



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**Título:**

**AVALIAÇÃO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR  
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO – VANT, PARA USO EM  
AEROLEVANTAMENTOS.**

ALEXANDRE MORENO RICHWIN FERREIRA

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Dissertação nº 069

2014

Brasília - DF

**ALEXANDRE MORENO RICHWIN FERREIRA**

**AVALIAÇÃO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO  
TRANSPORTADA POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO –  
VANT, PARA USO EM AEROLEVANTAMENTOS.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Brasília, para obtenção do Título de Mestre em Geociências.

Autor: Alexandre Moreno Richwin Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Brasília DF

2014

Ferreira, Alexandre Moreno Richwin.

Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado – VANT, para uso em aerolevantamentos.

92 páginas.

Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

1. VANT
2. Fotogrametria
3. LIDAR
4. Calibração câmara
5. Modelo Digital de Elevação

I. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Giuliano Sant`Anna Marotta - UnB

Prof. Dr. Edilson de Souza Bias - UnB

Prof. Dr. Carlos Antônio Oliveira Vieira - UFSC

## **Agradecimentos**

À empresa Terrasense, por disponibilizar os equipamentos e aeronaves não tripuladas para a realização desta pesquisa.

À empresa Topocart, por fornecer os dados LIDAR e imagens da câmara de grande formato.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, por disponibilizar os receptores GPS RTK para a obtenção das coordenadas dos pontos de apoio em campo.

Aos amigos Conrado Volnei, Lucas Sobral, Felipe Couto e Felipe Queiroz, amigos de longa data, sempre interessados e envolvidos no andamento desta pesquisa.

Aos professores Giuliano Marotta e Henrique Roig, pelos muitos ensinamentos e orientações. Professores que chamo de amigos, e que acompanharam e incentivaram esta pesquisa desde 2011, quando muitos ainda desacreditavam.

Aos agregados da família Cristovão Xavier, Fabiano Toni, Beto Coelho e Nataly pelas alegrias e brincadeiras e por estarem ao lado de minha mãe e irmãos, alegrando e compartilhando suas vidas.

Ao meu irmão de sangue, Igor Nicolau, e ao meu irmão de vida, Ticiano Bragatto, companheiros de pesquisa e desenvolvimento, pelas incontáveis horas de dedicação que tornaram possível a realização desta pesquisa entre tantas outras conquistas.

Às minhas irmãs, Iara Flor e Isadora de Afrodite, pela força e estímulo que me dão para continuar crescendo.

Finalmente, à minha mãe Else Richwin, sempre dedicada aos seus filhotes e preocupada com o bem estar e a alegria de cada um. Obrigado por todo o carinho e amor.

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	10
RESUMO .....	12
ABSTRACT .....	13
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1. Estrutura da dissertação .....	15
1.2. Hipótese.....	16
1.3. Objetivo Geral .....	16
1.4. Objetivos Específicos .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1. Fotogrametria .....	17
2.1.1. Definição.....	17
2.1.2. História .....	17
2.1.3. Geometria de imagem .....	19
2.1.4. Orientação das imagens.....	20
2.1.5. Câmaras Fotogramétricas e Câmaras não métricas.....	26
2.1.6. Obtenção de imagens aéreas.....	27
2.1.7. Calibração de Câmaras.....	30
2.2. MDT e MDE.....	31
2.2.1. Definição de Modelos Digitais de Terreno.....	32
2.2.2. Tipos de estruturas de MDE .....	33
2.2.3. Processo de geração de Modelos Digitais de Elevação .....	34
2.3. Light Detection And Ranging – LIDAR .....	35
2.3.1. Funcionamento .....	36
2.3.2. Precisão de dados LIDAR .....	38
2.4. Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT .....	39
2.4.1. Funcionamento .....	41
<b>3. AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO.....</b>	<b>43</b>
3.1. Introdução .....	43

3.2.	Área de Estudos .....	44
3.3.	Metodologia .....	46
3.3.1.	Materiais.....	46
3.3.2.	Planejamento do voo.....	47
3.3.3.	Obtenção das imagens e dos pontos de controle.....	48
3.3.4.	Calibração da câmara de pequeno formato .....	50
3.3.5.	Processamento das imagens.....	51
3.3.6.	Avaliação da qualidade posicional.....	52
3.4.	Resultados e Discussões.....	54
3.5.	Conclusões .....	61
4.	<b>AVALIAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DERIVADO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR VANT .....</b>	<b>62</b>
4.1.	Introdução .....	63
4.2.	Área de Estudos .....	64
4.3.	Metodologia .....	65
4.3.1.	Determinação e coleta de pontos de apoio em campo .....	66
4.3.2.	Aerolevanteamento com microVANT e câmara de pequeno formato ....	66
4.3.3.	Aerolevanteamento com sistema LIDAR .....	68
4.3.4.	Geração de MDE .....	69
4.3.5.	Avaliação da qualidade posicional.....	69
4.3.6.	Experimento 1 .....	70
4.3.7.	Experimento 2 .....	71
4.4.	Resultados E Discussões .....	72
4.5.	Conclusões .....	81
5.	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>83</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Vista de um balão da Cidade de Boston, Wallace Black, 1860 (Museu Metropolitano, < <a href="http://images.metmuseum.org/CRDImages/ph/original/DP137205.jpg">http://images.metmuseum.org/CRDImages/ph/original/DP137205.jpg</a> >, acesso em 02/05/014). .....	18
Figura 2 - São Francisco fotografada com auxílio de uma pipa após o terremoto de 1906, por George Lawrence (Biblioteca do Congresso, < <a href="http://lcweb2.loc.gov/service/pnp/ppmsca/07800/07823v.jpg">http://lcweb2.loc.gov/service/pnp/ppmsca/07800/07823v.jpg</a> >, acesso em 02/05/014). .....	19
Figura 3 - Representação exagerada da distorção radial em uma fotografia (fonte: Wolf, 2000). .....	21
Figura 4 - Representação exagerada da distorção descentrada em uma fotografia (fonte: Wolf, 2000). .....	22
Figura 5 - Parâmetros de orientação exterior de um sensor fotogramétrico a bordo de um avião (Coelho & Brito, 2007). .....	23
Figura 6 - Variações de escala em imagens oblíquas (adaptado de Aber <i>et al.</i> , 2010). .....	24
Figura 7 - Representação dos efeitos nas imagens ocasionados por rotação nos eixos ômega, phi e kappa (Fonte: Wolf, 2000). .....	26
Figura 8 – Tipos de imagens aéreas de acordo com a inclinação do sensor (Adaptada de Wolf, 2000). .....	28
Figura 9 – Representação da superposição longitudinal de imagens em uma linha de voo. ....	29
Figura 10 - Representação da superposição lateral de imagens controlada pela distância entre as faixas de voo. ....	29
Figura 11 - Posição do sensor e do objeto refletor do pulso de laser. Fonte: Katzenbeisse, 2003. ....	37
Figura 12 - Componentes básicos de um sistema LIDAR. Fonte: adaptado de Katzenbeisse, 2003. ....	38
Figura 13 - VANT Global Hawk da Northrop Grumman. Fonte: < <a href="http://www.as.northropgrumman.com/products/ghrq4b/gallery.html">http://www.as.northropgrumman.com/products/ghrq4b/gallery.html</a> >, acesso em 2011. ....	40
Figura 14 - Esquema de funcionamento e comunicação do sistema VANT Graúna. ....	42
Figura 15 - Área utilizada para calibração da câmara de pequeno formato, denominada Área 01. As linhas perpendiculares presentes na figura representam as faixas de voo planejadas para o aerolevanteamento. ....	45
Figura 16 - Área utilizada no aerolevanteamento, denominada Área 02. As linhas paralelas presentes na figura representam as faixas de voo planejadas para o aerolevanteamento. ....	46
Figura 17 - MicroVANT Graúna utilizado na aquisição de dados fotográficos e de posição. ....	47
Figura 18 - Rotina de procedimentos para aerolevanteamento (FERREIRA et al., 2013). ....	48
Figura 19 - Resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observadas em pares estereoscópicos de imagens, Área 01. ....	55
Figura 20 - Resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observadas em pares estereoscópicos de imagens, Área 02. ....	55
Figura 21 - Resíduos das coordenadas na direção X dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02. ....	57

Figura 22 - Resíduos das coordenadas na direção Y dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02. ....	57
Figura 23 - Resíduos das coordenadas na direção Z dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02. ....	58
Figura 24 - Área de estudos. Os pontos representados e numerados na figura são pontos de apoio de campo cujas coordenadas foram utilizadas como referência no processamento fotogramétrico e LIDAR. ....	65
Figura 25 - MicroVANT Graúna. ....	67
Figura 26 - Perfis utilizados para verificação dos resultados altimétricos do MDE gerado pelo processamento fotogramétrico, utilizando como referência, MDE gerado por processamento de dados do sistema LIDAR. ....	71
Figura 27 - Distribuição dos pontos de apoio de campo (pontos amarelo na figura) utilizados como referência, selecionados com base nos dados altimétricos LIDAR processados e fotoidentificados utilizando pares estereoscópicos do processamento fotogramétrico das imagens. ....	72
Figura 28 - MDE gerado após processamento dos dados da câmara de pequeno formato a bordo do microVANT. ....	74
Figura 29 - “a” e “b” representam nuvens de pontos, em perfil, de uma área de mata destacando a possibilidade do LIDAR obter dados abaixo do dossel (a e b). “c” e “d” representam nuvens de pontos, em perfil, com destaque para a representação de uma edificação. ....	74
Figura 30 - Representação de erros comuns á utilização de métodos automáticos para criação modelos digitais de elevação. Fonte: Aber et al. (2010). ....	75
Figura 31 - Resíduos dos pontos identificados em 9 perfis e calculados pela diferença entre os MDEs analisados. ....	76
Figura 32 - Variação dos resíduos dos pontos identificados em 9 perfis e calculados pela diferença entre os MDEs analisados. ....	77
Figura 33 - Perfil 8, com picos indicando a influência de vegetação. ....	78
Figura 34 - Parte do perfil 8, com destaque (círculos vermelhos) para áreas onde a vegetação sobrepõe o caminho utilizado como referencia para o perfil. ....	78
Figura 35 - Parte do perfil 3, com destaque (círculos vermelhos) para uma área onde houve a incidência de ações antrópicas entre os períodos dos aerolevantamentos realizados. “a” representa o período do aerolevantamento LIDAR, “b” o período do aerolevantamento microVANT e “c” diferença entre os MDEs gerados pelo processamento de dados da câmara de pequeno formato e LIDAR. ....	79
Figura 36 - Precisões estimadas com diferentes números de pontos de apoio. ....	81



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das estruturas mais utilizadas para armazenamento de Modelos Digitais de Elevação. (Fonte: adaptado de Felicísimo, 1994). .....	33
Tabela 2 - Métodos de aquisição de amostras para a criação de Modelos Digitais de Elevação. (Fonte: adaptado de Felicísimo, 1994).....	34
Tabela 3 - Categorias de VANT de acordo com UVS International. (Fonte: adaptado de Eisenbess, 2004).....	40
Tabela 4 - Planejamento de voo e de apoio de campo para aquisição dos dados. ....	49
Tabela 5 - EP para a Classe “A”, conforme Decreto-Lei 89817/1984.....	53
Tabela 6 - Parâmetros de calibração da câmara. ....	54
Tabela 7 - Síntese dos resíduos dos pontos de verificação medidos fotogrametricamente. ....	59
Tabela 8 - Análise de tendência no processamento fotogramétrico pela distribuição <i>t de student</i> . ....	59
Tabela 9 - Análise de precisão no processamento fotogramétrico pela distribuição $\chi^2$ .....	60
Tabela 10 - Parâmetros de orientação interior da câmara <i>Canon</i> , modelo <i>PowerShot S100</i> . ...	68
Tabela 11 - Precisão resultante do processamento de dados dos aerolevantamentos realizados. ....	73
Tabela 12 - Análise de precisão do mde gerado utilizando dados do processamento fotogramétrico, tomando como referência dados LIDAR. ....	77
Tabela 13 - Amplitudes máxima e mínima dos resíduos provenientes do processamento fotogramétrico, tomando dados LIDAR como referência. ....	80
Tabela 14 - Precisões no processamento fotogramétrico, tomando dados LIDAR como referência. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS – Airborne Laser Scanner  
ARP – Aeronave Remotamente Pilotada  
CCD – Charged Couple Device  
CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor  
DEM – Digital Elevation Model  
DTM – Digital Terrain Model  
EP – Erro Padrão  
FOV – Field Of View  
GCP – Ground Control Point  
GNSS – Global Navigation Satellite System  
GPS – Global Positioning System  
GSD – Ground Sample Distance  
IMU – Inertial Measurement Unit  
INS – Inertial Navigation System  
LIDAR – Light Detection And Ranging  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
MDT – Modelo Digital de Terreno  
MIT – Massachusetts Institute of Technology  
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica  
RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo  
RTK – Real Time Kinematic  
SAR – Synthetic Aperture Radar  
SIG – Sistemas de Informações Geográficas

UAV – Unmanned Air Vehicle

UVS – Unmanned Vehicle System

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

## RESUMO

Este trabalho analisa a qualidade de produtos cartográficos obtidos a partir câmeras de pequeno formato (não métricas) transportadas por um micro veículo aéreo não tripulado (VANT), em comparação com resultados obtidos com câmara fotogramétrica de grande formato e levantamento com uso de LIDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportado. Para isso, foram realizados três aerolevantamentos com um micro VANT, em áreas com condições distintas.

A primeira etapa da pesquisa consistiu na calibração de uma câmera de pequeno formato, inicialmente em laboratório e em seguida em campo. Os resultados das calibrações foram comparados e refinados para teste em aerolevantamento. Na análise foi realizado um levantamento em zona rural de Minas Gerais, e os dados foram processados utilizando os parâmetros de orientação interior obtidos previamente durante a calibração. Foram obtidos 26 pontos de apoio em campo por meio do uso de receptor GNSS. Estes pontos foram distribuídos na área para a orientação exterior das imagens e controle planimétrico e altimétrico dos produtos obtidos. Verificou-se que os dados processados possuíam variação de acordo com a metodologia usada, porém com precisão suficiente para realizar mapeamentos planimétricos na escala de até 1:250 e geração de curvas de nível com equidistância de até 50cm, mantendo-se no padrão A segundo classificação do PEC.

Após as análises da calibração da câmera, avaliou-se a precisão de um MDE, obtido com a mesma câmera da etapa anterior, comparando-o com modelos obtidos a partir de câmera de grande formato e LIDAR. Além da precisão, estudaram-se as características e diferenças nas nuvens de pontos obtidas pelos diferentes métodos. Por fim, foi investigada a relação entre o número de pontos de apoio em campo e a precisão do MDE, para entender e estimar um número de pontos de apoio necessários em aplicações futuras.

As análises realizadas sugerem que a utilização de micro VANT e câmara de pequeno formato para a realização de aerolevantamentos é viável do ponto de vista posicional.

## ABSTRACT

This paper analyzes the quality of cartographic products obtained from an Unmanned Air Vehicle (UAV), compared to results obtained from methods already established. Four aerial surveys were conducted with micro UAV in areas with different conditions.

The first stage of the research consisted of calibrating a small-format camera with the co-linearity method, initially in the laboratory and then in the field. The results of the calibration were compared and refined to be tested in aerial survey. In the next step an aerial survey was conducted in a rural area of Minas Gerais state, and the data were processed using the interior orientation parameters previously obtained during calibration. Ground control points obtained with GNSS receiver were distributed in the area for exterior orientation of the images and planimetric and altimetric control of the products obtained. Some variations in the results were found accordingly to the methodology used, but with enough precision to perform planimetric mappings with scale of 1:250 and generate a contour interval of 50 cm, which is enough to remain in class A of PEC classification.

After analysis of camera calibration, in the second stage, the precision of a DEM obtained with the small-format camera was evaluated, in comparison with models derived from large-format camera and LIDAR. Besides the precision, the characteristics and differences in the point clouds obtained by different methods were analyzed. Finally, we investigated the relationship between the number of ground control points in the field and the accuracy of the DEM, to understand and estimate the correct GCP number in future applications.

The results suggest that the use of micro UAV and small-format camera for conducting aerial surveys is feasible from a positional point of view.

## 1. INTRODUÇÃO

As geotecnologias estão sendo cada vez mais utilizadas nas tomadas de decisões em diversos níveis e escalas, desde a escolha para destinações de verbas para infraestrutura até a busca pelo melhor caminho para um destino. As pessoas passaram a ter acesso a bases georreferenciadas e imagens de satélite em dispositivos móveis e fazem cada vez mais uso delas no seu dia a dia, absorvendo as geotecnologias antes presentes apenas no setor corporativo e de pesquisa. Essa disseminação da geotecnologia gerou uma imensa demanda por mais dados, com maior qualidade, atualizações mais frequentes, resoluções maiores etc. Para atender essa demanda, surgem novas tecnologias e métodos ampliando as possibilidades de pesquisa.

Uma dessas tecnologias que surgem é o uso de veículos aéreos não tripulados (VANT ou DRONE) para imageamento de pequenas áreas com alta taxa de revisita e altíssima resolução espacial (Eisenbeiss, 2004; Nebiker *et al.*, 2008). Ainda são necessários estudos sobre segurança para a integração dessa categoria ao espaço aéreo, mas esse parece ser um caminho sem volta, pois muito já se progrediu no uso desses equipamentos (Nackaerts *et al.*, 2010; Lucieer *et al.*, 2012).

O uso dos Veículos Aéreos Não Tripulados em aplicações civis está crescendo rapidamente principalmente devido à versatilidade desses equipamentos em diversas situações e ao sucesso que esses veículos vêm obtendo em suas missões. O uso de um VANT para levantamentos planialtimétricos possibilita a obtenção de dados com curto intervalo de tempo a partir de imagens com resolução espacial de até 1cm, ampliando a capacidade produtiva de equipes de levantamento e diminuindo os custos da operação.

Tradicionalmente a coleta de dados para levantamentos planialtimétricos é realizada utilizando níveis, estações totais e/ou receptores GNSS. Técnicas de sensoriamento remoto utilizando imagens provenientes de sensores orbitais, de aerolevanteamento com câmaras métricas e dados posicionais provenientes de sensores LIDAR apresentam-se como alternativa às técnicas tradicionais para levantamento planialtimétrico, principalmente de grandes áreas.

Alguns empecilhos no uso de imagens de satélite são a baixa taxa de atualização das imagens, que é limitada à órbita dos satélites, e a dificuldade técnica de obtenção e transmissão de imagens com alta resolução espacial. Além disto, poucos satélites possuem os sensores ou mecanismos necessários para a captura de imagens estereoscópicas que permitam a extração de dados de elevação. No caso dos aerolevantamentos, os custos dos equipamentos e de operação são elevados e se tornam fatores relevantes para aquisição destes dados e restritivos na popularização de sua utilização, especialmente em pequenas áreas. Em contrapartida, o uso de pequenos VANT tende a preencher uma lacuna entre os métodos de levantamento citados, onde a sua associação com sensores de imageamento permitem obter informações terrestres de alta resolução espacial em curto intervalo de tempo e, muitas vezes, independente das condições atmosféricas, como o caso da cobertura de nuvens. No entanto, apesar deste avanço e demanda, poucos estudos foram realizados com vista a determinação da qualidade planialtimétricas destes levantamentos. Por este motivo, este trabalho volta-se a avaliação de micro VANT, associado à câmara de pequeno formato, para uso em aerolevantamentos.

### **1.1. Estrutura da dissertação**

A dissertação foi dividida em cinco capítulos: introdução; fundamentação teórica; avaliação geométrica de câmara de pequeno formato; avaliação de Modelo Digital de Elevação derivado de câmara de pequeno formato transportada por microVant; e conclusões e considerações finais.

O primeiro capítulo consiste na definição do problema, hipóteses e objetivos. O segundo capítulo trata-se do levantamento bibliográfico dos principais temas abordados durante a pesquisa. O terceiro e quarto capítulos descrevem os experimentos realizados na pesquisa. Para cada experimento, a dissertação foi estruturada em formato de artigo envolvendo introdução, definição das áreas de estudos, materiais e metodologias empregados, resultados, discussões e conclusões. O último capítulo apresenta as conclusões gerais finais da pesquisa.

## **1.2. Hipótese**

As hipóteses afirmativas a serem testadas neste trabalho são:

- A miniaturização de sensores e o aumento da capacidade de processamento das placas de circuitos integrados permitem a aquisição de dados de sensoriamento remoto a partir de um micro VANT com qualidade equivalente à obtida por sistemas aéreos convencionais tripulados ou sistemas orbitais.
- Novos algoritmos e métodos de processamento de imagens permitem que dados coletados por sistemas não tripulados gerem resultados de grande precisão e confiabilidade quando comparado à técnicas atuais.
- A combinação de VANT com câmara de pequeno formato pode ser utilizada para obtenção de resultados em trabalhos cartográficos e topográficos.

## **1.3. Objetivo Geral**

Avaliar dados obtidos por meio de câmara de pequeno formato transportada por um micro VANT, com o intuito de possibilitar o uso em mapeamentos planialtimétricos com precisão equivalente às técnicas com uso de câmara de grande formato e LIDAR.

