



ADILSON BERVEGLIERI

**LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE PONTOS DE CONTROLE EM
IMAGENS AÉREAS BASEADA EM CENAS TERRESTRES VERTICAIS**



Presidente Prudente

2014

ADILSON BERVEGLIERI

LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE PONTOS DE CONTROLE EM
IMAGENS AÉREAS BASEADA EM CENAS TERRESTRES VERTICAIS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia — Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas. Área de concentração em aquisição, análise e representação de informações espaciais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio M. G. Tommaselli

Presidente Prudente
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

B464L Berveglieri, Adilson.
Localização automática de pontos de controle em imagens aéreas
baseada em cenas terrestres verticais / Adilson Berveglieri. - Presidente
Prudente : [s.n], 2014
148 f.

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Orientação exterior. 3. Correspondência de imagens.
4. Fototriangulação. I. Berveglieri, Adilson. II. Tommaselli, Antonio Maria
Garcia. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e
Tecnologia. IV. Título.

BANCA EXAMINADORA




Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
(Orientador)




Prof. Dr. MAURICIO GALO
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO DA SILVA
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. IRINEU DA SILVA
(USP)



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA
(UFPr)



ADILSON BERVEGLIERI

Presidente Prudente (SP), 24 de outubro de 2014.

Resultado: APROVADO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – processo 2010/16954-5) que financiou o desenvolvimento desta pesquisa por meio da concessão de bolsa de estudos durante todo o período;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e à Faculdade de Ciências e Tecnologia por proporcionar as condições técnicas e de instalações necessárias ao desenvolvimento da pesquisa;

Às empresas de aerolevante Engemap e Sensormap, pela disponibilidade das imagens aéreas e fornecimento de um operador para medição de pontos;

Ao Professor Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela orientação tão precisa e atenciosa e, sobretudo, pela amizade e confiança;

Aos amigos do grupo de pesquisa que sempre ajudaram nos experimentos ou em trabalhos de campo: José Marcato Junior, Sérgio Leandro, Vander de Freitas, Carlos Rodrigo, Mariana Campos, Henrique Cândido, Raquel Alves de Oliveira e, em especial, ao Marcus Moraes pelo auxílio diretamente prestado para o desenvolvimento de todo o sistema implementado;

Aos amigos do PPGCC, pelas ideias compartilhadas, conversas e confraternizações, que enriqueceram o convívio em equipe;

À minha família pela educação formadora de meu caráter, apoio e incentivo para superar as dificuldades;

A todos um sincero obrigado.

RESUMO

Os pontos de controle são fundamentais nos processos de orientação de imagens. Mesmo com o desenvolvimento e consolidação das técnicas de levantamento aéreo pela integração de Sistemas de Posicionamento por Satélites (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) e sistema inercial, que possibilitam a orientação direta do sensor, pontos de controle são necessários para corrigir erros sistemáticos e avaliar a confiabilidade e a acurácia dos dados. A localização desses pontos de controle nas imagens ainda é uma tarefa realizada por um operador, sendo uma fonte adicional de erros devido às incertezas na identificação visual. Assim, este trabalho propõe um fluxo automático para obter coordenadas de pontos de controle e localizá-las nas imagens aéreas com precisão subpixel. A abordagem baseia-se em cenas terrestres verticais de áreas com características distinguíveis, contendo um ponto levantado por receptor GNSS (como um ponto de controle). Essas cenas terrestres são usadas na correspondência com janelas em imagens aéreas para transferir o ponto levantado. Algoritmos de correspondência de imagem baseada em área e em características são aplicados nessa tarefa, além de um posterior refinamento adaptativo por mínimos quadrados. Para realizar o fluxo automático, desenvolveu-se uma técnica de coleta de imagens terrestres na forma necessária. Além dessa técnica, outras foram desenvolvidas para: preparar a cena terrestre de controle com retificação e ortoretificação; localizar o ponto de controle em janela de busca na imagem aérea e minimizar as diferenças na correspondência entre imagens terrestre e aérea, definindo melhor a posição subpixel do ponto. Vários experimentos avaliaram a viabilidade e a acurácia alcançada com as técnicas propostas usando ajustamento por feixes de raios em modelos e blocos de imagens. A análise dos resultados baseou-se nas discrepâncias e resíduos nos pontos de controle e de verificação. Como resultado, a localização automática dos pontos de controle nas imagens aéreas permitiu atingir a acurácia de aproximadamente $1/5$ GSD (*Ground Sample Distance* – tamanho do pixel do terreno) da imagem aérea em planimetria e 1 GSD em elevação, na avaliação realizada em pontos de verificação no ajustamento por feixes de raios. Estes resultados alcançados com a medição automática foram mais acurados em comparação com resultados obtidos com medições manuais. Assim, a abordagem proposta demonstrou que as cenas terrestres podem ser usadas como primitivas de controle de imagens aéreas. Além disso, o trabalho desenvolvido proporcionou uma técnica eficiente de coleta de imagens terrestres, que pode ser usada para outras aplicações fotogramétricas.

Palavras-chave: Fotogrametria. Orientação exterior. Correspondência de imagens. Fototriangulação.

ABSTRACT

Control field is essential in image orientation procedures and is based on the determination of ground coordinates from distinguishable features. Aerial survey techniques have evolved with the integration of Global Navigation Satellite System (GNSS) and inertial systems, enabling Direct Sensor Orientation (DSO). However, even with the development and consolidation of these techniques, Ground Control Points (GCPs) are still needed to correct for systematic errors and to assess the reliability and accuracy of the orientation data. The location of GCPs over images is still a task performed by an operator, which is an additional source of errors due to the uncertainties in the visual identification. Thus, an automatic flow is proposed in this work to obtain GCP coordinates and locate them in aerial images with sub-pixel accuracy. The approach is based on vertical ground scenes from distinguishable feature areas with a point surveyed by GNSS receiver (like a GCP). These ground scenes are matched with aerial image patches to transfer surveyed points. Feature- and area-based matching algorithms are applied for this task as well as a subsequent adaptive refinement by least squares. To perform the automatic flow, a technique to acquire ground images as required was designed. In addition, other techniques were developed to: prepare control scenes by rectification and orthorectification; locate GCPs into search window in aerial images, and minimize the differences between matched image patches, improving the sub-pixel location of the match point. Different experiments assessed the feasibility and accuracy achieved with the proposed techniques using bundle adjustment in stereo-models and image blocks. The analysis of results was based on discrepancies and residuals at GPCs and independent checkpoints. As a result, the automatic location of GCPs in the aerial images allowed achieving an accuracy of approximately 1/5 GSD (Ground Sample Distance) of the aerial image in planimetry and 1 GSD in elevation, in the assessment performed at checkpoints in the bundle adjustment. These results achieved with the automatic measurement were also more accurate in comparison to the results obtained with manual measurements. Thus, the proposed approach showed that ground scenes can be used as control primitives for aerial images. Furthermore, the work provided an efficient technique for collecting terrestrial images, which can be used for other photogrammetric applications.

Keywords: Photogrammetry. Exterior orientation. Image matching. Triangulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de geometria de sensores.....	22
Figura 2 – Esquema de câmaras em sistema de observação omnidirecional.	23
Figura 3 – Lente <i>fisheye</i>	24
Figura 4 – Orientação direta do sensor.....	27
Figura 5 – Orientação exterior corrigida dos parâmetros <i>shift</i> e <i>drift</i>	29
Figura 6 – Ilustração do princípio de reconstrução de objeto e correspondência de imagem.	40
Figura 7 – Princípio da correspondência de imagens.....	42
Figura 8 – Correspondência entre subimagens.....	44
Figura 9 – Sequência de ajustes entre um <i>template</i> e sua correspondente janela de busca.....	48
Figura 10 – Importantes operadores desenvolvidos nas últimas décadas.	53
Figura 11 – Oitava composta por imagens filtradas e imagens DoG.....	56
Figura 12 – Imagens usando três oitavas.....	58
Figura 13 – Exemplo de construção de um vetor descritor (tamanho 128).....	61
Figura 14 – Vetores descritores de 111 pontos-chave.....	62
Figura 15 – Pirâmide de imagens com diferentes níveis de resolução.....	65
Figura 16 – Dispositivos produzidos para adquirir cenas terrestres.....	68
Figura 17 – Correspondência de imagens terrestre-aérea.....	69
Figura 18 – Fluxograma da abordagem.....	70
Figura 19 – Apoio de campo.	74
Figura 20 – Levantamento com a placa de controle.....	75
Figura 21 – Técnica de aquisição de imagens para ortorretificação.....	76
Figura 22 – Exemplo de imagem <i>fisheye</i>	77
Figura 23 – Modelo multiescala.	79
Figura 24 – Técnica de aquisição de imagens para retificação.	81
Figura 25 – Posições utilizadas para o cálculo da propagação de erro na imagem.	84
Figura 26 – Redução do espaço de busca.....	86
Figura 27 – Correspondência SIFT entre imagens multiescalas.	87
Figura 28 – <i>Majority voting</i>	88
Figura 29 – Exemplo de refinamento (recorte com 29×29 pixels).....	91
Figura 30 – Configuração do tripleto de imagens aéreas.	95
Figura 31 – Transferência automática de um ponto de controle pelo LPS.....	96

Figura 32 – REQMs dos pontos de controle (de 4 a 7) no espaço objeto	97
Figura 33 – Discrepâncias nas coordenadas planimétricas no espaço objeto.....	98
Figura 34 – REQMs dos resíduos de imagem nos pontos de controle.	98
Figura 35 – Geometria do bloco com 83 imagens.....	101
Figura 36 – Exemplo de um padrão repetitivo	104
Figura 37 – REQMs resultantes dos pontos de controle e verificação no espaço objeto.	106
Figura 38 – Campo de calibração com alvos Aruco.....	108
Figura 39 – Área de avaliação com oito pontos de controle sobre a placa.....	111
Figura 40 – Mapa de agulhas no campo de calibração.....	113
Figura 41 – Gráfico produzido pela comparação dos REQMs em relação a distância radial.	113
Figura 42 – Pontos de enlace entre as três imagens do modelo com a placa de controle.	115
Figura 43 – MDTs das áreas com tamanho aproximado de 5×5 m.....	117
Figura 44 – Geometria da faixa (3 modelos).....	120
Figura 45 – Experimento I.....	123
Figura 46 – Experimento II	124
Figura 47 – Experimento III	126
Figura 48 – Geometria do bloco com seis pontos de controle e quatro de verificação.	128
Figura 49 – REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto.....	130
Figura 50 – Mapa de agulhas para as discrepâncias planimétricas.	131
Figura 51 – Bloco de imagens usando dados de orientação direta.....	132
Figura 52 – Orientação indireta.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da propagação de erros na imagem	85
Tabela 2 – Medição monoscópica com transferência de pontos.	99
Tabela 3 – Medição estereoscópica.	99
Tabela 4 – Medição automática.	100
Tabela 5 – REQMs de oito pontos de controle e cinco pontos de verificação	105
Tabela 6 – Percentual de melhoria da técnica automática.....	107
Tabela 7 – POIs estimados pelo processo de calibração.	109
Tabela 8 – REQM nos pontos de verificação resultante do ajustamento do modelo.	112
Tabela 9 – Resultado das discrepâncias altimétricas.....	117
Tabela 10 – REQMs nos pontos após o ajustamento por feixe de raios no espaço imagem..	122
Tabela 11 – REQMs do ajustamento no espaço imagem.	124
Tabela 12 – REQMs do ajustamento no espaço imagem.	125
Tabela 13 – Dados resultantes do ajustamento no espaço imagem.	129
Tabela 14 – Diferença entre os pontos de controle medidos e calculados por intersecção....	129
Tabela 15 – Valor médio dos desvios-padrão estimados dos pontos de controle.	130
Tabela 16 – REQMs do ajustamento no espaço imagem.	132
Tabela 17 – REQMs do ajustamento no espaço imagem na orientação indireta.	133
Tabela 18 – Percentual de melhoria das técnicas automáticas de cenas de controle.....	135

LISTA DE SIGLAS

ACM = *Aluminium composite material*
AGE = *Automatic ground control point extraction*
AMOR = *Automatic model-based orientation*
CCD = *Charge-coupled device*
CMC = *Calibration multi-camera*
CMOS = *Complementary metal-oxide-semiconductor*
CP = *Centro perspectivo*
DLT = *Direct linear transformation*
DoG = *Difference of gaussian*
DSO = *Direct Sensor Orientation*
FAST = *Features from accelerated segment test*
FCT = *Faculdade de Ciências e Tecnologia*
GCC = *Ground control chip*
GLOH = *Gradient location and orientation histogram*
GNSS = *Global Navigation Satellite System*
GSD = *Ground sample distance*
HOG = *Histogram of oriented gradients*
IFOV = *Instantaneous field of view*
IMU = *Inertial measurement unit*
ISO = *Integrated sensor orientation*
LPS = *Leica photogrammetric suite*
LSM = *Least squares matching*
MDE = *Modelo digital de elevação*
MDT = *Modelo digital de terreno*
POE = *Parâmetro de orientação exterior*
POI = *Parâmetro de orientação interior*
RANSAC = *Random sample consensus*
REQM = *Raiz do erro quadrático médio*
SIFT = *Scale-invariant feature transform*
SURF = *Speeded up robust features*
SUSAN = *Small univalued segment assimilating nucleus*

SVLA = Sistema de varredura a laser aerotransportado

UNESP = Universidade Estadual Paulista

UTM = *Universal Transverse Mercator*

VLL = *Vertical line locus*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contextualização da pesquisa.....	15
1.2 Objetivos.....	19
1.3 Estrutura da tese.....	19
2. ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE IMAGENS.....	21
2.1 Geometria dos sensores ópticos.....	21
2.2 Modelo de sensor (orientação interior).....	24
2.3 Modelo de plataforma (orientação exterior).....	25
2.3.1 Orientação indireta do sensor.....	25
2.3.2 Orientação direta do sensor.....	27
2.3.3 Orientação integrada do sensor.....	29
2.4 Modelo equidistante para lente <i>fisheye</i>	30
2.5 Tipos de primitivas e alvos para apoio terrestre.....	31
2.6 Determinação de pontos para aerotriangulação.....	35
2.6.1 Distribuição e quantidade dos pontos.....	36
2.6.2 Levantamento de pontos de controle por GNSS.....	37
2.6.3 Identificação e medição de pontos de controle em imagens aéreas.....	38
3. CORRESPONDÊNCIA DE IMAGENS E OPERADORES DE INTERESSE.....	40
3.1 Fundamentos da correspondência de imagens e reconstrução de objeto.....	40
3.2 Correspondência baseada em área.....	43
3.2.1 Refinamento da correspondência por mínimos quadrados.....	45
3.2.2 Avaliação das estimativas.....	48
3.3 Correspondência baseada em características.....	49
3.3.1 Características locais e globais.....	49
3.3.2 Fatores a considerar na correspondência baseada em características.....	50
3.3.3 Detectores e descritores de características de imagem.....	52
3.4 Técnica SIFT.....	55
3.4.1 Detecção de pontos extremos.....	55
3.4.2 Localização dos pontos-chave.....	57
3.4.3 Atribuição da orientação.....	59
3.4.4 Construção do descritor local.....	60
3.5 Dificuldades no estabelecimento da correspondência.....	62
3.6 Redução do espaço de busca para correspondência.....	63

3.7 Reamostragem de imagem	65
3.8 Ortorectificação de imagem	66
4. DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS AUTOMÁTICAS PARA GERAÇÃO DE CENAS DE CONTROLE E MEDIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE	67
4.1 Principais softwares e recursos materiais	67
4.2 Conceito geral da abordagem e organização das técnicas	68
4.3 Levantamento de campo	72
4.3.1 Calibração da câmara com lente <i>fisheye</i>	73
4.3.2 Técnicas de aquisição de imagens terrestres verticais	73
4.4 Geração da cena terrestre de controle	76
4.4.1 Extração do recorte terrestre usando as imagens com as barras de referência	76
4.4.2 Extração do recorte terrestre usando as imagens com a placa de controle	78
4.4.2.1 Orientação por fototriangulação de modelo multiescala para ortorectificação	78
4.4.2.2 Orientação por ressecção espacial para retificação	81
4.5 Correspondência da cena terrestre de controle com a imagem aérea	82
4.5.1 Determinação do espaço de busca na imagem aérea	83
4.5.2 Estratégia para redução do espaço de busca	85
4.5.3 Medição subpixel do ponto de controle na imagem aérea	89
5. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	93
5.1 Teste da correspondência entre as imagens terrestre e aérea e técnicas de medição	93
5.1.1 Configuração e medição de coordenadas em um tripleto de imagens	94
5.1.2 Resultados e análises da aerotriangulação do tripleto	96
5.2 Redução do espaço de busca e ajustamento em bloco de imagens	100
5.2.1 Preparação dos dados e localização de ponto de controle	101
5.2.2 Resultados e análise do ajustamento em bloco	103
5.3 Avaliação da técnica automática de orientação, reconstrução 3D e ortorectificação ...	107
5.3.1 Calibração do sistema câmara-lente	108
5.3.2 Avaliação da placa de controle para a reconstrução 3D	110
5.3.3 Orientação e ortorectificação automatizadas de áreas de controle	114
5.3.3.1 Orientação dos modelos das áreas de controle	114
5.3.3.2 Validação das ortoimagens locais	116
5.4 Teste com a geração de cena de controle e localização subpixel de ponto de controle	118
5.4.1 Especificação dos dados imagem	118
5.4.2 Testes em modelos de imagens	119
5.4.2.1 Experimento I	122

5.4.2.2 Experimento II.....	123
5.4.2.3 Experimento III.....	125
5.4.3 Teste em um bloco de imagens	127
5.4.3.1 Geometria do bloco e cálculo da precisão esperada.....	127
5.4.3.2 Medição automática com injeção nos POEs	128
5.4.3.3 Medição automática com injeção aos POEs com menor peso	132
5.4.3.4 Orientação indireta	133
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	136
REFERÊNCIAS	140

1. INTRODUÇÃO

Desde as origens da Fotogrametria, os pontos de controle, também chamados de pontos de apoio, têm sido usados como a principal fonte de informação para a estimação indireta dos Parâmetros de Orientação Exterior (POEs) da câmara e para o controle de qualidade dos processos fotogramétricos. A Fotogrametria Digital tem se beneficiado dos avanços das técnicas de processamento de imagens e do aumento da eficiência computacional, tornando possível empregar diversas primitivas de controle terrestre nos processos fotogramétricos de correspondência entre os dados do espaço objeto com o espaço imagem. Assim, motivado por essa possibilidade, o trabalho foi desenvolvido com ênfase no uso da informação terrestre de controle com cenas pictóricas, isto é, espaços imageados, como se apresenta a seguir.

1.1 Contextualização da pesquisa

O controle de campo é fundamental nos processos de orientação de imagens e baseia-se na determinação das coordenadas terrestres de elementos fotoidentificáveis. As técnicas de levantamento aéreo têm evoluído com a integração dos sistemas de navegação global (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) e sistema inercial, possibilitando a orientação direta do sensor da câmara (*Direct Sensor Orientation – DSO*). Porém, mesmo com o desenvolvimento e consolidação dessas técnicas, ainda são necessários pontos de controle para corrigir erros sistemáticos e avaliar a qualidade dos processos fotogramétricos, mas com a vantagem de requerer menos pontos por blocos de imagens, se comparado a um levantamento aéreo não apoiado.

Em muitos casos, alguns fatores comprometem o uso apenas de sistemas integrados de orientação direta, os quais podem limitar a confiabilidade e a acurácia do mapeamento. Segundo Yastikli e Jacobsen (2005), problemas podem ocorrer com: a calibração do conjunto de sistemas, a estabilidade dos parâmetros de calibração e os efeitos do sistema de coordenadas de referência sobre a orientação, além dos erros sistemáticos. Muitos estudos têm sido publicados sobre a avaliação dos dados de orientação direta, como pode ser encontrado em Cramer et al. (2000), Jacobsen (2004), Yastikli e Jacobsen (2005) e Yuan (2009), entre outros.

De acordo com Blázquez e Colomina (2012), em processos de aerotriangulação, a combinação do posicionamento relativo GNSS/inercial com pontos de controle pode ser usada para estimar os POEs de um sensor em uma abordagem chamada de orientação integrada de sensor (*Integrated Sensor Orientation – ISO*). Ip et al. (2007) afirmam que a ISO combina os benefícios da orientação direta com a aerotriangulação tradicional. Skaloud (2007) argumenta que, para propósitos práticos, o problema de confiabilidade, o qual é causado por erros sistemáticos não corrigidos, pode ser resolvido pela ISO, mitigando simultaneamente os erros. Assim, os POEs adquiridos pela orientação direta são usados como observações ou injunções no ajustamento de um bloco fotogramétrico, exigindo um reduzido número de pontos de controle, mesmo quando os dados de orientação direta têm resultados aceitáveis no projeto, pois há necessidade de avaliar a qualidade dos dados.

Embora várias tarefas fotogramétricas tenham sido significativamente automatizadas, como a geração de pontos de enlace e a transferência de pontos homólogos entre imagens, a localização e a medição de pontos de controle em imagens, segundo Gruen (2012), ainda são realizadas por operadores humanos, que fazem uso de sua complexa capacidade de análise de imagens para identificar e medir pontos. Consequentemente, devido às habilidades de interpretação e à limitação da própria resolução das imagens, as medições manuais representam uma fonte adicional de erros dentro do processo de orientação de imagens.

Heipke (1997) apresentou uma revisão sobre técnicas de orientação de imagens aéreas e orbitais, sobretudo para a determinação dos POEs. Exigências sobre a seleção de vários tipos de primitivas de controle terrestre foram destacadas, incluindo recortes de imagens, ortoimagens, feições antrópicas e modelos de estruturas. Jaw e Wu (2006) também apresentaram uma revisão sobre trabalhos relevantes nos quais foram usadas várias primitivas de controle terrestre para os propósitos de orientação. Além de pontos, também foram usadas nas técnicas feições, linhas, áreas e estruturas. Com o propósito de automatizar o processo de orientação, foi relatado o uso de diferentes primitivas de controle, tais como:

- Pontos artificiais pré-sinalizados;
- Feições artificiais pré-existentes, por exemplo, tampas de bueiros e rotatórias urbanas;
- Feições naturais pré-existentes, como lagos e rios (para imagens orbitais);
- Modelos estruturais, como casas;
- Elementos lineares;

- Recortes de imagens, apresentando elementos distinguíveis, como cruzamentos e sinalizações de ruas.

Um processo de medição fotogramétrica requer, basicamente, a detecção, identificação e localização precisa de pontos de controle imageados, cujas coordenadas no espaço objeto devem ser determinadas a partir de feições distinguíveis. Apesar dos vários trabalhos científicos em ambientes de produção, a medição precisa desses pontos nas imagens ainda depende de técnicas manuais.

Com a finalidade de automatizar as etapas de localização e medição de coordenadas em imagens aéreas (podendo-se estender para imagens orbitais), este estudo desenvolveu um fluxo automático para adquirir coordenadas terrestres de pontos de controle e localizá-los em imagens aéreas com precisão subpixel, sem medições manuais.

Nesse processo automático, imagens terrestres verticais de pontos de controle (em alturas diferentes) são coletadas para formarem modelos de imagem multiescala em cada local de levantamento de campo. Os modelos são orientados automaticamente para produzirem recortes de cenas terrestres, usando procedimentos adaptados de retificação e ortorretificação de imagens. Os recortes dessas imagens com pontos de controle são feitos para a correspondência com janelas em imagens aéreas, transferindo automaticamente as coordenadas terrestres.

A base da metodologia está na correspondência entre imagens terrestres de áreas de pontos de controle com imagens aéreas. Isto implica na concepção de uma primitiva de controle de campo que, nesta tese, recebe o nome de **cena terrestre de controle**. A hipótese investigada foi que cenas terrestres poderiam ser usadas como apoio de campo para orientar ou corrigir erros sistemáticos em imagens aéreas, servindo como uma informação de controle. Para isso, recortes de imagens (chamados de *chips* ou *templates*) são extraídos de imagens terrestres verticais (vista superior ou aérea), contendo um ponto rastreado por receptor GNSS no centro. Estes recortes, após alguns procedimentos, são correlacionados com suas respectivas áreas em imagens aéreas, usando técnicas de correspondência e ajustamento por mínimos quadrados para atingir a precisão subpixel.

A viabilidade dessa abordagem automatizada tem como suporte os seguintes princípios:

- Melhor qualidade dos sensores e lentes atualmente disponíveis, aumentando a eficiência da aplicação dos algoritmos de correspondência;

- As diferenças geométricas e radiométricas entre imagens aéreas e terrestres podem ser minimizadas iterativamente pelo método dos mínimos quadrados, proporcionando um melhor ajuste entre áreas correspondentes;
- O realce de imagens pode ser aplicado para diminuir diferenças radiométricas entre pares de imagens;
- Pequenas diferenças (como sombras existentes ou algum elemento incomum em áreas correspondentes) podem ser detectadas, rotuladas e excluídas durante o processo de correspondência e ajustamento;
- Os dados de orientação direta fornecem uma aproximação inicial para os POEs da câmara aérea.

Embora não seja obrigatória, a disponibilidade dos dados de orientação direta aumenta a eficiência e a confiabilidade da técnica proposta pela redução do espaço de busca nas imagens aéreas para localizar uma coordenada imagem de um ponto de controle, o que diminui a possibilidade de falsas correspondências. Mesmo na falta de dados fornecidos pela orientação direta, informações do plano de voo para o posicionamento e uma orientação aproximada também podem ser utilizados, tornando possível o emprego da metodologia. Desse modo, a partir dos POEs iniciais, pontos de controle em imagens terrestres podem ser transferidos para as imagens aéreas pelas equações de colinearidade para localizar automaticamente suas coordenadas imagem via algoritmos de correspondência.

Além da automatização da medição, a abordagem também introduz técnicas de aquisição de cenas terrestres verticais para apoio de campo, as quais podem ser adquiridas por uma câmara supergrande angular ou *fisheye*, usando dispositivos projetados para os propósitos da metodologia. As técnicas de aquisição usam o posicionamento relativo entre um receptor GNSS em um levantamento convencional com a câmara (em visada nadiral) para obter cenas panorâmicas orientadas de qualquer área com alguma feição distinguível. Essas técnicas de aquisição foram desenvolvidas para produzir cenas terrestres de controle, porém outras aplicações também podem ser beneficiadas com seu uso, como será exemplificado no capítulo final. Dentro desse contexto, expõem-se na próxima seção os objetivos do trabalho.

1.2 Objetivos

A abordagem desenvolvida teve como base a hipótese de que pontos de controle (bem identificados em plano) poderiam ser obtidos e automaticamente localizados e medidos nas imagens aéreas usando cenas terrestres de controle.

Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Elaboração e avaliação de métodos específicos para coletar imagens terrestres verticais e orientadas;
- Implementação e testes de técnicas de correspondência entre imagens terrestres e aéreas, com escalas diferentes e usando algoritmos baseados em área e em características;
- Uniformização das diferenças entre escalas de maneira a determinar a correspondência da imagem terrestre retificada (e orientada) com uma janela da imagem aérea;
- Refinamento da correspondência para atingir a precisão subpixel, utilizando o método dos mínimos quadrados com ajustes em geometria e radiometria;
- Desenvolvimento de estratégias para solucionar situações em que os dados de orientação direta apresentam baixa qualidade ou não estão disponíveis;
- Ortorretificação da cena de controle para tratar situações nas quais as áreas dos pontos de controle apresentam variação significativa ou inclinação na superfície;
- Experimentos da abordagem com dados reais, baseados em modelos terrestres multiescalas, que apoiaram o ajustamento em bloco de imagens aéreas.

Em síntese, a finalidade foi melhorar o processo de orientação de imagens por meio da automação da fase de medição dos pontos de controle, fornecendo coordenadas imagens mais precisas, eliminando os erros resultantes dos métodos manuais (monoscópico ou estereoscópico) realizados por operadores humanos.

1.3 Estrutura da tese

A tese está organizada em seis capítulos. No capítulo introdutório, apresenta-se o problema tratado e a proposta geral para produzir automaticamente cenas de controle e medir pontos de controle em imagens aéreas, tendo como base a correspondência de imagens. A necessidade do apoio de campo para garantir a acurácia e a confiabilidade dos dados também é abordada, assim como os objetivos da metodologia, os quais enfatizaram a automação da

localização dos pontos de controle em imagens, uma vez que métodos manuais ainda são empregados para a realização dessa fase.

O Capítulo 2 discorre sobre a orientação de imagens, tratando da geometria de sensores ópticos, orientação interior e orientação exterior. Nesta última, são usadas três técnicas de orientação: indireta, direta e integrada. O apoio de campo, com base em pontos de controle, também aparece como requisito essencial no processo. Esses pontos de controle demandam distribuição adequada, medição em campo (normalmente realizada por GNSS) e métodos de medição nas imagens aéreas.

Em relação ao Capítulo 3, introduz-se o conceito sobre correspondência de imagens e reconstrução de objetos. Duas classes de correspondência são consideradas: classe baseada em área e classe baseada em características. Os principais problemas que dificultam o estabelecimento da correspondência e importantes estratégias de solução também são vistos. Além disso, o refinamento pelo método dos mínimos quadrados e a técnica *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) são abordados, por terem sido essenciais ao desenvolvimento do trabalho.

As técnicas automatizadas desenvolvidas neste trabalho para a orientação, geração de cenas de controle e localização e medição de pontos de controle nas imagens aéreas encontram-se no Capítulo 4. São mostrados os principais recursos de softwares e materiais e as técnicas especificamente desenvolvidas para se coletar as imagens terrestres na forma necessária. E, ainda, estão na composição do capítulo: a preparação das cenas de controle, as técnicas para estabelecer correspondências e o refinamento da localização subpixel dos pontos de controle nas imagens aéreas.

Por sua vez, o Capítulo 5 apresenta um conjunto de experimentos conduzidos para avaliar a aplicação e a acurácia das técnicas desenvolvidas. Os testes consideraram o ajustamento por feixes de raios em estéreos-modelos, em modelos multiescalas e em blocos de imagens. A análise dos resultados foi realizada com base nas discrepâncias em pontos de controle e verificação, e a precisão e acurácia das técnicas automáticas ainda foram comparadas com aquelas obtidas por medições manuais.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações sobre as técnicas empregadas, bem como as conclusões finais sobre os resultados alcançados, os quais comprovam a hipótese da tese e definem a cena terrestre, na forma concebida, como uma primitiva de controle de alta precisão.

2. ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE IMAGENS

A orientação de imagens é um pré-requisito essencial para qualquer tarefa que exige o uso de coordenadas do espaço objeto, segundo Heipke (1997). Assim, para orientar, corrigir ou avaliar a orientação de imagens aéreas em relação a um sistema de referência terrestre, um apoio de campo deve ser realizado para cumprir essa tarefa. Dentro desse contexto, os temas neste capítulo abordam alguns tipos de sensores de imagem, orientação interior e exterior da câmara, levantamento de campo e técnicas para medição de pontos para apoio fotogramétrico.

2.1 Geometria dos sensores ópticos

Uma imagem digital pode ser compreendida como um conjunto regular de elementos de imagem chamados de pixels, os quais são descritos por sua geometria e radiometria, mas também podem ser especificados em termos do *Instantaneous Field Of View* (IFOV), que representa o ângulo determinado por um pixel e a distância focal. Se um IFOV é grande, significa que um pixel cobre uma porção maior da cena, equivalente a uma resolução espacial menor. Outra medida relacionada ao tamanho do pixel é o *Ground Sample Distance* (GSD), que corresponde à projeção do tamanho do pixel sobre o plano do solo (MIKHAIL et al., 2001)

A aquisição de imagens pode ser realizada por sensores digitais, os quais são compostos por um arranjo de fotodetectores em estado sólido que captam a energia refletida e as quantificam como imagem (WOLF e DEWITT, 2000). Os tipos mais comumente usados são o *Charge-Coupled Device* (CCD) e o *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS).