## **1.4. Objetivos Específicos**

- Analisar a qualidade da calibração de câmaras de pequeno formato para uso em fotogrametria com micro VANT;
- Avaliar a qualidade posicional planimétrica e altimétrica dos dados obtidos a partir de câmaras de pequeno formato a bordo de micro VANT;
- Avaliar a relação entre o número de pontos de apoio em campo e a qualidade posicional altimétrica de MDE obtidos a partir de micro VANT.



## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Fotogrametria**

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos fundamentos e conceitos da fotogrametria, discorrendo sobre o início e a evolução desta ciência. Pelo tema abordado nesta pesquisa, foi dada ênfase aos métodos e técnicas utilizadas em fotogrametria digital aérea com finalidade em mapeamentos cartográficos, porém cabe ressaltar que metodologias muito semelhantes são utilizadas para fotogrametria terrestre e de curto alcance.

#### **2.1.1. Definição**

A palavra fotogrametria tem origem no idioma grego e se refere ao processo de realizar medições com o uso de fotografias. Os radicais da palavra são *photon* (luz), *graphos* (escrita) e *metron* (medições) (Coelho & Brito, 2007).

Segundo Wolf (2000), de acordo com a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, a fotogrametria é definida como a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos e ambientes através do processo de armazenar, medir e interpretar imagens fotográficas.

Para Meneses & Almeida (2012), a definição mais conhecida de sensoriamento remoto é uma técnica de obtenção de informações dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto.

#### **2.1.2. História**

Os primeiros experimentos no uso de fotogrametria para mapeamento e topografia ocorreram em 1849, conduzidos pelo Coronel Aimé Laussedat do Corpo de Engenheiros do Exército Francês. Porém, no ano 350 A.C., Aristóteles já havia se referido ao processo de projeção ótica de imagens. Antes mesmo da invenção da fotografia muitas pesquisas foram realizadas e originaram teorias que seriam fundamentais para a criação desta ciência. Entre

estes trabalhos cabe citar os trabalhos do Dr. Taylor Brook e J. H. Lambert sobre perspectiva linear. Em 1859, o Coronel Aimé Laussedat apresentou seu trabalho de mapeamento utilizando fotografias e por este trabalho pioneiro ficou conhecido como o pai da fotogrametria (Wolf, 2000).

Trabalhos posteriores como os de Gaspard Félix Tournachon, na França, em 1859, e as famosas fotografias capturadas em 1860 por James Wallace Black com a ajuda de um balão de ar quente sobre a cidade de Boston (Figura 1), já norteavam aquilo que seria o futuro da fotogrametria aérea. A partir de trabalhos como estes, em 1889, a fotogrametria ganha seu primeiro livro teórico, escrito pelo alemão Carl Koppe e intitulado “Manual de fotogrametria” (Coelho & Brito, 2007).

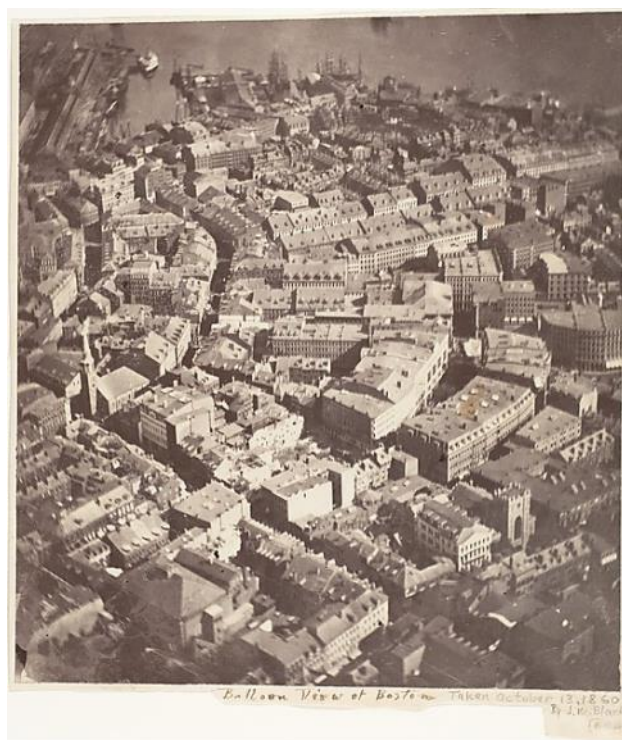


Figura 1 - Vista de um balão da Cidade de Boston, Wallace Black, 1860 (Museu Metropolitano, <<http://images.metmuseum.org/CRDImages/ph/original/DP137205.jpg>>, acesso em 02/05/014).

O uso de balões e pipas para a aquisição de imagens aéreas mostrou-se de grande importância para a criação de mapas e rapidamente foi absorvido pelas forças armadas de alguns países como França e EUA. Apesar da dificuldade de colocar os caros e pesados equipamentos fotográficos da época

no ar, pioneiros nesta arte geraram incríveis registros como o do terremoto de 1906 que atingiu São Francisco, na Califórnia, e deixou a cidade em ruínas (Figura 2).



Figura 2 - São Francisco fotografada com auxílio de uma pipa após o terremoto de 1906, por George Lawrence (Biblioteca do Congresso, <<http://lcweb2.loc.gov/service/pnp/ppmsca/07800/07823v.jpg>>, acesso em 02/05/014).

De acordo com Wolf (2000), novas técnicas e equipamentos foram desenvolvidos para atender a crescente demanda por mapas com maior qualidade e precisão, especialmente durante os períodos das guerras, e esta demanda necessitava de profissionais treinados para este trabalho específico. Era necessário muito treinamento para operar os restituidores analógicos e interpretar corretamente as fotografias e daí surgiu a profissão de restituidor fotogramétrico.

Atualmente a fotogrametria de imagens aéreas utilizadas comercialmente é quase toda digital, migrando da captura e armazenagem em filme fotográfico para sensores digitais com fotodetectores. Com isso a restituição digital também toma o espaço dos restituidores analógicos e analíticos.

### **2.1.3. Geometria de imagem**

De acordo com Aber *et al.* (2010), uma fotografia, seja ela analógica ou digital, é resultado de um sistema de projeção central ou perspectiva de um

único ponto. Nestes casos, as distâncias do ponto de convergência central até o sensor, em um lado do conjunto de lentes, e as distâncias até o objeto do outro lado, caracterizam a escala de uma fotografia. A escala de uma fotografia é o parâmetro mais fundamental para uso em fotogrametria.

#### **2.1.4. Orientação das imagens**

Os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara são utilizados para a realização de cálculos durante o processamento das imagens de um aerolevantamento. A estimativa correta destes parâmetros é fundamental para a obtenção de ortofotos e modelos digitais de elevação com qualidade cartográfica. Para isso, é necessário reconstruir matematicamente o caminho dos feixes de luz até o sensor no momento da fotografia e, portanto, calcular corretamente os ângulos e a posição do sensor, bem como as distorções do sistema de lentes (Aber *et al.*, 2010).

Os parâmetros de orientação interior são aqueles inerentes ao sistema ótico e do sensor da câmara, normalmente são: a distância focal do conjunto de lentes, os parâmetros de distorção radial, os parâmetros de distorção descentrada e a posição da coordenada central no sistema de coordenadas da câmara. Estes parâmetros são obtidos durante o processo de calibração da câmara, descrito posteriormente, e são utilizados para a correção de distorções nas imagens. Outros parâmetros como o *skew* (torção, enviesamento) podem ser utilizados em algoritmos de computador mais recentes (Agisoft, 2013).

Segundo Wolf (2000), a distância focal calibrada é basicamente a distância entre o ponto nodal da parte traseira do conjunto de lentes até o ponto principal do sensor de captura.

Ainda segundo Wolf (2000), distorção radial é o elemento de distorção que ocorre ao longo de linhas radiais partindo do ponto principal da fotografia, ou a coordenada central da imagem (Figura 3). Teoricamente esta distorção está presente em todas as fotografias por ser inerente à utilização de lentes para a formação da imagem, mesmo quando o sistema de lentes é produzido com o mais alto rigor geométrico. A distorção radial tende a aumentar à medida

que se afasta do ponto principal da fotografia, sendo este o único ponto livre desta distorção.

A distorção descentrada (Figura 4) ocorre por imperfeições durante a construção e montagem do sistema de lentes nas câmaras (Wolf, 2000). Deslocamentos e desalinhamentos na montagem dos componentes da câmera e mesmo deformações na fabricação da lente são alguns dos motivos da ocorrência desta distorção. Procedimentos rigorosos de fabricação tendem a diminuir este efeito em câmaras fotogramétricas.

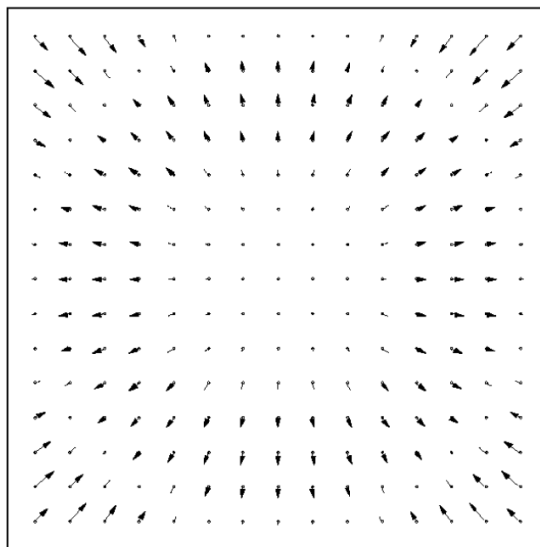


Figura 3 - Representação exagerada da distorção radial em uma fotografia (fonte: Wolf, 2000).

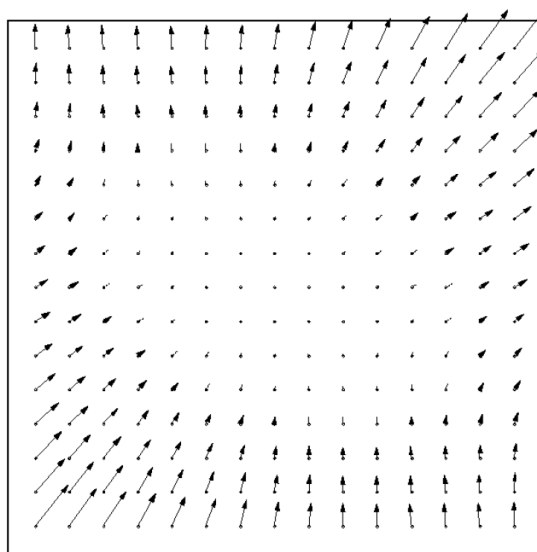


Figura 4 - Representação exagerada da distorção des centrada em uma fotografia (fonte: Wolf, 2000).

Ao utilizar câmaras de pequeno formato, as distorções citadas, também consideradas erros sistemáticos, são ainda mais expressivas, exigindo grande rigor no processo de calibração da câmara para determinação destes parâmetros. Outro aspecto a ser considerado durante a calibração de câmaras não métricas é que normalmente estas câmaras não possuem distância focal fixa. A variação da distância focal pode implicar em alterações nos parâmetros de distorção. Para contornar este problema é necessário fixar a distância focal no infinito durante o procedimento de calibração e mantê-la constante durante aerolevantamentos.

Segundo Coelho & Brito (2007), na fotogrametria digital a orientação interior é fundamentalmente a determinação de parâmetros de transformação entre o sistema de coordenadas da imagem em *pixels* (linha e coluna) e o sistema fotográfico. Essa transformação permite associar à uma imagem um sistema de coordenadas conhecido. Para isso são utilizados principalmente três modelos de transformação geométrica: afim, ortogonal e isogonal.

Ainda de acordo com Coelho & Brito (2007), câmaras métricas produzidas especialmente para a obtenção de produtos cartográficos normalmente são calibradas nos laboratórios das fábricas e os parâmetros de orientação interior entregues ao usuário. Para a utilização de câmaras

convencionais de pequeno formato como nesta pesquisa é necessário realizar este procedimento e para isso existem diversos métodos e modelos matemáticos. Ao final do processo de calibração, parâmetros estatísticos são utilizados para a avaliação da qualidade dos resultados.

Os parâmetros de orientação exterior são determinados pela posição espacial da fotografia e pela orientação angular do centro de perspectiva relativa ao solo no momento da captura. Estes parâmetros estão fundamentalmente ligados à trajetória do voo e aos movimentos da aeronave durante o aerolevanteamento. Na fotogrametria são utilizados seis parâmetros para definir a orientação exterior das fotografias, sendo três de posição e três de orientação angular.

Os parâmetros de posição são as coordenadas do centro de perspectiva da fotografia, definidos por X, Y e Z de um sistema métrico de coordenadas do espaço-objeto. Estas coordenadas servem como ponto de referencia conhecido para a realização de cálculos. A definição precisa destes parâmetros é especialmente necessária ao utilizar técnicas de georreferenciamento direto, onde o posicionamento das imagens processadas é obtido sem o auxílio de pontos de apoio em solo.

Os três parâmetros de orientação angular,  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ , são definidos pelo sistema de Euler (Figura 5). De acordo com Wolf (2000), outro sistema utilizado para a orientação angular de fotografias inclinadas é o sistema *tilt, swing, azimuth* (t, s e  $\alpha$ ), mas esta pesquisa utilizou apenas o sistema *ômega, phi e kappa*.

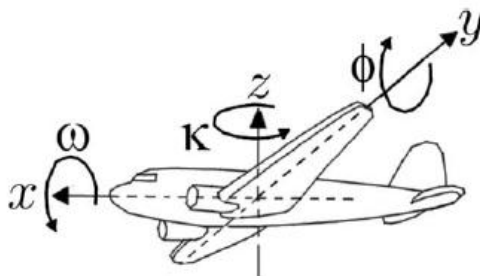


Figura 5 - Parâmetros de orientação exterior de um sensor fotogramétrico a bordo de um avião (Coelho & Brito, 2007).

Imagens obtidas com ângulos  $\omega$  e  $\phi$  diferentes de  $0^\circ$  em relação aos eixos X e Y são chamadas de oblíquas ou fora do nadir, sendo que nadir é caracterizado pela linha vertical imaginária que passa pelo centro de perspectiva em direção perpendicular à superfície terrestre. A obtenção de imagens com estas características alteram as escalas entre o espaço-objeto e o espaço-imagem e devem ser levadas em conta durante o processamento. Na Figura 6 é possível visualizar estas alterações de escala analisando as distancias  $D_1, D_2, D_3, D_4, d_1, d_2, d_3$  e  $d_4$ .

Em uma imagem vertical, as distâncias  $d_1, d_2, d_3$  e  $d_4$  seriam iguais, mantendo a relação com as distâncias no solo  $D_1, D_2, D_3$  e  $D_4$ , que são idênticas. Porém, com a angulação  $\nu$  do eixo ótico (linha tracejada) com relação à linha nadir (n-N), as proporções são alteradas entre as distâncias no espaço-objeto ( $D_1, D_2, D_3$  e  $D_4$ ) e no espaço-imagem ( $d_1, d_2, d_3$  e  $d_4$ ).

Devido à impossibilidade de se manter um sensor aerotransportado exatamente na direção nadir durante a tomada das imagens, tradicionalmente utiliza-se uma tolerância de até  $3^\circ$  entre o eixo ótico e o nadir para se considerar uma imagem como vertical.

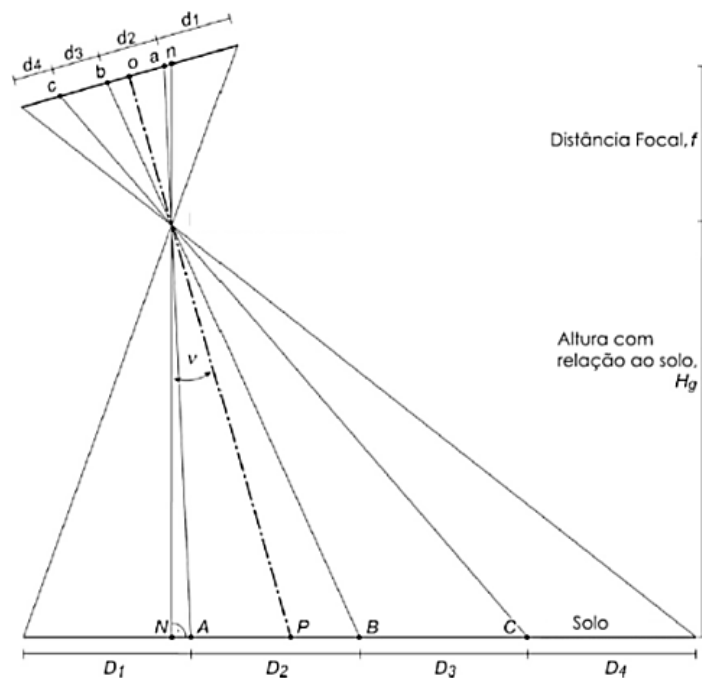


Figura 6 - Variações de escala em imagens oblíquas (adaptado de Aber *et al.*, 2010).



De acordo Aber *et al.* (2010), o método comumente utilizado para a determinação da orientação externa das fotografias é a utilização de pontos de apoio em campo com coordenadas conhecidas. Teoricamente são necessários no mínimo três pontos de apoio para a determinação da orientação externa de uma única foto, mas na prática diversas imagens são orientadas juntas utilizando algoritmos de densificação de pontos de amarração entre fotos e ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados, permitindo o uso de menos de três pontos de apoio por imagem.

Conforme explicado anteriormente, fotografias fora do nadir causam variações na escala e na geometria das imagens, mas estas variações não afetam apenas os cálculos fotogramétricos. Estes efeitos alteram também a superposição entre as imagens (Figura 7) e caso não sejam levados em conta podem comprometer um aerolevante. Aeronaves tripuladas utilizam sistemas robustos de compensação de movimento na plataforma da câmara visando a diminuição desses efeitos. No caso de fotogrametria de pequeno formato a bordo de um micro VANT isto se torna bem mais complicado uma vez que o espaço e o peso dos equipamentos são reduzidos. A própria aeronave é mais susceptível a fatores climáticos como ventos e turbulências do que aeronaves tripuladas devido ao seu tamanho e peso.

Durante a fase de planejamento de um voo não tripulado, os cálculos para a superposição lateral e longitudinal entre as imagens devem considerar este fator.

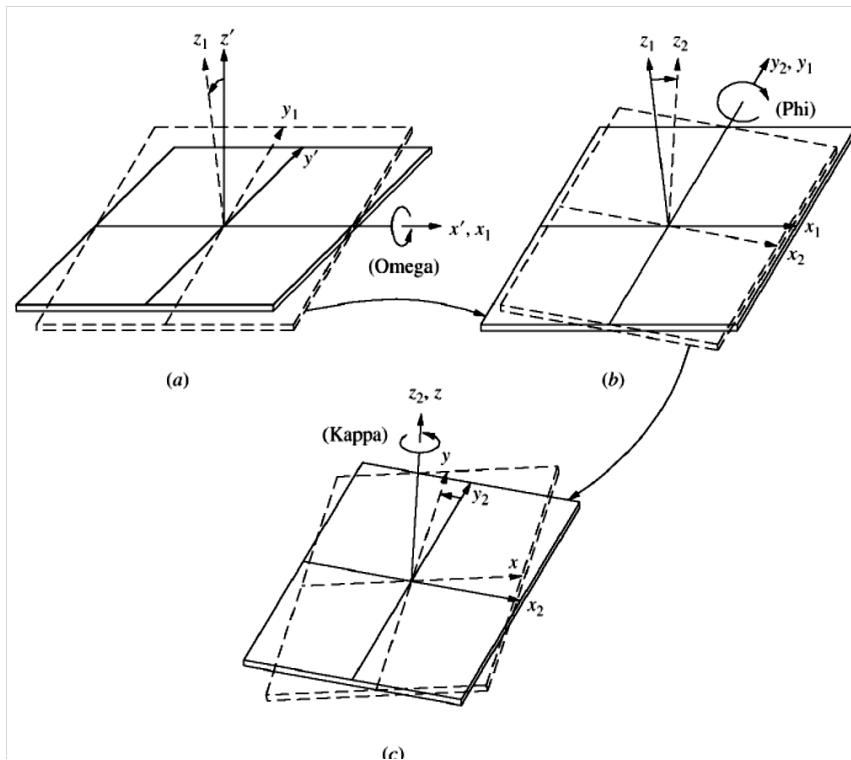


Figura 7 - Representação dos efeitos nas imagens ocasionados por rotação nos eixos  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  (Fonte: Wolf, 2000).

### 2.1.5. Câmaras Fotogramétricas e Câmaras não métricas

Segundo Coelho & Brito (2007), a denominação câmara fotogramétrica surgiu como referencia a determinados tipos especiais de câmara. Estas câmaras possuem características únicas e são desenvolvidas com o propósito específico de utilização em fotogrametria. Elas podem ser aéreas ou terrestres, mas são mais comumente usadas em aerofotogrametria e mapeamento. As primeiras câmaras fotogramétricas eram analógicas e algumas ainda hoje estão em funcionamento, mas com a evolução do mundo digital novas câmaras fotogramétricas digitais foram desenvolvidas.