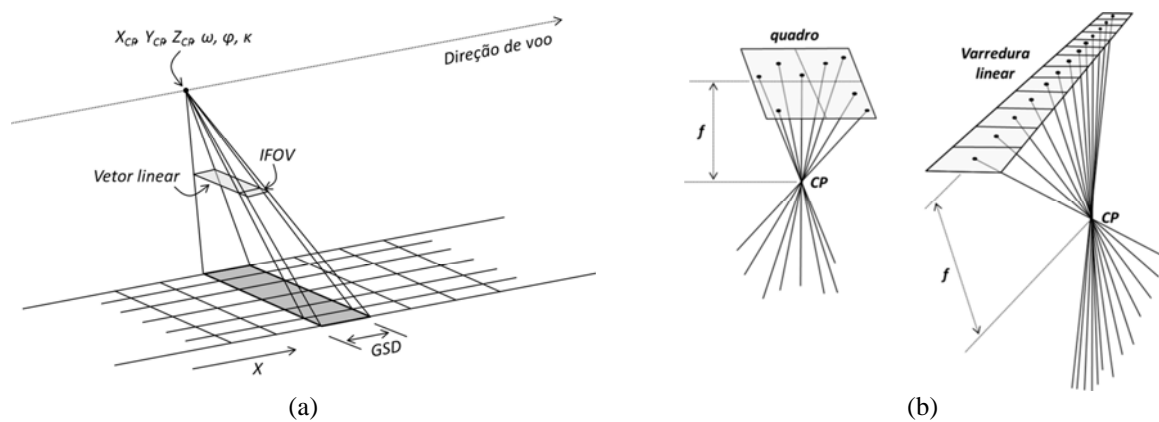
Embora o princípio básico de operação dos sensores CCDs seja o mesmo, diferentes configurações são encontradas, podendo-se classificá-las como sensores de: quadro (*frame*), varredura linear (*pushbroom*), panorâmico (*panoramic*) e varredura pontual (*whiskbroom*) (MIKHAIL et al., 2001).

Os sensores de quadro consistem em um arranjo bidimensional de elementos CCD ou CMOS. O sensor é instalado no plano focal de uma câmara com um único conjunto de lentes, e o quadro permite adquirir a imagem de uma área correspondente, conforme a altura de voo.

A combinação de mais de uma câmara também pode ser usada para produzir uma imagem virtual de quadro, por exemplo, ultracam (Vexel Microsoft).

Um sensor de varredura linear é formado por um sistema óptico que projeta uma imagem em um arranjo de sensores em linha, construindo uma linha por vez através do Centro Perspectivo (CP) e a linha que contém o sensor, o qual é orientado transversalmente ao movimento da plataforma e varre uma região do espaço (MIKHAIL et al., 2001). As Figuras 1(a) e (b) ilustram essas geometrias de quadro e varredura linear.

Figura 1 – Modelos de geometria de sensores: (a) Geometria do sensor linear; (b) Sensor de quadro e de varredura linear com os raios de luz passando pelo CP da câmara.



Fonte: Mikhail et al. (2001).

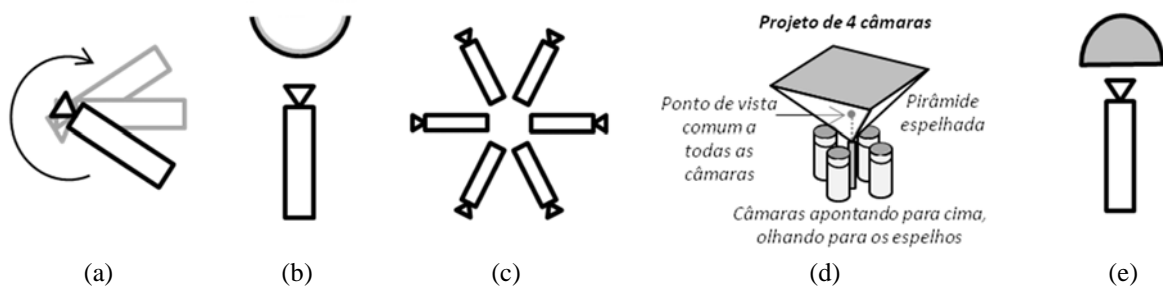
A partir dos dados sobre a distância focal, localização do ponto principal e distorções das lentes, o feixe de raios proveniente do espaço objeto pode ser reconstruído com os pontos imagem correspondentes, a partir das definições das propriedades da câmara. Outros modos de varredura linear podem ser com o uso da geometria de uma câmara panorâmica, como apresentado por Mikhail et al., (2001, p. 60).

Além desses sensores, há também aqueles com visão omnidirecional que possibilitam a observação em ângulo de até 360° . De modo resumido, apresentam-se algumas classes quanto à construção do sistema de observação omnidirecional:

- **Câmara de varredura por rotação:** utiliza somente uma câmara cuja rotação em torno de um eixo vertical passa pelo ponto nodal anterior. Apresenta possibilidade de duplicação de objetos móveis e distorções acentuadas pelo deslocamento da plataforma, ver Figura 2(a) (NAYAR e KARMARKAR, 2000);

- **Câmara única com espelho côncavo ou parabólico:** contém apenas um ponto de vista para o qual os raios luminosos convergem, permitindo capturar a imagem de todo o ambiente. Os problemas a serem tratados são as aberrações ópticas, causadas pela curvatura do espelho, e borramentos relacionados com a distância focal, ver Figura 2(b) (CORRÊA, 2005; SANTOS FILHO et al., 2005; BUSCHINELLI et al., 2007; GRASSI JR e OKAMOTO JR, 2006; MARCATO JUNIOR et al., 2014; OLIVETE, 2014);
- **Sistema de múltiplas câmaras divergentes:** associa várias câmaras com direções distintas. A mosaicagem de cada imagem é feita mediante linhas de corte, exceto para objetos afastados, devido ao posicionamento das câmaras e à ocorrência de paralaxe, ver Figura 2(c) (SWAMINATHAN e NAYAR, 1999);
- **Sistema de múltiplas câmaras com espelho triédrico:** é formado por quatro câmaras apontando para um espelho plano, o que define um único CP virtual e evita efeitos de aberração causados pela presença de curvatura nos espelhos, ver Figura 2(d) (FULLVIEW, 2009);
- **Câmara com objetiva olho de peixe (*fisheye*):** faz uso de um tipo de lente especial cobrindo um ângulo próximo a 180°, porém gera grande distorção, ver Figura 2(e) (NAYAR e KARMARKAR, 2000).

Figura 2 – Esquema de câmaras em sistema de observação omnidirecional: (a) Objetiva olho de peixe; (b) Varredura por rotação; (c) Câmara única com espelho côncavo ou parabólico; (d) Múltiplas câmaras divergentes; (e) Múltiplas câmaras com espelho triédrico.

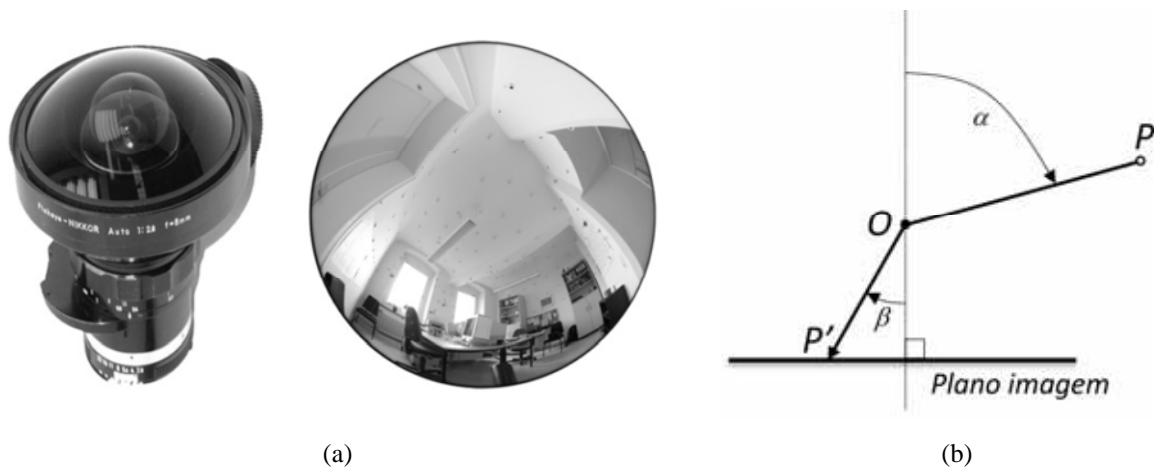


Fonte: Fullview (2009).

Este último sistema de observação *fisheye*, exemplificado na Figura 3, consiste no meio adotado neste trabalho para a aquisição das imagens terrestres. O tipo de lente *fisheye* possui a característica física de não colinearidade do raio de luz ao atravessar o conjunto de lentes, que é desviado. Logo, modelos matemáticos apropriados para esse tipo de geometria

são necessários, podendo ser utilizadas as projeções: equidistante, equisólida, estereográfica e ortogonal na calibração da câmara, conforme os trabalhos publicados por Abraham e Förstner (2005) e Schneider et al., (2009). A descrição do modelo matemático usado para a calibração do sistema câmara-lente para este estudo será detalhada na Seção 2.4, e os resultados da calibração efetivamente realizada serão mostrados no Capítulo 5.

Figura 3 – Lente *fisheye*: (a) Lente Nikkor 8 mm e imagem; (b) Geometria da projeção.



Fonte: Schneider et al. (2009).

2.2 Modelo de sensor (orientação interior)

O modelo de sensor define a geometria interna de uma câmara, ou seja, o conjunto de Parâmetros de Orientação Interior (POIs) da câmara, os quais permitem a reconstrução do feixe de raios que deu origem à imagem (MIKHAIL et al., 2001). Geralmente os POIs incluem o tamanho do pixel, a localização do ponto principal no plano da imagem, a distância focal e os parâmetros que modelam os erros sistemáticos (distorções das lentes: radial simétrica e descentrada) e afinidade. O ponto principal, definido como o pé da perpendicular ao plano imagem passando pelo CP, é dado com relação ao sistema de coordenadas imagem (coluna, linha). Para a calibração de câmaras, modelos matemáticos adequados ao tipo de geometria da lente com acréscimos dos parâmetros de distorções do modelo Conrady-Brown (BROWN, 1971) são usados. O sistema de equações linearizadas pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados, considerando-se algumas restrições sobre coordenadas terrestres, distâncias ou observações dos POEs.

O uso dos POIs permite a correção dos erros sistemáticos nas medidas feitas nas imagens. Com o feixe reconstruído, podem-se determinar as equações de observação de imageamento com as coordenadas do ponto objeto e os POEs da câmara.

Exemplos dos procedimentos de orientação interior podem ser encontrados em Fryer e Brown (1986), Lugnani (1987), Clarke e Fryer (1998), Mikhail et al. (2001), Kraus (2007), entre outros.

2.3 Modelo de plataforma (orientação exterior)

Enquanto a orientação interior reconstrói o feixe de raios a partir de pontos imagem, o modelo de plataforma, ou orientação exterior, determina a posição e a orientação do feixe de raios com relação ao sistema de coordenadas do espaço objeto. Cada feixe requer seis parâmetros independentes, os quais descrevem as informações de posição (X_{CP} , Y_{CP} , Z_{CP}) e ângulos de atitude (ω , φ , κ) da câmara no momento de aquisição da imagem (MIKHAIL et al., 2001).

Originalmente, a tarefa de orientar imagens era realizada com método indireto, porém com o avanço de tecnologias usando sistemas GNSS e sistemas inerciais, métodos para orientar o sensor diretamente ou com orientação integrada também têm sido desenvolvidos. Esses três métodos são descritos a seguir.

2.3.1 Orientação indireta do sensor

Segundo Cramer et al. (2000), o método indireto é comumente utilizado em Fotogrametria, sobretudo na orientação de sensores de quadro. Neste caso, os POEs da imagem são considerados como incógnitas, sendo estimadas em um processo de ajustamento por feixe de raios. Na orientação indireta por ressecção espacial, os seis parâmetros (X_{CP} , Y_{CP} , Z_{CP} , ω , φ , κ) são estimados a partir de um número de pontos de controle com suas coordenadas imagens correspondentes.

Para uma geometria de sensor com perspectiva central, a orientação da imagem pode ser realizada usando as equações de colinearidade, descritas nas Equações 1:

$$\begin{aligned}
 x &= -f \frac{r_{11}(X - X_{CP}) + r_{12}(Y - Y_{CP}) + r_{13}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})} \\
 y &= -f \frac{r_{21}(X - X_{CP}) + r_{22}(Y - Y_{CP}) + r_{23}(Z - Z_{CP})}{r_{31}(X - X_{CP}) + r_{32}(Y - Y_{CP}) + r_{33}(Z - Z_{CP})},
 \end{aligned} \tag{1}$$

em que:

- (x, y) são as coordenadas fotogramétricas corrigidas dos erros sistemáticos;
- (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) são as coordenadas do CP da câmara no espaço objeto;
- (X, Y, Z) são as coordenadas de um ponto no espaço objeto;
- f é a distância focal da câmara calibrada;
- r_{ij} : são os elementos da matriz rotação.

Conforme Kraus (2007), o fundamento dessas Equações (1) está no alinhamento do CP da câmara com o ponto na imagem e seu correspondente no espaço objeto. O modelo matemático define um processo físico de formação da imagem e relaciona as fotocoordenadas ao sistema de coordenadas do espaço objeto, em que a geometria da câmara é determinada pelos POIs. Dentre várias aplicações fotogramétricas, essas equações de colinearidade podem ser usadas, por exemplo, em calibração de câmara, ressecção espacial, intersecção de raios, orientação relativa, fototriangulação, como pode ser encontrado em Wolf e Dewitt (2000), Mikhail et al. (2001), Kraus (2007), entre outros.

Para orientar uma imagem aérea isolada, a técnica de ressecção espacial soluciona o problema. Em se tratando de múltiplas imagens, generaliza-se essa técnica para operações de aerotriangulação ou ajustamento de bloco, em que a estimação dos POEs e as coordenadas dos pontos no espaço objeto são realizadas simultaneamente. As imagens adjacentes são conectadas pela medição de pontos homólogos, os quais também são conhecidos como pontos de enlace, de passagem ou fotogramétricos. A solução da orientação é alcançada usando as equações de colinearidade e o método iterativo dos mínimos quadrados, em que as coordenadas imagem dos pontos de enlace e dos pontos de controle são consideradas como observações (WOLF e DEWITT, 2000).

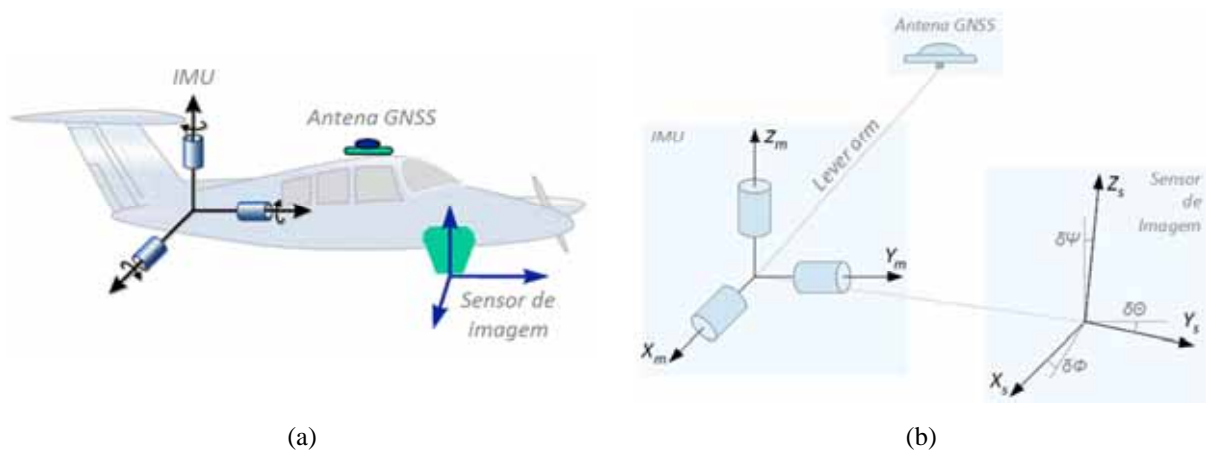
As coordenadas terrestres dos pontos de controle igualmente podem ser usadas como observações ou injunções ponderadas, bem como as informações da orientação direta que, se disponíveis, também podem ser inseridas no ajustamento como observações ou injunções, como se mostrará na próxima seção.

2.3.2 Orientação direta do sensor

Os sistemas integrados GNSS/inercial instalados em plataformas aéreas permitem adquirir dados de posição e atitude diretamente, além das velocidades instantâneas.

Para determinar a orientação do sensor de imagem, o dispositivo de medição inercial (*Inertial Measurement Unit – IMU*) deve ser fisicamente fixado em relação ao sensor, pois as posições e os eixos não são coincidentes e, portanto, é preciso determinar as translações entre as origens (*lever arm* ou braço) e as rotações entre os eixos (*boresight misalignment –* ou simplesmente *boresight*), como ilustra a Figura 4, em que o sistema de eixos da IMU não é exatamente paralelo aos eixos do sensor e a antena GNSS é posicionada sobre a aeronave.

Figura 4 – Orientação direta do sensor: (a) Dispositivos para aquisição das imagens; (b) *Lever arm* e ângulos de *boresight* (Φ , Θ , Ψ).



Fonte: adaptado de Yastikli e Jacobsen (2005).

O *lever arm* pode ser medido diretamente entre o receptor GNSS e o sensor de imagem, mas não é possível determinar o *boresight* diretamente, como será explicado na sequência. A calibração desse sistema, considerando o *boresight* e a orientação interior da câmara, pode ser realizada por um ajustamento em bloco de imagens, contendo pontos de controle (YASTIKLI e JACOBSEN, 2005).

O sistema GNSS oferece a possibilidade de determinar os dados de posição e velocidade com alta acurácia absoluta. O nível de acurácia é dependente da abordagem de processamento (absoluta ou diferencial), do tipo usado de observáveis (pseudodistância, doppler, fase) e da geometria dos satélites. Já a navegação inercial é baseada em medições de acelerações lineares e incrementos de taxas de rotação em relação a um sistema de

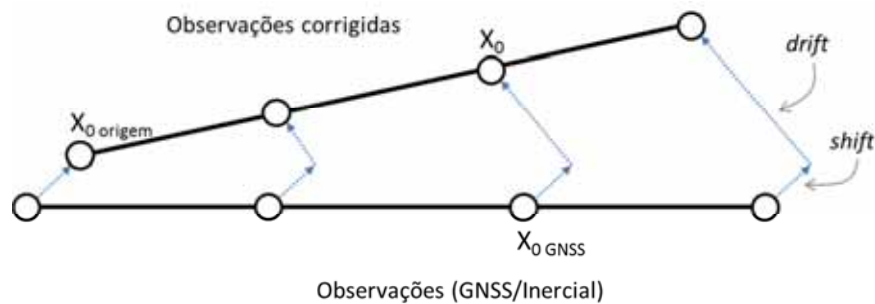
coordenadas inercial. A partir de um alinhamento prévio e processos de integração, obtêm-se a posição, velocidade e atitude. No primeiro cálculo de integração das acelerações, taxas angulares e acelerações lineares fornecem os valores de atitude e velocidade, respectivamente. Após a segunda integração, são obtidas as informações de posição. Por causa dessas integrações, a acurácia da IMU não é constante, mas dependente do tempo (CRAMER et al., 2000).

As atitudes fornecidas pelo sistema integrado GNSS/inercial são relacionadas com os eixos de coordenadas do sistema inercial. Por isso, a matriz de *boresight* deve ser considerada para transferir as atitudes medidas para o referencial do sensor. Uma vez que os ângulos de *boresight* entre a IMU e o quadro da câmara não são diretamente observáveis por meio de técnicas convencionais, estes devem ser determinados indiretamente em um procedimento de calibração apropriado. A qualidade da calibração de desalinhamentos é fortemente dependente do conjunto de erros sistemáticos não modelados no ajustamento por feixes de raios (CRAMER et al., 2000).

Para a correção dos erros sistemáticos no posicionamento GNSS, o modelo matemático da colinearidade, utilizado na aerotriangulação apoiada por GNSS, pode ser estendido com parâmetros adicionais para modelar deslocamentos sistemáticos e desvios lineares na trajetória em uma abordagem chamada *shift and drift* (*shift* significa três translações e *drift*, uma escala). Ambos podem ser adotados para todo o bloco ou por faixa.

Métodos usando diferença de fase da portadora são empregados para o posicionamento GNSS, mas o principal problema é manter continuamente a recepção do sinal GNSS de maneira que a mudança de fase não seja perdida, ou que o número de ciclos não seja contado errado. Preventivamente, faz-se uma inicialização antes e depois do voo para estabelecer os ciclos corretos. Devido à perda de contato ser mais provável durante as voltas no final de cada linha de voo, cada faixa pode ser tratada separadamente quanto a sua posição GNSS (MIKHAIL et al., 2001). Como ilustra a Figura 5, a perda de ciclo manifesta-se como um desvio linear e um deslocamento.

Os modelos de erros do sistema de orientação direta são formados por parâmetros que modelam os desvios de trajetória do sistema GNSS/inercial. Os parâmetros *shift* e *drift* absorvem os deslocamentos lineares e derivas proporcionais ao tempo decorrido na faixa de voo, conforme o movimento linear da aeronave. Durante o voo, são executadas manobras de calibração do sistema GNSS/inercial, como curvas, para minimizar o acúmulo dos erros no sistema inercial (DÖRSTEL et al., 2001).

Figura 5 – Orientação exterior corrigida dos parâmetros *shift* e *drift*.

Fonte: Dörstel et al. (2001).

Jacobsen (2004) comenta, como vantagens, a orientação direta do sensor não utilizar pontos de controle e os problemas de ligação entre as imagens não conduzirem à perda de solução. Mas, como desvantagens, têm-se a falta de confiabilidade e alguns problemas com paralaxe em y no modelo resultante. No entanto, o autor assegura que isto pode ser melhorado pelo método chamado de orientação integrada de sensor, que faz um ajustamento dos dados de orientação direta junto com as coordenadas imagens.

2.3.3 Orientação integrada do sensor

No método de orientação integrada, como Blázquez e Colomina (2012) descrevem, a determinação dos parâmetros de orientação do sensor é realizada a partir de todas as medições disponíveis: coordenadas imagem de pontos de enlace, pontos de controle, posições GNSS e trajetórias de voo derivadas dos sistemas integrados GNSS/inercial.

Segundo Ip et al. (2007), o método combina os benefícios da orientação direta com a aerotriangulação convencional, considerando uma configuração de imageamento com superposição suficiente. Pelo uso dos POEs (adquiridos por orientação direta) como observações e aproximações iniciais para a aerotriangulação, são necessários somente pontos de enlace na área de superposição e são exigidos pontos de controle para corrigir os erros sistemáticos residuais. Além disso, a orientação exterior direta reduz o tempo computacional para determinar os pontos de enlace e o número de erros grosseiros.

Em experimentos realizados por Yastikli e Jacobsen (2005), o uso de orientação integrada possibilitou a redução da paralaxe em y e também diminuiu os componentes de erros aleatórios na orientação direta do sensor.

Vários estudos têm sido feitos e publicados para avaliar a acurácia e a confiabilidade dos métodos de orientação direta e integrada, por exemplo, em trabalhos realizados por Cramer e Haala (1999), Heipke et al. (2001), Mostafa e Schwarz (2001), Jacobsen (2004), Yastikli e Jacobsen (2005), Ip et al. (2007), Blázquez e Colomina (2012), entre outros.

2.4 Modelo equidistante para lente *fisheye*

A calibração de câmara é um procedimento que deve ser realizado para as aplicações fotogramétricas que exijam acurácia. O modelo matemático de colinearidade combinado com modelos de distorção das lentes é geralmente usado. Porém, as lentes *fisheye* têm características que não seguem uma projeção perspectiva e requerem modelos específicos de projeção, como estereográfica, ortogonal, ângulo equisólido e equidistante, segundo Schneider et al. (2009). Para este trabalho, adotou-se o modelo de projeção equidistante, embora qualquer um dos outros também pudesse ser usado com a mesma qualidade, como avaliado nos experimentos feitos por Marcatto Júnior et al. (2014).

O procedimento de calibração da câmara com a lente *fisheye* pode ser realizado por uma estimação indireta para definir os POIs. Em geral, são determinados a distância focal, as coordenadas do ponto principal e os coeficientes de distorção das lentes. O modelo matemático comumente empregado para reconstruir a geometria dos raios no interior da câmara baseia-se nas equações de colinearidade, Equações 1 (MIKHAIL et al., 2001), com acréscimo dos parâmetros de distorção das lentes do modelo de distorção Conrady-Brown (BROWN, 1971), sendo escrita como mostram as Equações 2:

$$x = x' - x_0 - \Delta x = -f \cdot \frac{X_C}{Z_C},$$

$$y = y' - y_0 - \Delta y = -f \cdot \frac{Y_C}{Z_C},$$
(2)

em que: f é a distância focal; (X_C, Y_C, Z_C) são as coordenadas 3D do ponto no sistema de referência fotogramétrico, como nas Equações 3; (x, y) são as coordenadas imagem no sistema de referência fotogramétrico; (x', y') são as coordenadas imagem em um sistema de referência paralelo ao sistema fotogramétrico com origem no centro; (x_0, y_0) são as coordenadas do

ponto principal neste sistema e Δx e Δy são os efeitos das distorções radial e descentrada e modelo de afinidade.

$$\begin{aligned} X_C &= r_{11} \cdot (X - X_{CP}) + r_{12} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{13} \cdot (Z - Z_{CP}), \\ Y_C &= r_{21} \cdot (X - X_{CP}) + r_{22} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{23} \cdot (Z - Z_{CP}), \\ Z_C &= r_{31} \cdot (X - X_{CP}) + r_{32} \cdot (Y - Y_{CP}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{CP}), \end{aligned} \quad (3)$$

em que: r_{ij} são os elementos da matriz de rotação relacionando os sistemas de referência imagem e objeto; (X, Y, Z) são as coordenadas de um ponto no sistema de referência objeto; (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) são as coordenadas do centro perspectivo da câmara no sistema de referência objeto.

As Equações 4 apresentam o modelo matemático equidistante que pode ser adotado para a calibração da lente *fisheye*, como avaliado por Marcatto Junior et al. (2014) e usado na aquisição das imagens terrestres deste trabalho.

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x - f \cdot \frac{X_C}{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2}} \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2}}{Z_C}\right), \\ y' &= y_0 + \Delta y - f \cdot \frac{Y_C}{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2}} \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2}}{Z_C}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

O sistema de equações linearizadas das Equações 4 pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados, considerando-se algumas restrições sobre as coordenadas no espaço objeto dos pontos medidos ou observações dos POEs.

2.5 Tipos de primitivas e alvos para apoio terrestre

Para realizar a orientação indireta de imagens ou mesmo corrigir e avaliar os dados adquiridos por orientação direta, um apoio de campo é sempre necessário. Vários tipos de primitivas de controle terrestre têm sido usados e testados em diferentes aquisições de dados, variando-se os propósitos. Normalmente o uso de ponto é mais comum e preferido, pois está

relacionado à feição bem definida no terreno, proporcionando uma melhor identificação e localização na imagem.

Em aplicações de aerotriangulação, dois tipos principais de pontos de controle podem ser caracterizados: pontos pré-sinalizados e pontos naturais.

- **Pontos pré-sinalizados:** são detalhes pontuais marcados no terreno antes da aquisição das imagens aéreas. Possuem alta precisão, mas requerem forma e tamanho compatível com a resolução, exigem alto contraste em relação ao fundo. Alvos circulares e quadrados ou cruzeiros com fundos apropriados são mais comuns. Alvos pintados também são usados, devendo-se selecionar adequadamente a cor dos sinais e o tamanho. Como desvantagens desse tipo de alvo, têm-se o custo de produção e a manutenção no mesmo lugar até a realização do voo (GÜLCH, 1995);
- **Pontos naturais:** são bem definidos, devendo ser facilmente identificáveis na imagem. Estão relacionados com características topográficas e são escolhidos para evitar custos de sinalização. Podem ser quinas de construções, esquinas, terminações de faixas de ruas, pedras etc. Sua principal desvantagem é que a característica natural não é bem definida quanto um alvo pré-sinalizado (GÜLCH, 1995) e pode não estar presente nas áreas geometricamente adequadas no projeto fotogramétrico.

Em diversas aplicações, **alvos codificados** também são muito utilizados, principalmente em Fotogrametria à curta distância. Os alvos têm a propriedade de alto contraste e representam um padrão previamente definido, o qual possibilita identificar pontos de interesse com alta precisão. Os alvos são reconhecidos automaticamente na imagem e interpretados com base na informação codificada. Diversos tamanhos, formatos e arranjos de sua estrutura interna podem ser empregados, variando-se de acordo com a finalidade.

As **feições antrópicas** são outros tipos de primitivas de controle com um grande número de aplicações fotogramétricas. Essas feições constituem elementos estruturantes construídos pela ação humana, tais como edificações, limites de propriedades, rodovias (neste caso, descrevendo feições lineares). Seu uso é motivado pela facilidade de extração, se comparada à extração de pontos; representam descontinuidades em tons de cinza em uma direção, o que não ocorre com pontos, cuja descontinuidade ocorre em todas as direções. Segundo Tommaselli e Tozzi (1996), as feições também podem ser obtidas com precisão subpixel ao longo da direção do gradiente. As dificuldades para esse tipo de feição estão relacionadas ao reconhecimento automático em áreas complexas.

Na literatura fotogramétrica, diversos trabalhos usando diferentes tipos de primitivas de controle já foram realizados para a automação do processo de orientação indireta de imagens e avaliação do potencial métrico de imagens aéreas e orbitais. Malmström (1986) apresentou uma das primeiras abordagens utilizando recortes de imagem, denominados *Ground Control Chips* (GCCs) ou recortes de controle de campo, para orientar imagens de satélite. Os GCCs, extraídos no entorno de pontos de controle em imagens aéreas digitalizadas, foram definidos e comparados com imagens de satélites usando técnicas de correspondência por área e refinamentos por mínimos quadrados. Embora o problema de detecção não tenha sido resolvido, os GCCs foram localizados corretamente. O problema dessa técnica é a dependência da disponibilidade de imagens aéreas na mesma área da imagem orbital e também há dependência da acurácia da imagem de referência.

Schickler (1992) e Läbe e Ellenbeck (1996) implementaram um software chamado *Automatic Model-based Orientation* (AMOR) para automatizar a produção de mapas a partir de ortofotos digitais. Esta abordagem usa modelos 3D de construções como controle de campo para a orientação exterior por ressecção espacial. Ainda que o procedimento tenha demonstrado resultados robustos, a técnica tem a desvantagem de requerer a disponibilidade do tipo de informação de controle nos locais apropriados.

Drewniok e Rohr (1996) usaram tampas de bueiros como pontos de controle para gerar modelos de imagem extraídos em imagens em escala grande de áreas urbanas (como *templates*). Para a correspondência, os autores adotaram um mesmo fator de escala e aplicaram o método dos mínimos quadrados e a correspondência baseada em relações de distância. A abordagem encontrou problemas devido às variações de geometria e iluminação, por adotar um modelo representativo dos bueiros.

Dal Poz e Tommaselli (2000) desenvolveram um método para orientação automática usando feições extraídas de linhas retas. A abordagem baseou-se em correspondência por relações e em heurísticas para relacionar retas analiticamente do espaço objeto com suas feições correspondentes nas imagens. O principal problema é que a acurácia dos resultados depende da disponibilidade do grupo de linhas retas na configuração ideal, sendo uma condição não muito fácil de ser encontrada nas imagens de satélite em áreas com ausência de feições antrópicas. Outros estudos usando linhas como informação de controle terrestre podem ser encontrados, por exemplo, em Habib et al. (2003), Tommaselli e Medeiros (2010) e Marcato Junior e Tommaselli (2013).

Fraser et al. (2002) realizaram a triangulação de imagens de satélite usando funções racionais, transformação linear direta (*Direct Linear Transformation - DLT*) e projeção afim (uma variação da transformação afim, ver Lugnani (1987)). Na avaliação dos experimentos, rotatórias urbanas foram selecionadas como controle terrestre por apresentarem alto contraste na imagem e constituírem um alvo elíptico, cuja extração baseou-se em gradientes dos tons de cinza da imagem. Os centroides desses alvos foram determinados medindo-se seis ou mais pontos sobre a feição elíptica, tanto na imagem quanto em campo com receptor GNSS. As elipses foram ajustadas nas imagens usando o método dos mínimos quadrados. A técnica alcançou precisão subpixel: 0,3 m em planimetria e 0,7 m em elevação (em um estéreo par – Ikonos de 1 m). As desvantagens desses tipos de objetos é que ficam restritos a rotatórias urbanas. Além disso, vários pontos devem ser precisamente medidos para definir uma elipse em campo e nas imagens.