Coelho & Brito (2007), afirmam que a principal diferença entre uma câmara convencional e uma câmara fotogramétrica é o rigor na construção e na definição dos parâmetros geométricos que regem a câmara. Este rigor durante a construção permite a determinação de valores mais corretos durante

a calibração da câmara além da diminuição das distorções inerentes ao processo da fotografia.

Teoricamente, imagens obtidas a partir de câmaras fotogramétricas permitem cálculos e mensurações mais precisos que àqueles obtidos com câmaras convencionais. Porém, atualmente técnicas de calibração de câmaras não métricas vêm apresentando resultados com precisão equivalente em planimetria e, em alguns casos, superior em altimetria para a criação de Modelos Digitais de Elevação (Ferreira *et al.*, 2014).

Câmaras fotogramétricas são calibradas em laboratórios especializados que conseguem determinar com grande precisão os principais parâmetros de orientação interior, sendo eles: coordenada do ponto principal, distância focal, parâmetros de distorção descentrada ( $P_1$  e  $P_2$ ) e parâmetros de distorção radial ( $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ). Estas informações estão inseridas no certificado de calibração de câmara que acompanha todas as câmaras fotogramétricas.

Alguns softwares no mercado são especializados na calibração de câmaras métricas ou não métricas e permitem a obtenção destes mesmos parâmetros. Entre eles cabe ressaltar dois que são de uso gratuito e possuem ampla documentação a respeito: *Agisoft Lens* e *Adobe Lens Profile Creator*. A principal motivação pelo estudo do uso de câmaras não métricas para aerolevantamentos é o baixo custo quando comparadas ao custo de câmaras métricas no mercado.

#### **2.1.6. Obtenção de imagens aéreas**

A aquisição de imagens aéreas ainda é muito onerosa devido aos custos dos equipamentos e aos custos de operação, que são muito elevados. Por isso, a etapa de planejamento do aerolevantamento é fundamental para que o trabalho seja realizado de maneira correta e os riscos reduzidos.

Segundo Wolf (2000), imagens aéreas podem ser coletadas com diferentes ângulos relativos ao terreno (Figura 8). Normalmente imagens para a elaboração de produtos cartográficos são obtidas na vertical, o que quer dizer que o eixo focal deve estar orientado perpendicularmente ao horizonte. Em alguns casos são obtidas imagens chamadas oblíquas, onde o eixo da imagem

se encontra inclinado em relação ao horizonte. Imagens onde o horizonte não é capturado são chamadas de baixa oblíqua e nos casos onde o horizonte é registrado na imagem são chamadas de alta oblíqua.

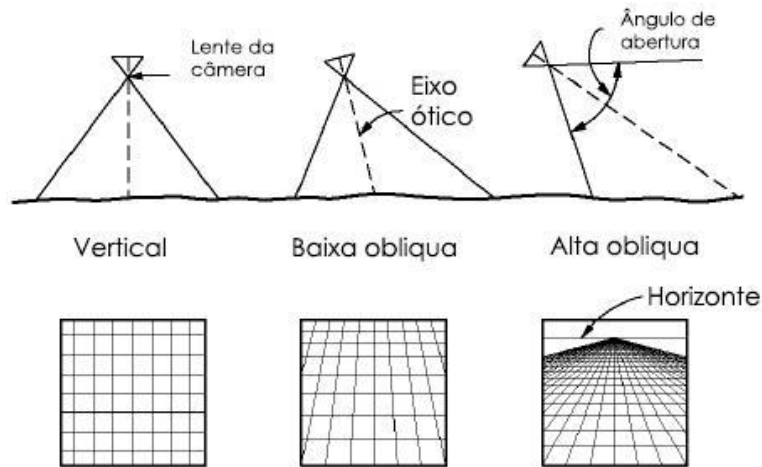


Figura 8 – Tipos de imagens aéreas de acordo com a inclinação do sensor (Adaptada de Wolf, 2000).

Para realizar o levantamento fotogramétrico de uma área, normalmente as imagens são capturadas sucessivamente ao longo de linhas de voo paralelas. As imagens são obtidas de forma que haja superposição longitudinal e lateral entre elas, permitindo a composição de pares estereoscópicos. A estereoscopia é fundamental para o trabalho de restituição das imagens, pois é a partir das diferentes posições de visada de um mesmo ponto no terreno que se torna possível a visualização tridimensional do terreno. Este é o mesmo processo que o cérebro utiliza para que, a partir das imagens dos dois olhos, seja possível ter noção de profundidade.

A superposição longitudinal das imagens utilizada normalmente na fotogrametria é de 60% e é controlada pela distância entre as imagens capturadas numa mesma linha de voo (Figura 9). A superposição lateral, normalmente de 30%, é controlada pela distância entre as linhas de voo adjacentes realizadas pela aeronave (Figura 10). Estes são valores de superposição utilizados para fotogrametria de grande formato e podem variar de acordo com o levantamento.

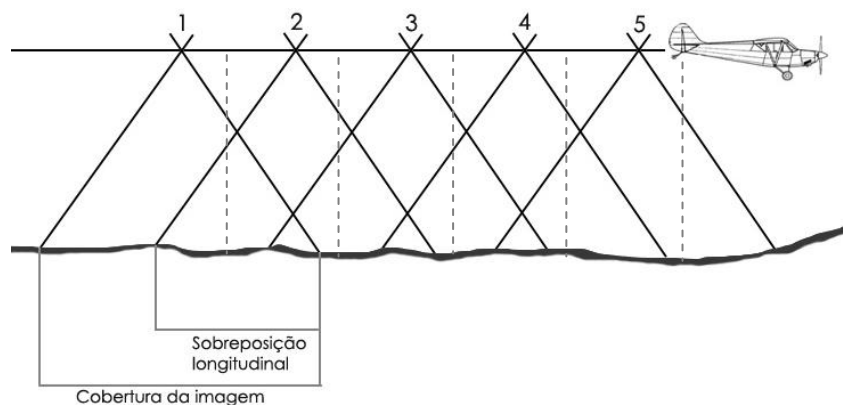


Figura 9 – Representação da superposição longitudinal de imagens em uma linha de voo.

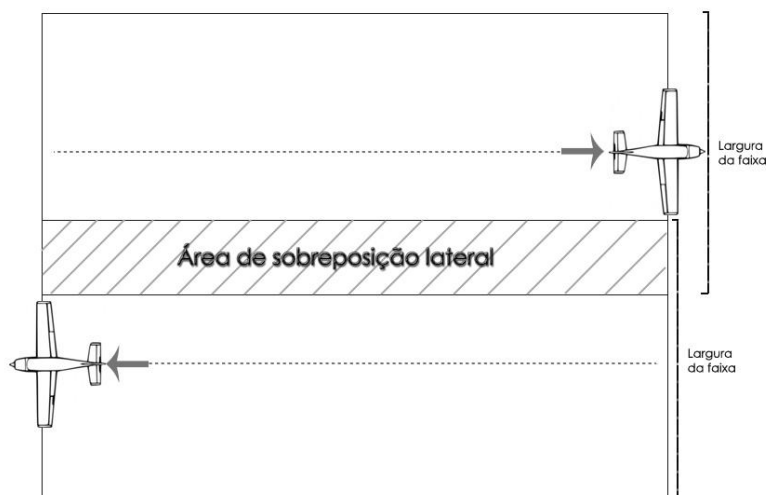


Figura 10 - Representação da superposição lateral de imagens controlada pela distância entre as faixas de voo.

Variações na trajetória de voo, oscilações na altura e nos ângulos de voo da aeronave causam mudanças nas sobreposições das imagens. Por este motivo é fundamental que exista uma margem de erro durante o planejamento para que nenhuma parte da área levantada fique sem a superposição necessária para realizar o processamento dos dados. Variações grandes no relevo também devem ser levadas em consideração para o cálculo da altura de voo, caso contrário, a resolução espacial da imagem pode ser comprometida e no pior dos casos podem faltar dados em algumas regiões da cobertura.

Para calcular as coordenadas em que cada imagem deve ser obtida é necessário conhecer o tamanho da área de cobertura de cada imagem. A área de cobertura da imagem no terreno ( $D$ ) pode ser calculada com base na altura da câmara com relação ao solo ( $H$ ), a distância focal ( $f$ ) das lentes e o tamanho do sensor ( $d$ ), conforme a Equação 1. Conhecendo essas informações é possível calcular a distância longitudinal e lateral entre cada imagem de forma que as sobreposições definidas no planejamento sejam respeitadas durante voo.

$$D = d \cdot \frac{H}{f} \quad (1)$$

Outra variável importante de ser calculada durante o planejamento do voo é a resolução espacial do aerolevanteamento. A resolução espacial é o tamanho do menor elemento detectável numa imagem, no caso da fotogrametria digital é o tamanho que cada pixel representa no terreno. Normalmente a resolução espacial é apresentada em metros por pixel (m/px). É possível calcular a resolução espacial de acordo com a equação 2, onde a resolução espacial ( $Res$ ) é igual ao tamanho de cada fotodetector no sensor ( $T_{Detector}$ ) multiplicado pela altura de voo ( $H$ ) sobre a distância focal ( $f$ ).

$$Res = T_{Detector} \cdot \frac{H}{f} \quad (2)$$

### **2.1.7. Calibração de Câmaras**

O processo de calibração da câmara é essencial na fotogrametria, pois é através dele que são definidos os parâmetros para correção dos erros sistemáticos nas imagens.

Existem diversos métodos para realizar a calibração de câmaras. Neste trabalho o método utilizado foi o de colinearidade, que utiliza pontos para relacionar o espaço imagem e objeto. Abaixo são apresentadas as equações dos modelos matemáticos usados para a definição dos parâmetros. As

Equações 3 e 4 descrevem os parâmetros de distorção radial  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ; e as Equações 5 e 6 descrevem os parâmetros de distorção descentrada  $P_1$  e  $P_2$  para as coordenadas no sistema fotogramétrico  $x$  e  $y$ .

$$x_r = (x^f - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (3)$$

$$y_r = (y^f - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4)$$

$$x_d = P_1(r^2 + 2(x' - x_0)^2) + 2P_2(x^f - x_0)(y' - y_0) \quad (5)$$

$$y_d = P_2(r^2 + 2(y' - x_0)^2) + 2P_1(x' - x_0)(y^f - y_0) \quad (6)$$

## 2.2. MDT e MDE

De acordo com Felicísimo (1994), as ciências ambientais se viram profundamente alteradas desde que os computadores começaram a fazer parte da rotina de trabalho de pesquisadores. A forma de trabalhar a informação geográfica também sofreu profundas mudanças durante este processo, e neste contexto surgiram os Sistemas de Informações Geográficas – SIG, possibilitando trabalhar com diferentes tipos de dados geográficos em formato digital.

Modelos Digitais de Terreno - MDT e Modelos Digitais de Elevação – MDE, são produtos de grande utilidade e interesse entre os profissionais e pesquisadores de SIG e a demanda por tais modelos tem crescido significativamente para subsidiar, principalmente, estudos ambientais. No entanto, muitas vezes os modelos são produzidos com pouca atenção e sem avaliação dos erros inerentes ao processo gerando produtos pouco confiáveis (Chagas *et al.*, 2010).

Felicísimo (1994), afirma que os primeiros trabalhos com o termo Modelo Digital de Terreno (*Digital Terrain Model - DTM*) foram desenvolvidos ainda na década de 50 por Laflamme (Laflamme, 1958) no laboratório de fotogrametria

do *Massachusetts Institute of Technology – MIT*. No trabalho, LaFlamme descreve a representação de uma superfície contínua de terreno através de um determinado número de pontos com coordenadas tridimensionais conhecidas.

Para Moura *et al.* (2013), diversos MDE de abrangência global foram produzidos e disponibilizados para a comunidade nos últimos quinze anos, principalmente produtos de programas orbitais que utilizam diferentes métodos de obtenção de dados. Contudo, mostra-se necessário avaliar as possíveis aplicações de tais modelos em função de sua acurácia vertical para a aplicação em situações corretas.

Segundo Cuartero *et al.* (2004), técnicas de fotogrametria para restituição topográfica são conhecidas há muitas décadas porém a possibilidade do uso de imagens estereoscópicas para obtenção de dados globais só foram possíveis a partir do lançamento do primeiro satélite da série SPOT em 1986. Atualmente, diversos sensores orbitais possibilitam a aquisição de dados estereoscópicos, alguns deles com alta resolução espacial.

Além de métodos utilizando sensores passivos, existem também métodos que utilizam sensores ativos para a obtenção de dados altimétricos. Os principais tipos de sensores ativos no mercado atualmente são o LIDAR e o SAR.

### **2.2.1. Definição de Modelos Digitais de Terreno**

Para Felicísimo (1994), modelos são representações simplificadas da realidade, onde apenas algumas propriedades do objeto ou sistema original são reproduzidas. Ou seja, modelos são objetos ou sistemas que tentam representar objetos de maior complexidade.

Ainda conforme Felicísimo (1994), um MDT é uma estrutura de dados digital, que representa a distribuição espacial de uma variável contínua e quantitativa. Uma definição mais antiga destes modelos é de Doyle (1978), que definiu como sendo “... *um conjunto de dados numéricos que descreve a distribuição espacial de uma característica do território*”. Felicísimo (1994) propõe uma definição mais completa incluindo duas condicionantes



suplementares à definição: “*um MDT é uma estrutura numérica de dados que representa a distribuição espacial de uma variável quantitativa e contínua*”.

Para esta pesquisa, primeiramente é importante diferenciar MDE e MDT. Ambos os modelos visam criar uma representação numérica da altimetria de um território e possuem estruturas iguais, porém existe uma diferença substancial entre eles e algumas vezes estas representações podem ser confundidas. O MDE visa representar a altimetria de uma área com todos seus elementos presentes, ou seja, leva em consideração o terreno e demais elementos como vegetação, edificações e automóveis. Estes modelos de elevação não possuem representação topográfica uma vez que apresentam variações de acordo com os elementos da paisagem. Já os MDT representam apenas os elementos topográficos de uma área, ou seja, o solo propriamente dito. Esta diferenciação é importante porque cada tipo de modelo possui um uso específico e a confusão dos mesmos pode gerar erros graves de análise.

### 2.2.2. Tipos de estruturas de MDE

O armazenamento e a forma de estruturação de Modelos Digitais de Elevação podem variar em função da metodologia utilizada. Historicamente houve uma divisão dos Modelos Digitais de Elevação em dois grupos principais em função da forma de representação destes dados: Vetorial e Raster (Tabela 1). Os modelos vetoriais se baseiam em pontos e linhas definidas por suas coordenadas, enquanto os modelos com estrutura raster podem ser considerados como um conjunto de células, regulares ou não, com cotas médias atribuídas a elas (Felicísimo, 1994).

Tabela 1 - Resumo das estruturas mais utilizadas para armazenamento de Modelos Digitais de Elevação. (Fonte: adaptado de Felicísimo, 1994).

<b>Vetoriais</b>	<b>Contornos</b>	Sequencial: as linhas são armazenadas como cotas de nível.
		Analítica: as linhas são armazenadas como segmentos de Bézier, polinomiais, etc.
	<b>Perfis</b>	Cadeias paralelas de linhas de cotas com altura variável.
	<b>Triângulos</b>	Rede de Triângulos Irregulares (TIN).

<b>Raster</b>	<b>Matrizes</b>	Regulares: cotas sobre uma malha quadrada de filas e colunas equidistantes.
		Escalonáveis: cotas sobre sub matrizes hierárquicas e de resolução variável.
	<b>Polígonos</b>	Cotas atribuídas às células poligonais regulares (triângulos ou hexágonos)

### 2.2.3. Processo de geração de Modelos Digitais de Elevação

Felgueiras & Câmara (2001), propõe a divisão do processo de geração de MDE ou MDT em três etapas básicas: amostragem, criação do modelo ou modelagem e aplicação.

A amostragem consiste na obtenção de amostras representativas do fenômeno estudado. No caso de MDE e MDT, as amostras normalmente são curvas de nível e pontos tridimensionais, interpolados posteriormente para a criação do modelo. Alguns algoritmos atuais utilizam mais dados de entrada como a rede fluvial e corpos hídricos para realizar a modelagem.

O processo de amostragem é de grande importância uma vez que toda a modelagem é realizada baseando-se nestas informações. Caso a amostragem apresente erros, todas as análises derivadas a partir dela estarão com erros propagados. Por mais complexa e sofisticada que seja, uma modelagem não é capaz de corrigir os efeitos de uma amostragem com erros (Felgueiras & Câmara, 2001).

Felicísimo (1994), afirma que existem diferentes métodos para a obtenção de dados amostrais para a criação de Modelos Digitais de Elevação, alguns com maiores dificuldades e limitações e outros mais eficazes. Basicamente os métodos são classificados em diretos e indiretos (Tabela 2), de acordo com a forma de aquisição das amostras.

Tabela 2 - Métodos de aquisição de amostras para a criação de Modelos Digitais de Elevação. (Fonte: adaptado de Felicísimo, 1994).

<b>Diretos</b>	<b>Altimetria</b>	Altimetros aerotransportados.
	<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> , sistema de localização por satélites.

	<b>Topografia</b>	Uso de estação total e níveis.
<b>Indiretos</b>	<b>Restituição</b>	Origem digital: imagens estereoscópicas orbitais ou de sistemas aerotransportados.
		Origem analógica: pares de fotografias estereoscópicas analógicas
	<b>Digitalização</b>	Manual: mediante mesas digitalizadoras
		Automática: com uso de <i>scanners</i>

O processo de modelagem consiste na criação de estruturas de dados e definição de superfícies de ajuste com o propósito de obter uma representação contínua do fenômeno estudado na área e que permitam uma manipulação eficiente do modelo (Felgueiras & Câmara, 2001).

A aplicação consiste no uso do modelo propriamente dito e na extração de informações derivadas a partir dele. Podem ser realizadas aplicações qualitativas, como a visualização tridimensional dos modelos, ou quantitativas, como cálculos volumétricos e de declividade.

### **2.3. Light Detection And Ranging – LIDAR**

Segundo Fowler (2000), LIDAR é a tecnologia que utiliza a luz para realizar medições de distância entre objetos. Pesquisadores já utilizam o espectro eletromagnético há mais de meio século para calcular distâncias, mas foi a partir de avanços em outros campos da ciência que permitiram a obtenção de dados confiáveis do terreno a partir de aeronaves. O desenvolvimento de sistemas GNSS, em especial o sistema americano GPS, juntamente com a evolução e barateamento de sistemas inerciais precisos ampliaram as possibilidades de aplicação da tecnologia LIDAR.

Ao longo das últimas duas décadas, o uso de sistemas LIDAR, para a obtenção de dados altimétricos em grandes e médias áreas cresceu consideravelmente e muitos trabalhos são encontrados na bibliografia atual avaliando seu uso, precisão e potencialidades (Pacheco *et al.*, 2011; Lohmann & Koch, 1999; Centeno & Mitishita, 2007; Katzenbeisse, 2003).

A utilização do LIDAR se mostra como alternativa aos métodos convencionais para criação de MDE e MDT em áreas urbanas e rurais, mas principalmente em locais de difícil acesso como florestas. Nestas áreas, o uso

desta tecnologia facilita a obtenção de dados, substituindo as caras e demoradas campanhas terrestres para levantamentos topográficos. O uso do LIDAR em áreas com vegetação apresenta a possibilidade de obtenção de informações abaixo do dossel arbóreo, com um número de pontos de solo suficiente para a criação de modelos com qualidade cartográfica (Lohmann & Koch, 1999).

### **2.3.1. Funcionamento**

A teoria da operação de um *laser scanner* é que a partir das coordenadas tridimensionais e da orientação conhecidas do sensor, é possível calcular as coordenadas tridimensionais onde o pulso de laser enviado refletiu. Para isso, o tempo entre a emissão e o retorno do pulso laser é calculado e dividido por dois. Com base no tempo, nas informações dos sistemas inerciais e na velocidade conhecida do pulso (velocidade da luz), as coordenadas tridimensionais do terreno são estimadas. O resultado primário de um levantamento LIDAR normalmente consiste em uma nuvem de pontos com informações de intensidade, número de retorno do pulso e as coordenadas dos pontos.

Portanto, de acordo com Katzenbeisse (2003), a aquisição de dados LIDAR para a elaboração de Modelos Digitais de Elevação baseia-se em dois conjuntos de dados vetoriais (Figura 11): a posição do sensor P ( $p$ ) e a distância e direção de P até o objeto refletor R.