Tournaire et al. (2007) propuseram uma abordagem combinando imageamento aéreo e terrestre. Os autores usaram a sinalização viária sobre as ruas como controle terrestre. As imagens das marcas viárias foram adquiridas por sistemas de mapeamento móvel em áreas urbanas, e imagens aéreas de alta resolução foram usadas para extrair um banco de objetos comuns entre as imagens aéreas e terrestres. As marcas de ruas extraídas das imagens aéreas serviram como objetos de controle para a ressecção espacial das imagens coletadas por um sistema de mapeamento móvel terrestre. Nessa técnica, somente sinalizações viárias foram usadas como controle para estimar a posição dos objetos nas imagens.

Gianinetto e Scaioni (2008) desenvolveram uma técnica chamada *Automatic Ground control point Extraction (AGE)* para orientar imagens orbitais de alta resolução. A técnica baseou-se na correspondência entre uma imagem de satélite e uma ortoimagem previamente georreferenciada com maior resolução. Implementou-se um algoritmo de correspondência adaptativo com ajustamento por mínimos quadrados e detecção de erros grosseiros. Os problemas desta técnica estão na dependência da qualidade da ortoimagem de referência e na disponibilidade de imagens atualizadas.

Mitshita et al. (2008) realizaram um estudo para a orientação de modelos fotogramétricos usando centroides de telhados retangulares, adquiridos por um Sistema de Varredura a Laser Aerotransportado (SVLA). A técnica é aplicável porque os centroides são equivalentes a pontos de controle, podendo ser utilizados em sistemas fotogramétricos tradicionais. Apesar de haver dependência das características dos telhados, os autores demonstraram sua viabilidade de aplicação nos experimentos.

Li et al. (2013) apresentaram um trabalho sobre o registro de imagens aéreas e dados de SVLA em regiões desérticas. Foram utilizados arbustos existentes no deserto como primitivas para o registro. Extraíram-se os centroides desses arbustos para gerar triângulos semelhantes, os quais serviram como características na correspondência entre imagens. A semelhança entre os triângulos foi analisada pelos valores lado-ângulo-lado, e a verificação do registro baseou-se no algoritmo *RANdom SAmple Consensus* (RANSAC).

Considerações gerais e importantes a respeito dessas abordagens são as condições que restringem cada aplicação. Problemas foram identificados, conforme a primitiva de controle, quanto à existência da feição de interesse na área do projeto, dependência da disponibilidade de ortoimagens para a área de mapeamento e a acurácia condicionada ao nível de resolução e precisão das imagens de referência. Outra observação é que, independentemente do tipo de aplicação fotogramétrica, uma fonte de controle é sempre exigida para avaliar a qualidade geométrica da orientação de imagem.

2.6 Determinação de pontos para aerotriangulação

A determinação do apoio de campo para aerotriangulação de imagens consiste na definição de pontos com características identificáveis (ou bem definidos) em ambos os espaços objeto e imagem. As coordenadas terrestres dos pontos de controle são levantadas por receptores de sinais GNSS e, posteriormente, localizadas em suas respectivas posições nas imagens. Nesse levantamento de pontos, condições básicas em relação à identificação e à localização são exigidas:

- **Identificação:** o topógrafo deve verificar, em campo, as condições do ponto de controle em comparação com as imagens aéreas, observando a qualidade visual do ponto e se ocorre alguma oclusão ou obstrução do sinal GNSS. Uma vez que o ponto é selecionado, sua posição é determinada por técnicas de posicionamento (normalmente GNSS) e documentada com uma breve descrição e esboço, produzindo um registro de campo;
- **Localização:** o ponto deve estar em uma posição geométrica adequada para assegurar a solução fotogramétrica. Nas imagens, os pontos devem preferencialmente ser selecionados na área de superposição, o que melhora a qualidade geométrica por ter um número maior de raios. Além disso, áreas com sombras e próximas à água devem ser evitadas.

Nos blocos de imagem, sabe-se que o levantamento de pontos de controle é uma etapa demorada dentro do processo de orientação indireta de imagens. Porém, a combinação dos sistemas GNSS/inercial possibilita obter os dados de orientação do sensor que podem ser usados como injunções o que permite reduzir o número de pontos de controle. A rigor, um bloco de imagens poderia ser orientado em um sistema de coordenadas arbitrário, definido com sete injunções mínimas, usando apenas pontos de enlace. Os pontos de controle ou as coordenadas dos CPs servem para definir o referencial.

Os **pontos de enlace** são feições distinguíveis no o espaço objeto, visíveis e distribuídas na área de superposição do modelo, as quais são usadas para conectar os feixes de raios (com no mínimo seis pontos por modelo). Os pontos distribuídos na região de superposição de dois modelos subsequentes permitem a observação em três imagens (três raios), sendo os responsáveis pela conexão dos modelos vizinhos ou pela conexão simultânea de três feixes de raios. A principal diferença entre pontos de controle e de enlace é que as coordenadas 3D dos pontos de controle são obtidas por meio de medições diretas em campo e inseridas no ajustamento por feixes de raios como observações ou injunções, ao passo que as coordenadas de terreno dos pontos de enlace são incógnitas e determinadas indiretamente por intersecção de raios. Os pontos de enlace podem ser extraídos automaticamente por algum algoritmo que detecte e compare características de imagem. A fase de automação dos pontos de enlace está resolvida e aceita na aerotriangulação há alguns anos, recebendo ênfase na transferência automática de pontos, como publicado nos trabalhos de Helava (1988), Tsingas (1991) e Ackermann e Tsingas (1994). Outros estudos sobre pontos de enlace foram realizados para discutir sua distribuição, geometria e acurácia na solução final de aerotriangulação, como em Honkavaara e Jaakkola (1998) e Heipke et al. (2001).

Outra classe de pontos de grande importância são os **pontos de verificação**, cujas coordenadas de terreno não são usadas como observações, mas usadas para fins de validação. O propósito é realizar uma avaliação quantitativa da precisão e da acurácia alcançada no final do processo fotogramétrico, sem introduzir as coordenadas dos pontos de verificação no ajustamento, sendo, portanto, pontos independentes.

2.6.1 Distribuição e quantidade dos pontos

A qualidade geométrica de uma aerotriangulação depende não somente do número de imagens com superposição e pontos de controle, mas também da distribuição dos pontos e dos

dados fornecidos pelos sistemas GNSS/inercial.

Os pontos de controle devem ser localizados nas extremidades de faixas individuais de voo e ao longo do perímetro das configurações de blocos. Além disso, o controle terrestre é adicionado em intervalos de vários estéreo-modelos, limitando a propagação de erros nas coordenadas dos pontos de enlace ajustados, como pode ser consultado em Kraus (2007, p 246).

O número de pontos de controle exigido e suas posições adequadas dependem da aplicação fotogramétrica. Por exemplo, na solução de uma ressecção espacial, um mínimo de três pontos de controle é necessário, embora um número de redundância seja recomendado (WOLF e DEWITT, 2000).

Além da quantidade e distribuição dos pontos de controle, Honkavaara e Jaakkola (1998) identificaram em seu estudo outros fatores que também influenciam os resultados de uma aerotriangulação:

- Precisão nas medidas homólogas, quantidade, geometria e distribuição dos pontos de enlace;
- Geometria do bloco de imagens;
- Qualidade das imagens;
- Métodos de ajustamento do bloco e detecção de erros.

No caso dos pontos de verificação, estes não são inseridos no cálculo dos POEs, como já mencionado, mas são usados para avaliar a qualidade do ajustamento do bloco. Por isso, sua distribuição também é importante. Os pontos de verificação preferencialmente devem estar localizados nas posições de maior efeito de resposta do ajustamento, ou seja, afastados dos pontos de controle e distribuídos pelo bloco. A posição do ponto de verificação em relação ao ponto de controle é mais importante do que o número de pontos.

2.6.2 Levantamento de pontos de controle por GNSS

A fim de medir os pontos de controle em campo, receptores GNSS de dupla frequência podem ser usados tanto pelo método posicionamento relativo estático quanto pelo método posicionamento relativo semicinemático, em comunicação com estações contínuas.

O método estático implica na fixação do receptor em pontos e na coleta de dados por um tempo superior a 20 minutos, podendo durar horas, o que aumenta a acurácia. Para

posicionamentos inferiores a 20 minutos, diz-se tratar de posicionamento estático rápido. Terminada a coleta, vetores de linha de base são calculados entre pares de receptores, resultando nas componentes ΔX , ΔY e ΔZ entre pontos correspondentes no sistema de coordenadas terrestre (WOLF e DEWITT, 2000; MONICO, 2007).

O posicionamento relativo semicinemático considera que, para solucionar as ambiguidades (presentes em uma linha de base a ser determinada), a geometria envolvida entre duas estações e os satélites seja alterada. Assim, dados são coletados continuamente na base em, pelo menos, dois curtos períodos onde se pretende determinar as coordenadas. Essas coletas devem estar separadas por um intervalo entre 20 e 30 minutos para que seja alterada a geometria dos satélites e permitir a solução das ambiguidades. Outro método de levantamento com GNSS é o semicinemático, chamado *stop and go*, o qual utiliza duas ou mais unidades. Pelo menos um receptor é configurado como referência e permanece estacionário para solucionar as ambiguidades, enquanto outros receptores GNSS são movidos para ocupar novas posições por um curto intervalo de tempo, o suficiente para identificar a estação. Em seguida, desloca-se a unidade para a próxima posição, sem perder o sinal dos satélites. Todas as linhas de base são produzidas a partir da base GNSS de referência para as unidades móveis. O conceito do posicionamento relativo é que dois ou mais receptores rastreiem juntos pelo menos dois satélites simultaneamente (MONICO, 2007).

2.6.3 Identificação e medição de pontos de controle em imagens aéreas

Terminado o levantamento dos pontos de controle, procede-se à medição destes nas respectivas imagens. A forma convencional de medição em imagens digitais é realizada interativamente por um operador. Para isso, utilizam-se dispositivos de controle e softwares fotogramétricos que facilitam e permitem melhorar a medição com precisão subpixel. Utilizando módulos específicos, os softwares normalmente fornecem recursos para as medições monoscópica e estereoscópica, tendo-se também a opção para transferência automática de coordenadas imagem. Assim, as medições podem ser classificadas como:

- **Monoscópica:** o operador, com base em um relatório que descreve os pontos de controle levantados em campo, reconhece e mede as coordenadas dos pontos inseridos nas imagens, uma coordenada por vez;
- **Estereoscópica:** os pontos são medidos em pares estéreos de imagens. Os pontos homólogos são localizados e medidos com base em uma marca flutuante que deve ser

fundida, indicando o mesmo lugar da feição do ponto em duas imagens.

- **Híbrida:** tanto a medição monoscópica quanto a estereoscópica podem ser usadas em combinação com a transferência automática de coordenadas. Neste caso, faz-se um posicionamento manual em uma imagem (se monoscópica) ou em duas imagens (se estereoscópica) e, posteriormente, os pontos são transferidos por correlação e ajuste por mínimos quadrados para posições homólogas em imagens adjacentes.

Embora os recursos tecnológicos tenham evoluído, facilitando a geração de coordenadas de pontos fotogramétricos ou transferência de pontos, a identificação e a localização de uma coordenada imagem levantada no espaço objeto por receptor GNSS ainda é uma tarefa não automatizada e requer um operador para realizar esse passo inicial na aerotriangulação.

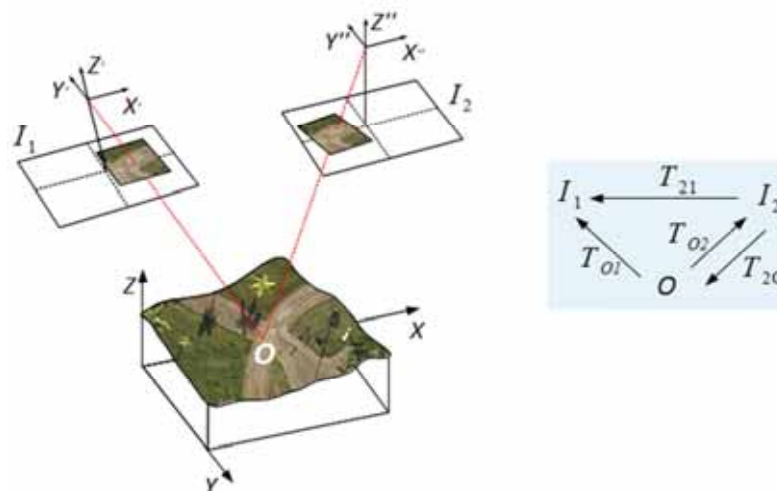
3. CORRESPONDÊNCIA DE IMAGENS E OPERADORES DE INTERESSE

A correspondência de imagens tem como objetivo encontrar pontos conjugados em descrições múltiplas de uma cena, o que é uma tarefa essencial nas aplicações fotogramétricas, sendo extremamente importante no processo de automatização, como comentado por Schenk (1999). Assim, o Capítulo 3 discorre sobre os fundamentos das técnicas de correspondência de imagens considerando duas classes gerais de algoritmos: correspondência baseada em área e correspondência baseada em características. Além disso, métodos de refinamentos, problemas que dificultam a correspondência e algumas estratégias de solução também são abordados.

3.1 Fundamentos da correspondência de imagens e reconstrução de objeto

Conforme Förstner (1993), na Figura 6, aparece um objeto O sendo mapeado pela transformação T_{O1} para a imagem I_1 e pela transformação T_{O2} para a imagem I_2 .

Figura 6 – Ilustração do princípio de reconstrução de objeto e correspondência de imagem.



Fonte: adaptado de Förstner (1993).

Havendo um número suficiente de imagens I_k (no mínimo duas), a reconstrução do objeto pode ser possível. Aspectos como iluminação, reflectância, detecção e similaridade descrevem essas transformações, as quais também são dependentes: da geometria do objeto (forma e posição); da fonte de iluminação (primitivas); dos sensores (da orientação interior)

etc. Se as propriedades de reflectância da superfície do objeto O puderem ser derivadas a partir de uma imagem, tem-se uma transformação composta, escrita como $T_{21} = T_{O1} \cdot (T_{O2})^{-1}$, contendo apenas parâmetros geométricos, os quais podem ser obtidos por técnicas de correspondência de imagens.

O mapeamento pode ser descrito na forma geral como $I_k = T_{Ok}(p_G, p_R, p_P, p_A, \dots)$, em que p_G, p_R, p_P, p_A são parâmetros desconhecidos que determinam as propriedades geométricas, radiométricas, posição da câmara e resposta atmosférica. Assim, o mapeamento estabelece a relação entre as características do objeto com suas características na imagem, segundo Förstner (1993).

Formalmente, assume-se que as transformações T_{Ok} sejam realizadas uma de cada vez. Isto permite derivar os parâmetros de reflectância p_R a partir de uma imagem, se conhecidos os demais parâmetros. Superfícies transparentes ou oclusas não entram nesta condição. Desse modo, como ilustra a Figura 6, a imagem I_2 pode ser determinada a partir de I_1 pela aplicação da transformação composta da Equação 5:

$$T_{21} = T_{O1}(T_{O2})^{-1}(p_G, p_R, p_P, p_A, \dots) \cdot \quad (5)$$

Nessa transformação, a parte geométrica engloba a perspectiva em I_2 , incluindo as variações da superfície e a perspectiva em I_1 . Quanto à parte radiométrica, se não houver forte dependência da forma ou da posição do objeto, os parâmetros p_R são reduzidos ou até mesmo eliminados. Neste caso, a diferença entre ambas as imagens I_1 e I_2 é conduzida pela forma do objeto. Logo, sob estas restrições, o estabelecimento de correspondência entre imagens é realizado (LANG e FÖRSTNER, 1998).

De acordo com Förstner (1993), a operação para comparar duas partes ou recortes de imagens I' e I'' pode ser determinada como: dados dois pontos P' e P'' dos recortes I' e I'' com coordenadas (c', l') e (c'', l'') e tons de cinza com intensidades g' e g'' , respectivamente, assume-se que esses dois pontos podem ser relacionadas pela transformação geométrica T_G entre as imagens, a qual é definida por um conjunto p_G de parâmetros desconhecidos, como aparece na Equação 6:

$$(c', l') = T_G(c'', l''; p_G) \cdot \quad (6)$$

Para relacionar as intensidades entre ambas as imagens, aplica-se a Equação 7, em que a transformação T_I relaciona as intensidades dos pixels no par de imagens, sendo P_I parâmetros desconhecidos:

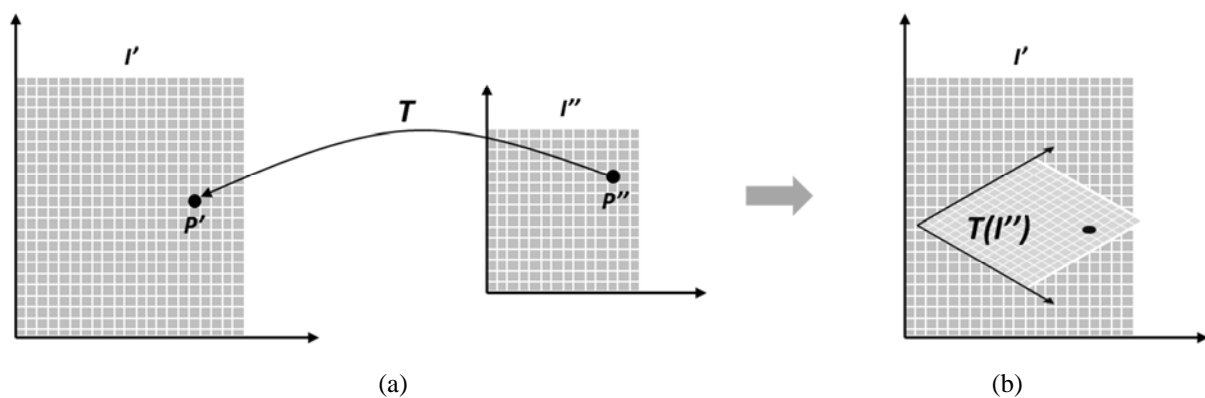
$$g' = T_I(g''; P_I). \quad (7)$$

As Equações 6 e 7 referem-se às informações de posição e intensidade, e se forem combinadas por uma transformação composta, produz-se o modelo completo de correspondência de imagens dado pela Equação 8, o qual permite relacionar um ponto do recorte I' com seu homólogo em I'' :

$$g'(c', l') = T_I \{ g'' [T_G(c'', l''; p_G)]; P_I \}. \quad (8)$$

Basicamente, como mostra a Figura 7, o problema de correspondência de imagem consiste em: localizar os pontos correspondentes P' e P'' e determinar a transformação T com os parâmetros geométricos e radiométricos simultaneamente.

Figura 7 – Princípio da correspondência de imagens: (a) Encontrar os pontos homólogos P' e P'' ; (b) Determinar a transformação T .



Fonte: adaptado de Förstner (1993).

A solução do problema de correspondência tem como base os tons de cinza das imagens e/ou os atributos dos pontos, os quais são obtidos a partir das funções de intensidade em uma vizinhança dos pontos de correspondência (FÖRSTNER, 1993).

Para alcançar a solução, normalmente se realizam as seguintes etapas:

- Primeiro, são selecionadas primitivas da imagem, podendo-se extraí-las, por exemplo, com operadores de interesse para compor uma lista de atributos, que pode ser a própria intensidade do pixel;
- Em seguida, pontos correspondentes são encontrados a partir das listas de cada imagem, desde que satisfaçam algum critério de similaridade.

Em geral, as técnicas para correspondência de imagem seguem estes passos, mas variam quanto às características de imagens, medidas de similaridade e algoritmos empregados. Várias técnicas também são baseadas na estrutura do conteúdo da imagem e na descrição das relações entre os objetos. Na sequência, as duas categorias de algoritmos mais frequentemente usadas serão apresentadas, as quais foram utilizadas neste trabalho.

3.2 Correspondência baseada em área

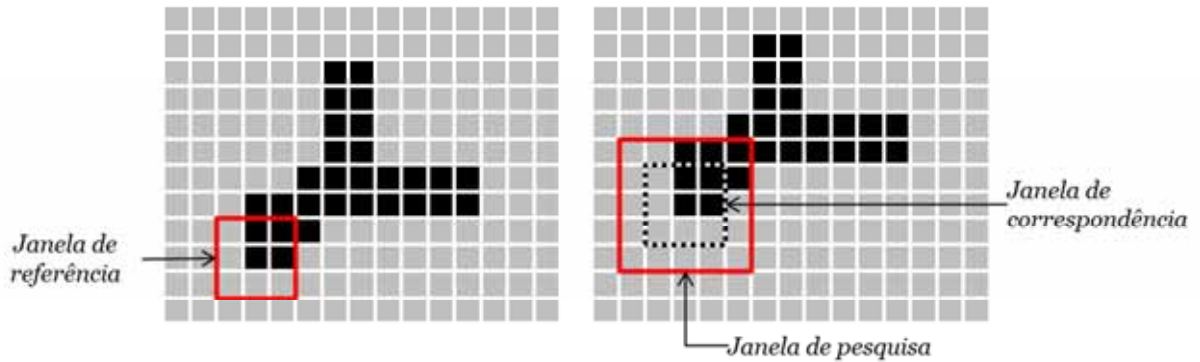
A técnica de correspondência por área (ou mesmo por sinal) identifica posições conjugadas com base nos tons de cinza (ou bandas espectrais) dos pixels em duas ou mais imagens. São utilizadas as distribuições desses tons de cinza em subimagens, sendo que uma delas é considerada como referência e a outra, que deve abranger o espaço de busca, como janela de pesquisa (SCHENK, 1999).

A partir de uma janela de referência g_r , contendo algum alvo de interesse, procura-se na janela de pesquisa g_p a existência da mesma primitiva com base em uma comparação de similaridade para encontrar a janela de correspondência. A determinação de subimagens e a redução do espaço de busca são fundamentais por motivos de processamento e para evitar ambiguidades, caso haja mais de um alvo com semelhanças ao alvo de referência.

A Figura 8 ilustra um exemplo com duas imagens. A primeira contém a janela de referência com o alvo de interesse, e a segunda mostra o espaço de busca para realizar a correspondência. Dessa forma, em cada posição da janela, são comparados os tons de cinza, medindo-se a similaridade por alguma função de correlação.

Diversas funções de correlação ou medidas de similaridade podem ser utilizadas nessa quantificação, tais como as funções: erro, erro quadrático, produto, quociente, correlação cruzada. Para detalhes sobre funções de correlação, pode-se consultar Yanniris (1974) e Galo (2003).

Figura 8 – Correspondência entre subimagens: janelas de referência, de busca e de correspondência.



Fonte: adaptado de Galo (2003).

O coeficiente de covariância cruzada (ρ) é uma função largamente usada devido a sua robustez. Idealmente os valores de brilho e contraste dentro de janelas de correspondência deveriam ser os mesmos, mas não se tem como garantir essa condição. Então, para eliminar problemas com diferenças radiométricas, faz-se a normalização da função para obter o coeficiente de correlação mostrado na Equação 9:

$$\rho(a,b) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{C-1} (g_r(i,j) - \bar{g}_r) \times (g_p(i+a, j+b) - \bar{g}_{p(a,b)})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{C-1} (g_r(i,j) - \bar{g}_r)^2 \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{C-1} (g_p(i+a, j+b) - \bar{g}_{p(a,b)})^2}}, \quad (9)$$

em que: \bar{g}_r e $\bar{g}_{p(a,b)}$ são as médias dos tons de cinza das respectivas janelas de referência e pesquisa; L e C são as, respectivas, dimensões de linha e coluna das janelas e (a, b) são translações da janela de referência dentro da janela de pesquisa.

O coeficiente de correlação normalizado no intervalo $[-1, 1]$ indica similaridade máxima se o valor é igual a 1; caso seja -1 , ocorre semelhança inversa e, se for 0, não há similaridade entre as correspondências. O cálculo é feito para cada nova posição da janela de referência dentro da janela de pesquisa. A posição com o maior coeficiente de correlação indica a melhor correspondência. Exemplos podem ser encontrados em Kraus (2007).

No final do procedimento de correspondência, a posição resultante é uma localização de valor inteiro do pixel, devendo-se proceder a um ajuste para alcançar a precisão subpixel.

3.2.1 Refinamento da correspondência por mínimos quadrados

Uma vez estabelecida a correspondência, pode-se refiná-la pelo método dos mínimos quadrados, ou *Least Squares Matching* (LSM), chegando-se a uma precisão de 1/10 pixel ou maior, como relatado por Gruen (2012, p. 37).

Gruen (1996) considera o LSM como uma generalização da correlação utilizada para comparar os tons de cinza entre duas imagens, tal que os parâmetros de posição e forma sejam determinados por um processo de ajustamento. A partir de uma imagem de referência, a imagem conjugada é modificada pela minimização das diferenças dos tons de cinza. No procedimento, duas imagens $f(x, y)$ e $g(x, y)$ são assumidas como funções bidimensionais discretas, sendo estabelecidas como regiões conjugadas. A função $f(x, y)$ é definida como a janela de referência (ou *template*) e $g(x, y)$, como a janela de busca (ou *search window*). A correspondência é (idealmente) estabelecida se ocorre a igualdade da Equação 10:

$$f(x, y) = g(x, y). \quad (10)$$

No entanto, devido a efeitos randômicos nas imagens, acrescenta-se um vetor de ruído $e(x, y)$, resultando na Equação 11:

$$f(x, y) - e(x, y) = g(x, y). \quad (11)$$

A localização de $g(x, y)$ deve ser determinada proporcionando o melhor ponto de correspondência. Isto é alcançado pela minimização de uma função objetivo que mede a diferença entre os tons de cinza da janela de referência e da janela de busca, ou seja, minimizam-se os resíduos. Essa localização é descrita pelos deslocamentos Δx e Δy , a partir de uma posição inicial de $g(x, y)$, que permite obter a aproximação da região na imagem conjugada $g^o(x, y)$.

Para realizar o ajuste e obter uma melhor correspondência, parâmetros de formação da imagem e de correções radiométricas são introduzidos em um mesmo sistema, bem como os parâmetros de deslocamento. Considerando-se os tons de cinza em uma grade, a formação da imagem é produzida pela reamostragem de $g^o(x, y)$ sobre os pontos da grade transformada. Assim, a transformação geométrica é modelada pela Equação 12, a qual representa uma

transformação afim, sendo (x_0, y_0) as posições dos pontos na grade em $g^o(x, y)$ e a_i e b_i os parâmetros da transformação para serem estimados :

$$\begin{aligned} x &= a_1 + a_2x_0 + a_3y_0 \\ y &= b_1 + b_2x_0 + b_3y_0. \end{aligned} \quad (12)$$

A transformação radiométrica é dada pela função linear da Equação 13:

$$f(x, y) = r_1 + r_2 \cdot g(x, y), \quad (13)$$

em que: r_1 e r_2 modelam, respectivamente, as diferenças de brilho e contraste entre as subimagens.

Esse tipo de transformação é considerado como um caso não linear e, por isso, requer a linearização da função $g(x, y)$ para solucioná-la por LSM, o que gera a Equação 14:

$$f(x, y) - e(x, y) = g^o(x, y) + \frac{\partial g^o(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial g^o(x, y)}{\partial y} dy, \quad (14)$$

sendo: $dx = \frac{\partial x}{\partial p_i} dp_i$ e $dy = \frac{\partial y}{\partial p_i} dp_i$.

A diferenciação da transformação afim das Equações 12 resulta nas Equações 15, as quais incluem os parâmetros de deslocamentos (Δx e Δy), representados por a_i e b_i :

$$\begin{aligned} dx &= da_1 + x_0 da_2 + y_0 da_3 \\ dy &= db_1 + x_0 db_2 + y_0 db_3. \end{aligned} \quad (15)$$

Essas diferenciações correspondem aos gradientes da imagem nas direções x e y e podem ser substituídas pelas notações simplificadas: $g_x = \frac{\partial g^o(x, y)}{\partial x}$ e $g_y = \frac{\partial g^o(x, y)}{\partial y}$.

Dessa forma, considerando-se estas notações e a adição de dois parâmetros radiométricos r_1 (brilho) e r_2 (contraste) no mesmo sistema dos parâmetros geométricos, tem-se a Equação 16:

$$f(x, y) - e(x, y) = g^o(x, y) + g_x da_1 + g_x x_0 da_2 + g_x y_0 da_3 + g_y db_1 + g_y x_0 db_2 + g_y y_0 db_3 + r_1 + r_2 \cdot g^o(x, y). \quad (16)$$

Para solucionar essa Equação 16 por mínimos quadrados, os termos são agrupados em matrizes da seguinte maneira:

- Parâmetros em $X^T = \{da_1, da_2, da_3, db_1, db_2, db_3, r_1, r_2\}$;
- Coeficientes na matriz A ;
- Observações em L , dadas a partir das diferenças $L = f(x, y) - g^o(x, y)$.

A estimação dos parâmetros é realizada pela Equação 17, podendo-se atribuir pesos P às observações:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L). \quad (17)$$

O vetor de resíduos V é obtido pela Equação 18:

$$V = A\hat{X} - L. \quad (18)$$

O fator de variância *a posteriori* é calculado pela Equação 19 e resulta em um estimador para a diferença entre o ruído da janela de referência e o ruído da imagem transformada:

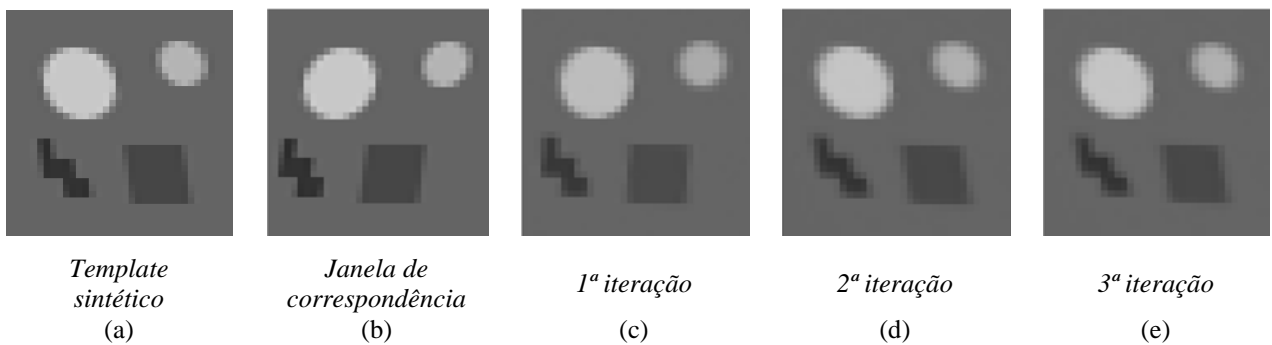
$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{1}{m} V^T P V, \quad (19)$$

em que $m = n - u$ é a redundância; u , o número de parâmetros de transformação e n , o número de observações. Esses resíduos representam as diferenças entre os tons de cinza da janela de busca transformada e os tons de cinza da janela de referência.

Devido à não linearidade do sistema de equações, a solução final é atingida iterativamente, sendo necessários valores aproximados iniciais para os parâmetros. Depois que o vetor solução da Equação 17 é obtido, a transformação afim da Equação 12 é aplicada. Então, $g^o(x, y)$ é reamostrada sobre um novo conjunto de coordenadas, e a matriz A é novamente avaliada, produzindo uma imagem reamostrada. Devido ao mau condicionamento do sistema, a solução pode divergir e, para evitar isso, as iterações continuam se cada elemento do vetor ajustado \hat{X} permanecer abaixo de determinado limiar. Desse modo, faz-se o ajuste simultâneo dos seis parâmetros para modelar as distorções geométricas com os outros dois parâmetros radiométricos para minimizar as diferenças de brilho e contraste.

A Figura 9 mostra um exemplo de uma sequência de ajustes por LSM entre imagens. As Figuras 9(a) e (b) referem-se, respectivamente, a um *template* sintético e seu correspondente recorte da janela de busca sintética, a qual é deformada no processo de ajuste em função desse *template*. Para o exemplo, a janela de busca foi previamente modificada em relação ao *template* da seguinte forma: rotação de 5°, variação de 20% em brilho e contraste e deformação de 2 pixels em xy . Neste caso, o ajustamento por LSM ocorreu em três iterações, e o resultado de cada iteração é apresentado nas Figuras 9(c), (d) e (e), em que as diferenças geométricas e radiométricas foram minimizadas.

Figura 9 – Sequência de três iterações para ajustar a janela de correspondência ao *template* sintético. Os ajustes são realizados por LSM, minimizando as diferenças geométricas e radiométricas.



3.2.2 Avaliação das estimativas

A avaliação de resultados é uma tarefa essencial no procedimento de correspondência e pode ser aplicada nesse procedimento. A precisão dos parâmetros estimados pelo LSM é verificada na matriz de covariância, dada pela Equação 20:

$$K_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 Q_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}. \quad (20)$$

Os desvios-padrão dos parâmetros de deslocamento a_1 e b_1 das Equações 21 possibilitam obter a precisão da correspondência na janela de busca:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\Delta x} &= \hat{\sigma}_{a_1} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{a_1}} \\ \hat{\sigma}_{\Delta y} &= \hat{\sigma}_{b_1} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{b_1}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Em resumo, segundo Schenk (1999), os procedimentos para aplicação da técnica por mínimos quadrados consistem em:

- Selecionar o ponto central da janela de referência em uma imagem;
- Determinar localizações aproximadas para a janela de referência dentro do espaço de busca;
- Iniciar a iteração no espaço de busca por um ponto aproximado, calculando-se os parâmetros da transformação geométrica e radiométrica;
- Transformar a janela de correspondência e determinar os tons de cinza por reamostragem;
- Repetir os processos de ajustamento e reamostragem até que um critério de parada seja satisfeito;
- Avaliar a qualidade do ponto de correspondência ajustado.

A correspondência por mínimos quadrados também pode ser realizada com outras funções de transformação mais simples, considerando-se, por exemplo, somente translação, como consta em Kraus (2007). Para mais detalhes sobre refinamento subpixel usando mínimos quadrados, alguns trabalhos podem ser consultados, como Ackermann (1984), Perl (1984) e Agouris e Schenk (1992).

3.3 Correspondência baseada em características

Os algoritmos baseados em características envolvem no mínimo três passos principais. Primeiro, características de interesse (como arestas, vértices, curvas entre outras feições) são detectadas nas imagens por meio de operadores. Em seguida, constroem-se descritores dessas características usando um conjunto de atributos. E, por fim, com base na similaridade entre descritores, são estabelecidas as correspondências. Os dois primeiros passos do processo são realizados em cada imagem independentemente.

3.3.1 Características locais e globais

As características podem ser locais ou globais. No caso local, referem-se a atributos de primitivas como pontos, bordas ou regiões e, no caso global, referem-se a polígonos ou estruturas. Para diferenciar uma característica, utiliza-se um conjunto de atributos, como posição, orientação e magnitude das bordas (gradientes), comprimento e curvatura de linhas,

tamanho e brilho médio das regiões etc. Relações radiométricas e geométricas entre características também podem ser estabelecidas. No caso radiométrico, estas relações podem ser dadas pela diferença entre tons de cinza ou variância entre duas regiões adjacentes e, no caso geométrico, pelo uso de ângulos entre dois lados de polígonos adjacentes ou a menor distância entre duas bordas (HEIPKE, 1997).

A estrutura dos objetos também pode ser usada na correspondência entre feições. São usadas descrições definidas por um conjunto de características e suas inter-relações. Se utilizadas as características junto às relações geométricas e topológicas, então a tarefa de correspondência pode ser automatizada sem qualquer estimativa inicial. As primitivas e suas relações podem ser descritas por um conjunto de atributos.

Por exemplo, um ponto P_i pode ser descrito como $P_i = \{coordenadas (x, y), nível\ de\ cinza = g, gradiente = t\}$ e uma relação r_j entre duas linhas como $r_j = \{linhas\ l_m, l_n (cruza = sim, ângulo = a)\}$. O objetivo é encontrar uma correspondência ou a melhor combinação entre as primitivas e as relações descritas. Uma função de avaliação é necessária para encontrar a maior similaridade entre as combinações. A estrutura de armazenamento pode utilizar algoritmos baseados em árvores. A busca e a comparação entre os nós da árvore conduzem para a solução. Outras estratégias de solução desse problema podem usar relaxação (GALO, 2003), programação dinâmica (DAL POZ et al., 2007), estimação robusta (STEWART, 1999), correlação cruzada (SCHENK, 1999) etc. O uso de restrições para reduzir o espaço de busca também contribui para a solução, como geometria epipolar, uso de mais de duas imagens e busca hierárquica, segundo Gruen (2012).

De acordo com Lang e Förstner (1998), o uso de características, ao invés de tons de cinza, permite escolher um atributo mais invariante em relação a distorções, tais como iluminação, reflexão ou geometria. Galo (2003) descreveu em seu trabalho uma revisão sobre importantes abordagens com diversas propostas de solução para o estabelecimento da correspondência de imagens.

3.3.2 Fatores a considerar na correspondência baseada em características

Na correspondência por características, alguns fatores importantes devem ser considerados, como:

- **Elementos a identificar:** compreendem primitivas como ponto, linha e regiões que sejam comuns entre as imagens de referência e de busca (FONSECA e MANJUNATH, 1996);
- **Extração de características:** os atributos são dos tipos ponto, linha e regiões, devendo ter atributos distinguíveis e ser de fácil identificação em múltiplas imagens. A maioria dos algoritmos empregados aplica algum operador de interesse. As primitivas para a correspondência são extraídas de todas as imagens independentemente (BARNARD e THOMPSON, 1980; FÖRSTNER, 1986);
- **Estratégia de busca:** empregada para reduzir o tamanho do espaço de busca de modo a melhorar o processo de correspondência das imagens por minimizar o custo computacional e diminuir as possibilidades de ambiguidades (SCHENK, 1999). Este tópico será detalhado na Seção 3.6;
- **Seleção dos resultados:** é difícil um elemento correlacionar-se com um único elemento em outra imagem, principalmente se não há imposições restritivas. As condições são necessárias devido aos problemas de distorções geométricas ou radiométricas. A tarefa de seleção do elemento homólogo entre tantos possíveis é um processo estatístico, baseado em medidas de similaridade (SCHENK, 1999);
- **Controle de qualidade:** os elementos homólogos devem apresentar coerência entre si, exigindo análise global ou controle estatístico sobre as correspondências (SCHENK, 1999).

Tanto a correspondência de imagem quanto sua análise geral exigem que uma imagem tenha pontos homólogos na outra. Nesse sentido, Haralick e Shapiro (1993) propuseram alguns critérios para corresponder feições distinguíveis que, idealmente, requerem atributos quanto à:

- **Distinção:** os pontos devem ser nítidos e distintos de seus vizinhos. Esta definição especialmente exclui pontos situados na mesma borda. Pontos distinguíveis podem ser cantos, manchas, locais altamente texturizados, entre outros;
- **Invariância:** a posição e a seleção dos pontos de interesse devem ser invariantes em relação às distorções geométricas e radiométricas, as quais podem incluir robustez em consideração a erros grosseiros ou aleatórios. Invariância e distinção são as principais propriedades que os pontos de interesse devem ter, pois influenciam os passos da análise realizada posteriormente;

- **Estabilidade:** tanto a posição quanto a seleção devem apresentar robustez contra ruídos de imagem e erros grosseiros. Isto assegura que os pontos de interesse na imagem correspondam aos pontos de interesse no objeto;
- **Unicidade:** Além de ser distinguível localmente, um ponto de interesse também deve ter uma singularidade global, de modo a melhorar a distinção de padrões repetitivos;
- **Interpretação:** os pontos de interesse devem ter significados importantes, tal que possam ser usados para análise de correspondência, podendo ser cantos, junções de linhas, centro de círculos etc.

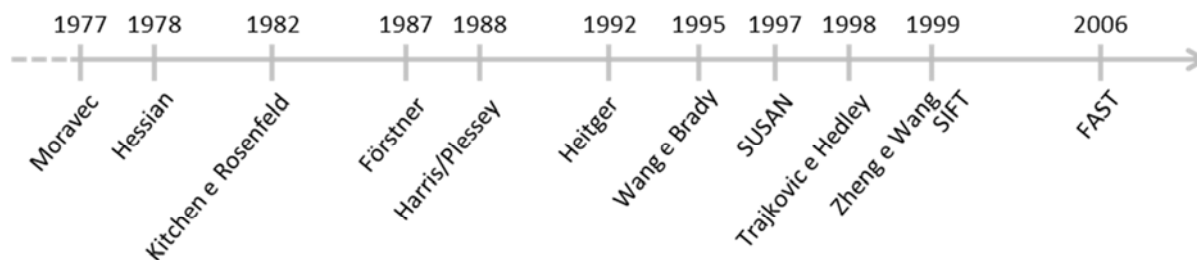
As diversas aplicações que usam a correspondência por características originam várias técnicas que são desenvolvidas para resolver problemas específicos. Conforme Fonseca e Manjunath (1996), a variedade de sensores, a geometria das imagens e as características das próprias primitivas em cena produzem efeitos particulares que requerem soluções específicas, logo, os algoritmos de correspondência não garantem resultados aceitáveis em todas as aplicações.

3.3.3 Detectores e descritores de características de imagem

Inicialmente, apresenta-se uma distinção entre detectores e descritores de características. Remondino (2006) considera os descritores como operadores que identificam nas imagens localizações geometricamente estáveis, como um ponto ou região, sob diferentes transformações e contendo informação distinguível. Os resultados geralmente são chamados de pontos de interesse, cantos, regiões afim ou invariante. Já os detectores, ao invés de analisar a imagem fornecendo, por exemplo, uma posição (ou ponto de interesse), proporcionam também informações sobre o pixel extraído armazenadas em um vetor, o qual é usado no processo de correspondência.

Uma das primeiras abordagens sobre operadores foi desenvolvida por Moravec (1977), quando introduziu o conceito de pontos de interesse e concluiu que esses pontos poderiam ser usados para encontrar regiões correspondentes em imagens sucessivas. Desde então, diferentes algoritmos têm sido desenvolvidos. A Figura 10 destaca importantes operadores publicados nas últimas décadas para detectar pontos de interesse, como relatado por Jazayeri e Fraser (2010). Uma descrição resumida desses vários algoritmos é apresentada na sequência.

Figura 10 – Importantes operadores desenvolvidos nas últimas décadas a partir do conceito introduzido por Moravec (1977).



Fonte: adaptado de Jazayeri e Fraser (2010).

Detector Moravec (MORAVEC, 1977): o operador tem como base a medida de variância direcional, originalmente desenvolvido para quatro direções, e adota o menor resultado como a medida de interesse. Assim, detecta pontos com grandes variações de intensidade em cada direção.

Detector Hessian (BEAUDET, 1978): calcula o canto pelo determinante da matriz Hessiana, ou seja, procura por locais que tenham forte mudança de gradiente ao longo de direções ortogonais. O máximo local do canto indica os cantos na imagem. O determinante tem relação com a variância direcional, sendo esta medida invariante à rotação. Uma versão estendida chamada Hessian-Laplace, proposta por Mikolajczyk e Schmid (2004), permite detectar pontos invariantes à escala e rotação.

Detector Kitchen-Rosenfeld (KITCHEN e ROSENFELD, 1982): calcula uma medida de canto com base na mudança de direção do gradiente ao longo de uma borda e multiplica o resultado pela magnitude do gradiente local.

Detector Förstner (FÖRSTNER e GÜLCH, 1987): determina analiticamente a posição subpixel de um canto com base em vetores perpendiculares às direções de máximo gradiente sobre as bordas. Förstner foi o primeiro a relatar que o operador de interesse pode ser analisado pelo inverso da matriz normal no método dos mínimos quadrados.

Detector Harris/Plessey (HARRIS e STEPHENS, 1988): calcula uma matriz relacionada com a função de autocorrelação (ou correlação cruzada) de um sinal. Os quadrados da primeira derivada são calculados sobre uma janela, e os autovalores da matriz resultante são as curvaturas principais da função de autocorrelação. Detecta-se o ponto de interesse quando se encontra duas curvaturas altas. Versões estendidas desse detector foram desenvolvidas por Mikolajczyk e Schmid (2001) e Brown et al. (2005), tornando os pontos invariantes à escala e rotação.

Detector Heitger (HEITGER et al., 1992): utiliza filtros Gabor para derivar uma característica unidirecional para várias direções. A primeira e a segunda derivada são calculadas e combinadas para obter pontos de interesse.

Detector Wang e Brady (WANG e BRADY, 1995): o algoritmo de detecção de canto é baseado na medição da curvatura da superfície e procura por locais em que há grande curvatura ao longo de uma borda, ou seja, em que muda a direção rapidamente.

Detector SUSAN (*Small Univalued Segment Assimilating Nucleus*) (SMITH e BRADY, 1997): analisa diferentes regiões separadamente com medições locais para encontrar lugares em que a fronteira da região tenha curvatura alta. O brilho de cada pixel dentro de uma máscara circular é comparado ao pixel central para definir uma área com brilho semelhante a esse pixel central (núcleo), o que resulta na seleção de pixels. Pelo cálculo da área obtida e com um limiar geométrico, obtém-se a resposta do operador. De modo similar a este operador SUSAN, Trajkovic e Hedley (1998) também propuseram um detector que analisa a semelhança de um pixel central em relação aos pixels vizinhos.

Detector Zheng e Wang (ZHENG et al., 1999): foi modificado o detector Harris/Plessey na fase de detecção de canto na direção do gradiente, baseando-se no módulo da direção do gradiente e em uma restrição para a resposta do operador.

Descritor SIFT (LOWE, 1999): detecta, extrai pontos invariantes e constrói descritores locais de uma imagem. O descritor é um histograma gerado a partir das informações de gradientes locais e proporciona que a técnica seja invariante parcialmente à escala, rotação, mudanças de iluminação e ponto de vista da câmara. Outras versões derivadas do descritor SIFT também podem ser encontradas, entre as quais se destacam as técnicas: *Gradient Location and Orientation Histogram* (GLOH) de Mikolajczyk e Schmid (2005); *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) proposta por Dalal e Triggs (2005) e *Speeded Up Robust Features* (SURF) apresentada por Bay et al. (2006). De modo geral, esses descritores proporcionam encontrar pontos homólogos entre imagens mesmo quando há alguma distorção geométrica e radiométrica e, em razão dessas propriedades, esse tipo de descritor torna-se adequado para os propósitos desta tese, em que é preciso localizar pontos homólogos entre imagens aéreas e terrestres, as quais têm várias diferenças entre si. Por isso, o interesse é dado ao descritor SIFT (na técnica original) e será detalhado em seção à parte devido a sua importância para este estudo.

Além do uso de descritores, algoritmos de inteligência artificial também são encontrados para extrair pontos de interesse, como é o caso do *Features from Accelerated*

Segment Test (FAST) de Rosten e Drummond (2006), o qual usa algoritmos de aprendizagem de máquina para classificar pixels como cantos ou não-cantos, a partir de um conjunto de padrões pré-definidos. Uma rede neural de três camadas é treinada para reconhecer os cantos em pequenas janelas de imagem. Apesar da simplicidade de implementação, tem sensibilidade a ruídos de imagem.

Todas essas abordagens, resumidamente apresentadas, realizam a detecção do ponto de interesse, mas um procedimento para a correspondência ainda é necessário, podendo-se utilizar, conforme a primitiva, cálculos de distância, coeficiente de correlação, LSM etc.

3.4 Técnica SIFT

Originalmente desenvolvida por Lowe (1999), a técnica SIFT, como mencionado na seção anterior, tem propriedades importantes que alcançam parcialmente a invariância à escala, rotação, iluminação e perspectiva, com base em descritores de imagem. A geração dos descritores SIFT baseia-se em quatro etapas principais: detecção de pontos extremos no espaço-escala; localização dos pontos-chave; atribuição da orientação e construção do descritor. Na sequência, estas etapas serão detalhadas considerando um exemplo de imagem terrestre. As seções de 3.4.1 até 3.4.4 foram baseadas nos trabalhos desenvolvidos por Lowe (1999, 2004).

3.4.1 Detecção de pontos extremos

Esta primeira etapa consiste em encontrar pontos extremos, isto é, máximos e mínimos locais. Um filtragem pela função *Difference of Gaussian* (DoG) é aplicada como uma pequena variação de escala para obter características estáveis da imagem original. A partir de um desvio-padrão σ inicial para o filtro gaussiano, o procedimento gera versões da imagem original modificadas por uma constante k , ou seja, $(\sigma, k\sigma, k^2\sigma, \dots)$. O valor de k é definido por $k = 2^{1/s}$, em que s representa um número inteiro de intervalos entre as DoGs. A DoG é obtida pela diferença entre as versões de imagem geradas, incluindo-se também a imagem original. Isto permite detectar variações de intensidades, como bordas.

As Equações 22 formalizam matematicamente a DoG:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y)$$

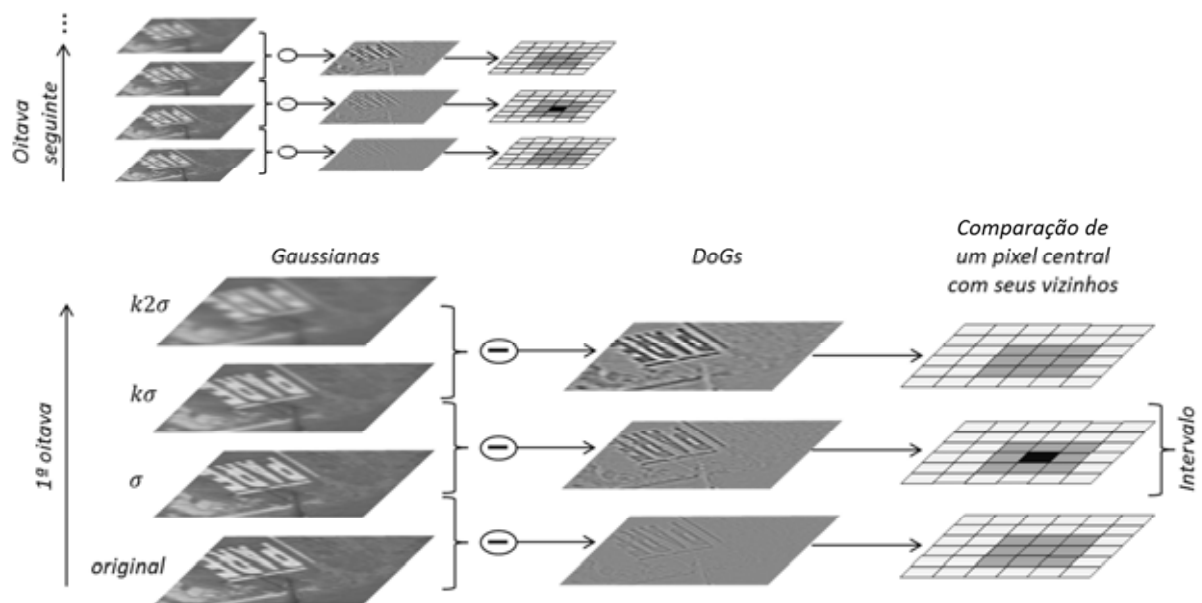
ou

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma),$$
(22)

em que $L(x, y, \sigma)$ é uma imagem gerada a partir da convolução de um filtro gaussiano $G(x, y, \sigma)$ com a imagem original $I(x, y)$.

O procedimento aplicado está ilustrado na Figura 11, em que são mostradas, além da imagem original, as versões filtradas e as resultantes DoGs, formando um conjunto que recebe o nome de primeira oitava.

Figura 11 – Oitava composta por imagens filtradas e imagens DoG, com $k = 2$ e $\sigma = 0,5$. Mostra-se um pixel central sendo comparado com seus 26 vizinhos. A segunda oitava é gerada a partir da subamostragem para a metade da imagem filtrada com desvio-padrão σ . A imagem central entre as DoGs indica intervalo $s = 1$.



Fonte: adaptado de Lowe (2004).

Em seguida, a imagem filtrada com desvio σ é subamostrada à metade para ser usada como imagem de entrada na próxima geração de oitava. O número de oitavas não é fixo, variando-se conforme as necessidades da aplicação. Quanto ao termo empregado, oitava, este pode ser explicado analogamente à música, em que uma oitava representa o intervalo entre uma nota musical com outra de metade ou dobro de sua frequência. No caso da técnica SIFT, a cada oitava, ocorre sempre a redução da escala para a metade na oitava seguinte.

Quando a geração de oitavas termina, cada pixel da imagem DoG é comparado com seus vizinhos na própria imagem e naquelas adjacentes. No exemplo mostrado da Figura 11, há somente uma imagem DoG entre outras duas DoGs. Isto indica intervalo $s = 1$, e a partir dessa DoG central, cada pixel é analisado, neste caso, em relação aos seus 26 vizinhos. Desse modo, faz-se a seleção dos pontos máximos ou mínimos locais, os quais se tornam candidatos a pontos-chave.

3.4.2 Localização dos pontos-chave

Este passo tem o propósito de melhorar a exatidão da localização de cada um dos pontos máximos e mínimos selecionados na etapa anterior. O objetivo é rejeitar pontos de baixo contraste (logo, sensíveis a ruídos) e aqueles localizados ao longo de uma borda.

Para aumentar a qualidade das correspondências, ajusta-se uma superfície quadrática ao ponto de amostragem local, permitindo ajustar a localização do máximo. Esta abordagem usa o polinômio de Taylor com grau dois na função espaço-escala $D(x, y, \sigma)$, transladada de modo que a origem esteja no ponto de amostragem da região, como mostra a Equação 23:

$$D(x) = D + \frac{\partial D^T}{\partial x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} x, \quad (23)$$

em que: $D = D(x, y, \sigma)$ e suas derivadas são verificadas no ponto da amostra; $x = (x, y, \sigma)^T$ é o deslocamento em relação a esse ponto.

A localização do extremo \hat{x} é determinada com as derivadas parciais da função em relação a x e igualando-a a zero, o que produz a Equação 24:

$$\hat{x} = - \frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial x^2} \frac{\partial D}{\partial x} \quad (24)$$

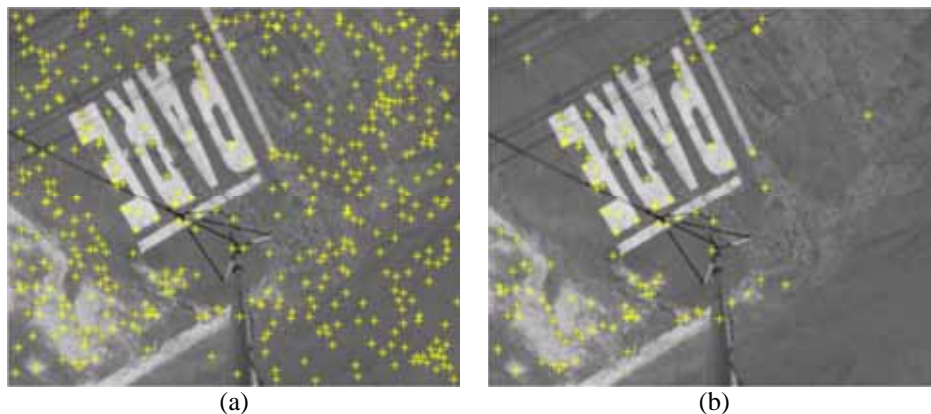
Como resultado, tem-se um sistema linear 3×3 com solução por mínimos quadrados. Se o deslocamento obtido for maior que 0,5, então o extremo está mais próximo a outro ponto de amostra. Neste caso, troca-se o ponto e um novo ajuste é realizado. Ao final, o deslocamento de \hat{x} é adicionado à localização do ponto em análise, resultando no valor da função no extremo $D(\hat{x})$, dado pela Equação 25:

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \hat{x} \quad (25)$$

Com a finalidade de refinar os pontos de baixo contraste, Lowe (2004) recomenda rejeitar os resultados inferiores a algum limiar previamente definido. Mesmo assim, fazer o refinamento somente por um limiar ainda não é suficiente, pois a função DoG possui altos valores de resposta ao longo das arestas, ficando instável a pequenos ruídos.

Como exemplo, a Figura 12(a) mostra o resultado quando não se define nenhum limiar de rejeição (204 pontos-chave). Já a Figura 12(b) exibe o resultado após a aplicação de um limiar de 0,03, gerando 41 pontos-chave. Esses resultados foram gerados com uma implementação em Matlab disponibilizada por Lowe (2005), usando-se o limiar sugerido.

Figura 12 – Imagens usando três oitavas: (a) Sem limiar de rejeição, encontrados 204 pontos-chave; (b) Com limiar 0,03, encontrados 41 pontos-chave.



Para solucionar esse problema, calcula-se a razão entre curvaturas principais, partindo do pressuposto que: um pico mal definido na função DoG forma uma grande curvatura principal do lado oposto da borda e uma pequena curvatura na direção perpendicular. Assim, obtêm-se as curvaturas principais em cada localização e escala do ponto-chave, com o cálculo da matriz Hessiana H , dada pela Equação 26:

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

em que: D_{xx} , D_{yy} e D_{xy} são as derivadas parciais de segunda ordem em relação a x , y e xy , respectivamente. Outros trabalhos sobre detectores de pontos de interesse também utilizaram

a análise dessa matriz H , tais como apresentados por Baudet (1978), Harris e Stephens (1988) e Förstner (1993).

Como os autovalores de H são proporcionais às curvaturas de D , basta calcular a razão entre o traço $Tr(H) = D_{xx} + D_{yy}$ (soma dos autovalores) e o determinante $Det(H) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2$ (produto dos autovalores). Caso o determinante seja negativo, descarta-se o ponto em análise. Para definir quais pontos serão pontos-chave, aplica-se um limiar para a razão de curvaturas principais, definido na relação 27:

$$\frac{Tr(H)^2}{Det(H)} < \frac{(q+1)^2}{q}, \quad (27)$$

em que q representa a razão entre o maior autovalor e o menor autovalor. Lowe (2004) sugere desconsiderar pontos com razão inferior a dez.

Até este passo, foram extraídos e refinados os pontos-chave. As duas próximas etapas referem-se à orientação desses pontos e à construção do descritor.

3.4.3 Atribuição da orientação

A atribuição é baseada em propriedades locais de cada ponto-chave, o que possibilita alcançar a invariância à rotação de imagem.

Nesta etapa, o desvio-padrão σ do ponto-chave é usado para selecionar a imagem filtrada $L(x, y)$. Isto garante que os cálculos sejam realizados em escala invariante. Todos os pontos da imagem $L(x, y)$ têm seus gradientes calculados, sendo a magnitude $m(x, y)$ e a orientação $\theta(x, y)$ dadas pelas Equações 28:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (28)$$

$$\theta(x, y) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right).$$

Então, constrói-se um histograma de gradientes h_θ para os pixels da região do ponto-chave. Lowe (2004) recomenda dividir os 360° de rotação em 10 intervalos, gerando 36 valores para o ângulo θ .

Três pesos são dados para os pixels da vizinhança do ponto-chave:

1. α : definido pela distância normalizada entre a orientação dos pixels e a orientação do ponto-chave;
2. $m(x, y)$: magnitude do gradiente;
3. $g(\Delta x, \Delta y, \sigma')$: janela gaussiana circular com deslocamentos Δx e Δy do pixel sob análise em relação ao ponto-chave e desvio-padrão $\sigma' = 1,5\sigma$ do ponto-chave.

Com estes três pesos, obtém-se o histograma de gradientes h'_θ atualizado pela Equação 29:

$$h'_\theta = h_\theta + \alpha \cdot m(x, y) \cdot g(\Delta x, \Delta y, \sigma'). \quad (29)$$

Os máximos no histograma de gradientes representam as direções dominantes dos gradientes locais. Além do pico do histograma, também são usados para definir a orientação outros picos com valor acima de 80% em relação ao maior pico obtido. No final, ainda se faz o ajustamento de uma parábola aos três valores mais próximos de cada pico para interpolar a posição do máximo (LOWE, 2004). Posteriormente, pode-se construir o descritor.

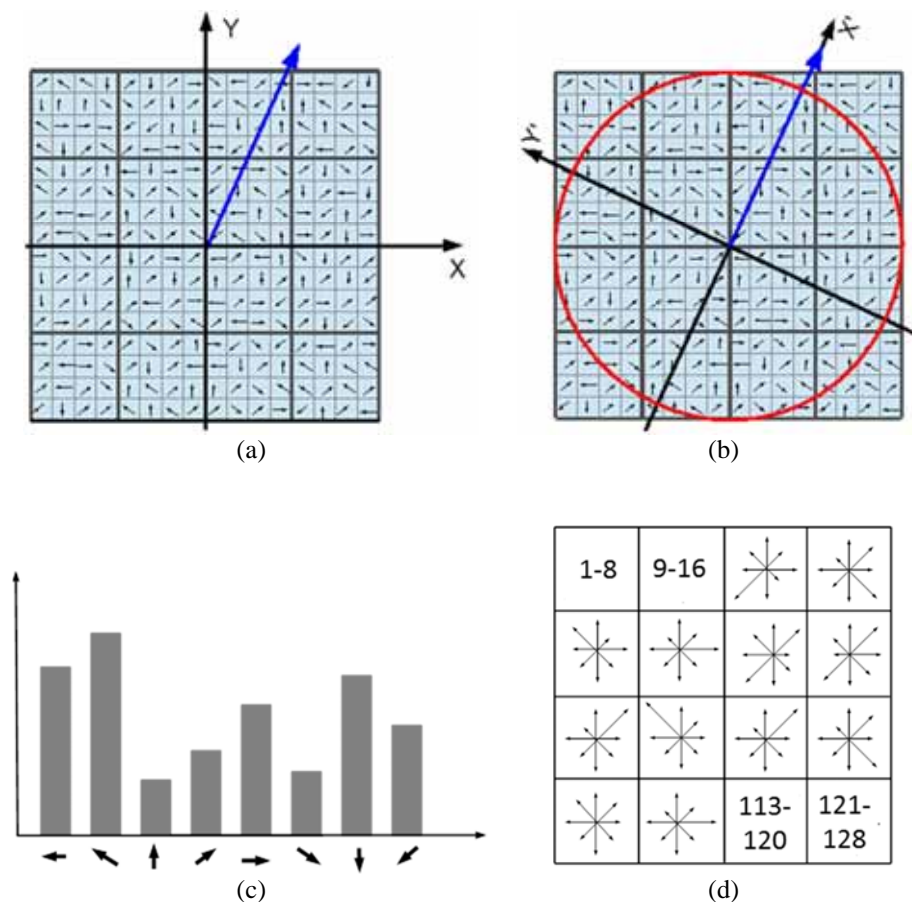
3.4.4 Construção do descritor local

Nesta etapa, os vetores descritores que representam as regiões de cada ponto-chave são calculados em relação à orientação. Os passos, segundo Lowe (2004), consistem em (ver ilustração da Figura 13):

- Selecionar a imagem filtrada $L(x, y)$ com desvio-padrão σ referente à oitava do ponto-chave;
- Rotacionar as orientações dos gradientes em relação à orientação do ponto-chave;
- Aplicar uma ponderação gaussiana com σ' igual à metade do tamanho da janela do descritor para atribuir um peso à magnitude de cada ponto vizinho, dando menos ênfase aos gradientes mais afastados;
- Definir uma janela com dimensões $k \times k$ pixels em cada região $n \times n$ em torno do ponto-chave;
- Calcular em cada região um histograma local para oito direções com base nas magnitudes dos pixels;

- Armazenar em um vetor descritor os valores acumulados nos histogramas locais. Neste caso, são regiões 4×4 subdivididas em 4×4 pixels e considerando oito direções, logo, o tamanho do vetor descritor para cada ponto-chave é $4 \times 4 \times 8 = 128$;
- Por fim, normalizar o vetor descritor pela unidade de comprimento e aplicar um limiar de ajuste, fazendo com que as direções mais acentuadas não prevaleçam na representação do descritor. Depois, normaliza-se o vetor novamente. Este passo trata da invariância à iluminação.

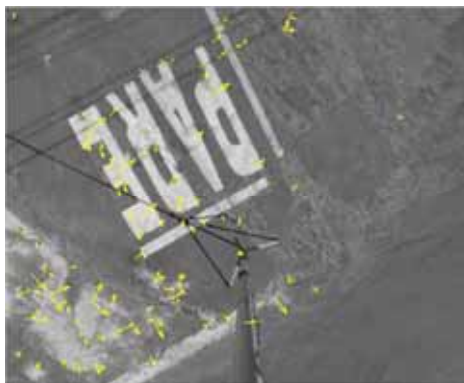
Figura 13 – Exemplo de construção de um vetor descritor (tamanho 128) usando o gradiente do ponto-chave. (a) Região do ponto-chave subdividida em 4×4 ($n = 4$ e $k = 4$) e orientação do ponto-chave; (b) Rotação do descritor em relação à orientação do ponto-chave e janela circular gaussiana; (c) Acúmulo das magnitudes em oito direções no histograma; (d) Os histogramas locais são armazenados nas 128 células do vetor descritor.