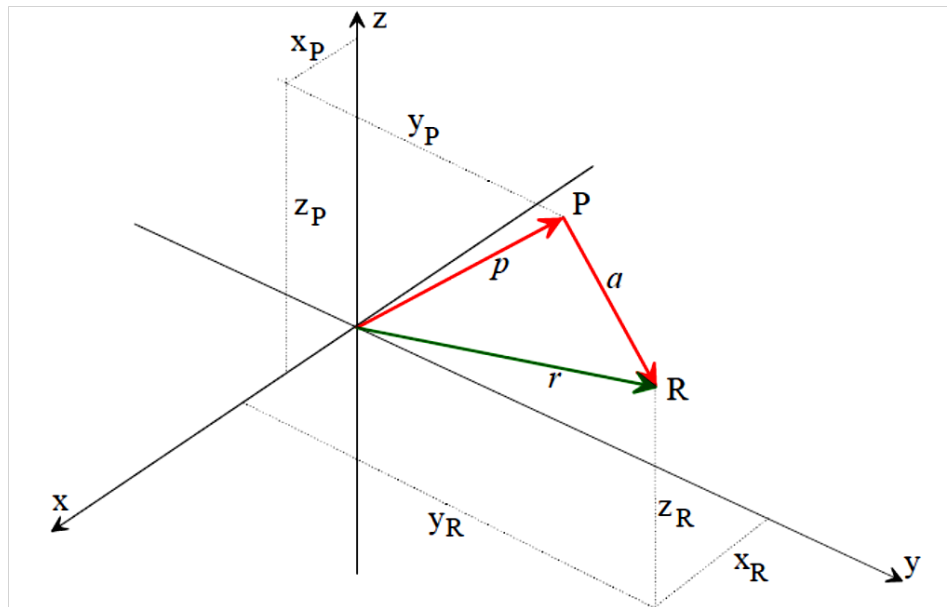


Figura 11 - Posição do sensor e do objeto refletor do pulso de laser. Fonte: Katzenbeisse, 2003.

Para a determinação desse conjunto de dados vetoriais, os sistemas LIDAR possuem uma série de equipamentos (Figura 12) realizando medições em conjunto e cujas informações são pós-processadas para a correção dos dados (Katzenbeisse, 2003). Os componentes fundamentais desses sistemas são:

- GNSS/GPS Diferencial, fornecendo a posição do sensor ( $x_p, y_p, z_p$ );
- Sistema de medição inercial (*Inertial Measurement Unit – IMU* ou *Inertial Navigation System – INS*), fornecendo os dados de atitude do sensor ( $\omega, \phi, \kappa$ );
- Relógio, calculando o tempo entre a emissão e o retorno do pulso;
- Dispositivo de deflexão do feixe;
- Detector do pulso.

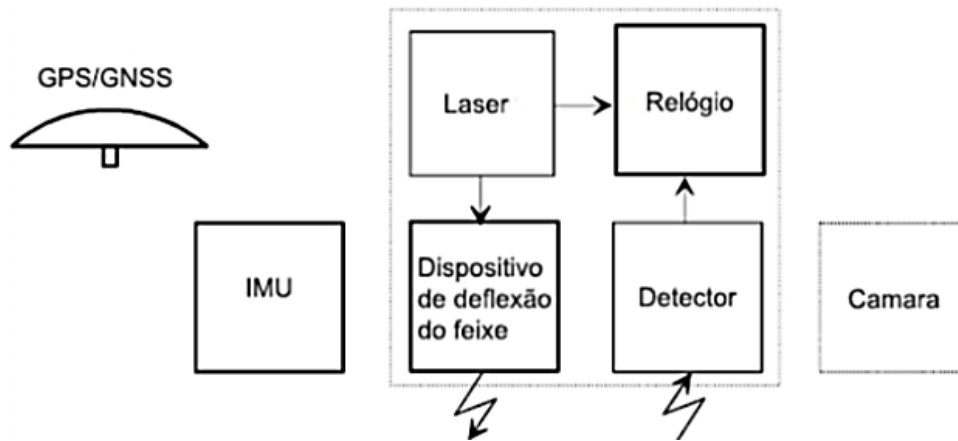


Figura 12 - Componentes básicos de um sistema LIDAR. Fonte: adaptado de Katzenbeisse, 2003.

### 2.3.2. Precisão de dados LIDAR

Segundo Fowler (2000), a acurácia de medições com laser é de alguns centímetros há muito tempo, isto se tratando de distâncias relativas ou em sistemas fixos em solo. A obtenção de medidas absolutas acuradas, especialmente a partir de plataformas móveis como aviões, se torna muito mais complexa uma vez que a posição do sensor se torna um fator limitante.

A precisão de dados obtidos com LIDAR varia de acordo com o sistema utilizado. Cada sistema possui características únicas e margens de erro de operação conhecidas pelos fabricantes. No entanto, alguns estudos avaliam a precisão desta tecnologia em situações práticas e discutem fatores que podem influenciar estes resultados.

Para Lohmann & Koch (1999), a precisão de Modelos Digitais de Terreno criados a partir de laser scanners dependem fundamentalmente de três fatores: a medição da distância, a orientação dinâmica do sensor e a posição dinâmica do sensor. A acurácia da medição da distância varia em torno de 06 cm (Lohmann & Koch, 1999, apud Katzenbeisse *et al.*, 1996). A determinação correta de posição e orientação do sensor depende da combinação do sistema inercial (INS ou IMU) com o sistema de posicionamento (GNSS).

Para Fowler (2000), cada sistema LIDAR possui características e aplicações específicas. Um sistema desenvolvido para operar em cima da água não irá operar tão bem em solo, e vice versa. O autor afirma também que, levantamentos em grandes alturas não possuem a mesma acurácia que levantamentos realizados em alturas inferiores. A explicação para isso é que, apesar da acurácia do pulso laser se manter a mesma, os erros do sistema inercial ou da calibração são amplificados conforme o aumento da distância. Além disto, a própria geometria do feixe interfere nos resultados uma vez que o tamanho do pulso refletido no objeto aumenta conforme aumenta a distância da fonte emissora.

Entende-se, portanto, que a precisão de Modelos Digitais de Elevação criados a partir de dados de laser scanner variam de acordo com o sistema utilizado e as condições de operação. Fatores como o tipo de terreno e a calibração do sensor com relação ao IMU e GNSS são fundamentais para a obtenção de produtos precisos.

#### **2.4. Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT**

O termo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) utilizado no Brasil é uma adaptação do termo em inglês Unmanned Aerial Vehicle (UAV) e, segundo Eisenbeiss (2004), se refere a qualquer veículo que possa voar e ser controlado sem a necessidade de uma pessoa a bordo. Isso inclui pequenos aviões e helicópteros rádio controlados até foguetes e aviões capazes de voar durante 30 horas ininterruptas, como é o caso do VANT americano Global Hawk (Figura 13).



Figura 13 - VANT Global Hawk da Northrop Grumman. Fonte: <<http://www.as.northropgrumman.com/products/ghrq4b/gallery.html>>, acesso em 2011.

Para a Comunidade Internacional de Sistemas para Veículos Não Tripulados (UVS International Community), existem cinco categorias de VANT (Tabela 3): Micro, Mini, Curto Alcance, Médio Alcance e Grande Altitude/Longa Duração.

Tabela 3 - Categorias de VANT de acordo com UVS International. (Fonte: adaptado de Eisenbess, 2004).

<b>Categoria</b>	<b>Peso (Kg)</b>	<b>Raio de operação (Km)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Duração (horas)</b>
<b>Micro</b>	<5	<10	250	1
<b>Mini</b>	<25	<10	150/250/300	<2
<b>Curto Alcance</b>	25 - 150	10 - 30	3000	2 - 4
<b>Médio Alcance</b>	50 -250	30 - 70	3000	3 - 6
<b>Grande Altitude e Longa Duração</b>	>250	> 70	>3000	> 6

O uso dos VANT em aplicações civis está crescendo rapidamente principalmente devido à versatilidade desses equipamentos em diversas situações e ao sucesso que esses veículos vêm obtendo em suas missões. Além disso, o fato de não haver um piloto a bordo da aeronave diminui os riscos de acidentes envolvendo vítimas.

Não existe um consenso sobre as categorias de VANT e nem sobre quais aspectos devem ser considerados para classificá-los. Cada país ou organização classifica os VANT da maneira que acha melhor. Outro ponto



ainda não resolvido na temática dos VANT está na questão legal de seu uso. Não existe nenhuma organização internacional que regule sua utilização e a legislação dos países, mesmo os que já utilizam os VANT há mais tempo, como a Austrália, ainda não regulam de forma clara a utilização civil com fins comerciais.

O mercado de VANT está em ascensão no mundo todo. Segundo estudo realizado em 2010, pelo *Teal Group Corporation* (Teal Group, 2011), empresa americana de consultoria no ramo aeroespacial e de defesa, a estimativa é que os gastos com VANT serão mais que duplicados na próxima década. Ainda de acordo com o estudo, anualmente o mercado de VANT movimenta cerca de 4,9 bilhões de dólares e nos próximos dez anos esse número deverá chegar na casa dos 11,5 bilhões de dólares por ano.

Além das diversas aplicações militares o uso dessas plataformas em aplicações civis está ficando cada vez mais diversificado. Para Sarris (2001), alguns dos possíveis usos civis dos VANT são o patrulhamento de fronteiras, sensoriamento remoto, detecção e monitoramento de queimadas, auxílio em situações de emergência e desastre, monitoramento de estruturas lineares como gasodutos e linhas de transmissão, pesquisa, monitoramento ambiental e segurança pública.

#### **2.4.1. Funcionamento**

Cada aeronave não tripulada pode utilizar um sistema diferente, variando tanto em hardware como em software, porém o esquema básico de funcionamento é bem semelhante entre os diferentes modelos disponíveis no mercado. Esta parte do trabalho descreve o funcionamento do VANT Graúna, da empresa TerraSense, que foi utilizado para obtenção dos dados para esta pesquisa.

Grande parte das aeronaves não tripuladas possui um sistema de comunicação por meio de frequência de rádio entre o operador de solo e a aeronave. Algumas aeronaves de grande porte ou militares possuem sistema de comunicação via satélite, permitindo maior alcance de operação e segurança no tráfego de dados.

É por meio desta comunicação que o operador de solo controla e monitora o voo da aeronave. O VANT Graúna possui dois sistemas de comunicação independentes operando em frequências distintas, sendo uma para controle manual e outra para transmissão de telemetria. A Figura 14 mostra, de forma esquemática, o funcionamento e a comunicação do sistema VANT Graúna.

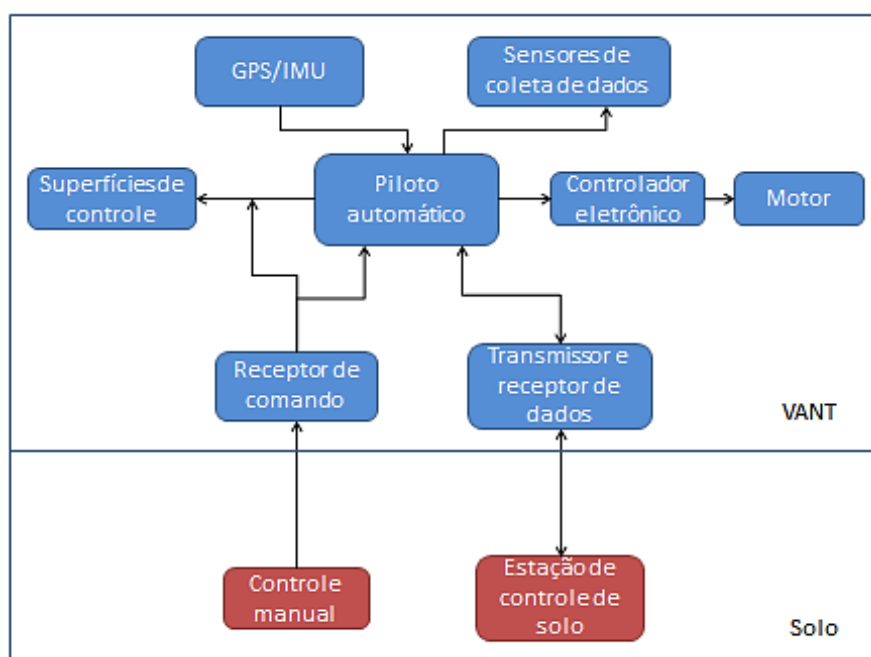


Figura 14 - Esquema de funcionamento e comunicação do sistema VANT Graúna.

### 3. AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO

Artigo intitulado “AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA USO EM AEROLEVANTAMENTOS” submetido à periódico científico nacional. Versão original em língua portuguesa.

#### RESUMO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vêm sendo, nos últimos anos, empregados para finalidades diversas. A categoria microVANT, para utilização em aerolevantamentos, requer sensores leves e de baixo custo. No entanto, para assegurar qualidade posicional torna-se necessário analisar as potencialidades das tecnologias citadas. Este trabalho analisa aerolevantamentos com microVANT em diferentes áreas, utilizando diferentes configurações na coleta de dados, estimativa de parâmetros de orientação interior e aplicação de testes estatísticos para avaliar tendência e precisão dos resultados finais. Com a análise estatística dos resultados, foi verificada variação significativa nas precisões em diferentes experimentos realizados. Por outro lado, foi possível sugerir que a utilização do microVANT e da câmara de pequeno formato analisados neste trabalho, para a realização de aerolevantamentos, é viável do ponto de vista posicional 3D.

**Palavras chaves:** Câmara de pequeno formato, microVANT, qualidade posicional.

#### 3.1. Introdução

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) ou Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) vêm sendo, nos últimos anos, empregados para finalidades diversas, como segurança (MARQUES, 2007), meio ambiente (ROIG *et al.*, 2013), mineração/fiscalização (ROCK *et al.*, 2011), cartografia (FERREIRA *et al.*, 2013), entre outros. O uso civil destes veículos deve-se, em parte, à sua flexibilidade, taxa de revisita e alta resolução espacial. Nos estudos de caso

revisados na literatura pesquisada, aeronaves de pequeno porte com baixa capacidade de carga, menor que 05 Kg, conhecidos como microVANT (EISENBEISS, 2004), vêm sendo amplamente utilizados (CORONADO *et al.*, 1998; EISENBEISS, 2004; ESPOSITO *et al.*, 2006; NEBIKER *et al.*, 2008; BENTO, 2008; VOGLER *et al.* (2009); ABER *et al.* (2010); HAALA *et al.* (2010); PEGORARO & PHILIPS, 2011).

Devido à baixa capacidade de carga dos microVANT, estes requerem sensores leves e de baixo custo. Conseqüentemente, câmaras fotográficas digitais de pequeno formato vêm sendo utilizadas a bordo de microVANT para aquisição de informações do ambiente, por meio de propriedades que se traduzem em grandezas que podem ser medidas com melhor precisão.

Uma das discussões sobre a utilização de sensores não métricos, como câmaras de pequeno formato para realização de trabalhos voltados à cartografia, está na estabilidade dos parâmetros de calibração, que são determinados principalmente por técnicas de fotogrametria a curta-distância (LÄBE *et al.*, 2004). Trabalhos como os de CRAMER (2004), HABIB *et al.* (2005), HABIB *et al.* (2006), WACKROW *et al.* (2007), RUY *et al.* (2008); MITISHITA *et al.* (2009) , MITISHITA *et al.* (2010) e DEBIASI *et al.* (2012) investigam o uso destes sensores e provam, por meio de diferentes métodos, a estabilidade dos parâmetros de calibração das câmaras de pequeno formato. Porém, a utilização destas câmaras acopladas a microVANT ainda é objeto de questionamento e, conseqüentemente, de pesquisa, no que tange à utilização para fins cartográficos. Diante do exposto, este trabalho busca analisar, no que concerne à qualidade posicional, as potencialidades da utilização de tecnologias de baixo custo, por meio da utilização de câmara de pequeno formato a bordo de microVANT na aquisição de informações cartográficas.

### **3.2. Área de Estudos**

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas duas áreas para a aquisição de dados que permitissem processar, analisar e avaliar a qualidade de produtos obtidos a partir de imagens de câmaras de pequeno formato a bordo de um microVANT.

A primeira área de estudo está localizada no Campus da Universidade de Brasília, Brasília – DF (Figura 15), denominada Área 01, onde foi realizada a coleta de informações necessárias para a calibração da câmara de pequeno formato. A área possui um relevo plano e aproximadamente 06 (seis) hectares.

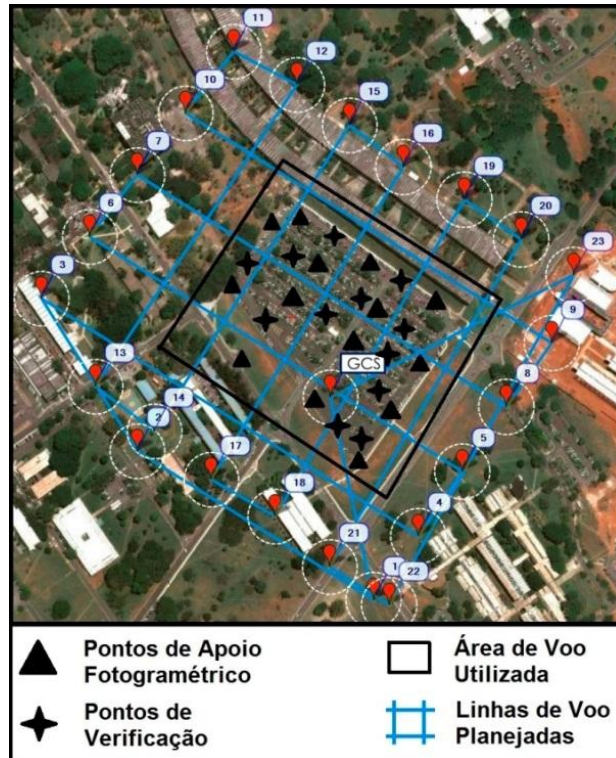


Figura 15 - Área utilizada para calibração da câmara de pequeno formato, denominada Área 01. As linhas perpendiculares presentes na figura representam as faixas de voo planejadas para o aerolevamento.

A segunda área esta localizada na zona rural do município de Belo Horizonte – MG, denominada Área 02 (Figura 16), onde também foi realizada a coleta de informações necessárias à calibração da câmara. A Área 02 (dois) possui aproximadamente 600 hectares e relevo com variações altimétricas de até 200 metros.

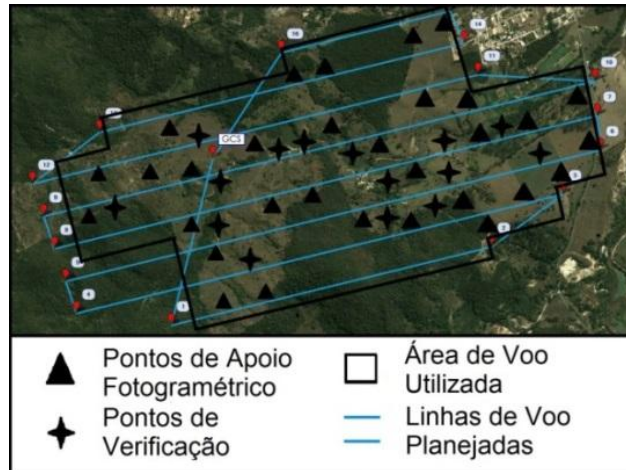


Figura 16 - Área utilizada no aerolevantamento, denominada Área 02. As linhas paralelas presentes na figura representam as faixas de voo planejadas para o aerolevantamento.

### 3.3. Metodologia

A realização do referido trabalho envolve o planejamento do voo, obtenção de imagens com câmara de pequeno formato a bordo do microVANT, determinação e coleta de pontos de apoio e verificação em campo, calibração da câmara, processamento das imagens e avaliação da qualidade posicional planimétrica e altimétrica dos pontos de verificação.

#### 3.3.1. Materiais

Para a realização deste trabalho optou-se por um microVANT, do tipo asa fixa (Figura 17), com 1,8m envergadura, movido a energia elétrica com autonomia de 45 minutos de voo com capacidade de carga de 1,5kg. Todo o desenvolvimento e montagem do microVANT foi realizado e disponibilizado para esta pesquisa pela empresa TerraSense.

O sistema a bordo do microVANT Graúna é composto por uma câmara *Canon PowerShot S100*, de pequeno formato, um receptor de sinais de satélite de posicionamento - GNSS (posicionamento absoluto por código), sistema inercial e piloto automático capaz de realizar missões pré-programadas.

Para monitoramento e controle de voo, o microVANT é equipado com um sistema de comunicação de duplo sentido que envia informações de todo o sistema a bordo para uma estação de recepção localizada em solo.



Figura 17 - MicroVANT Graúna utilizado na aquisição de dados fotográficos e de posição.

A câmara utilizada para aquisição das imagens possui matriz de fotodetectores CCD (*Couple Charged Device*) com 4000 x 3000 elementos, onde cada fotodetector, considerado quadrado, possui dimensão de  $1,861\mu\text{m}$ . Esta câmara é acoplada, individualmente, a uma plataforma localizada no microVANT e é programada para adquirir imagens em intervalos de tempo pré-definidos, que variam de acordo com a altura e velocidade de voo. O cálculo de tempo entre as imagens é realizado utilizando as distâncias definidas entre as imagens, para que a sobreposição planejada seja observada, e a velocidade de cruzeiro da aeronave.

Em campo, as coordenadas dos pontos necessários para apoio fotogramétrico e para verificação foram estimadas por meio do posicionamento estático relativo utilizando um par de receptores GNSS, *Topcon Hiper Lite*.

### **3.3.2. Planejamento do voo**

O correto planejamento do voo e da coleta das imagens é um passo importante para a obtenção de resultados consistentes. Durante a realização deste experimento seguiu-se uma rotina de seis procedimentos (Figura 18) para cada voo conforme FERREIRA *et al.* (2013), sendo eles: escolha da área,

análise de segurança, planejamento do voo, preparação dos equipamentos, verificação dos equipamentos e coleta de dados.