Fonte: adaptado de Lowe (2004).

A Figura 14 apresenta um exemplo de resultado após a construção dos descritores. São mostrados 111 pontos-chave como vetores, os quais indicam: escala, pelos seus comprimentos; orientação, pelas direções das setas e localização, pelas posições na imagem.

Figura 14 – Vetores descritores de 111 pontos-chave indicando escala, orientação e localização.



Desse modo, a técnica SIFT produz o descritor para cada ponto-chave de uma imagem. Como resultado, tem-se um conjunto de descritores que é usado na comparação com conjuntos de descritores de outras imagens para fins de correspondência, seguindo algum algoritmo de busca e análise de similaridade, como, por exemplo, busca pelo vizinho mais próximo, busca em árvores, indexação em tabela, funções de correlação etc.

3.5 Dificuldades no estabelecimento da correspondência

Independentemente do método de correspondência utilizado, diversos problemas podem conduzir à falha dos algoritmos. Mayer et al. (2013) apontam os principais fatores a serem considerados:

- **Projeções de perspectivas diferentes:** as imagens são tomadas a partir de diferentes pontos de vista. As diferenças entre as imagens aumentam com o ângulo entre as direções de visada e com a irregularidade da superfície. Vários algoritmos consideram uma superfície suave, a qual permite usar transformações geométricas simples entre pares homólogos de imagens. Um exemplo que causa falha desses algoritmos pode ser uma paisagem urbana com muitas discontinuidades de elevações;
- **Oclusão:** as diferentes vistas perspectivas das imagens podem esconder parcial ou totalmente os objetos das cenas em um caso extremo;
- **Reflectâncias diferentes:** diferentes pontos de vista da imagem resultam em variação da direção de incidência da luz. O algoritmo de correspondência deve tratar essas variações;
- **Iluminação diferente:** imagens que são tomadas sob condições de iluminação diferentes resultam em variações dos tons de cinza;

- **Padrões repetitivos:** algumas cenas podem ter características semelhantes. Para determinado padrão em uma imagem, uma imagem pode encontrar múltiplos padrões similares em outra imagem. Algoritmos que operam somente em um contexto local serão confundidos pela aparência ambígua. É preciso impor alguma consistência global;
- **Relação sinal-ruído baixa:** tanto os algoritmos baseados em área quanto os algoritmos baseados em características são beneficiados pelo alto contraste de imagem. Se a informação da imagem não é bem distinguível em relação ao plano de fundo, o processo de correspondência pode ser comprometido pela dificuldade na extração das características;
- **Valores aproximados com pouca precisão:** diversos algoritmos requerem aproximações iniciais para posições, ou para alguma transformação. Se aproximações de baixa precisão são fornecidas, os algoritmos podem não convergir para uma correspondência correta.

Além desses problemas, outros efeitos que dificultam a correspondência de imagens podem ser acrescentados quando imagens são tomadas por aerolevantamentos. Segundo Schenk (1999), esses efeitos são devidos à:

- Diferença de escalas entre duas imagens provocadas pela mudança da altura de voo;
- Diferença de ângulos de orientação entre imagens. A comparação pixel a pixel não é possível, pois o mesmo pixel em duas ou mais imagens refere-se a posições diferentes do espaço objeto.
- Variação do relevo, o que produz distorções geométricas.

Em geral, os problemas de distorções geométricas em imagens têm grandes efeitos sobre as correspondências baseadas em área. Já no método de correspondência baseado em características, normalmente as distorções geométricas têm menos influência (SCHENK, 1999).

3.6 Redução do espaço de busca para correspondência

Um problema fundamental a ser tratado na correspondência entre imagens é a determinação do espaço de busca. Na procura por características homólogas, caso o espaço não seja restringido, o tempo de processamento pode ser muito elevado e, principalmente, pode ocorrer ambiguidades, ocasionando falsas correlações, se consideradas apenas as

informações locais. Para evitar problemas desse tipo, pode-se limitar o espaço de busca usando alguma restrição geométrica que forneça uma aproximação ao local para correspondência, como, por exemplo, linhas epipolares, *Vertical Line Locus* (VLL), busca hierárquica, ou ainda, com os dados de orientação direta do sensor.

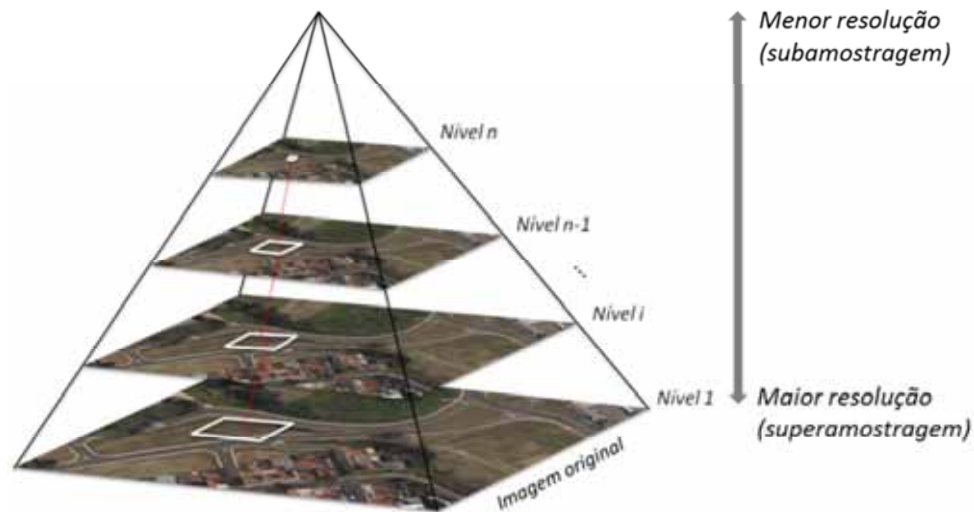
A geometria epipolar, que requer a orientação relativa, considera um plano definido pelos CPs de duas imagens e um ponto no espaço objeto. Normalmente, as imagens não são paralelas, mas se transformadas para suas posições normalizadas, as linhas de intersecção do plano com ambas as imagens tornam essas linhas epipolares. Assim, dado um ponto em uma das imagens, seu homólogo na outra imagem estará sobre a linha epipolar conjugada. Logo, se os POEs das imagens forem conhecidos, as linhas epipolares conjugadas podem ser obtidas e o espaço de busca é reduzido, passando de bidimensional para unidimensional (SCHENK, 1999; MIKHAIL et al., 2001).

O algoritmo VLL foi inicialmente proposto por Gyer (1981) para restringir o espaço de busca durante o processo de correspondência. O processo realiza a correlação de janelas selecionadas centradas em pontos do espaço objeto ao longo da projeção de uma linha vertical, e o par de janelas com a maior correlação é selecionado como a correspondência correta.

A busca hierárquica realiza a redução do espaço de busca por meio de uma pirâmide de imagens (SCHENK, 1999). Como ilustra a Figura 15, uma pirâmide representa um conjunto de imagens com diferentes níveis de resolução, cujo nível mais alto (nível n) é a imagem com menor resolução e o mais baixo (nível 1), a imagem com maior resolução (original), sendo a base da pirâmide.

A partir da base, os níveis superiores são formados de maneira que tanto a densidade da amostra quanto a resolução sejam diminuídas em passos regulares (BISCHOF e LEBERL 2004). O fundamento desta técnica está na consideração de que os erros de correspondência dependem somente do tamanho do pixel e, mediante esta técnica de reamostragem variável, vai-se refinando progressivamente os resultados, utilizando sempre um espaço de busca semelhante com apoio nos resultados obtidos do nível superior da pirâmide.

Figura 15 – Pirâmide de imagens com diferentes níveis de resolução.



Outra possibilidade que pode reduzir o espaço de busca e melhorar o desempenho do processo de correspondência é usar os dados de orientação direta do sensor, os quais fornecem informações sobre os parâmetros de orientação exterior (aproximados) das imagens. Se conhecidas as coordenadas terrestres de um ponto de interesse, estas podem ser usadas com os POEs nas equações de colinearidade para localizar aproximadamente o ponto terrestre na imagem. Desse modo, o espaço de busca também pode ser reduzido. Esta estratégia será detalhada no próximo capítulo, pois faz parte da metodologia desenvolvida.

3.7 Reamostragem de imagem

A reamostragem de imagem é usada em várias tarefas incluindo redimensionamento de imagem, registro, ortoimagem, mosaicagem etc. O processo transforma uma imagem, a qual é definida em um conjunto de coordenadas, para um novo conjunto de pontos coordenados. O resultado é uma grade reamostrada especificando as localizações em que a imagem de entrada deve ser reamostrada (PARKER et al., 1983). Esta grade de reamostragem geralmente não coincide com a grade da imagem de entrada, exigindo algum algoritmo de interpolação, cujos mais conhecidos são: interpolação pelo vizinho mais próximo, interpolação bilinear e interpolação bicúbica, como podem ser encontradas em Wolf e Dewitt (2000). Segundo Mikhail et al. (2001), a transformação geométrica em imagem digital pode ser realizada, como por exemplo, usando similaridade, afim, projetiva, polinomial etc.

3.8 Ortorretificação de imagem

A ortoimagem é baseada na projeção ortográfica ao invés de uma projeção perspectiva. Em uma imagem de quadro, os raios de luz passam através do CP antes de atingir o plano. Os pontos têm a mesma localização horizontal, mas diferentes elevações. A escala da imagem varia conforme a variação do terreno devido à projeção central. Na projeção ortográfica, os raios projetados são perpendiculares a um plano de referência horizontal. A alteração em elevação de um ponto não afeta sua projeção, de modo que a escala de uma ortoimagem é constante (MIKHAIL et al., 2001).

A ortoimagem é produzida a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT) ou um Modelo Digital de Elevação (MDE) da área da imagem, dos POIs e POEs. As informações de elevação são usadas para remover os efeitos de elevação da imagem em perspectiva por uma reprojeção. Duas abordagens podem ser usadas para gerar uma ortoimagem: pelo método direto e pelo método indireto, como descrito em Mikhail et al. (2001, p. 234).

4. DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS AUTOMÁTICAS PARA GERAÇÃO DE CENAS DE CONTROLE E MEDIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE

Neste capítulo, apresenta-se a abordagem sobre os temas desenvolvidos para adquirir imagens terrestres verticais à curta distância e gerar cenas de controle, as quais são usadas para localizar automaticamente a posição subpixel dos pontos de controle em imagens aéreas. Com este propósito, foram desenvolvidas técnicas específicas de coleta de imagens terrestres, bem como outras técnicas para o estabelecimento e refinamento da correspondência entre as imagens terrestres e aéreas. O conceito e o detalhamento da abordagem serão apresentados com o objetivo de automação da fase de identificação e medição de pontos de controle em imagens aéreas e também para a definição das cenas terrestres de controle.

4.1 Principais softwares e recursos materiais

Para o desenvolvimento das técnicas, basicamente os softwares necessários foram:

- Compiladores livres da linguagem C/C++;
- Trimble-TBC (licenciado pela FCT/UNESP) – para pós-processamento de dados GNSS;
- ERDAS-LPS[®] (*Leica Photogrammetric Suite*) v. 11 – licenciado pela FCT/UNESP;
- *Calibration Multi-Camera* (CMC) – programa em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa;
- Matlab v. 7.6 – licenciado pela FCT/UNESP;

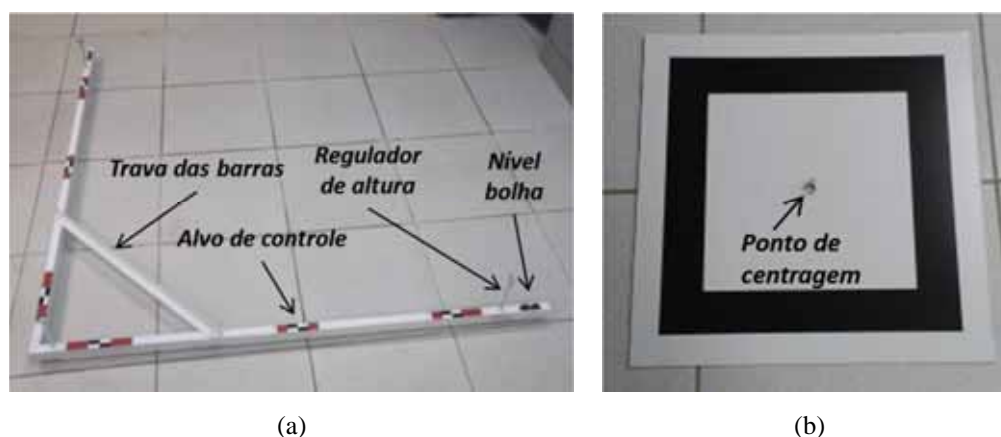
Em relação aos dados de imagem, foram requeridas imagens aéreas e imagens terrestres verticais coletadas por lentes *fisheye*, tendo todas as imagens (aérea e terrestre) uma informação prévia de orientação exterior.

Quanto aos recursos materiais, os principais foram: computador; câmara digital com lente *fisheye*; receptor GNSS (Hiper - Topcon); tripé com bastão de 4,7 m ou maior; bússola; distanciômetro eletrônico manual (Topcon) e alvos de controle terrestre, como detalhados a seguir.

A aquisição de imagens terrestres seguiu uma técnica especificamente planejada para coletar as imagens na forma exigida pela abordagem. Para isso, dois dispositivos de controle, mostrados na Figura 16, foram desenvolvidos: barras de referência e placa de controle.

As barras de referência da Figura 16(a) materializam os eixos coordenados, servindo como uma referência aproximada do GSD e da orientação da imagem. São barras de alumínio montadas (e fixadas pela trava) perpendicularmente, com regulagens de alturas em seus três vértices e dois níveis do tipo bolha nas extremidades dos eixos. Os padrões regulares afixados ao longo das barras são alvos de controle para se extrair informações da imagem.

Figura 16 – Dispositivos produzidos como apoio para as cenas terrestres: (a) Barras perpendiculares de referência; (b) Placa com alvo de controle.



Na Figura 16(b), tem-se outro alvo de controle com um furo no centro para fixação e nivelamento. Este alvo é formado por uma placa branca de material *Aluminium Composite Material* (ACM) com dimensões 50×50 cm, na qual se visualiza uma moldura quadrada em preto de 42×42 cm com 6 cm de espessura. O padrão e o tamanho foram definidos para possibilitar a identificação e a extração automática dos cantos dessa moldura nas imagens tomadas a alguns metros de altura (em torno de 4,5 m). O modo de utilização desses dois dispositivos será mostrado na Seção 4.3.2, em que serão explicadas as técnicas de coleta das imagens terrestres verticais.

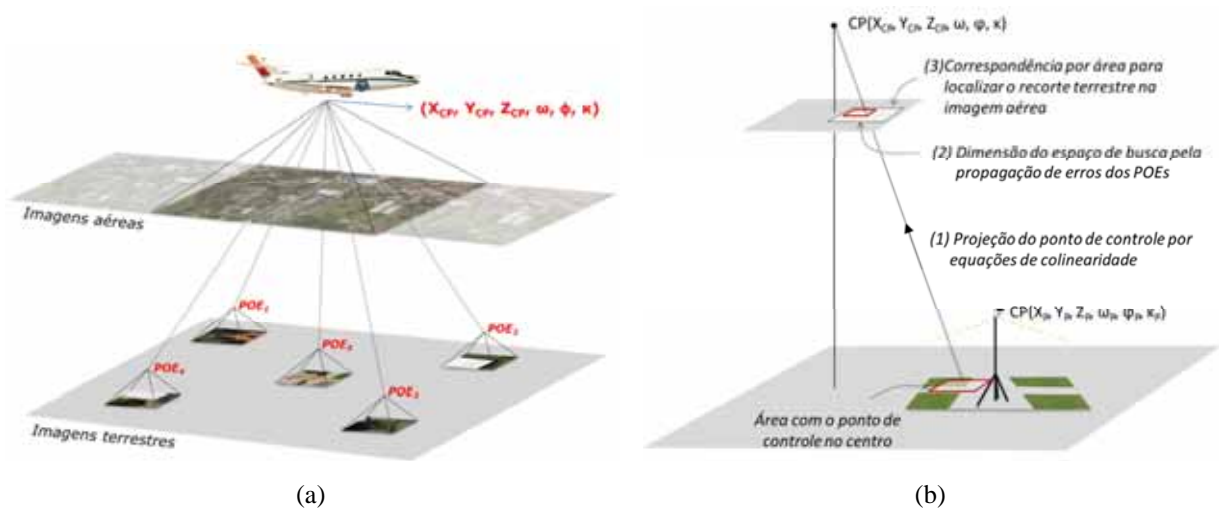
4.2 Conceito geral da abordagem e organização das técnicas

A abordagem proposta tem como finalidade automatizar a fase de medição de pontos de controle em imagens aéreas e, com isso, atingir um nível de precisão que eleve a qualidade da determinação indireta dos POEs, ou a correção de erros sistemáticos ainda remanescentes sobre os dados de orientação direta, no caso de uma orientação integrada.

A viabilidade da abordagem está nas informações de orientação direta, tanto para as

imagens terrestres (de alta resolução) quanto para as aéreas (de menor resolução). Como ilustra a Figura 17(a), imagens terrestres verticais de pontos de controle ou alguma feição distinguível em uma área de levantamento são usadas para servir como controle terrestre. A ideia é que áreas distinguíveis sejam levantadas com o método convencional de posicionamento GNSS, adquirindo-se também imagens verticais dessas áreas, sem adicionar tempo ao levantamento de campo. O processo de aquisição de imagens terrestres deve ocorrer simultaneamente ao rastreamento GNSS.

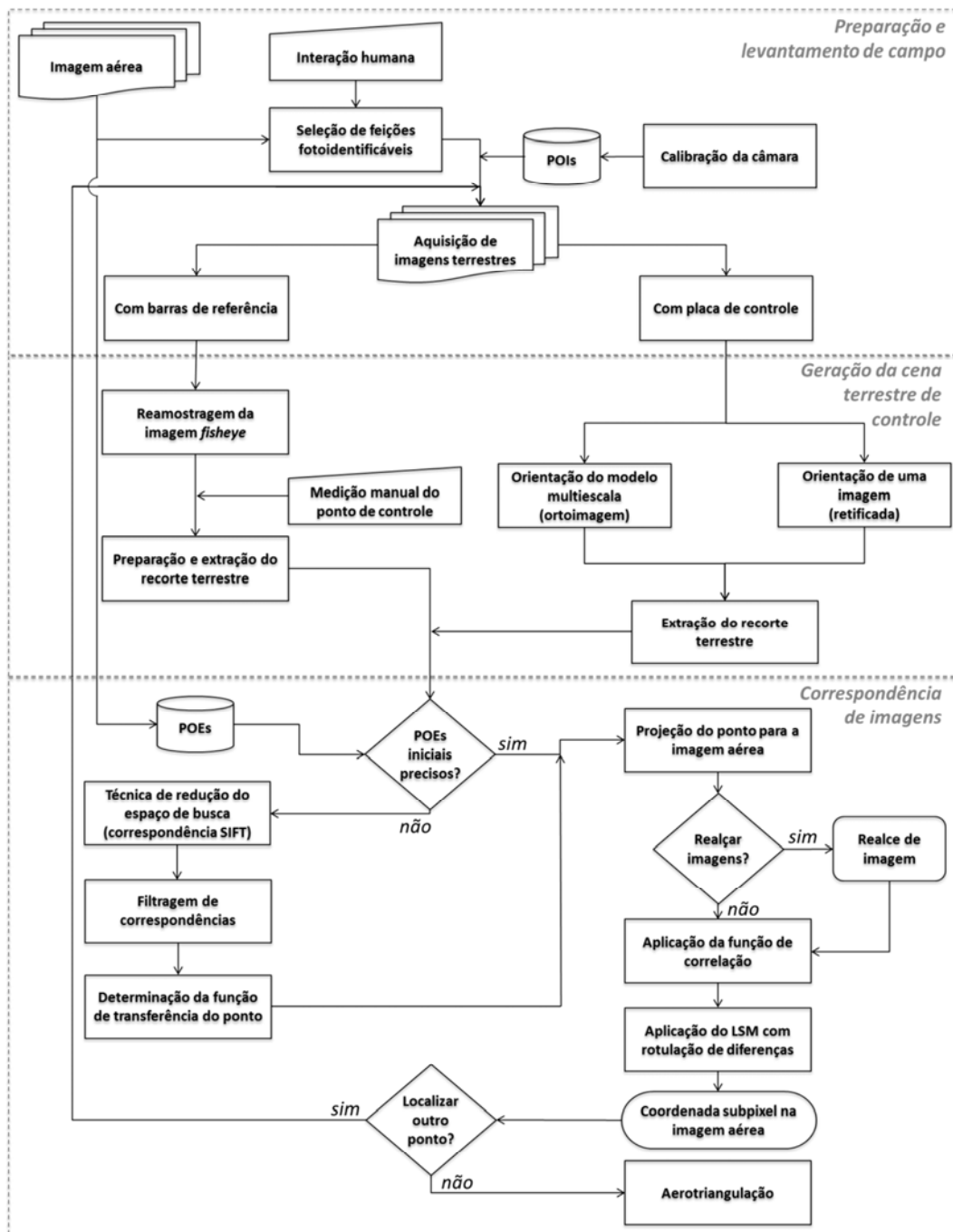
Figura 17 – Correspondência de imagens terrestre-aérea: (a) Áreas de apoio e suas posições correspondentes na imagem aérea; (b) Transferência de um ponto de controle para a imagem aérea, indicando-se a área do ponto de apoio no terreno, a projeção do ponto para a imagem aérea e o espaço de busca na imagem aérea contendo o recorte terrestre para comparação.



Com as técnicas desenvolvidas para a coleta de imagens terrestres, os POEs aproximados dessas imagens são estimados, como ilustra a sequência na Figura 17(b). Usando-se os POEs das imagens aérea e terrestre, (1) o ponto de controle, no centro do recorte da imagem terrestre, pode ser projetado com as equações de colinearidade para a imagem aérea. No entanto, devido às imprecisões resultantes dos POEs, o ponto pode ser projetado afastado por alguns pixels da sua posição correta. Então, (2) um cálculo de propagação de erros sobre os POEs é realizado para determinar o espaço de busca em que a posição verdadeira do pixel deve estar. Dentro desse espaço de busca, (3) aplica-se a correspondência por área para correlacionar o recorte da imagem terrestre com a imagem aérea, localizando-se a posição correta do ponto. Em seguida, refinamentos pelo LSM são aplicados para atingir a precisão subpixel. A aplicação da abordagem é idealmente realizada

com as informações de orientação direta, mas, caso não estejam disponíveis, dados do plano de voo e orientações aproximadas podem ser usadas para possibilitar o emprego da mesma técnica. O fluxograma da Figura 18 foi elaborado para organizar e explicar o emprego da metodologia, a qual envolve três etapas principais: preparação e levantamento de campo, geração da cena de controle e correspondência de imagens.

Figura 18 – Fluxograma da abordagem para adquirir imagens terrestres, gerar cenas de controle e localizar pontos de controle em imagens aéreas com precisão subpixel.



A etapa de **preparação e levantamento de campo** objetiva adquirir coordenadas GNSS de pontos de controle simultaneamente com a coleta de imagens terrestres do entorno de cada ponto de controle. Após um levantamento aéreo com dados de orientação exterior direta, faz-se o planejamento convencional para o apoio de campo, selecionando áreas fotoidentificáveis por interação humana. Paralelamente, a calibração da câmara (Seção 4.3.1) é realizada para estimar os POIs da câmara terrestre. Terminados os preparativos, procede-se ao trabalho de campo. Então, os pontos são rastreados por receptor GNSS, e as imagens são adquiridas seguindo um protocolo. Esta coleta, como será explicada na Seção 4.3.2, pode ser realizada de duas maneiras, diferindo-se pelo tipo de dispositivo de controle empregado: barras de referência ou placa de controle. A diferença entre ambos é que a técnica de aquisição com as barras de referência é mais simples, mas conduz a um fluxo semiautomático, pois para localizar o ponto rastreado na imagem terrestre, ainda é usada uma medição manual, porém com a vantagem de ser uma imagem de maior resolução, se comparada com a imagem aérea. Já com a placa de controle, o fluxo é completamente automático, não havendo qualquer localização manual da coordenada do ponto de controle na imagem terrestre.

A segunda etapa corresponde à **geração da cena de controle** ou recorte terrestre para cada área de levantamento. Isto envolve a orientação e a retificação ou ortorretificação das cenas. Para orientar as imagens terrestres, duas formas foram desenvolvidas: na primeira, as imagens terrestres são coletadas com as barras de referência no campo de visada, retificando-se e medindo-se o ponto GNSS na imagem terrestre retificada e aplicam-se alguns procedimentos de subamostragem e rotação para extrair o recorte, preparando-o para a correspondência. Na segunda forma, uma placa de controle é anexada ao receptor GNSS e imagens são adquiridas sobre o alvo. Em seguida, os recortes de imagens podem ser gerados por duas técnicas: ortorretificação ou retificação. A ortorretificação é usada quando a superfície local apresenta variações significativas em elevação, o que exige tomar mais de uma imagem com a placa de controle em posições diferentes para gerar um mini MDT local e uma imagem adicional sem alvo para extrair um recorte. Se as superfícies forem planas ou tiverem pouca variação, a retificação é suficiente e, para ser aplicada, adquire-se somente uma imagem com a placa de controle (para o cálculo da orientação) e outra sem esta placa (para a geração da cena de controle), na mesma posição. Uma ressecção espacial seguida pelo registro de imagens é usada nesta técnica. Tanto no procedimento de ortorretificação quanto

na retificação, o recorte terrestre é extraído como uma cena de controle. Os detalhes serão apresentados na Seção 4.4.

Na terceira etapa, ocorre a **correspondência de imagens** para localizar cada recorte terrestre (com o ponto de controle no centro) na imagem aérea, com precisão subpixel. Primeiro, um cálculo de propagação de erros usando os POEs disponíveis da imagem aérea é realizado. O resultado, com base na precisão dos POEs, determina o espaço de busca na imagem aérea. Assim, são verificadas duas condições em relação ao tamanho desse espaço de busca: se as dimensões forem de poucos pixels (dezenas ou menos), projeta-se o ponto de controle do recorte para a imagem aérea usando as equações de colinearidade. Caso contrário, uma estratégia é usada para reduzir o espaço de busca e projetar o ponto. Nesta estratégia, aplica-se a correspondência por características usando descritores SIFT entre o par de imagens terrestre-aérea. As correspondências são filtradas por uma combinação da transformação 2D de Helmert com um algoritmo de votação por maioria (*majority voting*). Neste procedimento, uma função geométrica bidimensional é definida para transferir o ponto para as proximidades de sua posição correta na imagem aérea. A partir disso, com o ponto melhor projetado para a janela aérea, computa-se a correlação por área para determinar o pixel de correspondência entre o recorte e a janela na imagem aérea. Se for necessário, um realce de imagens pode ser usado para melhorar a correlação. Em seguida, refinamentos por mínimos quadrados e rotulação de diferenças são realizados para atingir a precisão subpixel. Esta terceira etapa será explicada na Seção 4.5.

Todos esses passos descritos realizam a localização subpixel para um ponto, logo um novo fluxo deve ser iniciado para processar outro ponto a partir das imagens terrestres adquiridas. Quando terminada a localização de todos os pontos disponíveis, a aerotriangulação pode ser realizada. As próximas seções detalharão cada uma dessas etapas previamente apresentadas.

4.3 Levantamento de campo

Envolve a calibração da câmara e o trabalho de campo para adquirir coordenadas dos pontos por GNSS simultaneamente à aquisição de imagens terrestres verticais.

4.3.1 Calibração da câmara com lente *fisheye*

A lente utilizada para adquirir as imagens terrestres é uma supergrande angular do tipo *fisheye*, que é necessária para se obter uma visão ampla, cobrindo as principais características da cena. Esta lente deve ser calibrada por um procedimento realizado em campo de calibração terrestre para se determinar os seguintes POIs: distância focal, coordenadas do ponto principal e coeficientes de distorção das lentes (radial simétrica e descentrada).

O modelo matemático adotado é a projeção equidistante, que foi descrita na Seção 2.4. O procedimento de calibração de câmara realiza um ajustamento por feixes de raios usando o modelo equidistante acrescido dos parâmetros de distorção das lentes.

A Equação 4 do modelo equidistante é usada para gerar um sistema de equações não-lineares, em que as coordenadas imagem são observações e os POIs, os POEs e as coordenadas dos pontos objeto são os parâmetros. Este sistema é solucionado pelo método dos mínimos quadrados, com algumas injunções impostas às coordenadas dos pontos objetos, distâncias ou observações sobre os POEs. O processo rigoroso de calibração é fundamental para corrigir os efeitos de distorção radial, próprios da lente *fisheye*. Mais detalhes desse tipo de calibração com lentes *fisheye* são encontrados em Marcato Júnior et al. (2014) e Tommaselli et al. (2014).

4.3.2 Técnicas de aquisição de imagens terrestres verticais

Inicialmente, seleciona-se o local para a coleta do ponto ou área de apoio seguindo os procedimentos convencionais de levantamento: áreas com primitivas fotoidentificáveis e abertas (sem obstruções) para evitar problemas de recepção do sinal GNSS e de multicaminho. Estes procedimentos favorecem também a aquisição de imagens, evitando problemas com alguma oclusão de objetos.

A partir disso, duas técnicas diferentes podem ser usadas para coletar imagens terrestres na forma requerida pela metodologia: usando barras de referência ou usando uma placa de controle sob o receptor GNSS.

A primeira técnica, com **barras de referência**, é realizada da seguinte maneira: um ponto de controle é selecionado e rastreado por um receptor GNSS, como mostra a Figura 19(a). Enquanto se coleta as observações GNSS, o sistema de aquisição de imagens é

posicionado próximo ao ponto. Uma câmara com lentes *fisheye* em visada nadiral é levantada por um bastão a aproximadamente 4,5 m. As barras de referência também são posicionadas próximas ao ponto, sendo niveladas em relação ao terreno e com uma das barras orientada ao norte magnético por uma bússola, como apresentado na Figura 19(b). Duas imagens são coletadas. A primeira contendo as barras de referência para obter informações aproximadas sobre o GSD e a orientação da imagem. Sem mover a câmara e apenas retirando-se os alvos e o receptor GNSS, uma segunda imagem é adquirida, esta para ser usada na extração dos recortes terrestres. Nesta técnica, a medição do ponto na imagem terrestre é realizada manualmente, mas todo o fluxo seguinte para localizar o ponto na imagem aérea é feito de modo automático.

Figura 19 – Apoio de campo: (a) Levantamento GNSS de um ponto de controle; (b) Técnica de aquisição de imagens usando barras de referência.



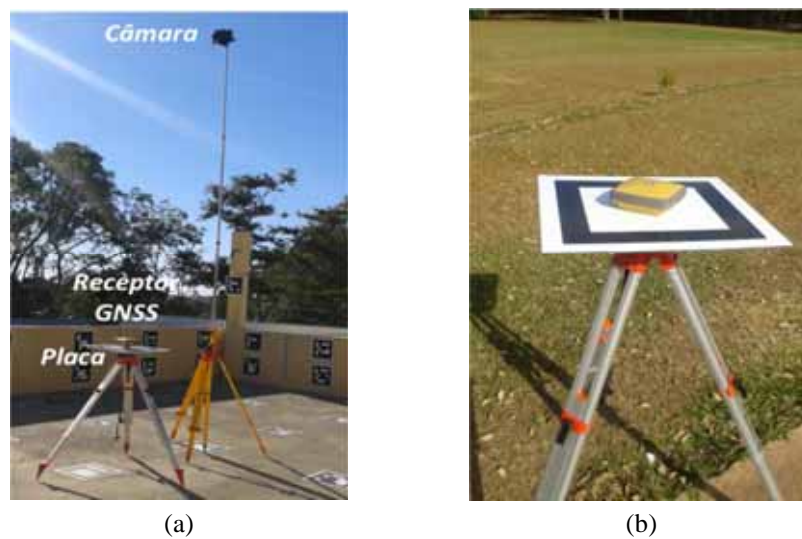
(a)



(b)

Por outro lado, a técnica em que é usada uma **placa de controle** foi planejada para não haver medição manual do ponto fotografado na imagem terrestre, como mostra a Figura 20(a). A técnica usa uma placa acoplada sob um receptor GNSS e sobre a base nivelante em um tripé, ver Figura 20(b). Este conjunto de levantamento é posicionado para coletar observáveis GNSS sobre uma feição natural bem definida ou em uma área que possua em sua vizinhança elementos fototidificáveis. Próximo ao receptor, um segundo tripé é posicionado para adquirir imagens com a câmara *fisheye*, em posição nadiral, e em diferentes alturas.