Durante todo o processo a etapa de segurança é considerada a fase crítica, pois é necessário avaliar diversos fatores que possam influenciar no sucesso da operação, mantendo assim a segurança de pessoas, equipamentos e bens materiais de terceiros. Conforme descrito por FERREIRA *et al.* (2013), alguns fatores devem ser levados em consideração na análise de segurança, os quais são: condições legais da operação, possíveis obstáculos como torres e linhas de transmissão, proximidade a aeroportos e aeródromos, limites de áreas urbanas, morfologia do terreno, condições de vento e locais para pouso e decolagem.

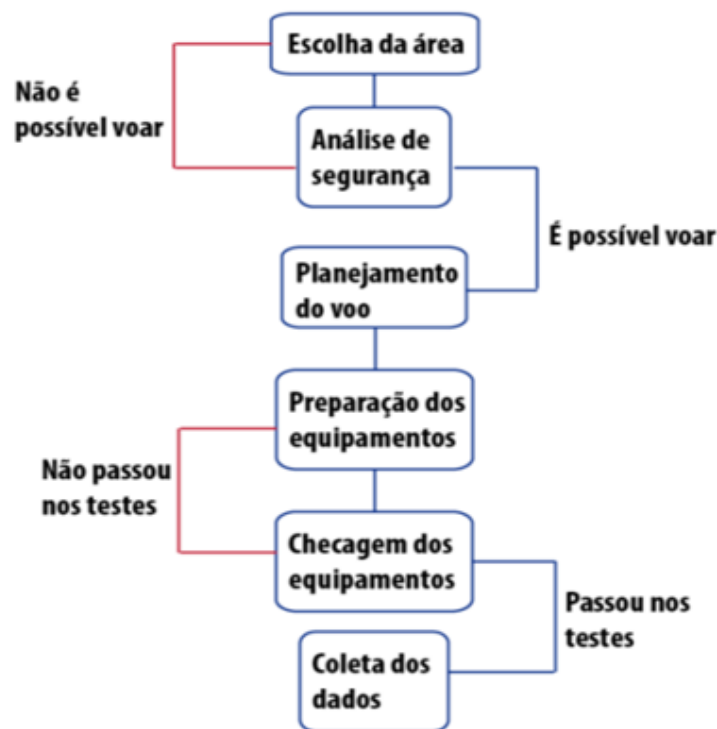


Figura 18 - Rotina de procedimentos para aerolevanteamento (FERREIRA *et al.*, 2013).

### 3.3.3. Obtenção das imagens e dos pontos de controle

A tomada das imagens, na Área 01, se deu em direções perpendiculares, formando um bloco retangular de faixas ortogonais de voo. Também foram



coletadas coordenadas de 26 pontos bem distribuídos e pré-sinalizados em campo para posterior identificação nas imagens. Do total de pontos de controle, 14 foram utilizados como apoio de campo, para o processamento fotogramétrico, e 12 utilizados para verificação dos resultados.

A tomada das imagens na Área 2 se deu em direções paralelas, simulando levantamento aerofotogramétrico com maior economia, formando um bloco retangular com 8 faixas de voo. Foram também coletadas coordenadas de 46 pontos bem distribuídos e pré-sinalizados em campo, sendo que 31 foram utilizados como apoio de campo e 15 utilizados para verificação dos resultados.

As precisões das coordenadas estimadas, tanto para os pontos utilizados como apoio de campo quanto para verificação dos resultados, foram de aproximadamente 5cm.

A Tabela 4 e Figuras 15 e 16 demonstram o planejamento de aquisição dos dados.

Tabela 4 - Planejamento de voo e de apoio de campo para aquisição dos dados.

<b>Levantamento de campo</b>	<b>Área 01</b>	<b>Área 02</b>
<b>Área levantada</b>	6 ha	600 ha
<b>Altura do voo</b>	180m	300m
<b>Distância linear do voo</b>	9,2km	23,8km
<b>Distância entre imagens</b>	38m	63m
<b>Distancia entre faixas</b>	116m	194m
<b>Número de faixas</b>	10 (ortogonais)	8 (paralelas)
<b>Área de cobertura no terreno de cada imagem (largura x altura)</b>	259,600m x 190,400m	432,700m x 317,300m
<b>Resolução espacial estimada</b>	6,35cm/pixel	10,58cm/pixel
<b>Superposição lateral</b>	55%	55%
<b>Superposição longitudinal</b>	80%	80%
<b>Número de imagens</b>	139	831
<b>Número de pontos de apoio</b>	14	31
<b>Número de pontos de verificação</b>	12	15
<b>Altitude mínima do terreno</b>	1013m	671m
<b>Altitude máxima do terreno</b>	1025m	919m

### 3.3.4. Calibração da câmara de pequeno formato

O processo de determinação dos parâmetros de orientação interior da câmara e sua utilização para o cálculo dos parâmetros da orientação exterior de cada uma das imagens do levantamento aerofotogramétrico foi feito com o software *Agisoft PhotoScan Professional*. O método utilizado para determinação dos parâmetros foi o de autocalibração, ou calibração em serviço, da câmara.

A estimativa dos parâmetros de orientação interior foi primeiramente realizada utilizando dados da Área 01. Posteriormente foram estimados os parâmetros para a Área 02, utilizando como valores iniciais os parâmetros de orientação interior estimados previamente na Área 01. Justifica-se a realização de uma nova calibração em campo para permitir a comparação dos resultados do processamento fotogramétrico das imagens.

A determinação dos parâmetros de orientação interior, essencial para o tratamento geométrico das imagens, foi realizada por meio do ajustamento de observações segundo modelos funcionais que relacionam sistemas de coordenadas de imagem, de coordenadas da câmara e de coordenadas terrestres, conforme proposto por BROW (1971), MONIWA (1977), FRASER (1997) e SHAHBAZI *et al.* (2011):

$$F(x) = x - x_0 + \Delta x + f \cdot (N_1/N_3) = 0 + e \quad (7)$$

$$F(y) = y - y_0 + \Delta y + f \cdot (N_2/N_3) = 0 + e \quad (8)$$

sendo,

$$N_1 = a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0) \quad (9)$$

$$N_2 = a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0) \quad (10)$$

$$N_3 = a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0) \quad (11)$$

$$\Delta x = (x - x_0) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) + P_1(r^2 + 2 \cdot \bar{x}^2) + 2 \cdot P_2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} + s \quad (12)$$

$$\Delta y = (y - y_0) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) + P_2(r^2 + 2 \cdot \bar{y}^2) + 2 \cdot P_1 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (13)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (14)$$

onde  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  representam as coordenadas de pontos no sistema de coordenadas terrestre;  $a_{ij}$  são os elementos da matriz de rotações;  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  são coordenadas do centro de perspectiva da câmara, no sistema de coordenadas terrestre;  $e$  são os resíduos dos parâmetros ajustados;  $x$ ,  $y$  as coordenadas de pontos no sistema de coordenadas da câmara;  $f$  é a distância focal;  $x_0$ ,  $y_0$  são as coordenadas fiduciais do ponto principal no sistema de coordenadas da câmara;  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são correções de distorções sistemáticas;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  são os coeficientes de distorção radial;  $P_1$ ,  $P_2$  são os coeficientes de distorção descentrada;  $s$  é o coeficiente de não perpendicularidade, ou inclinação, entre os eixos cartesianos nas direções  $x$  e  $y$ .

### 3.3.5. Processamento das imagens

Todo o processamento fotogramétrico das imagens passou pelas etapas de orientação interior e exterior, onde, de posse dos pares estereoscópicos das imagens, foi possível extrair valores de coordenadas tridimensionais de pontos coletados nas fotografias, no sistema de coordenadas de terreno. Para isto foram considerados os parâmetros de calibração da câmara utilizada, as coordenadas dos pontos de apoio de campo coletadas fotograficamente e suas respectivas coordenadas tridimensionais coletadas no terreno.

As coordenadas do centro de cada imagem de cada bloco foram obtidas através do receptor GNSS da aeronave que possui precisão de aproximadamente 10m. Devido à baixa precisão destas coordenadas, os valores de posição foram utilizados somente para orientação inicial das imagens e não para o processo de calibração e posterior processamento fotogramétrico das imagens. Estas coordenadas do centro das imagens foram utilizadas

apenas para restringir a área de busca dos pontos de ligação entre as fotos. Depois que os pontos de ligação foram criados e medidos apenas as coordenadas dos pontos de apoio de campo foram utilizadas para ajustamento e cálculo das coordenadas dos centros de perspectiva no referencial espaço-objeto (de terreno), bem como para os demais parâmetros da orientação exterior de cada imagem, ou seja, dos respectivos ângulos de Euler ou de atitude da plataforma sensora, no instante da tomada de cada imagem.

### **3.3.6. Avaliação da qualidade posicional**

Em ambas as áreas de estudo, realizou-se a análise dos resultados por meio da análise da qualidade posicional dos pontos fotogramétricos de verificação medidos sobre a imagem, referenciados ao sistema de coordenadas terrestre. Para melhor análise, além do processamento fotogramétrico realizado na Área 01, utilizando parâmetros de orientação interior estimado na mesma área, o processamento fotogramétrico da Área 02 foi realizado de duas formas distintas, sendo uma utilizando parâmetros de orientação interior estimados na Área 01 e outra utilizando os parâmetros citados estimados na Área 02.

A avaliação da qualidade posicional foi feita baseando-se na análise de tendência e precisão (MAROTTA & CALIJURI, 2006), seguindo orientações do decreto Decreto-lei 89817/1984, onde foi possível avaliar os resultados do processamento fotogramétrico e a viabilidade de utilização destes para confecção e/ou atualização de bases cartográficas.

O Decreto-lei 89817/1984, criado pela CONCAR (Comissão Nacional de Cartografia), apresenta o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade (1,6449 vezes o Erro Padrão - EP), que define a exatidão dos trabalhos cartográficos realizados no Brasil. A Tabela 5 demonstra os valores do Erro Padrão (EP) para a Classe "A", utilizados como referência no presente trabalho, conforme especificado no Decreto-lei.

Tabela 5 - EP para a Classe "A", conforme Decreto-Lei 89817/1984.

Classe	Planimetria	Altimetria
	EP	EP
A	0,3 mm	1/3 x equidistância

A análise de tendência foi baseada da distribuição *t de Student*, que, por meio das discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação obtidas no processamento fotogramétrico e as respectivas coordenadas obtidas em campo, tomadas como referência.

$$t_{d_{X,Y,Z}} = \frac{\overline{d_{X,Y,Z}} \cdot \sqrt{n}}{S_{d_{X,Y,Z}}} \quad (15)$$

onde  $t_{d_{X,Y,Z}}$  representa os valores de t calculados para as discrepâncias nas coordenadas X, Y e Z;  $\overline{d_{X,Y,Z}}$  representa as discrepâncias nas coordenadas X, Y e Z, respectivamente;  $S_{d_{X,Y,Z}}$  representa o desvio-padrão das discrepâncias para as coordenadas X, Y e Z;  $n$  representa o número de amostras.

A análise de precisão foi baseada na distribuição Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), onde foram comparadas as variâncias das discrepâncias amostrais com o EP, definido pelo Decreto-lei 89817/1984, com objetivo de verificar em que escala de representação o processamento fotogramétrico se enquadra, tanto em termos planimétricos quanto altimétricos.

$$\chi_{d_{X,Y,Z}}^2 = \frac{(n-1) \cdot S_{d_{X,Y,Z}}^2}{\sigma_{d_{X,Y,Z}}^2} \quad (16)$$

sendo,

$$\sigma_{d_{X,Y,Z}}^2 = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

onde  $\chi_{d_{E,N,h}}^2$  representa os valores de  $\chi^2$  calculados para as coordenadas X, Y e Z, respectivamente;  $\sigma_{d_{X,Y,Z}}^2$  representa a variância utilizada como tolerância para

as coordenadas X, Y e Z;  $S_{d_{X,Y,Z}}^2$  representa as variâncias das discrepâncias encontradas nas coordenadas X, Y e Z.

Tanto na análise de tendência quanto na análise de precisão, foi considerado nível de confiança de 90%.

### 3.4. Resultados e Discussões

Para a Área 01, a execução do voo se deu a uma altura média de 216m em relação à superfície terrestre, proporcionando uma resolução espacial de 0,06m/pixel e abrangendo uma porção de 0,11km<sup>2</sup>. Na Área 02 o voo teve altura média de 352m, com área coberta de 6,13km<sup>2</sup> e resolução espacial de 0,10m/pixel.

No processo de calibração da câmara utilizada, cujo levantamento dos dados compreendeu as Áreas 01 e 02, foi possível obter os parâmetros de orientação interior conforme a Tabela 6. Os resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observados no processo de orientação exterior, devidamente orientados no sistema de coordenadas terrestre, são apresentados nas Figuras 19 e 20.

Tabela 6 - Parâmetros de calibração da câmara.

Parâmetros	Área 01	Área 02	Área 01-Área02
$f$ (mm)	5,526	5,422	0,104
$x_0$ (mm)	3,732	3,724	0,008
$y_0$ (mm)	2,654	2,652	0,002
$s$ (mm)	3,926E-04	4,667E-04	-7,417E-05
$k_1$ (mm <sup>-2</sup> )	-5,728E-05	-7,604E-05	1,876E-05
$k_2$ (mm <sup>-4</sup> )	6,670E-06	3,446E-06	3,224E-06
$k_3$ (mm <sup>-6</sup> )	1,604E-05	2,011E-05	-4,071E-06
$P_1$ (mm <sup>-1</sup> )	-1,223E-05	-1,206E-05	-1,676E-07
$P_2$ (mm <sup>-1</sup> )	2,695E-06	1,733E-06	9,620E-07

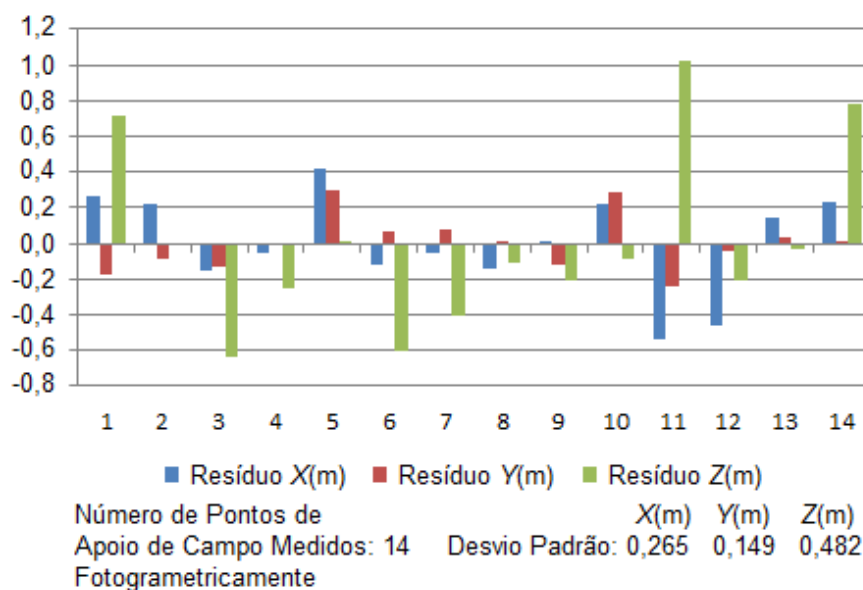


Figura 19 - Resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observadas em pares estereoscópicos de imagens, Área 01

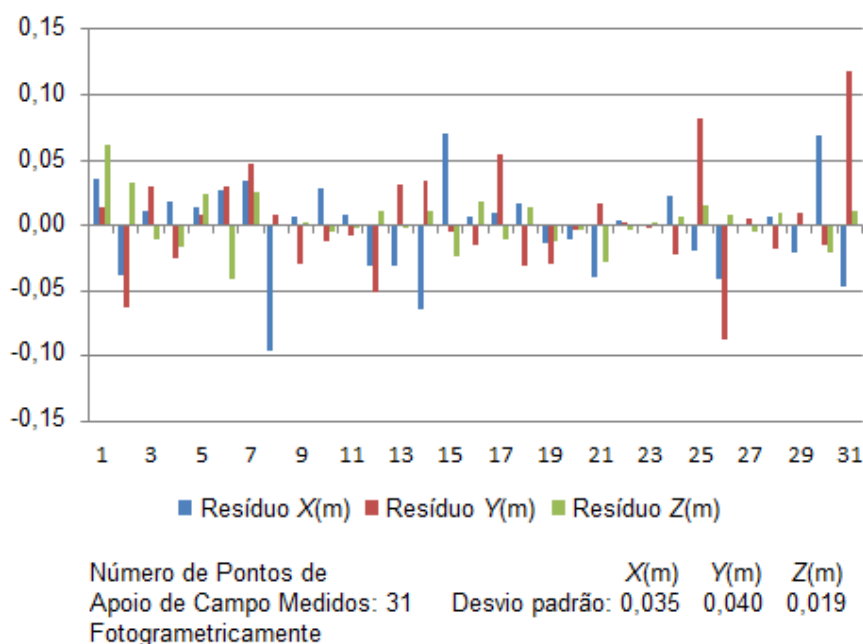


Figura 20 - Resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observadas em pares estereoscópicos de imagens, Área 02.

Pelos resultados apresentados na Tabela 6, verifica-se diferenças entre os parâmetros de calibração. Assumindo a estabilidade de câmaras de pequeno formato, como sugerido por CRAMER (2004), HABIB *et al.* (2005), HABIB *et al.* (2006), WACKROW *et al.* (2007), RUY *et al.* (2008); MITISHITA *et al.* (2009), MITISHITA *et al.* (2010) e DEBIASI *et al.* (2012), considera-se que as diferenças

encontradas nos parâmetros de orientação interior estão diretamente relacionadas com a configuração das faixas de voo, a variação altimétrica do terreno e a distribuição de pontos de apoio de campo.

Ao comparar os resíduos apresentados pelos pontos de apoio utilizados na calibração de ambas as áreas de estudo (Tabela 6 e Figuras 19 e 20), verifica-se que a calibração da Área 02 apresenta melhores resultados quando comparados à calibração da Área 01.

Na Área 01, o levantamento aéreo foi realizado em faixas perpendiculares de voo e em local relativamente plano, onde a variação do relevo é de aproximadamente 12m. Já na Área 02, foi realizado o levantamento aéreo em faixas paralelas de voo e em local com variação de relevo na ordem de 248m.

A configuração do voo na Área 01, quando comparada ao voo na Área 02, permite uma maior rigidez do bloco formado durante a geração de pontos de ligação das imagens, denominados pontos fotogramétricos, necessários para o cálculo e ajustamento dos parâmetros de orientação exterior e para o processamento fotogramétrico de cada bloco. Esta maior rigidez pode representar menor capacidade do bloco, formado pela ligação entre imagens, em se ajustar aos pontos de apoio de campo, visto a menor capacidade de ajustamento das variações de translação, rotação e escala de imagens individualizadas. Por outro lado, a maior a variação do relevo apresentada na Área 02 tende a proporcionar melhor estimativa dos parâmetros de orientação interior, uma vez que correlações entre os parâmetros são quebradas.

Ao utilizar os parâmetros de orientação interior estimados na Área 01 para realizar o processamento fotogramétrico na Área 02, de forma similar à primeira análise, verificam-se diferentes comportamentos dos resíduos, como observados nas Figuras 21, 22 e 23. Nesta análise, os parâmetros de orientação interior estimados nas Áreas 01 e 02, utilizados no processamento fotogramétrico da Área 02, foram denominados parâmetros pré-calibrados e calibrados, respectivamente.



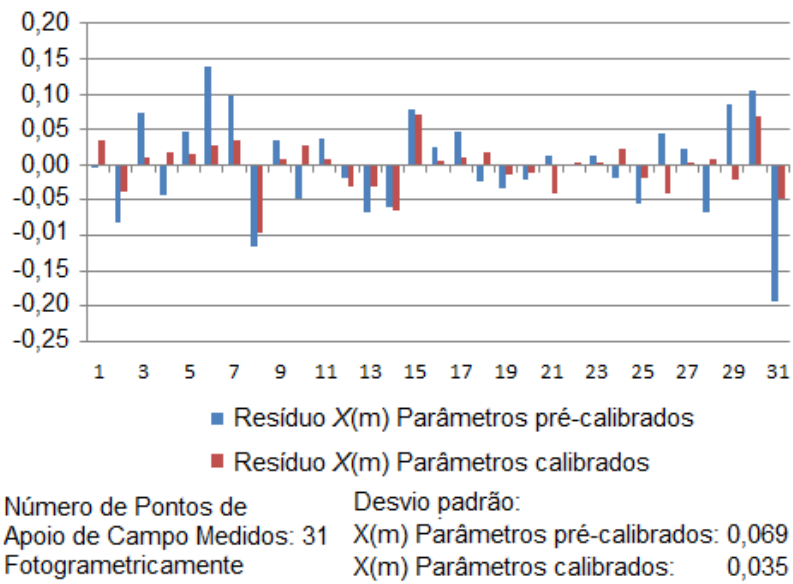


Figura 21 - Resíduos das coordenadas na direção X dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02.