Figura 20 – Levantamento com a placa de controle: (a) Posição relativa entre os dispositivos; (b) Placa de controle acoplada ao receptor GNSS.

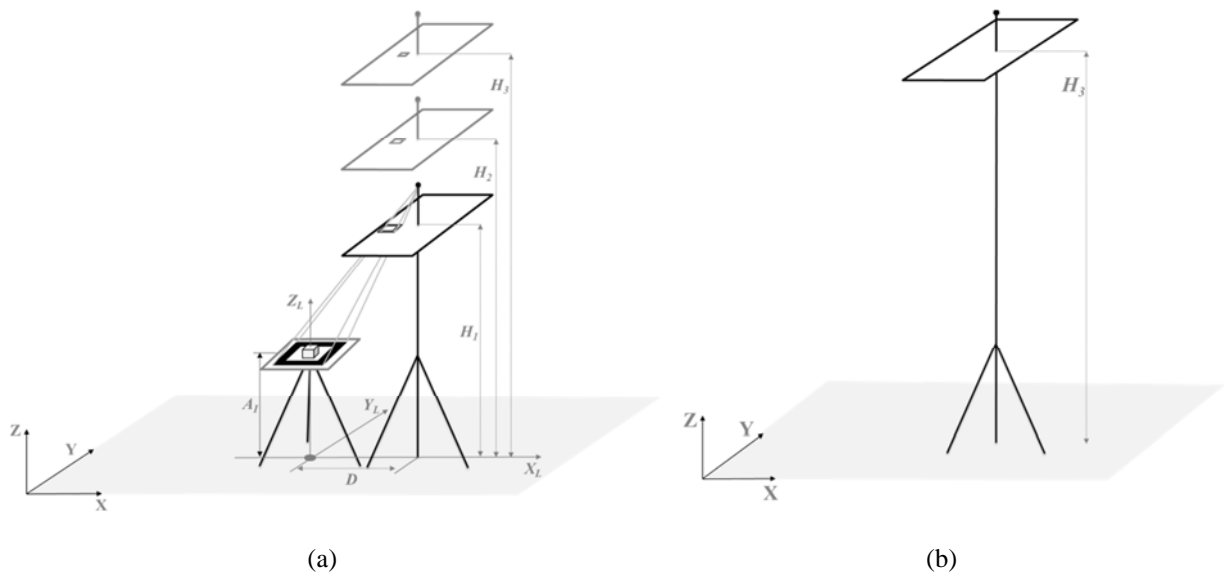


O procedimento de coleta de imagens e observáveis GNSS está ilustrado na Figura 21. Primeiro, posiciona-se o tripé do receptor com a placa de controle. Em seguida, faz-se o nivelamento da placa e alinha-se um dos lados do alvo perpendicularmente em relação ao tripé da câmara. O azimute aproximado da placa alinhada pode ser medido com uma bússola ou magnetômetro. Enquanto ocorre o rastreamento GNSS, são adquiridas quatro imagens em uma posição planimétrica similar, variando-se apenas a altura da câmara. A aquisição acontece da seguinte forma:

- São tomadas três imagens cobrindo a placa de controle em três diferentes alturas, como ilustrado na Figura 21(a);
- Uma quarta imagem, na posição mais alta, é adquirida para ser usada na correspondência, sem a presença da placa de controle, rastreador e tripé, como aparece na Figura 21(b).

A definição do uso de três alturas foi previamente analisada em campo de calibração, e três imagens foram suficientes para garantir robustez e qualidade geométrica. O uso de uma quantidade maior de imagens não resultou em melhora significativa (TOMMASELLI e BERVEGLIERI, 2014). Durante as aquisições, são anotadas as medidas de distâncias relativas entre o eixo de centragem do tripé GNSS e o eixo do bastão da câmara (distância D) e as alturas (A_i e H_i).

Figura 21 – Técnica de aquisição de imagens para ortorretificação: (a) aquisição de três imagens multiescalas registrando a placa de controle; (b) Quarta imagem na posição mais alta e sem os dispositivos de controle.



Fonte: Tommaselli e Berveglieri (2014).

O posicionamento dos dispositivos e as medições relativas definem um sistema de referência local (X_L, Y_L, Z_L) , que pode ser transformado para outro sistema (X, Y, Z) , como, por exemplo, para coordenadas geográficas ou coordenadas planas (E, N, h) no sistema *Universal Transverse Mercator* (UTM). Neste caso, o azimute deve ser corrigido em relação à declinação magnética e à convergência meridiana (ver BLACHUT et al., 1979), ou deve ser calculado com base em uma segunda posição fornecida, caso se utilize um segundo receptor GNSS.

4.4 Geração da cena terrestre de controle

Esta etapa objetiva extrair o recorte da imagem terrestre para ser comparado com a imagem aérea, o que requer um passo de preparação desse recorte para ter condições similares à janela aérea e possibilitar a aplicação das técnicas de correspondência baseada em área. Com este propósito, apresenta-se a seguir os procedimentos usados, conforme a técnica de aquisição de imagens terrestres utilizada.

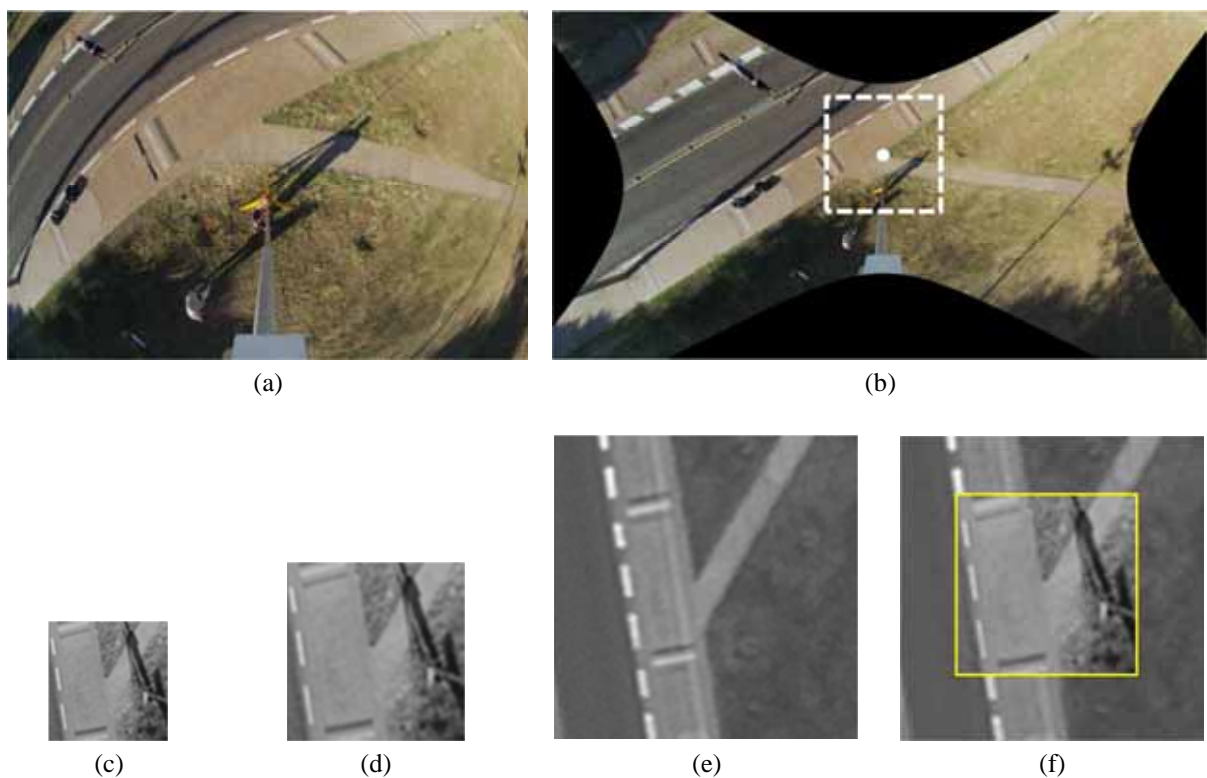
4.4.1 Extração do recorte terrestre usando as imagens com as barras de referência

Após a aquisição de imagens, uma reamostragem é necessária para corrigir os efeitos

da geometria da lente *fisheye* e da inclinação da câmara, com um GSD definido. Para esta técnica, as imagens são reamostradas usando os POIs estimados no processo de calibração da câmara e usando um modelo específico para lente *fisheye* ou mesmo as equações de colinearidade.

A Figura 22(a) exibe um exemplo de imagem *fisheye* com seus efeitos característicos antes do processamento, e a Figura 22(b) mostra a reamostragem realizada para deixá-la semelhante a uma vista em perspectiva aérea, em que se também mostra a área de um recorte terrestre (quadrado tracejado) com o ponto de controle no centro. O GSD resultante na área central do ponto de controle tem cerca de 3 mm na imagem reamostrada.

Figura 22 – Exemplo de imagem *fisheye*. (a) Imagem *fisheye* original; (b) Imagem após sua reamostragem indicando a área do recorte terrestre com o ponto de controle no centro; (c) Recorte terrestre em tons de cinza e rotacionado; (d) Recorte subamostrado aproximadamente para o GSD da imagem aérea. (e) Espaço de busca na imagem aérea correspondente; (f) Correspondência por área do recorte terrestre com a janela aérea.



Um passo manual é realizado para localizar na imagem terrestre o ponto GNSS levantado. Em seguida, como exemplificam as Figuras 22(c) a (f), o recorte ao redor do ponto é extraído, convertido para tons de cinza e preparado para a correspondência usando as informações de GSD e azimuth, obtidas a partir das barras de controle. Faz-se a rotação e a subamostragem desse recorte para o GSD da imagem aérea, aproximadamente. O tamanho do

recorte é adaptativamente definido com base no maior valor do coeficiente de correlação com a imagem aérea, devendo ser o mínimo suficiente para reduzir os efeitos de distorção geométrica e radiométrica. Desse modo, a cena de controle é extraída.

4.4.2 Extração do recorte terrestre usando as imagens com a placa de controle

Nesta técnica, gera-se a cena de controle usando processos automáticos para orientar e extrair o recorte da imagem terrestre, o qual pode ser obtido tanto por um processo de ortorretificação quanto de retificação, como se explica na sequência.

4.4.2.1 Orientação por fototriangulação de modelo multiescala para ortorretificação

A ortorretificação requer a orientação do conjunto de imagens coletadas para produzir um MDT local e gerar uma ortoimagem. Para isso, são necessários: POIs, POEs como aproximações iniciais, pontos de controle e coordenadas imagem como observações. Os POIs são previamente determinados pelo processo de calibração da câmara, e os POEs iniciais de posição são calculados com base nas medidas anotadas em campo e são usados como injunções, . Os ângulos de atitude entram no processo de orientação como incógnitas.

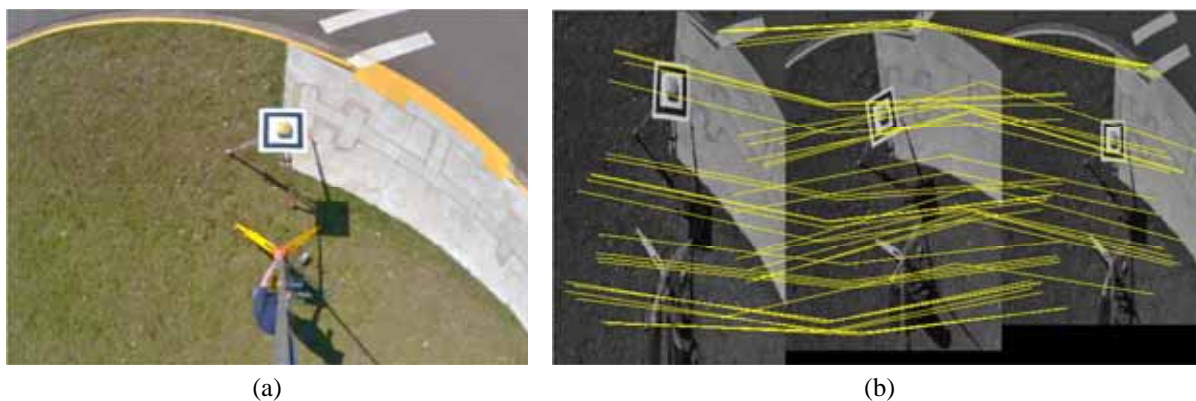
Uma vez que o centro da placa tem suas coordenadas terrestres definidas pelo levantamento GNSS, os oito cantos do alvo quadrado (bordas externa e interna) passam a ter também suas coordenadas conhecidas no referencial local (a partir das dimensões do quadrado) e são usadas como pontos de controle para orientar as imagens. Com base no azimute coletado em campo, as coordenadas são transferidas aproximadamente para o norte verdadeiro, aplicando-se as correções de declinação magnética.

Em cada imagem, o alvo de controle é automaticamente identificado por um detector de contornos retangulares e seus vértices são extraídos (com precisão subpixel) por intersecção de linhas, como apresentado por Garrido-Jurado et al. (2014) e adaptado por Silva et al. (2014).

As quatro imagens *fisheye* são usadas no processo de ajustamento por feixe de raios para estimar seus POEs. A quarta imagem não possui alvos de controle, mas se conecta com as demais por pontos de enlace. Um modelo multiescala é então formado, e todas as imagens são conectadas entre si também por meio de pontos de enlace, proporcionando mais

consistência e rigidez geométrica na estimativa dos POEs. Tais pontos de enlace são determinados automaticamente usando a técnica SIFT, como exemplifica a Figura 23.

Figura 23 – Modelo multiescala: (a) Imagem nadiral *fisheye* mostrando o posicionamento da placa de controle, tripé e bastão; (b) Pontos de enlace determinados por SIFT entre as imagens com a placa de controle.



É importante ressaltar que o feixe de raios fornecido apenas pela placa de controle nas imagens não tem uma geometria adequada para realizar a orientação indireta completa do modelo. Porém, com base nas medições realizadas em campo, são fornecidas as posições aproximadas dos CPs nas três alturas de aquisição, o que melhora a rigidez do modelo multiescala. A orientação permite uma qualidade aceitável na reconstrução da parte central das imagens, a qual consiste na área do ponto de controle e abrange as principais características da cena, favorecida pelo posicionamento em campo.

Sabe-se que para ortorretificar imagens, um MDT é necessário. Por esta técnica, qualquer área levantada pode ter seu MDT local produzido pelos pontos de enlace gerados pela fototriangulação do modelo multiescala. Usando os pontos de enlace do modelo, as coordenadas podem ser determinadas no espaço objeto pela fototriangulação ou por intersecção fotogramétrica posterior, gerando um conjunto de pontos 3D que definem um MDT local.

Originalmente as imagens terrestres são obtidas com GSD entre 2 e 3 mm na região da placa de controle, de acordo com a altura de aquisição considerada. Esta alta resolução possibilita produzir MDTs locais também com alta resolução espacial.

Por definição, um MDT deve considerar apenas elementos do terreno. Embora a quarta imagem não contenha o alvo de controle, o tripé e o bastão da câmara ainda aparecem na imagem. Porém, o posicionamento feito em campo entre os tripés do receptor e da câmara favorece que a área de interesse seja sempre visível, sem obstruir as características mais

importantes da cena. Assim, a porção da imagem em que o tripé e o bastão aparecem não produz prejuízos aos propósitos da técnica. Ambos são excluídos usando uma máscara previamente definida, visto que esses elementos sempre aparecem na parte central da cena, como mostrado na Figura 23(a). Isto garante que os dispositivos utilizados para coletar dados não prejudiquem a geração do MDT local.

O processo de produção do MDT local a partir dos pontos gerados na fototriangulação segue os procedimentos tradicionalmente conhecidos, como pode ser consultado em Mikhail et al. (2001). Define-se uma grade regular, conforme as dimensões da área e a resolução pretendida, e interpolam-se as altitudes dos pontos da grade com base nas coordenadas 3D dos pontos de enlace.

Para gerar a ortoimagem local, o procedimento requer POIs, o MDT local, a imagem original (4ª imagem adquirida) a ser ortorretificada e seus respectivos POEs. A finalidade é que seja reconstruída a área circundante ao ponto de controle. Por isso, a coordenada levantada em campo com receptor GNSS é incluída no MDT local e determina o centro de geração da ortoimagem.

De acordo com as dimensões das áreas dos pontos de controle e da resolução do MDT local, a ortoimagem é produzida. O procedimento adotado usa o método indireto (ver MIKHAIL et al., 2001) com uma adaptação para gerar a ortoimagem em torno do ponto GNSS levantado. Para cada ponto da ortoimagem no referencial do espaço objeto, faz-se a busca do tom de cinza do pixel correspondente na imagem de entrada seguindo os passos:

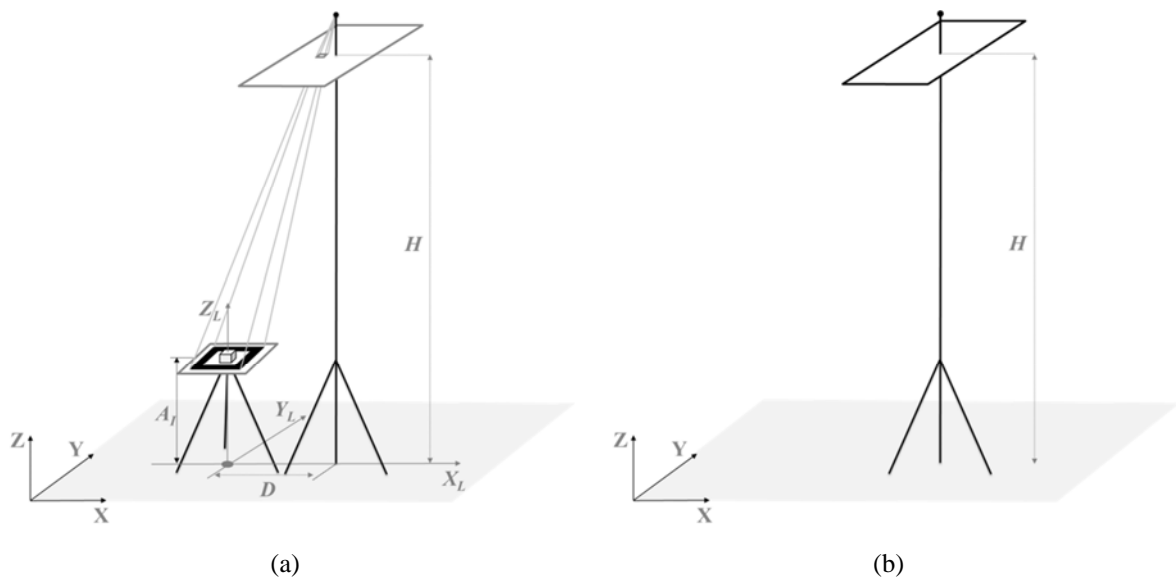
1. Projeção das coordenadas (X, Y, Z) do MDT local para o espaço imagem usando um modelo matemático para lente *fisheye*. A coordenada GNSS do ponto de controle (centro da placa de controle) também é projetada para definir o centro da ortoimagem;
2. Mapeamento inverso conforme o modelo de distorção das lentes para o sistema fotogramétrico distorcido;
3. Determinação da posição no sistema imagem (coluna, linha) com base nas informações da câmara;
4. Interpolação do tom de cinza a partir dos pixels vizinhos na imagem original e atribuição ao pixel da ortoimagem.

No final, tem-se a região do ponto de controle ortorretificada e orientada aproximadamente para o norte verdadeiro, podendo ser usada como cena de controle.

4.4.2.2 Orientação por ressecção espacial para retificação

A técnica de retificação é uma alternativa que pode ser usada quando a superfície da área do ponto de controle não tem variação significativa em elevação. Neste caso, utilizam-se apenas duas imagens de cada área de apoio: uma primeira imagem com a placa de controle e tripé GNSS e a outra, considerando apenas a área de apoio sem a presença da placa, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Técnica de aquisição de imagens para retificação: (a) Primeira imagem registrando a placa de controle; (b) Segunda aquisição de imagem sem a placa de controle e o tripé GNSS.



O posicionamento dos dispositivos e as medições relativas seguem os mesmos procedimentos apresentados na Seção 4.3.2, exceto que, nesta técnica, somente uma altura de câmara é usada para adquirir as imagens.

As duas imagens são coletadas em uma posição aproximadamente similar, diferindo apenas por pequenas oscilações da plataforma entre os instantes de aquisição. Assim, o objetivo é orientar a primeira imagem que contém o alvo de controle usando a ressecção espacial modificada e, em seguida, registrar a segunda imagem, que não contém o alvo, em relação a esta primeira orientada, usando pontos de correspondência e uma função polinomial de segunda ordem. Dessa forma, a segunda imagem torna-se geometricamente similar à primeira. Neste procedimento de ressecção espacial, as coordenadas do CP são fixadas por injunção e os ângulos de atitude são calculados como incógnitas.

Do mesmo modo como os dados são fornecidos para a técnica da seção anterior, neste caso, também são exigidos: os POIs, valores iniciais dos POEs (obtidos em campo) da imagem com alvo, sendo a posição usada como injeção e os ângulos de atitude, como incógnita. Os cantos do alvo são inseridos no projeto fotogramétrico como pontos de controle (em um sistema local cujas coordenadas são similares às coordenadas do sistema UTM) e suas coordenadas imagem, extraídas automaticamente, são usadas como observações. Usando uma técnica de ressecção espacial modificada, os parâmetros de posição do CP da câmara são usados como injeções e os ângulos de atitude são calculados como incógnitas. Em seguida, alguns pontos homólogos entre ambas as imagens são determinados com a correspondência SIFT e, então, o registro de imagens pode ser aplicado. Isto produz uma imagem geometricamente equivalente à imagem orientada e com a vantagem de não apresentar o alvo e o tripé, sendo mais similar à sua correspondente na imagem aérea.

Para gerar a cena de controle retificada com centro no ponto de controle, o algoritmo requer os POIs, as coordenadas do ponto GNSS e a imagem original com seus POEs. O procedimento é semelhante ao processo de ortorretificação apresentado anteriormente. A diferença para este caso é que não há necessidade de um MDT local, sendo definido um único plano de projeção (valor Z do ponto GNSS coletado) com espaçamento da grade no tamanho do GSD pretendido. Como resultado, tem-se a área do ponto de controle retificada e orientada, a qual também pode ser usada como cena de controle para extrair um recorte.

A técnica que usa as barras de referência parece ser mais simples quando comparada à técnica com a placa de controle. Embora esta técnica também possa ser usada para transferir um ponto terrestre para uma imagem aérea por algoritmos de correspondência, uma medição manual é necessária para localizar o ponto de controle na imagem terrestre, o que torna o processo semiautomático. No caso da técnica com a placa de controle, o alvo quadrado pode ser reconhecido automaticamente para obter as oito coordenadas terrestres com relação ao receptor no centro da placa. Isto possibilita que as imagens sejam orientadas automaticamente e que o ponto seja localizado nas imagens sem uma medição manual, ou seja, o fluxo de processamento é inteiramente automático.

4.5 Correspondência da cena terrestre de controle com a imagem aérea

Esta etapa tem o propósito de localizar na imagem aérea a coordenada terrestre coletada pelo receptor GNSS. A ideia é usar as características do entorno do ponto levantado

para ajustá-lo com precisão subpixel em sua posição de correspondência. Para isso, algoritmos baseados na correlação por área são usados e, portanto, exigem aproximações ao local de correspondência, devendo-se restringir o espaço de busca. Como já apresentado na Seção 4.2, a abordagem idealmente relaciona o espaço objeto com o espaço imagem por meio das equações de colinearidade, as quais dependem dos POEs das imagens para obter uma aproximação ao ponto de correspondência. Logo, os valores iniciais dos POEs adquiridos são essenciais para determinar a primeira aproximação. Assim, uma verificação sobre os desvios-padrão dos POEs fornecidos é necessária para se avaliar e estabelecer o tamanho do espaço de busca na imagem aérea.

4.5.1 Determinação do espaço de busca na imagem aérea

O fundamento das equações de colinearidade está no alinhamento de um ponto do terreno com sua coordenada na imagem e CP da câmara. Dependendo da acurácia dos POEs, a coordenada imagem é localizada em uma posição deslocada em relação à verdadeira. Isto implica que a posição correta deve estar em um pixel da vizinhança, o que conseqüentemente conduz a uma busca em um espaço discreto.

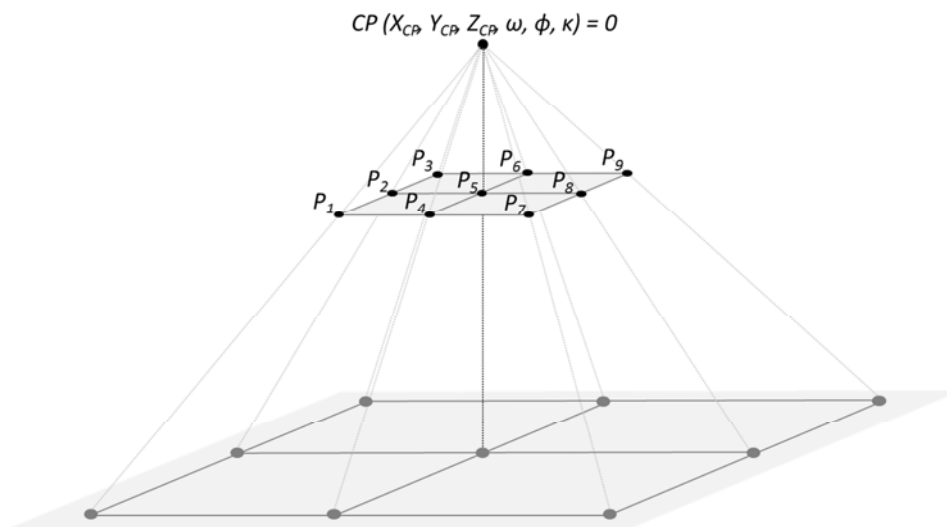
O espaço de busca na imagem aérea pode ser determinado pelo cálculo de propagação de covariâncias (WOLF et al., 2014, p. 538) a partir dos desvios-padrão dos POEs. No caso desta abordagem, são usados os desvios-padrão dos seis parâmetros (X_{CP} , Y_{CP} , Z_{CP} , ω , φ , κ) e das coordenadas (X , Y , Z) do ponto terrestre levantado por receptor GNSS. Os demais termos das equações de colinearidade geralmente são considerados constantes e não foram incluídos na Equação 30 de propagação de erros:

$$\sigma_F = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial X_{CP}}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Y_{CP}}\right)^2 \sigma_2^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Z_{CP}}\right)^2 \sigma_3^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \omega}\right)^2 \sigma_4^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi}\right)^2 \sigma_5^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \kappa}\right)^2 \sigma_6^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial X}\right)^2 \sigma_7^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Y}\right)^2 \sigma_8^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Z}\right)^2 \sigma_9^2}, \quad (30)$$

em que σ_F é o erro calculado para a função F com nove parâmetros independentes.

A Figura 25 ilustra as nove posições utilizadas para o cálculo da propagação de erros e verificação do efeito dos erros nos POEs e no ponto de controle, quando o ponto é projetado para a imagem.

Figura 25 – Posições utilizadas para o cálculo da propagação de erro na imagem.



A noção sobre a magnitude em pixels do resultado da propagação de erros pode ser dada pelo exemplo a seguir. Considere as posições indicadas na Figura 25 em um sistema de referência local, em que: os POEs do CP sejam todos iguais a zero; o quadro do sensor tenha as dimensões de 8956×6708 pixels com tamanho do pixel de $6 \mu\text{m}$ e a distância focal seja de 50 mm . A partir desta configuração e adotando-se um desvio-padrão de $\sigma = 5 \text{ cm}$ para o posicionamento GNSS em campo, a Equação 30 é usada para calcular a propagação de erros nos pontos destacados na ilustração.

A Tabela 1 apresenta os valores resultantes dessa propagação de erros considerando simulações em três cenários para se calcular o tamanho do espaço de busca na imagem aérea. O primeiro cenário esboça um levantamento aéreo com dados de orientação direta precisos ($\sigma = 10 \text{ cm}$ em posição e $\sigma = 20''$ em atitude), como um sistema Applanix POS/AV, de acordo com IP et al. (2007). O segundo cenário considera um caso intermediário ($\sigma = 50 \text{ cm}$ em posição e $\sigma = 1'$ em atitude) com dados adquiridos por um sistema Novatel SPAN-CPT. No terceiro cenário, representa-se dois casos gerais, indicando baixa qualidade nos valores iniciais dos POEs, como dados de navegação coletados por um sistema GNSS/inercial de baixo custo (1 m e $20'$; 3 m e 2° , respectivamente).

Os valores na Tabela 1 estão agrupados pelas posições dos pontos devido ao efeito similar resultante.

Tabela 1 – Resultados da propagação de erros na imagem aérea, considerando um sensor de quadro com 8956×6708 pixels, tamanho do pixel de $6 \mu\text{m}$ e desvio-padrão de $\sigma = 0,05 \text{ m}$ no levantamento GNSS do ponto de controle.

Posições	$\sigma_{\text{posição_CP}}$ (m)	$\sigma_{\text{atitude_CP}}$	σ_F em x (mm)	σ_F em y (mm)	σ_F em x (pixel)	σ_F em y (pixel)
P1, P3, P7 e P9 (cantos)	0,10	20''	0,0279	0,0237	5	4
	0,50	1'	0,1142	0,0973	19	16
	1,00	20'	0,9589	0,8169	160	136
	3,00	2°	5,6768	4,8363	946	806
P2 e P8 (centro da borda na largura)	0,10	20''	0,0267	0,0161	4	3
	0,50	1'	0,1117	0,0673	19	11
	1,00	20'	0,8284	0,4990	138	83
	3,00	2°	4,8734	2,9357	812	489
P4 e P6 (centro da borda no comprimento)	0,10	20''	0,0155	0,0220	3	4
	0,50	1'	0,0661	0,0934	11	16
	1,00	20'	0,4301	0,6083	72	101
	3,00	2°	2,5088	3,5480	418	591
P5 (centro)	0,10	20''	0,0148	0,0148	2	2
	0,50	1'	0,0645	0,0645	11	11
	1,00	20'	0,3168	0,3168	53	53
	3,00	2°	1,7939	3,5480	418	591

Pelo exemplo dado, a propagação de erros mostra que, quando os dados apresentam melhor precisão, o espaço de busca na imagem aérea é restringido a poucos pixels, como esperado, sendo menor que 20×20 pixels nos dois primeiros cenários. Nestes cenários, as técnicas de correspondência baseada em área podem ser aplicadas diretamente para localizar o recorte terrestre na imagem aérea. Porém, o espaço de busca aumenta significativamente no caso dos dados não precisos. Isto implica em um problema para a aplicação da correspondência por área, devido às ambiguidades que podem ocorrer. Por esta razão, uma técnica auxiliar é necessária para reduzir o espaço de busca, o qual pode ser muito maior se outras configurações de dados imprecisos forem consideradas.

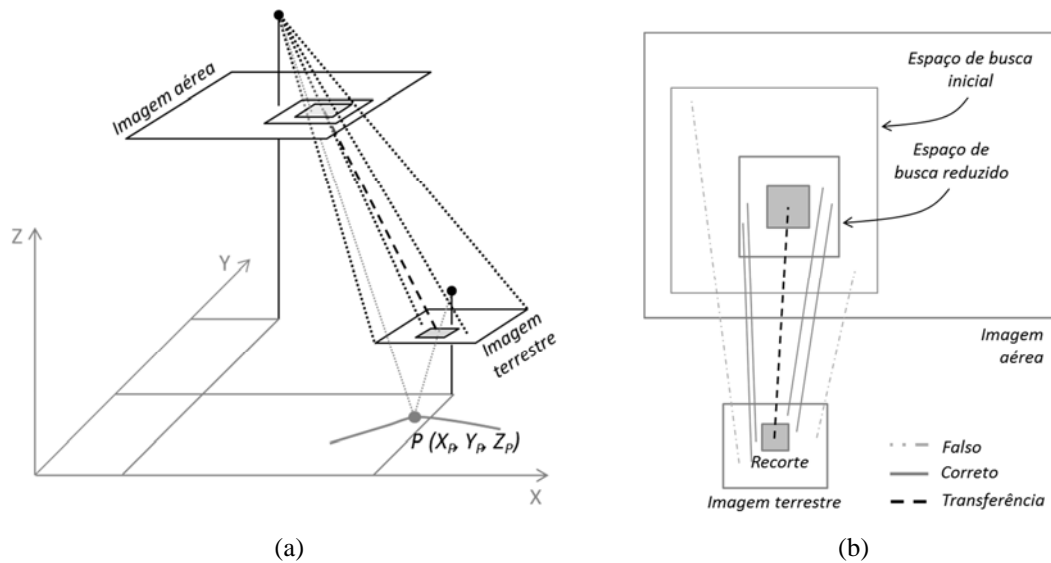
Na próxima seção, apresenta-se uma solução para o caso quando os dados são imprecisos. Serão descritos o conceito e a técnica particularmente desenvolvida para reduzir o espaço de busca na imagem área.

4.5.2 Estratégia para redução do espaço de busca

O fundamento da técnica para realizar a correspondência entre uma imagem terrestre e uma área em escalas diferentes está ilustrado na Figura 26(a), na qual se mostra um ponto de

controle P para ser transferido para a imagem aérea. O principal problema está relacionado ao espaço de busca que pode ser muito grande e, por isso, exige uma estratégia para sua redução. Para isso, a técnica SIFT é aplicada para encontrar pontos homólogos, os quais devem ser filtrados para assegurar que apenas as correspondências corretas sejam utilizadas.

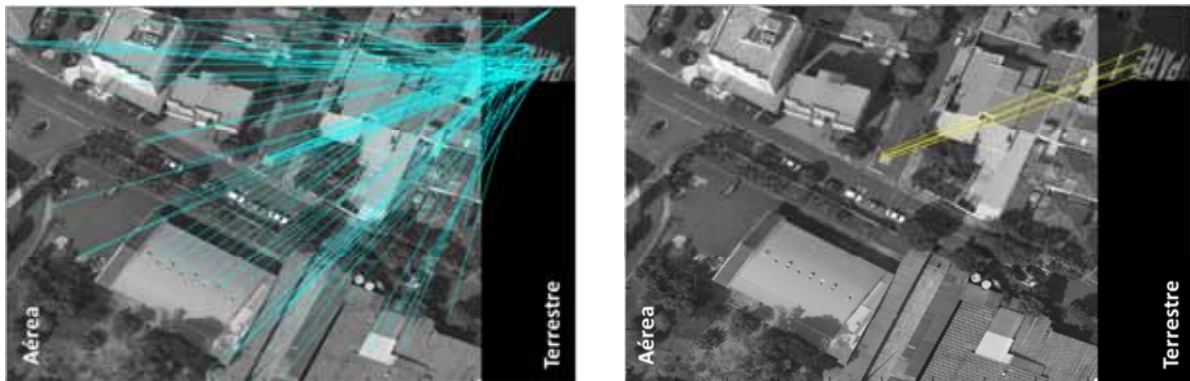
Figura 26 – Redução do espaço de busca: (a) Relação entre as imagens terrestre e aérea para transferir um ponto P do espaço objeto para a imagem; (b) Relação no espaço imagem.



A Figura 26(b) complementa a explicação da estratégia por representar a correspondência entre as imagens e a redução do espaço de busca no espaço imagem. Ilustra-se a imagem aérea com um amplo espaço de busca, no qual são extraídos pontos-chave SIFT que são comparados aos pontos-chave extraídos na imagem terrestre, resultando em correspondências falsas e corretas. Ao se considerar somente as correspondências corretas, o espaço de busca pode ser reduzido e com os pares corretos de correspondência, é possível aplicar uma transformação geométrica 2D para definir uma função de transferência entre a imagem terrestre e a aérea. A partir disso, o ponto de controle do recorte terrestre pode ser transferido para a imagem aérea dentro do espaço reduzido.

A Figura 27(a) apresenta um exemplo de correspondência SIFT entre um espaço de busca na imagem aérea (à esquerda) e sua respectiva imagem terrestre (à direita). Várias correspondências foram encontradas e uma filtragem foi feita para extrair um subconjunto de correspondências corretas, como na Figura 27(b).

Figura 27 – Correspondência SIFT entre imagens multiescalas: (a) janela aérea (à esquerda) com 900×900 pixels e GSD 6 cm e uma imagem terrestre (à direita) com 31×31 pixels e GSD 3 cm; (b) Subconjunto de correspondências filtradas após a aplicação da transformação 2D de Helmert combinada com *majority voting*.



(a)

(b)

A partir dos dados de orientação direta e dos GSDs das imagens terrestres e aéreas, as informações aproximadas de escala e rotação são conhecidas. No entanto, usando-se as correspondências encontradas, podem-se determinar os parâmetros de translação que transformam as coordenadas da imagem terrestre para a imagem aérea. Assim, uma transformação de Helmert ou isogonal (quatro parâmetros) é usada nesse procedimento. Outros tipos de transformações, como afin ou projetiva, exigiriam a solução de um número maior de parâmetros, o que inviabilizaria o processo de votação a ser apresentado no parágrafo seguinte.

As falsas correspondências são excluídas usando a transformação geométrica 2D de Helmert (MIKHAIL et al., 2001) com um procedimento preliminar de cálculo das translações por *majority voting* (SKEA et al., 1993). Para cada par de pontos correspondentes, as coordenadas (x, y) da imagem terrestre e (x', y') do espaço de busca na imagem aérea são inseridas nas Equações 31, que formam um sistema de duas equações.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}. \quad (31)$$

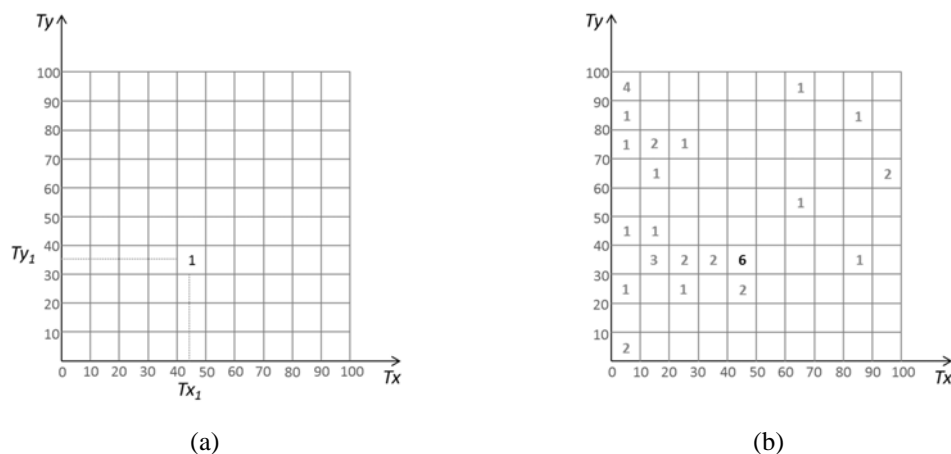
Estas Equações 31 representam a transformação de Helmert ou isogonal, a qual foi reescrita para a determinação dos parâmetros de translação T_x e T_y , em uma dada escala λ e rotação θ , para um par de pontos correspondentes fornecido, como mostram as Equações 32.

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \tag{32}$$

Com base nos valores aproximados de escala e rotação, o procedimento de *majority voting* é aplicado para identificar os parâmetros T_x e T_y com comportamento regular ou similar entre as correspondências corretas.

Este procedimento é realizado usando-se um processo de votação em uma matriz acumuladora normalizada. Cada célula da matriz representa um intervalo de translações em pixels e cada translação entre um par conjugado (T_x e T_y), calculada pela Equação 32, adiciona um voto em uma posição específica da matriz, como exemplifica a Figura 28(a) em que os votos foram computados com base na correspondência das imagens da Figura 27(a). A posição com o maior número de votos indica as translações mais prováveis e os pares correspondentes que devem ser selecionados. A Figura 28(b) representa uma matriz acumuladora em que o maior número de votos ou pico é seis. Isto significa que os seis pares de correspondência referentes a esses votos serão eleitos como possíveis correspondências corretas. Se na matriz houver mais de um pico com o mesmo número de votos, então todos os picos também são aceitos como prováveis correspondências corretas, sendo os demais pares descartados.

Figura 28 – *Majority voting*: (a) Adição de um voto para um par (T_x, T_y) na matriz; (b) Votos acumulados destacando-se a posição com o maior número de votos na matriz.



Considerando o subconjunto de pares selecionados, este é usado para computar os parâmetros da transformação 2D de Helmert com ajustamento por mínimos quadrados, neste

caso, usando a forma linear das Equações 33. Uma análise de resíduos ainda é realizada para eliminar alguma correspondência incorreta remanescente, ou seja, faz-se a verificação e eliminação de erros grosseiros. Neste passo, verifica-se se há, pelo menos, dois pares de correspondência com resíduos menores do que um limiar estabelecido em pixels, devido ao efeito que a variação do terreno pode provocar.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}, \quad (33)$$

em que: $a = \lambda \cdot \cos \theta$ e $b = \lambda \cdot \sin \theta$.

Vale ressaltar que a variação do relevo ou alguma obliquidade de imagem aérea não interfere na aplicação da abordagem. A técnica SIFT é capaz de identificar pontos conjugados mesmo considerando tais alterações. Os efeitos resultantes apenas produzem resíduos maiores na transformação 2D de Helmert.

No final do procedimento, alguns pares de correspondência e os parâmetros da transformação 2D de Helmert são obtidos. Logo, uma função de transferência é definida com os parâmetros, e o ponto GNSS da cena de controle pode ser projetado para a imagem aérea com um erro de poucos pixels, dependendo do deslocamento do relevo. Dessa forma, o espaço é significativamente reduzido pela projeção 2D.

4.5.3 Medição subpixel do ponto de controle na imagem aérea

O recorte terrestre deve ser correlacionado com a imagem aérea para localizar automaticamente o ponto de controle com precisão subpixel. A localização inicial da coordenada imagem do ponto de controle depende do meio utilizado para projetá-lo na imagem aérea, ou seja, se por função de transferência 2D ou por equações de colinearidade.

No caso do ponto ser transferido com a transformação geométrica 2D, sua projeção define o centro de um espaço de busca com os limites calculados pelo tamanho do recorte acrescido pelo dobro do maior resíduo da transformação de Helmert, devido às variações do terreno. Este critério foi definido empiricamente. No outro caso, em que o ponto é projetado direto pelas equações de colinearidade, a propagação de erros determina os limites do espaço de busca. Em ambos os casos, o tamanho do recorte é definido adaptativamente, baseado no menor valor aceito para o coeficiente de correlação ($\rho = 0,7$), o qual também determina o

pixel de correspondência pela comparação da área do recorte terrestre com a janela aérea. Caso haja necessidade para melhorar a correlação, pode-se realizar um realce prévio de imagens com *matching* de histogramas.

Em seguida, um refinamento é aplicado para atingir a precisão subpixel. Este refinamento realiza um ajustamento iterativo por LSM que foi modificado para incluir uma etapa de rotulação e eliminação de pequenas diferenças.

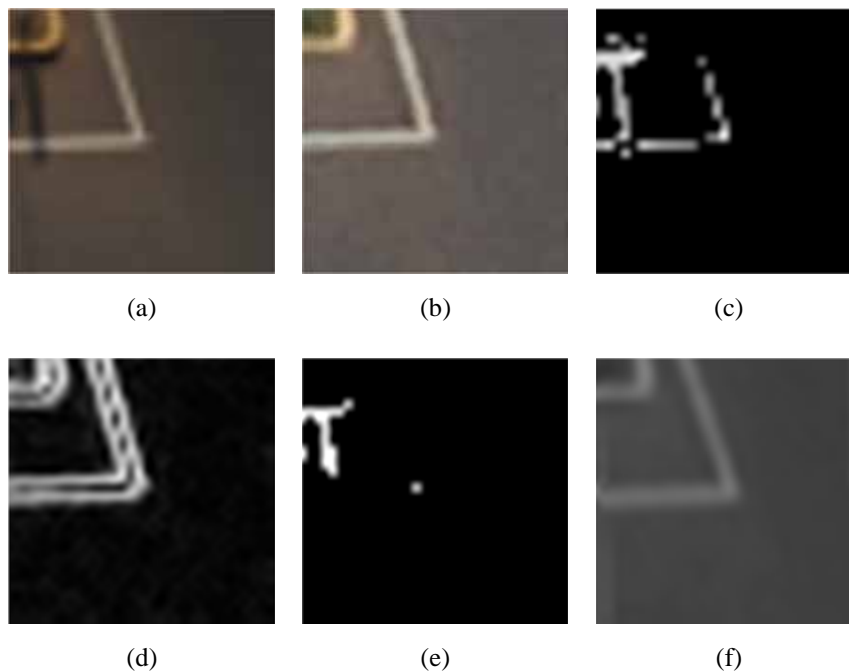
A etapa de eliminação de diferenças é necessária porque, mesmo tendo estabelecido a correspondência, pequenas diferenças, devido a épocas distintas de levantamento, sombras ou objetos incomuns, podem estar presentes e influenciar a estimação dos parâmetros geométricos e radiométricos no LSM. Por isso, introduziu-se no ajustamento LSM proposto por Gruen (1996) o passo combinando rotulação e eliminação de pequenas diferenças. O objetivo é que as diferenças sejam verificadas, rotuladas e eliminadas do conjunto de observações para melhorar a estimação dos parâmetros no LSM.

A Figura 29(a) mostra um exemplo de refinamento considerando as diferenças entre um recorte terrestre, na Figura 29(a), e uma janela aérea correspondente, na Figura 29(b). Uma máscara de diferenças é gerada pela subtração entre ambas as imagens com base nos seguintes passos:

1. A primeira iteração do LSM é realizada para minimizar as diferenças;
2. Uma imagem de diferenças é obtida pela subtração da janela aérea com o recorte terrestre, resultando na Figura 29(c);
3. Para garantir a determinação precisa dos oito parâmetros envolvidos, os pixels com altos gradientes de tons de cinza (ver Figura 29(d)) são calculados com base na janela aérea, preservados e eliminados da imagem de diferenças;
4. A imagem resultante define uma máscara com as diferenças mais significativas, como na Figura 29(e).

Os pixels rotulados como diferenças são excluídos das equações de observações no ajustamento por LSM. No exemplo dado, a Figura 29(f) mostra a janela aérea ajustada após três iterações. Em geral, as diferenças de brilho e contraste são principalmente reduzidas na primeira iteração do LSM, e as iterações subsequentes têm efeitos maiores sobre os parâmetros geométricos.

Figura 29 – Exemplo de refinamento (recorte com 29×29 pixels): (a) Recorte terrestre; (b) Janela área correspondente; (c) Diferenças mais significativas; (d) Gradientes da janela aérea; (e) Diferenças rotuladas; (f) Janela da imagem aérea após ajustamento.



O algoritmo usado para o refinamento está descrito no Quadro 1. Uma vez que o processamento é iterativo e o ajustamento ocorre entre pares de imagens com diferenças significativas, os critérios de convergência e parada foram definidos por testes experimentais usando imagens sintéticas, em que foram controladas as variações de rotação, brilho, contraste e deformação em xy . Na realização do ajustamento LSM, é verificado se o vetor X de correção dos parâmetros é continuamente minimizado e se cada parâmetro geométrico está dentro dos limites estabelecidos de deformação.

As técnicas apresentadas neste capítulo têm o objetivo de executar um fluxo automático, desde a aquisição de um ponto terrestre até sua localização subpixel na imagem aérea. O procedimento foi descrito aplicando-se as técnicas para a localização de uma coordenada terrestre. Logo, o mesmo procedimento deve ser repetido para os demais pontos do bloco fotogramétrico. No final, tem-se um conjunto de coordenadas imagem medidas automaticamente nas imagens aéreas. Então, a fototriangulação pode ser realizada.

Embora a abordagem tenha internamente em seus passos diversos controles sobre inconsistências, é importante destacar que, como em toda aplicação com dados reais, uma verificação sobre os resultados finais é necessária para identificar algum erro grosseiro. Um

passo final de detecção de erros na fototriangulação pode eliminar pontos localizados incorretamente.

Quadro 1 – Algoritmo para o refinamento subpixel usando LSM com eliminação de diferenças.

ENTRADA: Par de subimagens correspondentes com coeficiente de correlação $\rho \geq 0,70$.

- Recorte terrestre $f(x, y)$;
- Janela da imagem aérea no espaço de busca para ser ajustada $g^\circ(x, y)$;
- Valores iniciais para o vetor de parâmetros $X_0 = [0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1]$.

PROCESSAMENTO: Determinação da posição subpixel:

1. Montagem do vetor $L = f(x, y) - g^\circ(x, y)$;
2. Resolução da equação $X = (A^T.A)^{-1}.(A^T.L)$ na iteração n :
 - a. Cálculo dos gradientes G_x e G_y em $g^\circ(x, y)$;
 - b. Montagem da matriz $A = [da_1, da_2, da_3, db_1, db_2, db_3, r, s]$;
 - Se $n > 1$, aplicar a máscara de rotulação de diferenças;
 - c. Cálculo de $X = (A^T.A)^{-1}.(A^T.L)$;
 - d. Atualização do vetor $X_n = X_0 + X$;
 - e. Soma S_n da correção dos seis parâmetros geométricos de X na iteração n ;
 - f. Atualização $X_0 = X_n$;
 - g. Cálculo do vetor de resíduos $V = AX - L$ e sigma *a posteriori*
 - h. Ajuste radiométrico de $g^\circ(x, y) = r_1 + r_2.g^\circ(x, y)$;
 - i. Ajuste geométrico:
 - Cálculo para cada pixel da grade na direção x : $dx = da_1 + x_0da_2 + y_0da_3$;
 - Cálculo para cada pixel da grade na direção y : $dy = db_1 + x_0db_2 + y_0db_3$;
 - Reamostragem de $g^\circ(x, y)$ por interpolação bilinear;
 - Se $n = 1$, gera-se a máscara de rotulação de diferenças.
 - j. Se $(da_1 \text{ e } db_1) < 2$ e $(da_2, da_3, db_2, db_3) < 0,1$ e $S_n < S_{n-1}$.
 - Cálculo de $L = g^\circ(x, y) - f(x, y)$;
 - Retorna para (2).
3. Obtém-se $g^\circ(x, y)$ ajustada ao recorte terrestre $f(x, y)$.

SAÍDA: Centro de $g^\circ(x, y)$ ajustado com coordenada subpixel.

O próximo capítulo apresentará os experimentos realizados para avaliar toda a abordagem automática para geração de cena de controle e localização de ponto de controle.

5. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os experimentos com as técnicas propostas são apresentados neste capítulo. Quatro grupos principais de testes foram organizados e serão mostrados pela ordem de desenvolvimento: o primeiro deles foi feito para verificar a acurácia com a correspondência de imagens, bem como comparar a abordagem com técnicas convencionais de medição; o segundo grupo testou a técnica de redução do espaço de busca e avaliou a abordagem no ajustamento em bloco; no terceiro grupo, fez-se a avaliação sobre a reconstrução de coordenadas 3D considerando um fluxo automático, pois os dois primeiros grupos ainda exigiram um passo inicial manual. Por último, no quarto grupo, apresentam-se os resultados de coordenadas localizadas automaticamente em imagens aéreas, usando as cenas de controle e sem qualquer medição manual.

5.1 Teste da correspondência entre as imagens terrestre e aérea e técnicas de medição

O primeiro experimento foi baseado na fototriangulação de um triplete de imagens aéreas adquiridas pela empresa Engemap, por um levantamento aéreo sobre a FCT/UNESP em Presidente Prudente, em novembro de 2011. As especificações técnicas das câmaras utilizadas são apresentadas no Quadro 2. Os dados desse levantamento aéreo foram coletados com orientação direta usando sistemas GNSS/inercial (Applanix POS/AV 510) em uma altura média de 520 m, que resultou na razão base-altura de $B/H = 0,4$. A câmara foi previamente calibrada e os parâmetros foram refinados por calibração em serviço, também chamado de *in-situ* ou *on-the-job*. Os POIs utilizados no experimento foram determinados com o software INBlock –INPHO (Trimble) pela Engemap. O GSD das imagens resultantes foi de aproximadamente 7 cm.

Quadro 2 – Características das câmaras aérea e terrestre usadas.

Elementos	Imagem aérea	Imagem terrestre
Modelo de câmara	Hasselblad H4D	Fuji Finepix S3 Pro
Distância focal nominal	50 mm	8 mm (Bower <i>fisheye</i>)
Tamanho do pixel	6,0 μm	5,4 μm
Dimensões do sensor	53,7 \times 40,2 mm	23,0 \times 15,4 mm
Dimensões da imagem	8956 \times 6708 (60,1 megapixel)	4256 \times 2848 (12,1 megapixel)

O Quadro 2 também mostra as características técnicas da câmara digital Fuji usada para adquirir as imagens terrestres verticais (em dezembro/2011), as quais, depois de reamostradas, resultaram em imagens com GSDs entre 2 e 3 mm nas áreas dos pontos de controle. Previamente, os POIs foram determinados pelo processo de calibração de câmara em campo terrestre, usando o modelo de colinearidade acrescido dos parâmetros de distorção de Conrady-Brown. Este modelo de colinearidade foi possível de ser aplicado porque somente as partes centrais das imagens foram utilizadas, o que não afeta a etapa seguinte de correspondência entre as imagens terrestre e aérea. Nos experimentos realizados por Marcato Júnior et al. (2014), verificou-se que os maiores efeitos de distorção da lente *fisheye* são radialmente na periferia. Maiores detalhes sobre o procedimento da calibração com a lente *fisheye* serão descritos na Seção 5.3.1, em que a abordagem proposta é apresentada em um fluxo completamente automático.

Então, recortes terrestres foram preparados seguindo os procedimentos descritos na Seção 4.4.1 e correlacionados com as imagens aéreas, sendo aceitos somente recortes com coeficiente de correlação $\rho \geq 0,7$.

5.1.1 Configuração e medição de coordenadas em um tripleto de imagens

A Figura 30 mostra o tripleto utilizado considerando os seguintes pontos distribuídos: 7 pontos de controle, 31 pontos de enlace e 4 pontos de verificação.

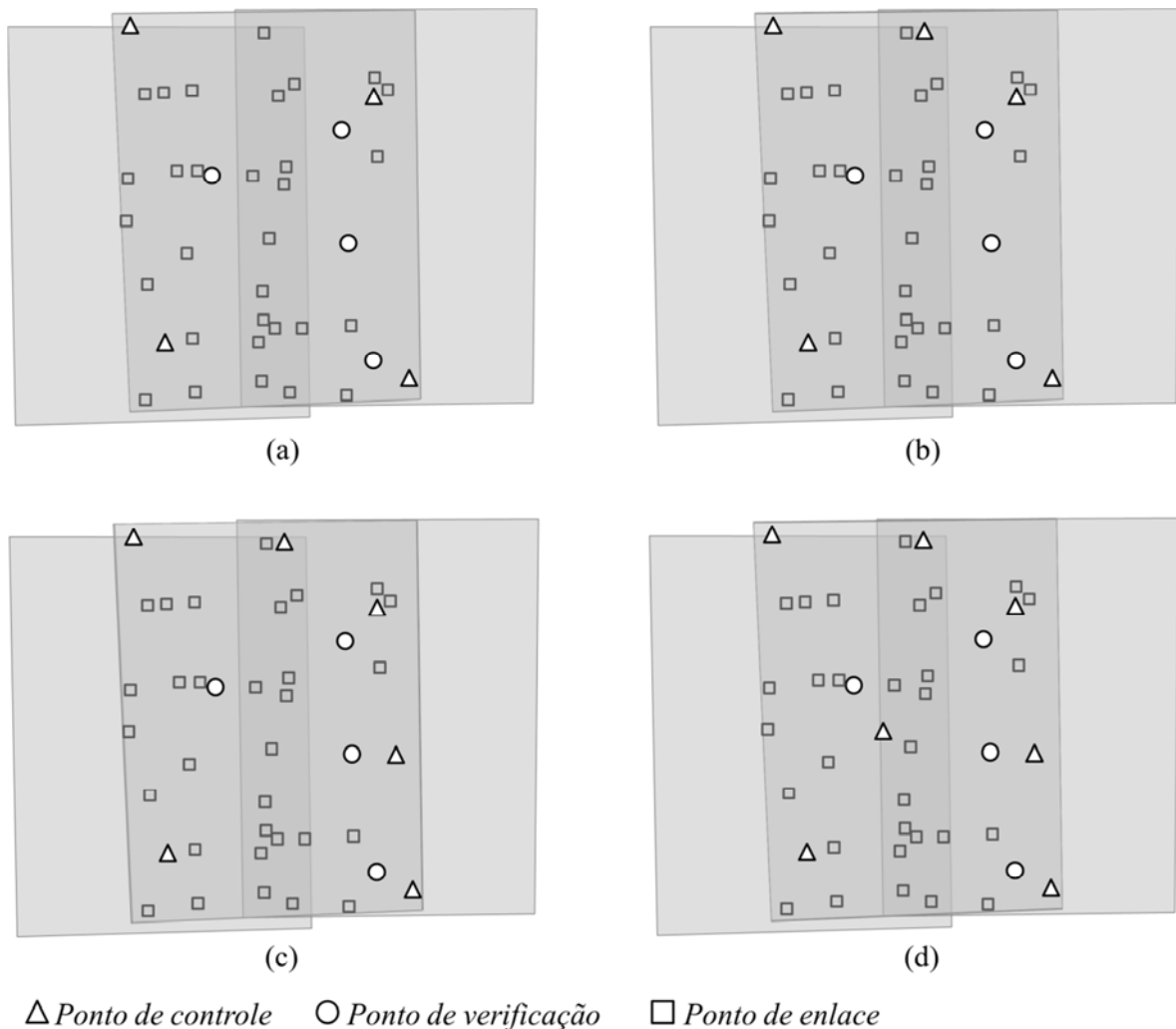
Para verificar o desempenho da técnica automática em comparação com as técnicas manuais normalmente empregadas para medição de pontos de controle, grupos de experimentos foram independentemente processados. As coordenadas imagem de todos os pontos de controle e pontos de verificação foram medidas nas imagens aéreas com três técnicas diferentes:

- Medição manual monoscópica com transferência automática de ponto;
- Medição manual estereoscópica;
- Medição com localização automática – técnica implementada em linguagem C/C++.

Um projeto no software ERDAS-LPS[®] foi configurado para realizar as duas medições manuais por um operador experiente (com cinco anos na empresa Engemap). Neste projeto, os pontos de enlace foram gerados automaticamente, e os dados dos POEs entraram como aproximações iniciais, adotando-se $\sigma = 10$ m em posição e $\sigma = 3^\circ$ em atitude. Para a aerotriangulação, a precisão dos pontos de controle foi definida com $\sigma = 5$ cm, baseada no

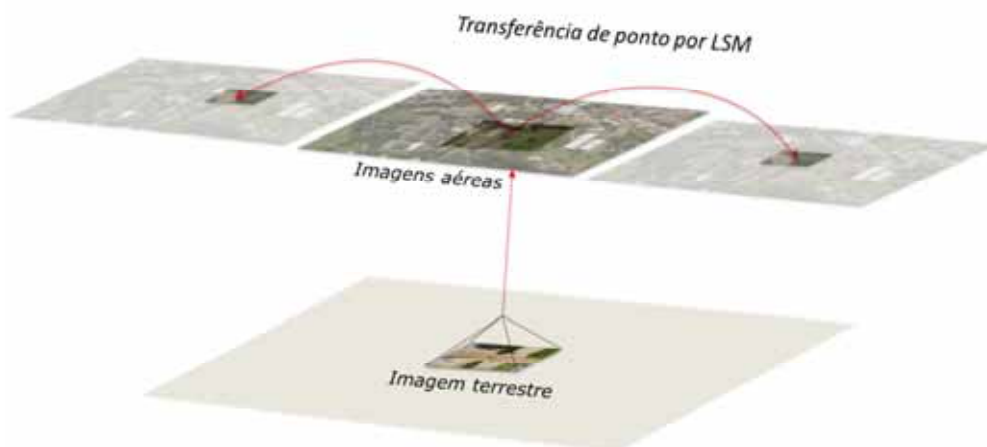
posicionamento relativo GNSS. Previamente vários experimentos foram realizados para definir este valor como o mais realístico. Todas as observações imagens consideraram $\sigma = 0,5$ pixel.

Figura 30 – Configuração do triploto de imagens aéreas usado para os experimentos, variando-se o número de pontos de controle, de quatro, em (a), até sete, em (d).



As medições das coordenadas imagens foram feitas de modo híbrido, utilizando o recurso de transferência de pontos disponibilizado pelo módulo LPS, ou seja, a coordenada imagem foi medida diretamente apenas em uma imagem e, depois, transferida pelo próprio LPS para posições homólogas por correlação e mínimos quadrados, como ilustra a Figura 31.

Figura 31 – Transferência automática de um ponto de controle pelo LPS: após a medição do ponto de controle na imagem aérea, o ponto é transferido por correlação e mínimos quadrados para as imagens adjacentes.



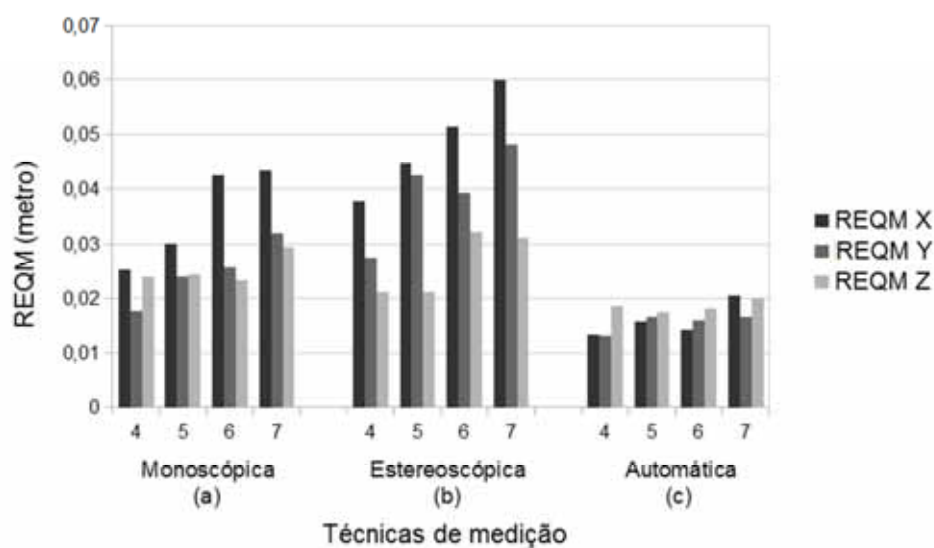
Para garantir igualdade na comparação dos resultados, o mesmo projeto foi utilizado para os três casos de medição de pontos de controle e verificação, exceto pelas coordenadas imagens que foram substituídas a cada aerotriangulação do tripleto.

5.1.2 Resultados e análises da aerotriangulação do tripleto

As discrepâncias entre as coordenadas objeto estimadas no ajustamento por feixe de raios e aquelas medidas em campo tanto para os pontos de controle quanto para os pontos de verificação foram usadas para avaliar a técnica automática de localização em comparação com as medições manuais. Objetivou-se verificar a precisão alcançada e se a técnica desenvolvida melhorou a acurácia da orientação, quando comparada às outras duas (monoscópica e estereoscópica).

Uma análise sobre a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) das coordenadas dos pontos de controle pode ser feita como um indicativo de melhoria na medição de imagem. Os gráficos da Figura 32 exibem os REQMs obtidos dos pontos de controle nas três técnicas, variando-se de 4 a 7 pontos de controle. Com isto, pode-se ter uma avaliação sobre o ajustamento por feixes de raios nos pontos de controle. Em todas as coordenadas, os resultados da técnica automática (Figura 32(c)) foram menores do que as técnicas manuais (Figuras 32(a) e (b)). Os resultados indicam que a técnica automática atinge maior precisão devido ao ajustamento de raios apresentar discrepâncias menores.

Figura 32 – REQMs dos pontos de controle (de 4 a 7) no espaço objeto. Resultados nas três técnicas de medição.