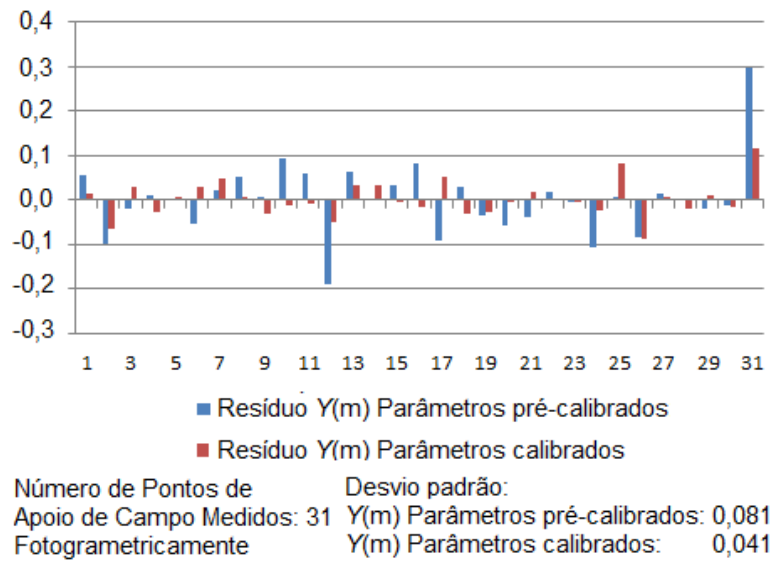


Figura 22 - Resíduos das coordenadas na direção Y dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02.

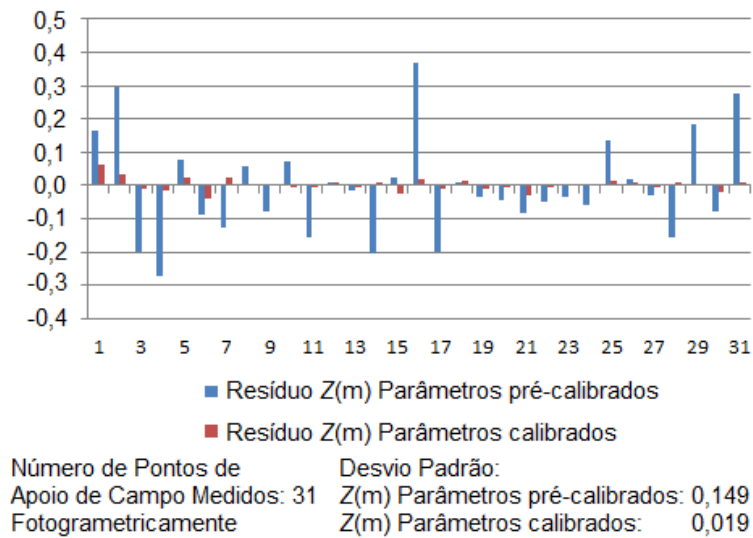


Figura 23 - Resíduos das coordenadas na direção Z dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02.

Os resultados apresentados nas Figuras 21, 22 e 23 demonstram resíduos significativos, ao se comparar parâmetros de orientação interior pré-calibrados e calibrados na Área 02. Os resíduos máximos encontrados, para os 31 pontos dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente utilizados, foram de 0,192m, 0,298m e 0,369m utilizando parâmetros pré-calibrados e 0,090m, 0,117m e 0,061m utilizando parâmetros calibrados, para as direções X, Y e Z, respectivamente.

Na avaliação da qualidade posicional, os resíduos e a análise de tendência e precisão, considerando o Decreto-lei 89817/1984, são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Síntese dos resíduos dos pontos de verificação medidos fotogrametricamente.

1*	2*	Estatística	X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)
01	01	Média	-0,043	-0,025	0,303	0,004
		Desvio Padrão	0,327	0,211	0,234	0,651
		Máximo	0,482	0,360	0,697	1,059
		Mínimo	-0,683	-0,525	0,052	-0,962
02	01	Média	-0,038	0,028	0,164	0,275
		Desvio Padrão	0,222	0,084	0,173	0,449
		Máximo	0,260	0,188	0,742	1,065
		Mínimo	-0,740	-0,151	0,020	-0,593
02	02	Média	-0,004	-0,002	0,044	0,031
		Desvio Padrão	0,029	0,044	0,027	0,124
		Máximo	0,040	0,080	0,080	0,220
		Mínimo	-0,071	-0,075	0,003	-0,300

1\* - Área Analisada; 2\* Área de Calibração.

Tabela 8 - Análise de tendência no processamento fotogramétrico pela distribuição *t de student*.

1*	2*	$t_{calculado}$			PC	$t_{tabelado}$
		X	Y	Z		
01	01	-0,460	-0,406	0,020	12	1,796
02	01	-0,671	1,295	2,372	15	1,761
02	02	-0,550	-0,134	0,964	15	1,761

1\* - Área Analisada; 2\* Área de Calibração  
PC - Número de Pontos de Verificação

Na análise de erros sistemáticos pode-se verificar, segundo Tabela 8 e utilizando pontos de verificação juntamente com a aplicação do teste *t de student*, que a utilização de parâmetros de calibração estimados na área do aerolevante apresentaram-se livres de tendência, em nível de 90% de

confiança. Já analisando os resultados do processamento fotogramétrico da Área 02, utilizando parâmetros de orientação interior estimados na Área 01, ficou evidenciada a presença de tendência na coordenada “Z”. Diante dos resultados, pode-se sugerir que a realização da calibração dos parâmetros de orientação interior na mesma área do aerolevantamento, ou seja, com mesmas condições técnicas e ambientais, podem minimizar a presença de erros sistemáticos.

A análise da precisão (Tabela 9) foi realizada por meio do teste  $\chi^2$ , em nível de 90% de confiança, tomando como referência os pontos de verificação coletados em campo e os respectivos EP (Tabela 5). Verifica-se, após aplicação do teste, que as escalas e equidistâncias verticais encontradas utilizando a calibração dos parâmetros de orientação interior estimados na Área 01 estão na ordem de 1:1.500 e 2,5m, respectivamente. Utilizando a calibração dos parâmetros de orientação interior estimados na Área 02, para analisar o processamento fotogramétrico da mesma área, verifica-se que a escala e equidistância vertical encontradas são de 1:250 e 0,5m, respectivamente. Esta diferença significativa dos resultados pode ser devida às diferentes configurações de faixas de voo, como descrito na análise do ajustamento dos parâmetros de orientação interior, e à maior variação de relevo. Vale lembrar que, na análise realizada, a qualidade dos resultados finais também é dependente da quantidade, precisão e distribuição dos pontos de verificação no terreno.

Tabela 9 - Análise de precisão no processamento fotogramétrico pela distribuição  $\chi^2$ .

1*	2*	$\chi^2_{calculado}$			PC	$\chi^2_{tabelado}$	Eq (m)	Escala
		X	Y	Z				
01	01	11,646	4,848	13,412	12	17,275	2,5	1/1500
02	01	15,340	2,186	12,677	15	21,064	2	1/1000
02	02	4,307	9,551	15,610	15	21,064	0,5	1/250

1\* - Área Analisada; 2\* Área de Calibração  
 PC - Número de Pontos de Verificação  
 Eq - Equidistância vertical

### 3.5. Conclusões

Este trabalho consistiu na verificação das potencialidades da utilização do microVANT Graúna e da câmara *Canon PowerShot S100* para a realização de aerolevantamentos. Para isto foi realizada a estimativa dos parâmetros de orientação interior em duas áreas que apresentam diferentes métodos de coleta de dados aéreos aliada a condições técnicas e ambientais distintas.

Na análise de diferentes métodos de aquisição de imagens, por faixas de voo perpendiculares e paralelas, foi possível verificar diferenças significativas nos resultados finais do processamento fotogramétrico. Apesar dos resultados apresentados no processamento da Área 01 serem menos precisos que os apresentados na Área 02, pode-se sugerir que o primeiro apresenta maior confiabilidade, em virtude da maior rigidez do bloco formado utilizando pontos de ligação entre imagens tomadas em diferentes direções. Por outro lado, a maior a variação do relevo apresentada na Área 02 tende a proporcionar melhor estimativa dos parâmetros de orientação interior, uma vez que correlações entre os parâmetros de orientação interior são quebradas.

Sobre a determinação dos parâmetros de orientação interior, quando confrontados com os resultados dos processamentos fotogramétricos, foi possível sugerir que a realização da calibração na área onde o aerolevantamento é realizado pode minimizar a presença de erros sistemáticos, visto que todos os dados são coletados nas mesmas condições técnicas e ambientais.

Com a análise estatística dos resultados adquiridos neste trabalho, verificou-se uma variação significativa nas precisões. No entanto, a análise da qualidade posicional das medições fotogramétricas realizadas, tanto planimétrica quanto altimetricamente, indica a viabilidade do emprego do microVANT e da câmara de pequeno formato utilizados nesta pesquisa, para realização de aerolevantamentos.

#### **4. AVALIAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DERIVADO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR VANT**

Artigo intitulado “AVALIAÇÃO POSICIONAL DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) DERIVADO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO” submetido à periódico científico nacional. Versão original em língua portuguesa.

#### **RESUMO**

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vêm sendo, nos últimos anos, empregados para finalidades diversas. Para tornar viável a aplicação de microVANT em aerolevantamentos, é necessária a utilização de sensores leves e de baixo custo. No entanto, para assegurar qualidade posicional e verificar a sua aplicabilidade prática, torna-se necessário analisar as potencialidades das tecnologias citadas. Este trabalho avalia os Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados a partir das imagens obtidas por uma câmara de pequeno formato a bordo de um microVANT, tomando como referência MDE gerado por perfilamento realizado por sistema LIDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado por aeronave tripulada. Foram analisadas, além da precisão, as características e diferenças nas nuvens de pontos obtidas pelos diferentes métodos. Também foi investigada a relação entre o número de pontos de apoio em campo e a precisão do MDE, para estimar o número de pontos de apoio necessários em aplicações práticas. Com a análise estatística dos resultados, verificou-se que MDEs com alta resolução espacial apresentaram-se sensíveis às diferenças no processo de aquisição dos dados e às variações temporais do ambiente. Observou-se também que a precisão do processamento fotogramétrico dos dados da câmara de pequeno formato a bordo do microVANT utilizados são muito dependentes do número de pontos de apoio em campo.

**Palavras chaves:** Câmara de pequeno formato, microVANT, qualidade posicional, MDE.

#### 4.1. Introdução

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e câmara de pequeno formato em aplicações civis vêm crescendo rapidamente em diversas áreas e com inúmeras finalidades, como gestão dos recursos naturais e monitoramento (HORCHER & VISSER, 2004), monitoramento da vegetação (SUGIURA, *et al.*, 2005), monitoramento de incêndios florestais (ZHOU *et al.*, 2005), agricultura de precisão (REIDELSTUERZ *et al.*, 2007), mapeamento de sítios arqueológicos (BENDEA, *et al.*, 2007; PATIAS, *et al.*, 2007), mineração e fiscalização (ROCK *et al.*, 2011), segurança e meio ambiente (ROIG *et al.*, 2013) e cartografia (REMONDINO *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2013). Esta acelerada expansão no uso de tais aeronaves pode ser explicada pela evolução técnica de componentes eletrônicos, como microcontroladores, receptores GNSS e sistemas inerciais. A partir do desenvolvimento e miniaturização destes equipamentos, permitiu-se a produção de aeronaves mais leves, e equipadas com um maior número de sensores (VALLET *et al.*, 2011). Além disso, estas tecnologias acopladas a aeronaves remotamente pilotadas vêm ganhando espaço nas geociências, pois, permitem a coleta de dados com alta resolução espacial e temporal (ROCK *et al.*, 2011).

Destaca-se nesta pesquisa, dentre as aplicações diversas, o uso de VANT e câmara de pequeno formato para fins cartográficos. Uma vez provada a estabilidade dos parâmetros de orientação interior das câmaras de pequeno formato (CRAMER, 2004; HABIB *et al.*, 2005; HABIB *et al.*, 2006; WACKROW *et al.*, 2007; RUY *et al.*, 2008; MITISHITA *et al.*, 2009; MITISHITA *et al.*, 2010 e DEBIASI *et al.*, 2012), por meio de conceitos de fotogrametria, torna-se possível a estimativa de posição tridimensional do terreno, com precisão devidamente avaliada. Para DEBIASI & MITISHITA (2013), de forma geral, câmaras de baixo curso (aqui entendido como de pequeno formato) possuem como vantagens a aquisição direta de imagens digitais, a facilidade de manuseio e processamento das imagens e o seu pequeno porte, que viabiliza a sua utilização em qualquer tipo de aeronave.

Voltando-se a análise altimétrica dos produtos derivados de aerolevantamentos utilizando câmara de pequeno formato a bordo de

microVANT, como MDE, HAARBRINK & EISENBEISS (2008), ROCK *et al.* (2011), SAUERBIER *et al.* (2011) e STEFANIK *et al.* (2011) entram no assunto e avaliam a qualidade posicional desses modelos por meio de diferentes métodos.

Segundo EISENBEISS (2004), microVANT é caracterizado por aeronaves de pequeno porte com baixa capacidade de carga, menor que 05 Kg.

Em consonância com os recentes trabalhos realizados, entende-se que a utilização de câmaras de pequeno formato a bordo de microVANT ainda é assunto pendente de compreensão e que, para analisar a potencialidade de uso de um MDE gerado por meio do sensor e da aeronave citados, acredita-se necessário confrontá-lo com MDEs derivados de sensores e técnicas tradicionais.

Por isto, o objetivo deste trabalho foi analisar a qualidade posicional altimétrica de MDEs gerados a partir de dados obtidos por câmara de pequeno formato a bordo de um microVANT e por sistema LIDAR a bordo de aeronave tripulada.

## **4.2. Área de Estudos**

Para a realização deste trabalho, foi utilizada uma área de aproximadamente 100 hectares que está localizada próxima a Brasília, no setor rural da Região Administrativa de São Sebastião (Figura 24). A área de estudos apresenta relevo plano a ondulado, com variação máxima de 105m de altitude, onde há a presença de rodovias, pequenas edificações rurais, estradas vicinais e matas com diferentes dimensões.





Figura 24 - Área de estudos. Os pontos representados e numerados na figura são pontos de apoio de campo cujas coordenadas foram utilizadas como referência no processamento fotogramétrico e LIDAR.

### 4.3. Metodologia

Este trabalho envolve, para a área de estudos, a identificação e estimativa das coordenadas de pontos de apoio em campo, a obtenção de imagens com câmara de pequeno formato a bordo de um microVANT, a obtenção de dados posicionais de terreno derivados do sistema LIDAR e da câmara de pequeno formato e avaliação da qualidade posicional altimétrica de MDEs gerados por dados LIDAR e câmara de pequeno formato.

Na avaliação da qualidade posicional altimétrica foram realizados dois experimentos distintos. O primeiro envolveu a geração de MDEs, por meio do processamento de dados coletados pela câmara de pequeno formato e pelo sistema LIDAR, e a avaliação dos resíduos entre eles. O segundo envolveu a análise da variação da quantidade de pontos de apoio de campo utilizados

como referência, para o processamento fotogramétrico das imagens provenientes da câmara de pequeno formato, e sua associação com as precisões alcançadas nos MDEs gerados.

#### **4.3.1. Determinação e coleta de pontos de apoio em campo**

Para o processamento dos dados, coletados por diferentes sensores, foram coletas informações de 15 pontos de apoio de campo (Figura 24) distribuídos em toda a área de estudos. Uma vez que os aerolevantamentos utilizados neste trabalho foram realizados em períodos diferentes, a seleção dos pontos de apoio se deu em feições que não apresentavam problemas de identificação causada pela variação temporal.

As coordenadas dos pontos de apoio de campo foram obtidas com o uso de receptores GNSS *Topcon Hiper Lite*, por meio do método de posicionamento relativo estático (IBGE, 2008). No processamento, foi utilizada como referência a estação BRAZ (SAT 91200), pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC, de controle do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. A escolha desta estação de referência se deu por sua proximidade com a área de estudos. Após processamento, as coordenadas dos pontos 15 pontos selecionados apresentaram precisões na ordem de 5cm.

#### **4.3.2. Aerolevantamento com microVANT e câmara de pequeno formato**

Na coleta dos dados com câmara de pequeno formato optou-se pelo uso do VANT Graúna (Figura 25) produzido pela TerraSense. O VANT Graúna é uma aeronave de asa fixa que possui 1,8m de envergadura e pesa 2,6 kg quando equipado com uma câmara de pequeno formato.



Figura 25 - MicroVANT Graúna.

A aeronave é capaz de realizar missões de forma automática, navegando por pontos previamente definidos e capturando imagens em coordenadas previamente estabelecidas. Para isto a aeronave é equipada com um piloto automático integrado a diversos sensores, como receptor GNSS, magnetômetro de 03 eixos, acelerômetro de 03 eixos, giroscópio de 03 eixos, sensor de velocidade do ar e barômetro, que permitem o controle e a navegação da aeronave de maneira autônoma. Além dos sensores, a aeronave possui dois sistemas de comunicação com o computador em solo, sendo um responsável pelo controle manual da aeronave, para possíveis intervenções do operador, e o outro para transmissão de dados como posição, velocidade e condições da bateria. Ambos os sistemas operam de forma individual e em frequências diferentes para redundância no caso de uma possível falha.

A câmara utilizada a bordo do microVANT foi uma *Canon*, modelo *PowerShot S100*, equipada com sensor CCD (*Couple Charged Device*) com 4000 x 3000 elementos, onde cada fotodetector possui dimensão de 1,861 $\mu$ m.

Os parâmetros de orientação interior do sensor utilizado (Tabela 10), necessário para o processamento fotogramétrico das imagens, foram previamente estimados pelo método de autocalibração, ou calibração em serviço. Dos parâmetros citados e apresentados na Tabela 10,  $f$  é a distância focal;  $x_0$ ,  $y_0$  são as coordenadas fiduciais do ponto principal no sistema de coordenadas da câmara;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  são os coeficientes de distorção radial;  $P_1$ ,  $P_2$

são os coeficientes de distorção descentrada;  $s$  é o coeficiente de não perpendicularidade, ou inclinação, entre os eixos cartesianos do sistema de coordenadas da câmara.

Tabela 10 - Parâmetros de orientação interior da câmara *Canon*, modelo *PowerShot S100*.

Parâmetros	Valores
$f$ (mm)	5,526
$x_0$ (mm)	3,732
$y_0$ (mm)	2,654
$s$	3,926E-04
$k_1$ (mm <sup>-2</sup> )	-5,728E-05
$k_2$ (mm <sup>-4</sup> )	6,670E-06
$k_3$ (mm <sup>-6</sup> )	1,604E-05
$P_1$ (mm <sup>-1</sup> )	-1,223E-05
$P_2$ (mm <sup>-1</sup> )	2,695E-06

O voo para a coleta das imagens foi realizado a uma altura média de 250 m, com superposição longitudinal e lateral de 80% e 60%, respectivamente. A resolução espacial resultante foi de 7cm. Para o recobrimento total da área analisada foram necessárias 205 imagens registradas em 6 faixas paralelas de voo, cada uma com aproximadamente 1,6km de comprimento.

Para o processamento fotogramétrico (estimativa dos parâmetros da orientação exterior), foi utilizado o software *PhotoScan Professional*.

#### 4.3.3. Aerolevanteamento com sistema LIDAR

Os dados LIDAR foram coletados utilizando o sensor *Laser Scanner ALS60*, fabricado pela *Leica Geosystems*. O sensor possui capacidade de operar a uma altitude de até 6000 metros, com frequência máxima de operação de 200.000 pulsos por segundo (200khz) e o maior ângulo de visada de 75°.

O perfilhamento LIDAR, na área de estudos, foi realizado a uma altura média de voo de 1138 m e velocidade de 259 km/h. Foi utilizado ângulo de visada de 40°, resultando em uma faixa de varredura com 828 m de largura

média. Os pulsos foram gerados com um padrão senoidal a uma frequência de 178,6 KHz, obtendo uma média de 3,27 pontos por metro quadrado.

Neste trabalho, as coordenadas dos pontos de campo gerados pelo sistema LIDAR foram fornecidas, após processamento, pela empresa Topocart Topografia Engenharia e Aerolevantamentos S/S Ltda.

#### **4.3.4. Geração de MDE**

A geração do MDE foi realizada por meio de coordenadas terrestres de nuvens de pontos extraídas do processamento dos dados LIDAR e do processamento fotogramétrico das imagens provenientes da câmara de pequeno formato. Foi considerado, portanto, a menor densidade apresentada entre os diferentes métodos de aerolevanteamento realizados para definição da resolução espacial.

Para transformar os valores de altimetria da nuvem de pontos em uma malha regular, visando a representação do MDE no formato matricial, primeiramente foi considerada a dimensão dos elementos da malha (resolução espacial) e, posteriormente, atribuídos os valores de altimetria para cada elemento. Neste caso, os valores de altimetria do MDE foram calculados pela média dos valores de altitude dos pontos vetoriais, contidos em cada elemento da malha, e a interpolação utilizada foi o vizinho natural mais próximo. Segundo Sibson (1981), o método de interpolação empregado procura um subconjunto de amostras próximas ao ponto de interesse e aplica-lhes pesos com base em áreas proporcionais a fim de interpolar um valor.

#### **4.3.5. Avaliação da qualidade posicional**

Como método de avaliação da precisão posicional planimétrica ( $P_p$ ) e altimétrica ( $P_z$ ), utilizou-se o Desvio Quadrático Médio planimétrico ( $DQM_{XY}$ ) e altimétrico ( $DQM_z$ ) (MAUNE *et al.*, 2001; CHEARER, 1990; MATOS, 2005; PREOSCK, 2006), a 95% de confiança (GREENWALT & SCHULTZ, 1968; MATOS, 2005; PREOSCK, 2006). Para isto, os resíduos foram considerados

livres de tendências e assumiu-se que estes obedecem a uma distribuição normal.

$$DQM_{X;Y;Z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X;Y;Z_{obs\ i} - X;Y;Z_{ref\ i})^2}{n}} \quad (18)$$

$$DQM_{XY} = \sqrt{DQM_X^2 + DQM_Y^2} \quad (19)$$

$$P_p = 2,4477.0,5.DQM_{XY} \quad (20)$$

$$P_z = 1,9600.DQM_Z \quad (21)$$

sendo  $X_{obs}$ ,  $Y_{obs}$ ,  $Z_{obs}$  são coordenadas observadas após processamento;  $X_{ref}$ ,  $Y_{ref}$ ,  $Z_{ref}$  são coordenadas observadas utilizadas como referência.

A avaliação da precisão posicional foi aplicada em dois experimentos distintos.

#### 4.3.6. Experimento 1

No primeiro experimento, a avaliação da qualidade posicional foi realizada por meio de duas análises distintas. A primeira envolvendo os resultados do processamento realizado para os aerolevantamentos utilizando câmara de pequeno formato a bordo do microVANT e sistema LIDAR a bordo de aeronave tripulada. Ambos os processamentos foram realizados utilizando os mesmos pontos de apoio coletados em campo, como referência. A segunda, utilizando MDE derivado da altimetria obtida pelo sistema LIDAR, como referência, e confrontando-os com MDE derivado da altimetria obtida pelo uso de câmara de pequeno formato. Para verificação dos resultados da segunda análise, foram definidos 9 perfis (Figura 26) para extração de dados de altimetria, localizados em regiões distintas da área de estudos, seguindo prioritariamente as áreas de menor variação temporal de feições, como

rodovias, estradas e caminhos de forma a minimizar interferências nas análises causadas por mudanças no tamanho da vegetação e por atividades antrópicas.



Figura 26 - Perfis utilizados para verificação dos resultados altimétricos do MDE gerado pelo processamento fotogramétrico, utilizando como referência, MDE gerado por processamento de dados do sistema LIDAR.

#### 4.3.7. Experimento 2

Para analisar a relação entre o número de pontos de apoio de campo e a precisão dos MDEs gerados, foram selecionadas coordenadas de 50 pontos de apoio de campo com base nos dados altimétricos LIDAR processados. Para identificação dos pontos, foram utilizados pares estereoscópicos orientados segundo Experimento 1.

Após a seleção das coordenadas e identificação pontos, foram realizados 07 processamentos fotogramétricos independentes, das imagens da câmara de pequeno formato, utilizando diferentes números de pontos de apoio de campo.

O primeiro processamento foi realizado sem pontos de apoio de campo, utilizando apenas as coordenadas das imagens como referência, dadas no sistema de coordenadas terrestre. As coordenadas das imagens foram adquiridas através do receptor GNSS a bordo do microVANT, por meio do posicionamento absoluto por código, cuja precisão posicional é de aproximadamente 15 metros.

Os demais processamentos foram realizados utilizando 05, 10, 20, 30, 40 e 50 pontos de apoio de campo (Figura 27).

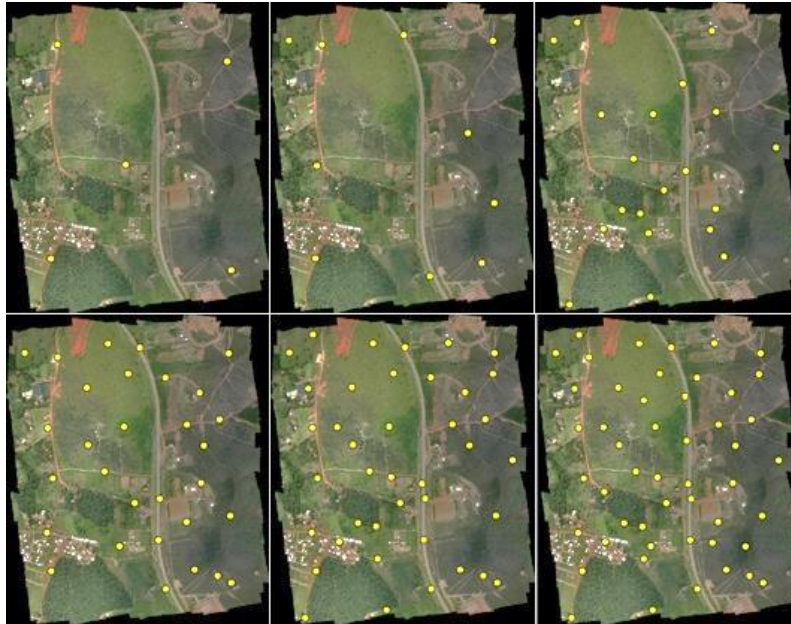


Figura 27 - Distribuição dos pontos de apoio de campo (pontos amarelo na figura) utilizados como referência, selecionados com base nos dados altimétricos LIDAR processados e fotoidentificados utilizando pares estereoscópicos do processamento fotogramétrico das imagens.

#### 4.4. Resultados E Discussões

No Experimento 1, após processamento dos dados dos aerolevantamentos realizados, envolvendo câmara de pequeno formato a bordo do microVANT e sistema LIDAR a bordo de aeronave tripulada, utilizando como referência as coordenadas dos pontos de apoio de campo apresentados na Figura 24, foi possível estimar os  $DQM$ , entre coordenadas planimétricas e altimétricas processadas e de referência, conforme apresentados na Tabela 11.

Verifica-se, na Tabela 11, que o  $DQM$  dos resíduos das coordenadas planimétricas, após o processamento fotogramétrico da câmara *Canon PowerShot S100*, corresponde a 0,260m (3,728 pixels), com precisão planimétrica de 0,319m (4,551) pixels a 95% de confiança.



Tabela 11 - Precisão resultante do processamento de dados dos aerolevantamentos realizados.

Aeronave	microVANT		SÊNECA-II
Câmara	PowerShot S100		ALS60
Unidade	m	pixel	m
<b>GSD</b>	0,070	1,000	-
<b><math>DQM_x</math></b>	0,232	3,314	-
<b><math>DQM_y</math></b>	0,118	1,686	-
<b><math>DQM_{xy}</math></b>	0,260	3,718	-
<b><math>DQM_z</math></b>	0,191	2,729	0,179
<b><math>P_p</math></b>	0,319	4,551	-
<b><math>P_z</math></b>	0,374	5,348	0,352

Na análise altimétrica, percebe-se que o sensor LIDAR *ALS60* apresentou resultados semelhantes aos da câmara *Canon PowerShot S100*, com precisão altimétrica de 0,352m a 95% de confiança. Esta precisão, diferentemente do processo fotogramétrico, está diretamente relacionada à precisão angular do sensor inercial, à precisão posicional dada pelo processamento dos dados provenientes do receptor GNSS a bordo da aeronave e à precisão dos pontos de apoio de campo utilizados como referência terrestre. Além disto, para análise da precisão altimétrica, as coordenadas verticais precisam ser interpoladas para a posição planimétrica do ponto de apoio de campo, o que torna este processo sensível às pequenas variações de relevo do entorno.

Na segunda análise, devido a variação da quantidade de pontos terrestres gerados (nuvem de pontos) após processamento de dados LIDAR *ALS-60* (3,27 pontos/m<sup>2</sup>) e câmara *Canon PowerShot S100* (23 pontos/m<sup>2</sup>), verificou-se a necessidade de geração de MDEs com resolução espacial de 0,5m, de forma a normalizar as informações altimétricas necessárias para análise (Figura 28).

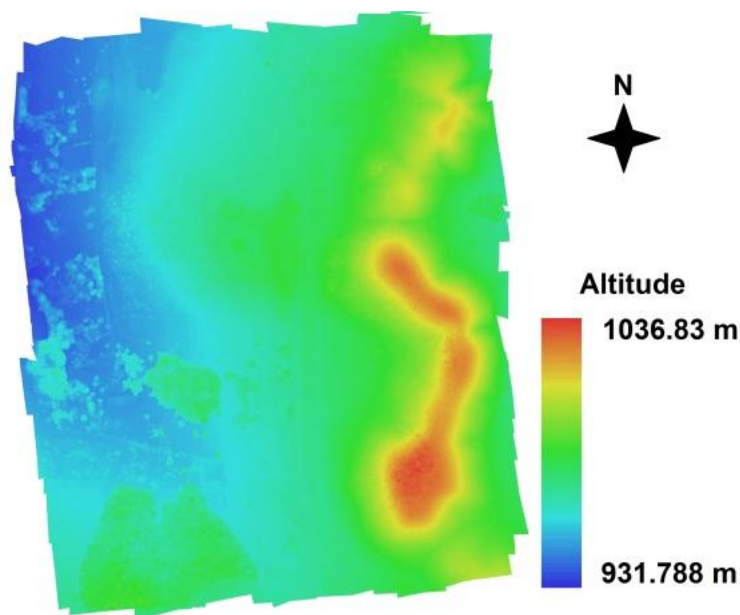


Figura 28 - MDE gerado após processamento dos dados da câmara de pequeno formato a bordo do microVANT.

Há de se considerar, na análise realizada, as características de obtenção de informações por diferentes sensores. No caso de sensores passivos, como os utilizados na fotogrametria, a detecção de informações se dá pela radiação eletromagnética emitida e refletida pela camada mais externa da superfície. Já os sensores ativos, como o LIDAR, possibilita a detecção de diferentes retornos de um mesmo pulso emitido, permitindo obter informações abaixo de folhas e galhos (Figura 29).

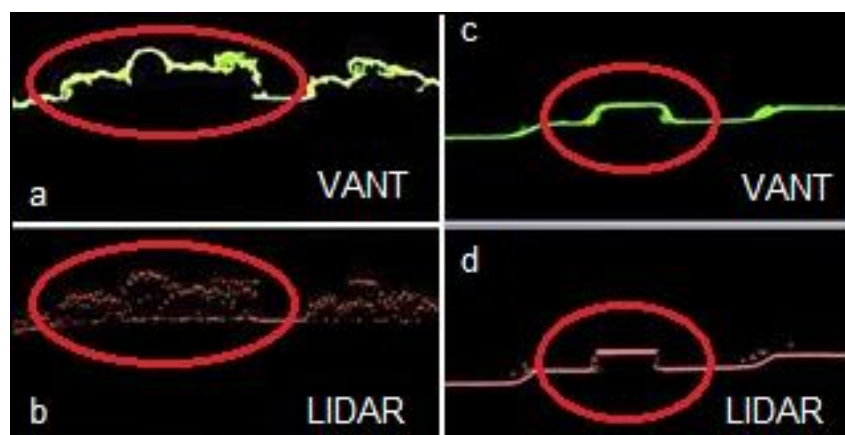


Figura 29 - "a" e "b" representam nuvens de pontos, em perfil, de uma área de mata destacando a possibilidade do LIDAR obter dados abaixo do dossel (a e b). "c" e "d" representam nuvens de pontos, em perfil, com destaque para a representação de uma edificação.

É possível também observar que a nuvem de pontos gerada por LIDAR é capaz de detectar variações altimétricas com ângulos mais acentuados, de maneira mais precisa, como as paredes de edificações (Figuras 29c e 29d). Sendo assim, percebe-se que as nuvens de pontos obtidas a partir de processamento fotogramétrico apresentaram maior suavização angular, representando alguns objetos de maneira menos fiel.

A suavização apresentada na representação dos dados altimétricos, provenientes de nuvens de pontos obtidas a partir do processamento fotogramétrico, pode ser explicada pelo efeito de sombra (Figura 30) que ocorre em algumas áreas. Este efeito reduz, segundo Aber *et al.* (2010), a identificação de pontos e causando lacunas de informação no MDE.

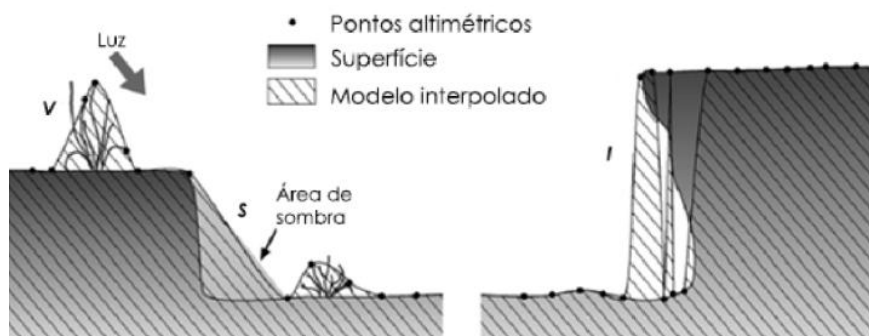


Figura 30 - Representação de erros comuns á utilização de métodos automáticos para criação modelos digitais de elevação. Fonte: Aber et al. (2010).

Na análise do MDE gerado pelos dados provenientes da câmara de pequeno formato, tomando como referência o MDE gerado pelos dados do sistema LIDAR e utilizando as variações dos valores altimétricos obtidos nos 9 perfis selecionados na área de estudos, a amplitude máxima e mínima dos resíduos encontrados foram de 2,211m e -3,014m, respectivamente (Figura 31). Do total de resíduos, 92,26% estão concentrados no intervalo de  $\pm 50$ cm (Figura 32).

Dos resultados de precisão, verifica-se (Tabela 12) um  $DQM_z$  e  $P_z$  total de 0,624m e 1,224m, respectivamente. Estes valores são resultantes dos

resíduos de 8758 pontos identificados no terreno, em 9 perfís analisados, dos quais apresentam diferentes precisões.

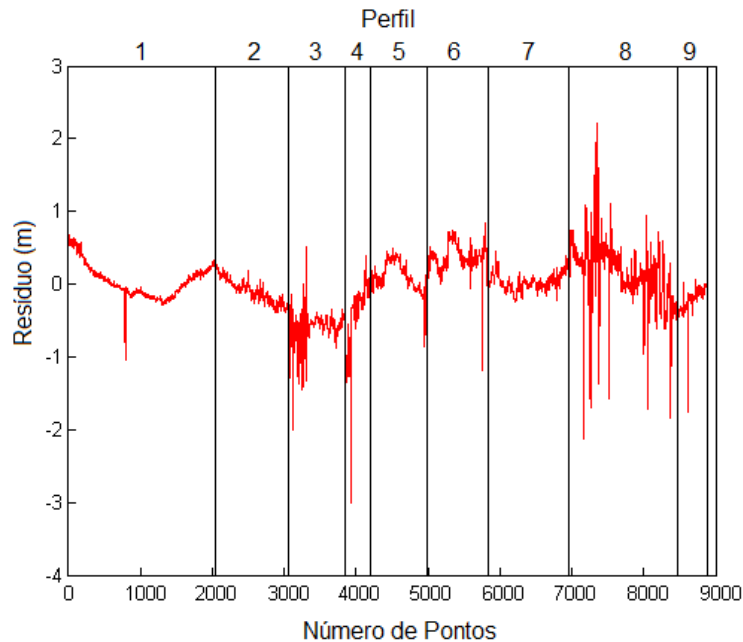


Figura 31 - Resíduos dos pontos identificados em 9 perfís e calculados pela diferença entre os MDEs analisados.

Nota-se na Figura 31 e Tabela 12, que os perfís 3, 4 e 8 apresentaram os maiores resíduos e, conseqüentemente, as menores precisões altimétricas. Após verificação dos perfís indicados, foi observado que os maiores resíduos estão relacionados à presença de vegetação e à ação antrópica. Isto proporciona influência direta nos resultados por causa das diferentes características dos sensores (ativo e passivo), na aquisição de informações de terreno, e pela variação entre os períodos dos aerolevantamentos realizados.

Tabela 12 - Análise de precisão do mde gerado utilizando dados do processamento fotogramétrico, tomando como referência dados LIDAR.

Perfil	Número de pontos	$DQM_z$	$P_z$
1	2001	0,207	0,405
2	1046	0,266	0,521
3	772	0,715	1,402
4	447	0,707	1,386
5	688	0,199	0,390
6	807	0,317	0,622
7	1160	0,188	0,368
8	1403	1,314	2,576
9	434	0,379	0,742
01 a 09	8758	0,624	1,224

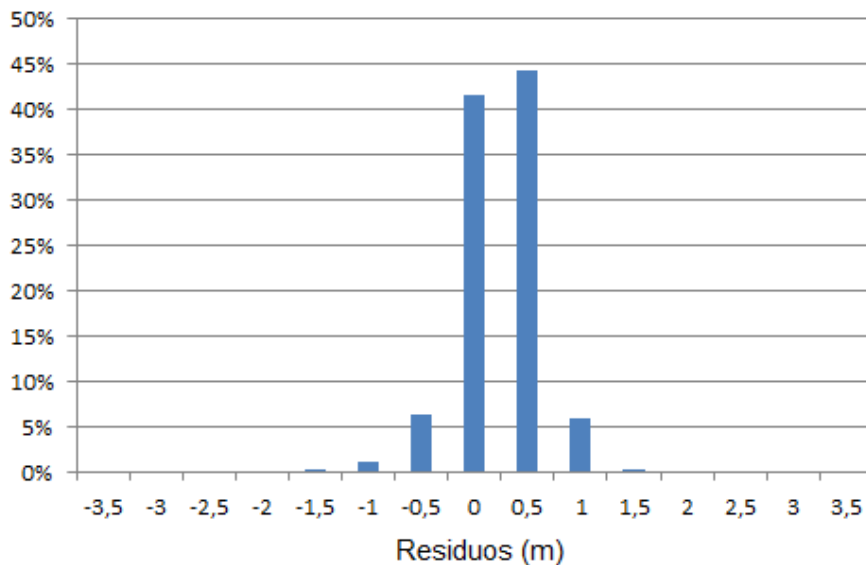


Figura 32 - Variação dos resíduos dos pontos identificados em 9 perfis e calculados pela diferença entre os MDEs analisados.

A exemplo, no perfil 8, traçado em um caminho de aproximadamente 1 metro de largura em meio à vegetação, é possível identificar (Figuras 33 e 34) que a vegetação cobre o caminho nos mesmos locais que estão situados os picos no perfil. Além disto, há também a presença de efeito de sombra,

conforme Aber *et al.* (2010), que contribui para a suavização na geração do MDE.

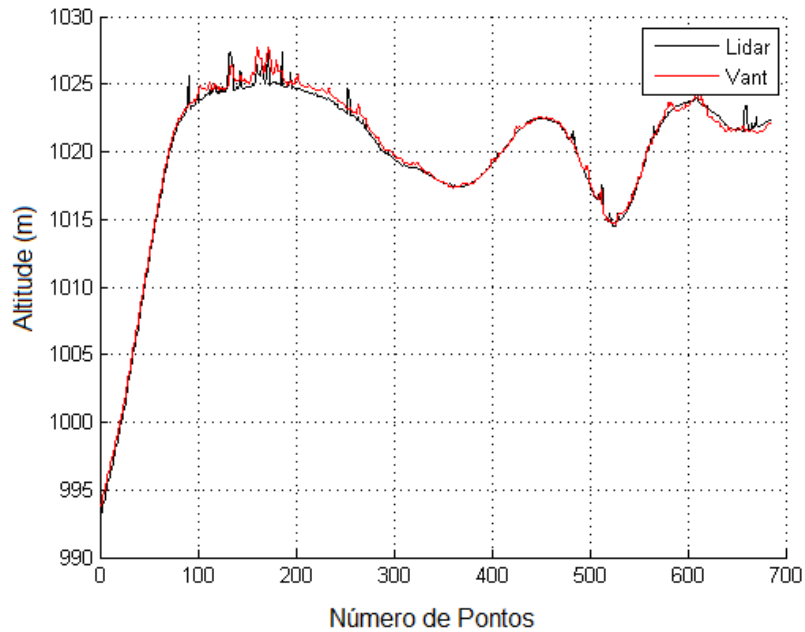


Figura 33 - Perfil 8, com picos indicando a influência de vegetação.



Figura 34 - Parte do perfil 8, com destaque (círculos vermelhos) para áreas onde a vegetação sobrepõe o caminho utilizado como referencia para o perfil.

No perfil 3, traçado em estrada não pavimentada, pode-se verificar a alteração do ambiente devido à ações antrópicas realizadas entre os períodos dos aerolevantamentos (Figura 35).

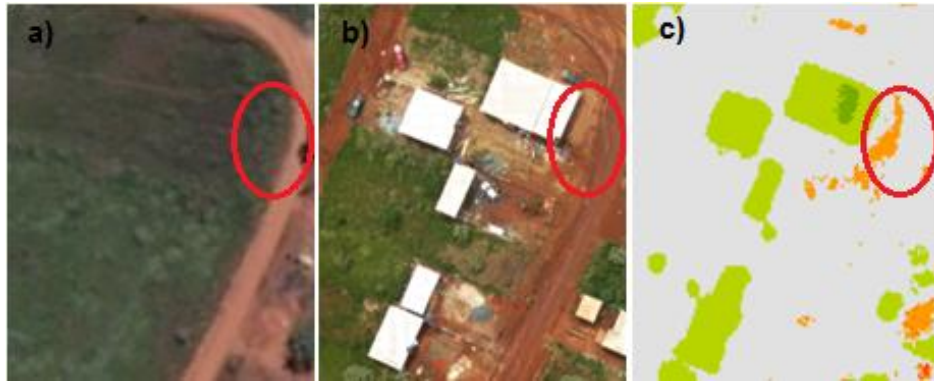


Figura 35 - Parte do perfil 3, com destaque (círculos vermelhos) para uma área onde houve a incidência de ações antrópicas entre os períodos dos aerolevantamentos realizados. “a” representa o período do aerolevantamento LIDAR, “b” o período do aerolevantamento microVANT e “c” diferença entre os MDEs gerados pelo processamento de dados da câmara de pequeno formato e LIDAR.

No Experimento 2, após os processamentos fotogramétricos das imagens da câmara de pequeno formato, utilizando 00, 05, 10, 20, 30, 40 e 50 pontos de apoio (Figura 27), os MDEs gerados apresentaram variações significativas nos resíduos e nas precisões (Tabelas 13 e 14) quando comparados com o MDE tomado como referência. Os resultados foram definidos para os 9 perfis utilizados no trabalho (Figura 26).

Tabela 13 - Amplitudes máxima e mínima dos resíduos provenientes do processamento fotogramétrico, tomando dados LIDAR como referência.

Perfil	Nº de Pontos de Apoio de Campo						
	0	5	10	20	30	40	50
1	14,770	0,307	0,884	0,226	0,281	0,265	0,249
	4,390	-1,623	-0,484	-1,054	-0,801	-0,719	-0,755
2	28,757	-0,235	0,329	0,225	0,116	0,177	0,291
	13,894	-2,856	-1,652	-1,912	-1,936	-1,834	-1,697
3	17,257	2,022	3,364	3,504	2,917	3,521	3,359
	11,529	-3,571	-2,321	-1,243	-2,260	-2,621	-2,384
4	11,303	0,436	2,012	1,248	1,480	1,610	0,566
	6,236	-4,072	-2,897	-3,499	-3,496	-3,245	-3,414
5	14,457	0,519	0,620	0,469	0,095	0,122	0,097
	8,039	-1,307	-0,756	-1,206	-1,360	-1,354	-1,398
6	13,320	0,601	0,652	0,676	0,676	0,335	0,302
	7,584	-0,915	-0,975	-0,827	-0,827	-1,283	-1,240
7	16,348	0,248	0,913	0,693	0,360	0,403	1,485
	6,963	-1,616	-0,483	-1,038	-0,846	-0,733	-0,792
8	10,442	2,509	2,706	3,285	2,716	2,760	2,762
	-0,220	-3,030	-2,859	-2,482	-2,846	-2,924	-2,854
9	16,350	0,277	1,307	0,640	0,576	0,601	0,594
	12,488	-1,607	-0,609	-1,312	-1,368	-1,424	-1,337

Tabela 14 - Precisões no processamento fotogramétrico, tomando dados LIDAR como referência.

Perfil	Nº de Pontos de Apoio de Campo						
	0	5	10	20	30	40	50
1	23,247	1,378	0,969	0,786	0,612	0,544	0,595
2	34,325	1,848	0,335	0,548	0,582	0,483	0,466
3	25,847	1,646	1,582	1,808	1,456	1,558	1,642
4	17,177	2,480	1,095	1,588	1,451	1,224	1,347
5	23,252	0,481	0,544	0,398	0,680	0,688	0,731
6	19,685	0,503	0,630	0,463	0,463	0,596	0,595
7	23,195	1,097	1,024	0,564	0,471	0,372	0,435
8	11,002	1,401	1,371	2,190	1,414	1,409	1,448
9	28,381	0,787	1,233	0,333	0,345	0,328	0,311
<b>1 a 9</b>	<b>23,386</b>	<b>1,393</b>	<b>1,041</b>	<b>1,201</b>	<b>0,912</b>	<b>0,893</b>	<b>0,937</b>



Analisando a Figura 36 e Tabelas 13 e 14, é possível observar que para a área de estudo, a utilização de maior quantidade de pontos de apoio representou melhoria na precisão, a 95% de confiança, na ordem de 35%, equivalente a 0,50 m (diferença entre modelos utilizando 40 e 5 GCP).

Ainda de acordo com os resultados apresentados na Figura 36 e Tabelas 13 e 14, verifica-se que a ausência de pontos de apoio associada à baixa precisão dos sensores a bordo da aeronave não possibilitam a geração de MDE com precisão controlada.

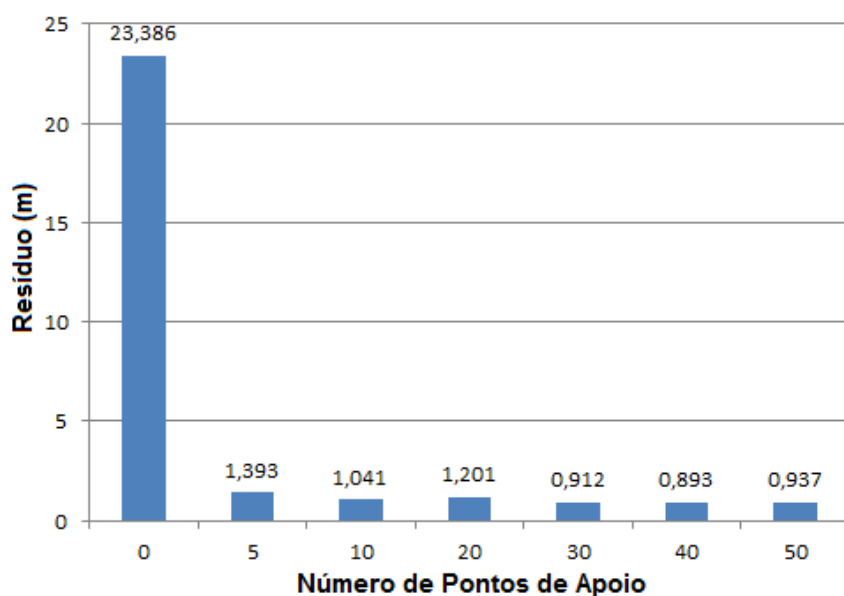


Figura 36 - Precisões estimadas com diferentes números de pontos de apoio.

#### 4.5. Conclusões

Diante dos resíduos e precisões mostrados no Experimento 1, considerando as configurações de obtenção de dados dos aerolevantamentos, sugere-se que o microVANT e a câmara de pequeno formato utilizados neste trabalho possibilitam a geração de MDEs compatíveis com os gerados por processamento LIDAR.

As principais divergências encontradas entre os MDEs gerados encontram-se no processo de aquisição dos dados, explicado pelas

características dos sensores (passivo e ativo) utilizados, e nas variações temporais do ambiente, explicado pela alta resolução dos dados analisados e a consequente sensibilidade dos MDEs em considerar as pequenas variações. Isto foi verificado nas amplitudes máximas e mínimas dos resíduos.

Verificou-se, no Experimento 2, que o processamento fotogramétrico com a câmara de pequeno formato a bordo do microVANT utilizados são muito dependentes do número de pontos de apoio em campo. As precisões aumentaram cerca de 35%, equivalente a 0,50 m, após aumentar a quantidade de pontos utilizados como referência.

Cabe ressaltar que MDEs não possuem representação topográfica como os MDS (Modelos Digitais de Superfície) e, portanto, não devem ser usados para tais fins. A obtenção de MDS a partir de MDE é possível através da classificação, filtragem e interpolação de nuvens de pontos. Portanto, recomenda-se a realização de estudos futuros para avaliar a precisão de MDS obtidos com esta metodologia.

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de VANT de pequeno porte para a realização de aerolevantamentos não substitui os satélites e aviões tripulados com câmaras fotogramétricas e sensores ativos para mapeamentos de grandes áreas. O micro VANT acoplado com câmaras de pequeno formato surge como mais uma opção para aquisição de dados de sensoriamento remoto.

O atual estágio de expansão do uso dessas plataformas aliado a grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento no setor, sugere que em breve aparecerão novos sensores e equipamentos otimizados para VANT. O uso de sistemas de navegação mais precisos poderá aumentar ainda mais a qualidade dos produtos gerados por estas plataformas.

O objetivo principal desta pesquisa de desenvolver uma metodologia para coleta de dados a partir de VANT com a qualidade e precisão necessárias para a realização de produtos cartográficos foi atingido. Os dados obtidos nesta pesquisa permitiram a confecção de cartas planimétricas com escalas entre 1:200 e 1:1.500, mantendo a classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica. Os dados de altimetria permitiram a extração de curvas de nível com equidistância entre 0,50 e 2 metros. Conclui-se com isto que produtos gerados a partir destas plataformas e, conforme a metodologia usada nesta pesquisa, podem ser usados em projetos básicos e executivos.

A calibração de câmara de pequeno formato apresentou diferenças nos resultados ao utilizar parâmetros adquiridos em áreas distintas. Para evitar a presença de erros sistemáticos recomenda-se que não sejam fixados os parâmetros pré-calibrados da câmara. Os mesmos devem ser utilizados apenas como referencia permitindo que o algoritmo refaça a calibração interior utilizando dados coletados nas mesmas condições técnicas e ambientais da aquisição das imagens.

As nuvens de pontos obtidas com câmara de pequeno formato se mostraram bem consistentes quando comparadas com nuvens obtidas utilizando sistemas LIDAR. Os modelos processados a partir da nuvem de pontos do VANT apresentaram resolução espacial de 15 cm/pixel e erros submétricos. Acredita-se que a utilização de dados obtidos na mesma data e

sob as mesmas condições permitiria erros menores nas análises de precisão durante o segundo experimento.

A obtenção de resultados precisos com o micro VANT se mostrou dependente dos pontos de apoio em campo devido aos maiores ângulos de aquisição das imagens e à baixa precisão das coordenadas das imagens obtidas por receptor GPS de navegação. Por isso os dados que foram processados sem pontos de apoio apresentaram baixa precisão tanto pra planimetria como para a altimetria. Recomenda-se que estes dados sejam utilizados apenas para fins que não necessitem precisão.

Indica-se a realização de pesquisas futuras utilizando métodos de georreferenciamento direto para aumento da precisão dos resultados. Embarcar sistemas RTK para correção das coordenadas das imagens em tempo real é uma possível solução. A miniaturização dos equipamentos permitirá que sejam embarcados sistemas LIDAR em micro VANT e pesquisas poderão ser realizadas para a avaliação das potencialidades e limitações da congruência destas duas tecnologias.

## **BIBLIOGRAFIA**

ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. B. Small-Format Aerial Photography. Principles, techniques and geoscience applications. Elsevier, Amsterdam. 268 p.. 2010.

AGISOFT. Multi-view 3D reconstruction software. Disponível em <<http://www.agisoft.ru>>. Acesso: 10 novembro de 2013.

BENDEA, H. F.; CHIABRANDO, F.; TONOLO, F. G.; MARENCHINO, D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site, In: XXI International Symposium, Athens, Greece. 2007. Anais. 2007

BENTO, M. D. F. Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. Inside GNSS, v. 3, n. 1, p. 54-61, jan. 2008.

BRASIL. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 - Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, 1984.

BROWN, D. C. Close-range camera calibration. Ibid. 37(8): 855–866, 1971.

CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A.. 2007. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 2007. Anais, 4, p. 3645-3652. 2007.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W. D.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(2), p. 218-226, 2010.

COELHO, L.; BRITO, J. N. Fotogrametria digital. Ed. UERJ. 2007. 196 p.

CORONADO, P. L.; STETINA, F.; JACOB, D. New technologies to support NASA's Mission to Planet Earth satellite remote sensing product validation: use of an unmanned auto piloted vehicle (UAV) as a platform to conduct remote sensing. In: Proceedings of SPIE, 1998. Anais. p. 3366, 38-51. 1998.

COSTA, G. C.; DA SILVA, D. C. Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2012. Anais. 2014.

CRAMER, M. Performance of medium format digital aerial sensor systems. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 35, B5, p. 769-774, 2004.

CUARTERO, A.; FELICÍSIMO, A. M; ARIZA, F. J.. Accuracy of DEM generation from TERRA ASTER stereo data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35(B2), p. 559–563, 2004.

DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; MITSHITA, E. A. Calibração em serviço de câmara digital de baixo custo com o uso de pontos de apoio altimétrico. Curitiba. Boletim de Ciências. Geodésicas, v. 18, n. 2, p. 225-241, 2012.

EISENBEISS, H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. In: International Workshop on Processing and visualization using high resolution imagery. 2004. Anais. p. 18-20.2004

ESPOSITO, F.; ACCARDO, D.; RUFINO, G.; MOCCIA, A. 1st: a Fully Autonomous UAV Aimed at Monitoring Environmental Risks. Italian Journal on Composites and Nanotechnologies-Materials, Aerospace, Special Technologies, v. 2, n. 2, p. 61-69, 2006.

EVERAERTS, J. The use of UAVs for remote sensing and mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China. 2008.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G.. 2001. Modelagem numérica de terreno. AMV Análise Espacial de Dados Geográficos. INPE Disponível em:< <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>. Acesso em Fevereiro, 2014.

FELICÍSIMO, A. M. Modelos digitais del terreno. Oviedo: Pentalfa. 1994

FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; MAROTTA, G. S.; MENEZES, P. H. B. J. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte desedimentos no Lago Paranoá. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, 2013. Anais. p. 9308-9315, 2013.

FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; MAROTTA, G. S.; MENEZES, P. H. B. J. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do XVI SBSR, 2013. p. 9308-9315.

FOWLER, R. A. The lowdown on LIDAR. Earth Observation Magazine, 9(3), 5. 2000.

FRASER, C. S. Digital Camera Self-Calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 52, p. 149-159, 1997.

GREENWALT, C. R.; SCHULTZ, M. E. Principles of Error Theory and Cartographic Applications. In: ACIC Techinal Report No. 96, Aeronautical Chart and Information Center, U. S. Air Force, St. Louis, Mo., 89 p., 1968.

HAALA, N.; HASTEDT, H.; WOLF, K.; RESSL, C.; BALTRUSCH, S. Digital Photogrammetric Camera Evaluation - Generation of Digital Elevation Models. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2, p. 99-116. 2010.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MORGAN, M. F. Quantitative measures for the evaluation of camera stability. *Optical Engineering*, v. 44, n. 03, 2005.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MITISHITA, E. A.; GHANMA, M.; KIM, E. Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different georeferencing techniques. *The Photogrammetric Record*, v. 21, n. 113, p. 29-43, 2006.

HAARBRINK, R. B.; EISENBEISS, H.. Accurate DSM production from unmanned helicopter systems. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 37, p. 1259-1264. 2008.

HORCHER, A.; VISSER, R. J. M. Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring. In: Council on Forest Engineering Annual Meeting, Hot Springs (AR), USA. 2004. Anais. 2004.

IBGE. Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS. Manual técnico, 2008. Disponível em [ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/recom\\_gps\\_internet.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/recom_gps_internet.pdf). Acesso 27 agosto 2014.

KATZENBEISSER, ROLF. About the calibration of lidar sensors. *ISPRS Workshop*. 2003.

LÄBE, T.; FÖRSTNER, W. Geometric Stability of low-cost Digital Consumer Cameras. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 35, n. 5, p. 528-535, 2004.



LOHMANN, P.; KOCH, A. Quality assessment of laser-scanner-data. In ISPRS workshop: Sensors and mapping from space, Hannover, Germany. 1999.

LUCIEER, A.; ROBINSON, S.; TURNER, D.; STEVE, HA.; KELCEY, J.. 2012. Using a Micro-UAV for ultra-high resolution multi-sensor observations of Antarctic moss beds. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012.

MARQUES, R. B. Utilização de VANT no Auxílio à Defesa de Superfície de Base Aérea Expedicionária. In: IX Simpósio de Guerra Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2007. Anais. 4 p. 2007.

MAROTTA, G. S.; CALIJURI M. L. Avaliação da Qualidade Posicional Planimétrica em Planta Cadastral Utilizando Diferentes Processos na Extração de Feições. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, 2006. Anais. 2006.

MATOS, A. C. O. C. Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia física na América do Sul. Tese de Doutorado. EPUSP, Universidade de São Paulo, 2005.

MAUNE, D. F. Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. ASPRS (The Imaging & Geospatial Information Society), 539 p., 2001.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto. 1. ed. Brasília: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2012. v. 1. 266p .

MILLER, C. L., & LAFLAMME, R. A. *The Digital Terrain Model:- Theory & Application*. MIT Photogrammetry Laboratory. 1958

MITISHITA, E.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. L. Small-format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation. In: MMT09 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, PresidentePrudente, 2009. Anais. 2009.

MITISHITA, E.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. L.; MARTINS, M. Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration. In: Canadian Geomatics Conference, Calgary, Alberta, 2010. Anais. 2010.

MORAES, E. C. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 2002, 23p.

MOURA, L. Z.; BIAS, E. D. S.; BRITES, R.. Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. Revista Brasileira de Cartografia, 1(66/1). 2014.

MONIWA, H. Analytical Photogrammetric System with Self-Calibration and its Applications. Ph.d. Thesis, Department of Surveying Engineering. UNB, 1977.

NEBIKER, S.; ANNEN, A.; SCHERRER, M.; OESCH, D. A Light-Weight Multispectral Sensor for micro UAV – Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. v. XXXVII, B1, 2008.

PACHECO, A. P.; CENTENO, J. A. S.; ASSUNÇÃO, M. G. T. A.; BOTELHO, M. F. Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT. Boletim de Ciências Geodésicas, 17(3), p. 417-438. 2011.

PATIAS, P.; SAATSOGLOU-PALIADELI, C.; GEORGOULA, O.; PATERAKI, M.; STAMNAS, A.; KYRIAKOU, N. Photogrammetric documentation and digital representation of the Macedonian palace in Vergina-Aegeae, In: CIPA, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2007. Anais. 2007.

PEGORARO, A. J.; PHILIPS, J. W. Quadrirotores / Microdrone como Portadores de Geosensores aplicados ao Cadastro Territorial. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, 2011. Anais. p. 8461. 2011.

PREOSCK, R. E. Otimização da Restituição Fotogramétrica Digital Urbana: Relação Escala da Fotografia e a Resolução Geométrica da Imagem. Dissertação de Mestrado. CPGCG, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2006.

REIDELSTUERZ, P.; LINK, J.; GRAEFF, S.; CLAUPEIN, W. UAV (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13 Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming, In: Bornimer Agrartechnische Berichte. Anais. 61, 75-84. 2007.

REMONDINO, F.; BARAZZETTI, L.; NEX, F.; SCAIONI, M.; SARAZZI, D.. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(1), C22. 2011.

ROCK, G.; RIES, J. B.; UDELHOVEN, T. Sensitivity Analysis of UAV-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011. Anais. v. XXXVIII-1/C22, p. 70 – 73, 2011.

ROIG. H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES, P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico

georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, 2013. Anais. 2013.

RUY, R. S.; TOMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; MENOSSI, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. Boletim de Ciências Geodésicas. v. 14 n. 4, p. 571-587, 2008.

SARRIS, Z.; ATLAS, S.. Survey of UAV applications in civil markets. In IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation. (p. 11). 2001.

SAUERBIER, M.; SIEGRIST, E.; EISENBEISS, H.; DEMIR, N. The practical application of UAV-based photogrammetry under economic aspects. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38, 1. 2011.

SHAHBAZI, M.; HOMAYOUNI, S.; SAADATSERESHT, M.; SATTARI, M. Range Camera Self-Calibration Based on Integrated Bundle Adjustment via Joint Setup with a 2D Digital Camera. Sensors. 11, p. 8721-8740, 2011.

SIBSON, R. A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In: Interpolating multivariate data, John Wiley & Sons, New York, p. 21-36, 1981.

STEFANIK, K. V.; GASSAWAY, J. C.; KOCHERSBERGER, K.; ABBOTT, A. L. UAV-Based Stereo Vision for Rapid Aerial Terrain Mapping. GIScience & Remote Sensing, 48:1, 24-49, 2011.

SUGIURA, R., NOGUCHI, N.; ISHII, K. Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter, In: Biosystems Engineering, 90, 4, 369–379, 2005.

TEAL GROUP, 2011. Teal Group's 2011 Market Analysis.

TERRASENSE, 2014. Soluções em Mapeamento. Disponível em: <<http://www.terrasense.com.br>>, acessado em 2014 .

VOGLER, A.; EISENBEISS, H.; AULINGER-LEIPNER, I.; STAMP, P. Impact of topography on cross-pollination in maize (*Zea mays* L.). In: European Journal of Agronomy, 31, pp. 99-102. 2009

WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. Photogrammetric Record, USA, v. 22, n. 118, p. 121-134, 2007.

WOLF, P.; DEWITT, B.; Wilkinson, B. Elements of Photogrammetry: with applications in GIS (Vol. 3). New York: McGraw-Hill. 2000.