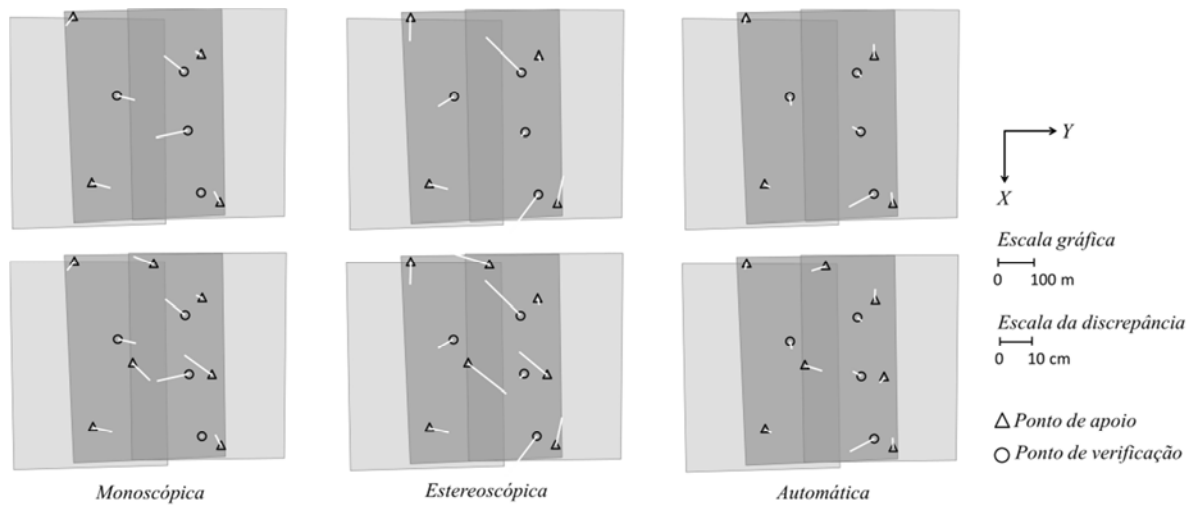


O maior erro em planimetria observado nas Figuras 32(a) e (b) corresponde a um efeito resultante da medição realizada pelo operador. Este efeito foi provavelmente produzido pela introdução de um ponto específico com erro maior. Em contrapartida, a técnica automática proporcionou um melhor ajuste em planimetria, indicando medições mais precisas.

Para analisar o comportamento dos erros nos pontos de controle, a Figura 33 foi produzida para ilustrar graficamente as discrepâncias nas coordenadas objeto (X , Y) dos pontos de controle e de verificação. A primeira linha da figura apresenta os resultados com 4 pontos de controle, e a segunda linha, com 7 pontos de controle para as três técnicas de medições usadas. Pode ser visto que o comportamento das discrepâncias é similar, exceto por um fator de escala, indicando que a técnica automática melhora a precisão da medição imagem.

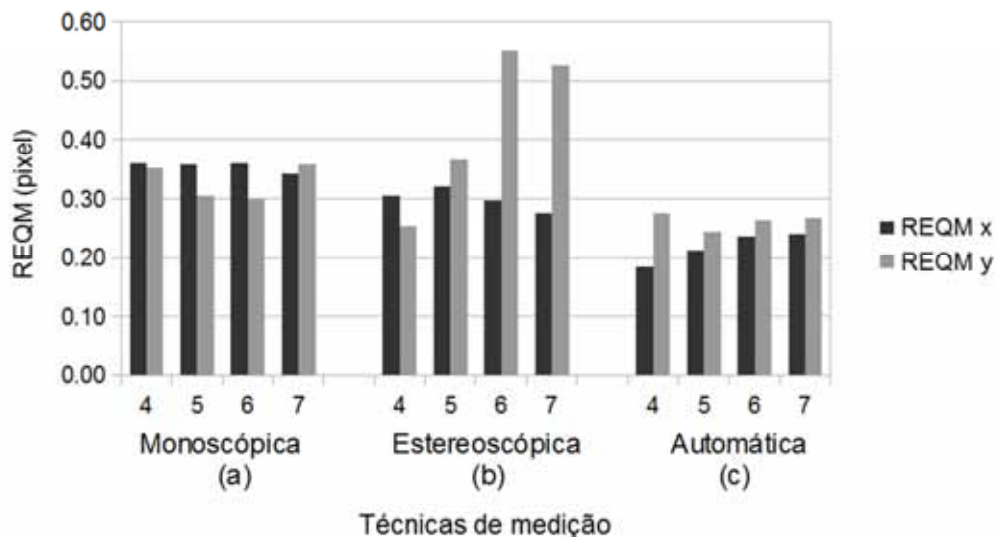
Outra hipótese é a deformação do modelo, o qual é detectado quando pontos de controle são inseridos na área central do bloco. A análise da Figura 33 revela que os pontos na área central do tripeto têm discrepâncias maiores, mas este efeito de deformação é mais notável no experimento onde os pontos foram medidos estereoscopicamente.

Figura 33 – Discrepâncias nas coordenadas planimétricas no espaço objeto de quatro a sete pontos de controle e quatro pontos verificação.



O gráfico da Figura 34 apresenta o REQM dos resíduos de imagem resultantes dos pontos de controle. Os valores foram calculados a partir das diferenças entre as coordenadas imagem ajustadas (pela aerotriangulação) e as coordenadas medidas (pelas três técnicas). Todos os REQMs dos resíduos obtidos com a técnica automática foram menores do que 0,30 pixel, ao passo que as técnicas manuais produziram resíduos maiores.

Figura 34 – REQMs dos resíduos dos pontos de controle projetados na imagem.



As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam o REQM para as coordenadas dos pontos de verificação nos espaços objeto e imagem para os experimentos com o ajustamento por feixe

de raios. O número e a distribuição de pontos de controle variaram de 4 a 7. No espaço imagem, os REQMs foram calculados pela diferença entre as coordenadas medidas e as coordenadas imagem projetadas, usando os POEs estimados e as coordenadas terrestres.

Tabela 2 – Medição monoscópica com transferência de pontos – REQMs dos quatro pontos de verificação.

Número de pontos de controle	Espaço objeto			Espaço imagem	
	X	Y	Z	x	y
	(m)	(m)	(m)	(pixel)	(pixel)
4	0,048	0,020	0,151	0,173	0,003
5	0,045	0,023	0,140	0,173	0,003
6	0,046	0,023	0,136	0,185	0,003
7	0,048	0,025	0,119	0,195	0,003

A Tabela 2 expõe os resultados alcançados com a medição monoscópica dos pontos de controle na imagem central do triplete com transferência automática para as imagens adjacentes. Os REQMs obtidos em 4 pontos de verificação independentes foram menores que 5 cm em planimetria e 15 cm em Z. No espaço imagem, todos os valores foram menores que 0,20 pixel. Os valores baixos na coordenada y no espaço imagem são um efeito da geometria do estéreo modelo, porque o eixo Y está na direção de voo, não há paralaxe residual. A Figura 30 mostra as posições de cada ponto de verificação podendo-se observar as intersecções por dois raios, o que resulta em valores próximos a zero para os resíduos em y na imagem.

A Tabela 3 apresenta os resultados alcançados com a medição estereoscópica. Os REQMs nas coordenadas dos pontos de verificação foram menores que 9 cm em XY e menores que 23 cm em Z. Para as coordenadas imagem, o REQM máximo obtido foi de 0,20 pixel.

Tabela 3 – Medição estereoscópica – REQMs dos quatro pontos de verificação.

Número de pontos de controle	Espaço objeto			Espaço imagem	
	X	Y	Z	x	y
	(m)	(m)	(m)	(pixel)	(pixel)
4	0,078	0,072	0,158	0,195	0,005
5	0,049	0,062	0,171	0,189	0,005
6	0,046	0,084	0,225	0,198	0,005
7	0,058	0,065	0,216	0,203	0,005

A Tabela 4 mostra os REQMs para as coordenadas dos pontos de verificação obtidos com a técnica automática de localização de pontos de controle usando recortes terrestres, também considerando a transferência de pontos. No espaço objeto, os resultados foram no máximo 30 cm em planimetria e abaixo de 12 cm em elevação. No espaço imagem, também os valores foram menores do que aqueles obtidos pelas técnicas manuais.

Tabela 4 – Medição automática– REQMs dos quatro pontos de verificação.

Número de pontos de controle	Espaço objeto			Espaço imagem	
	X	Y	Z	x	y
	(m)	(m)	(m)	(pixel)	(pixel)
4	0,024	0,018	0,103	0,054	0,001
5	0,023	0,018	0,112	0,054	0,001
6	0,026	0,017	0,097	0,043	0,001
7	0,030	0,018	0,087	0,037	0,001

Comparando-se os resultados no espaço objeto, a técnica automática alcançou resultados mais acurados em relação às técnicas manuais. No espaço imagem, também o mesmo efeito foi verificado. Na avaliação das discrepâncias em relação aos pontos de controle e verificação, pode-se concluir que a acurácia foi melhorada significativamente com a técnica automática.

Nestes experimentos, os pontos de controle foram adquiridos em áreas planas. Os testes da Seção 5.4 mostrarão os experimentos e resultados quando áreas com outras características são usadas.

5.2 Redução do espaço de busca e ajustamento em bloco de imagens

Neste caso, os experimentos foram conduzidos para verificar o efeito das técnicas de redução do espaço de busca e eliminação de diferenças e, conseqüentemente, avaliar a localização automática dos pontos de controle em imagens aéreas a partir dos recortes terrestres. A orientação indireta com o ajustamento por feixe de raios de um bloco de imagens foi usada como base para os testes.

5.2.1 Preparação dos dados e localização de ponto de controle

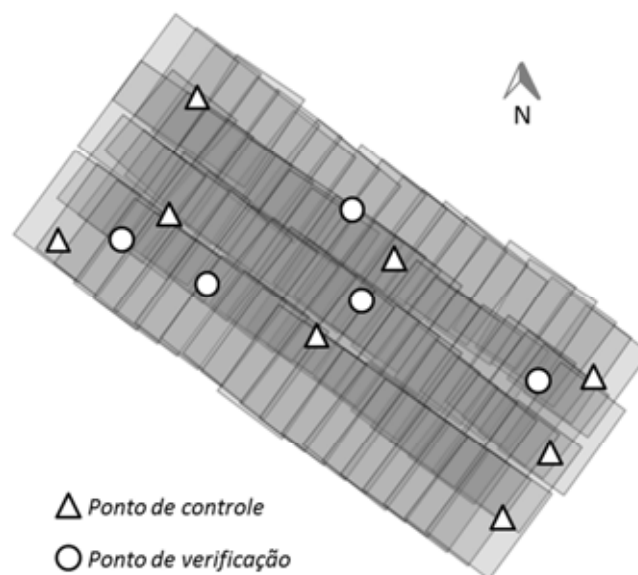
As características técnicas das câmaras digitais usadas para adquirir as imagens aéreas e terrestres são as mesmas apresentadas no Quadro 2 da Seção 5.1.

As imagens aéreas foram adquiridas por uma câmara Hasselblad com um sistema inercial integrado (Applanix POS/AV 510) em um voo produzido pela empresa Sensormap sobre a área urbana de Presidente Prudente, em junho de 2012. A altura média de voo foi de 960 m, adquirindo imagens com GSD de aproximadamente 12 cm. Previamente, calibrou-se a câmara Hasselblad com dados adquiridos em um campo de calibração aéreo e, em seguida, realizou-se a uma calibração em serviço, sendo as imagens posteriormente reamostradas para corrigir os efeitos de distorção das lentes, etapas estas realizadas pela empresa Sensormap.

No caso das imagens terrestres, estas foram coletadas em agosto de 2012, como descrito na Seção 4.3.2, usando as barras de referências e uma câmara (em visada nadiral) levantada em torno de 4,5 m sobre o terreno, o que resultou em imagens com GSD próximo a 3 mm (na área central da imagem).

A Figura 35 mostra a geometria do bloco de imagens considerando 8 pontos de controle, 5 pontos de verificação e 83 imagens agrupadas em quatro faixas de voo com 80% de superposição longitudinal e 40% lateral. A razão base-altura dos modelos no bloco é de aproximadamente $B/H = 0,26$.

Figura 35 – Geometria do bloco com 83 imagens, oito pontos de controle e cinco pontos de verificação.



Antes de localizar os pontos de controle nas imagens aéreas, primeiramente as coordenadas imagem dos pontos de controle devem ser medidas manualmente nas imagens terrestres para, em seguida, aplicar a sequência: a técnica SIFT, a estratégia de redução do espaço busca e a transferência de pontos de controle para a imagem aérea.

A técnica SIFT usada para gerar descritores das imagens terrestres e aéreas e para encontrar pontos homólogos foi realizada usando um script desenvolvido em Matlab por Lowe (2005), e os algoritmos para realizar a redução do espaço de busca e a localização automática de pontos de controle foram implementados em linguagem C/C++.

Para extrair pontos-chave das imagens aéreas e terrestres, os principais parâmetros do algoritmo SIFT foram configurados como: três oitavas, limiar de rejeição de baixo contraste menor que 0,03 e razão de curvaturas principais menor que 10, como mostrado na Seção 4.3.2 e sugerido por Lowe (2004).

A escolha dos correspondentes SIFT entre uma imagem terrestre e seu respectivo espaço de busca na imagem aérea foi definida pelo produto escalar entre os vetores descritores de ambas as imagens, sendo aceitos somente os pares de correspondência com similaridade acima de 0,85 (em que 1 representa a similaridade máxima). O objetivo é encontrar apenas algumas correspondências entre as imagens, devendo ser, no mínimo, duas para permitir a aplicação da estratégia de redução do espaço de busca, como descrito na Seção 4.5.2. As correspondências SIFT mais precisas foram obtidas quando as imagens terrestres e janelas aéreas foram orientadas similarmente e reamostradas para níveis de resolução intermediários do seguinte modo: as janelas aéreas com um GSD de 12 cm foram superamostradas para 6 e 3 cm, ao passo que as imagens terrestres foram subamostradas de 3 mm para 3 e 6 cm. A técnica de redução do espaço na imagem aérea realizou buscas por correspondências nos dois níveis de GSD.

Várias correspondências foram encontradas e uma filtragem foi feita com a transformação 2D de Helmert combinada com *majority voting* para extrair um subconjunto de correspondências corretas, o qual foi usado posteriormente em uma transformação 2D de Helmert para definir a função linear de transferência do ponto de controle para a janela aérea. Esse procedimento, usando a técnica SIFT e a redução do espaço de busca, foi repetido para todos os pontos de controle do bloco de imagens, de modo que cada ponto de controle teve sua função de transferência definida.

Então, os recortes nas imagens terrestres foram gerados e cada ponto de controle dos recortes terrestres foi transferido para sua janela aérea correspondente, usando a função

específica. Dentro do espaço de busca na imagem aérea, a técnica de correlação por área foi aplicada para estabelecer correspondência entre o recorte terrestre (com um tamanho médio de 25×25 pixels, conforme a correlação com a janela aérea) e a janela aérea, usando um coeficiente de correlação mínima de 0,7 (procedimento descrito na Seção 4.5.3). Em seguida, o ajustamento por LSM iterativo, combinado com a eliminação de diferenças, estimou a localização subpixel de cada ponto, em geral com três iterações.

Para avaliar a precisão e acuraria da técnica de localização de ponto de controle, um projeto no ERDAS-LPS[®] foi configurado para realizar:

- Medição manual monoscópica;
- Geração automática de pontos de enlace e transferência com LSM;
- Transferência automática de pontos de controle para imagens adjacentes por LSM;
- Ajustamento do bloco de imagens.

Os POEs existentes foram aleatoriamente degradados para simular dados de navegação adquiridos por um sistema GNSS/inercial de baixo custo. Em seguida, estes POEs foram inseridos no projeto LPS como aproximações iniciais, sendo configurados os desvios-padrão com $\sigma = 3$ m para posição e $\sigma = 2^\circ$ para os ângulos de atitude. Esta configuração conduziu a uma busca por pontos em áreas grandes, com aproximadamente 900×900 pixels, segundo o cálculo de propagação de erros nessa configuração simulada. No espaço imagem, o desvio-padrão foi de $\sigma = 0,5$ pixel, e o desvio-padrão admitido para os pontos de controle foi de $\sigma_{XYZ} = 5$ cm, baseando-se na acurácia do posicionamento estático GNSS.

Para comparar os resultados, o mesmo procedimento usado nos experimentos da Seção 5.1 foi aplicado, ou seja, os pontos de controle foram medidos manualmente nas imagens de um projeto LPS por um operador experiente e, usando esse mesmo projeto, substituiu-se cada coordenada imagem por aquelas calculadas pela técnica automática. Em ambas as técnicas, manual e automática, a medição de cada ponto foi realizada apenas em uma imagem para depois transferi-lo por LSM para suas posições homólogas.

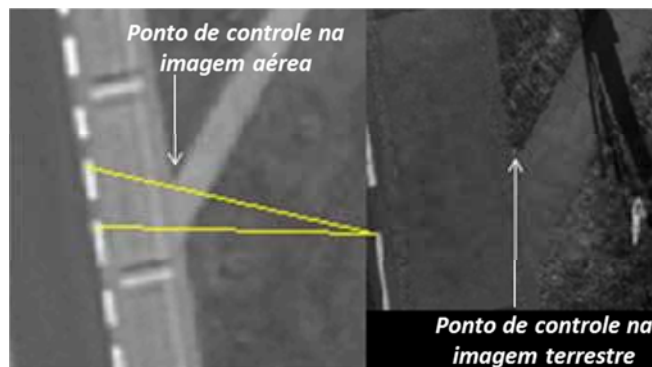
5.2.2 Resultados e análise do ajustamento em bloco

Para obter uma medida da distância entre as coordenadas transferidas e seus valores esperados, os pontos de controle foram projetados para as imagens aéreas pela técnica automática, e as coordenadas foram comparadas com os valores manualmente medidos.

Os resultados nos casos estudados indicaram que as coordenadas foram transferidas pela transformação 2D de Hermert com uma diferença máxima de 5 pixels em relação à medição manual. Estas diferenças ocorreram devido às variações em elevação entre os pontos usados para calcular os parâmetros de transformação e os pontos transferidos.

Três dos 13 pontos (pontos de controle e verificação) do bloco de imagens foram incorretamente transferidos por haver algum padrão repetitivo (por exemplo, ver Figura 36) nas áreas de busca grandes nas imagens aéreas (centenas \times centenas de pixels) e, conseqüentemente, seus resíduos na transformação 2D de Helmert foram maiores que 5 pixels, atingindo um máximo de 19 pixels. Ainda assim, os três pontos foram projetados para as imagens aéreas e quando comparados à medição manual, no pior caso, o ponto de controle foi projetado para 27 pixels distante de sua posição correta na imagem aérea.

Figura 36 – Exemplo de um padrão repetitivo (faixas na lateral da calçada) na região do ponto de controle que teve influência no resultado da correspondência de imagens.



A Figura 36 mostra duas correspondências entre uma janela aérea e uma imagem terrestre em que o resultado foi influenciado pelo padrão repetitivo (faixas na lateral da calçada) próximo ao ponto de controle, o qual é um ponto distinguível.

Mesmo usando esses falsos positivos, as correspondências SIFT permitiram a redução do espaço de busca e não afetaram a localização final dos pontos de controle. Esta hipótese foi confirmada porque a localização dos pontos foi bem sucedida. Todos os pontos atingiram a precisão subpixel usando a correspondência baseada em área e o refinamento com LSM.

É importante observar que algum padrão repetitivo próximo ao ponto de controle, como faixas de ruas, pode aparecer marginalmente na cena terrestre e entrar na correspondência SIFT, uma vez que neste passo toda área da cena terrestre é usada. Geralmente, as falsas correspondências são eliminadas pelo processo de votação, porém, se

alguma delas permanecer, o padrão repetitivo não afetará o passo seguinte, porque a área é limitada e o recorte terrestre é distinguível, o que assegura a localização correta do ponto pela correspondência baseada em área.

A Tabela 5 apresenta os REQMs resultantes do ajustamento em bloco considerando as seguintes medições:

- Técnica manual, para propósitos de comparação;
- Técnica automática sem eliminação de diferenças no LSM;
- Técnica automática com máscara de rotulação e eliminação de diferenças no LSM, para avaliar o efeito na precisão do ajustamento.

Tabela 5 – REQMs de oito pontos de controle e cinco pontos de verificação no espaço imagem.

Técnica	Pontos de controle		Pontos de verificação	
	x	y	x	y
	(pixel)	(pixel)	(pixel)	(pixel)
Manual	0,14	0,19	0,14	0,16
Automática sem máscara	0,12	0,18	0,14	0,17
Automática com máscara de eliminação de diferenças	0,12	0,16	0,14	0,16

Os valores da tabela são referentes aos resíduos no espaço imagem de oito pontos de controle e cinco pontos de verificação independentes, não sendo inseridos no cálculo da aerotriangulação.

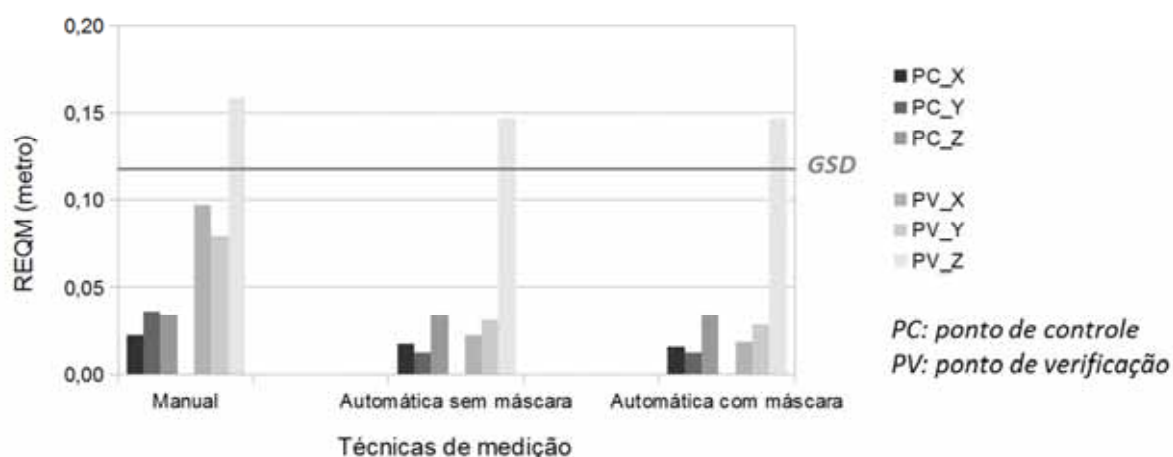
Os REQMs obtidos pela técnica automática estão abaixo de 0,19 pixel e menores do que aqueles obtidos pela técnica manual, com exceção na coordenada y dos pontos de verificação para a técnica automática sem máscara. Isto indica a presença de um erro sistemático que deve ser eliminado, o qual foi constatado pela aplicação da máscara de eliminação de diferenças. O resultado foi melhorado quando as diferenças foram removidas com a máscara, indicando a relevância dessa filtragem no LSM.

Uma análise semelhante pode ser realizada com as discrepâncias resultantes dos pontos no espaço objeto. A Figura 37 mostra os valores dos REQMs obtidos sobre os pontos de controle e pontos de verificação. Como se pode notar, o maior impacto da técnica automática está na planimetria. A técnica automática com eliminação de diferenças alcançou REQMs nos pontos de controle menores que 0,015 m em X (0,13 GSD) e 0,012 m em

Y (0,10 GSD), enquanto a técnica manual resultou em valores maiores, sendo 0,022 m em X (0,18 GSD) e 0,036 m em Y (0,30 GSD).

A análise de acurácia, baseada nas discrepâncias dos pontos de verificação independentes, indicou que a técnica automática com eliminação de diferenças resultou em REQMs abaixo de 0,018 m em X (0,15 GSD) e 0,028 m em Y (0,02 GSD). Estes resultados representam uma melhoria significativa se comparada à medição manual, a qual obteve REQMs de 0,097 m em X (0,08 GSD) e 0,079 m em Y (0,07 GSD).

Figura 37 – REQMs resultantes dos pontos de controle e verificação no espaço objeto.



Na coordenada Z dos pontos de controle, os REQMs foram similares: 0,034 m (0,03 GSD) para a técnica manual e 0,033 m (0,28 GSD) para ambas as técnicas automáticas. Considerando as coordenadas Z dos pontos de verificação, os REQMs resultantes foram 0,0159 m (1,33 GSD) com a técnica manual e 0,147 m (1,33 GSD) com as técnicas automáticas. As pequenas diferenças de REQM em Z são devidas à transferência automática de pontos igualmente realizada pelo software LPS em todas as técnicas. Os valores de variância *a posteriori* resultantes do ajustamento nos três casos foram também similares, com um valor aproximado de $\sigma = 0,33$.

A Tabela 6 apresenta o percentual de melhoria ao se usar as técnicas automáticas (com e sem máscara) em comparação com a técnica manual. As técnicas automáticas significativamente melhoraram a precisão na localização dos pontos de controle, e valores mais acurados foram obtidos quando a máscara de rotulação e eliminação de diferenças foi aplicada, o que indica a sua importância para o refinamento do ajuste.

Tabela 6 – Percentual de melhoria da técnica automática em comparação com a medição manual.

Técnica	Pontos de controle			Pontos de verificação		
	X	Y	Z	X	Y	Z
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Automática sem máscara	22,7	66,7	2,9	77,3	60,8	7,6
Automática com máscara de eliminação de diferenças	31,8	66,7	2,9	81,4	64,6	7,6

Adotando-se o GSD como uma unidade, mais uma comparação pode ser feita sobre os pontos de verificação, considerando o melhor caso com a técnica automática com máscara. Os resultados podem ser expressos com as seguintes relações:

- Técnica manual: 0,80 GSD e 0,67 GSD para XY, respectivamente ($\sim 3/5$ GSD, em média), e 1,33 GSD para Z;
- Técnica automática com máscara: 0,15 GSD e 0,23 GSD para XY, respectivamente ($\sim 1/5$ GSD, em média), e 1,23 GSD para Z.

Estes resultados demonstram que uma acurácia planimétrica de aproximadamente $1/5$ GSD no espaço objeto pode ser alcançada com o uso da técnica de localização automática, a qual indicou uma importante melhoria na qualidade das medições das coordenadas imagem.

Em resumo, a estratégia para reduzir o espaço de busca mostrou ser eficiente, transferindo as coordenadas dos pontos de controle para poucos pixels distantes de suas posições esperadas nas imagens aéreas. Isto permitiu adequar o espaço para a aplicação da correspondência baseada em área, e os pontos de controle foram corretamente localizados nas imagens aéreas devido às características distinguíveis dos recortes terrestres. Desse modo, a solução foi alcançada, superando os problemas com a baixa qualidade dos valores iniciais dos POEs. O refinamento usando LSM com remoção de diferenças também contribuiu para uma melhor localização subpixel dos pontos. Além disso, as discrepâncias obtidas nos pontos de verificação independentes demonstraram valores acurados, sendo significativamente melhores do que aqueles obtidos pela medição manual.

5.3 Avaliação da técnica automática de orientação, reconstrução 3D e ortorretificação

Os experimentos apresentados nas duas seções anteriores enfatizaram a localização automática do ponto de controle nas imagens aéreas, mas ainda dependendo de um passo

manual para medir o ponto de controle nas imagens terrestres. Nesta seção, a abordagem enfoca esse passo inicial para torná-lo também automático, sem haver qualquer interação para localizar o ponto nas imagens.

5.3.1 Calibração do sistema câmara-lente

As imagens para os experimentos foram adquiridas por uma câmara digital com lente *fisheye*. O Quadro 3 fornece os detalhes técnicos do sistema usado para as aquisições.

Quadro 3 – Especificações técnicas do sistema de aquisição de imagens.

Modelo de câmara	Nikon D3100
Tamanho do sensor	CMOS APS-C (23,1 × 15,4 mm)
Dimensões da imagem	4608 × 3072 pixels (14,2 megapixels)
Tamanho do pixel	0,005 mm
Distância focal nominal	8,0 mm (Bower SLY 358N)

Realizou-se a calibração da lente *fisheye* em um campo de calibração terrestre 3D, localizado na FCT/UNESP em Presidente Prudente. O campo possui 139 alvos com codificação Aruco (GARRIDO-JURADO et al., 2014), como mostra a Figura 38(a). Este tipo de codificação possibilita identificar os alvos e medir automaticamente as coordenadas dos cantos do quadrado externo para serem usadas como controle no ajustamento por feixe de raios na calibração do sistema câmara-lente.

Figura 38 – Campo de calibração com alvos Aruco: (a) Exemplo de uma imagem *fisheye* usada para calibração da câmara; (b) Exemplo de imagem vertical *fisheye* usada na calibração e na avaliação da placa de controle.



(a)



(b)

Um conjunto de 16 imagens foi adquirido para o processo de calibração da seguinte maneira: 12 imagens horizontais foram coletadas em três estações de câmara. Em cada estação, adquiriram-se 4 imagens com mudanças em posição e rotações com giro de 90° no eixo da câmara. Além destas, 4 imagens verticais, como aparece na Figura 38(b), também foram coletadas em uma mesma posição com variações em altura. Realizou-se este procedimento para minimizar a dependência linear entre os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara e também para testar a técnica de reconstrução com imagens multiescala.

Um programa computacional de localização de alvos Aruco, usando a biblioteca OpenCV, foi adaptado por Silva et al. (2014) para calibração de câmaras, o qual extrai os cantos do quadrado externo de cada alvo, fornecendo suas respectivas coordenadas terrestres. Do mesmo modo, o alvo da placa de controle também foi planejado para ser identificado automaticamente, extraindo-se as coordenadas imagem de seus oito cantos (mas estes não entraram no processo de calibração).

Os cantos dos alvos Aruco foram automaticamente localizados sobre as 16 imagens, gerando 6820 observações a partir de 383 pontos do espaço objeto. Segundo Moraes et al. (2013), as coordenadas terrestres dos cantos foram previamente medidas por técnicas topográficas e fotogramétricas, com uma acurácia de 3 mm.

Tendo identificadas as coordenadas, os POIs foram determinados usando o software CMC, desenvolvido por Ruy et al. (2009), com adaptação feita por Marcato Junior et al. (2014) para o modelo equidistante, apropriado para a lente *fisheye*. Os valores dos POIs estimados pelo processo de calibração estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – POIs estimados pelo processo de calibração usando ajustamento por feixe de raios com o modelo equidistante.

Parâmetro	Valor estimado	Desvio-padrão estimado
f (mm)	8,3794	0,0011 ($\pm 0,23$ pixels)
x_0 (mm)	0,0729	0,0011 ($\pm 0,22$ pixels)
y_0 (mm)	0,0019	0,0009 ($\pm 0,18$ pixels)
K_1 (mm ⁻²)	$4,20 \times 10^{-4}$	$3,77 \times 10^{-6}$
K_2 (mm ⁻⁴)	$8,20 \times 10^{-7}$	$6,32 \times 10^{-8}$
K_3 (mm ⁻⁶)	$-2,54 \times 10^{-9}$	$3,12 \times 10^{-10}$
P_1 (mm ⁻¹)	$4,84 \times 10^{-6}$	$1,63 \times 10^{-6}$
P_2 (mm ⁻¹)	$-2,28 \times 10^{-7}$	$1,67 \times 10^{-6}$
A	$3,34 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-5}$
B	$-7,43 \times 10^{-4}$	$3,58 \times 10^{-5}$
σ a posteriori	0,0054 (≈ 1 pixel)	

5.3.2 Avaliação da placa de controle para a reconstrução 3D

Para introduzir a placa de controle como um dispositivo de apoio ao levantamento terrestre e permitir a automação da fase de medição de pontos, testes específicos foram conduzidos para avaliar as capacidades, limitações e os efeitos resultantes quando a placa de controle é usada. Os detalhes completos de todos os procedimentos aplicados estão descritos em Tommaselli e Berveglieri (2014), mas uma síntese é apresentada a seguir.

O experimento foi produzido no campo de calibração devido à disponibilidade de um número significativo de coordenadas conhecidas e sua distribuição espacial regular, possibilitando avaliar os efeitos da placa de controle igualmente em várias direções.

A aquisição dos dados seguiu os procedimentos descritos na Seção 4.3.2, em que as imagens verticais em uma mesma posição planimétrica XY com alturas diferentes (3,0; 3,5 e 4,5 m) foram coletadas para formar um modelo multiescala. O GSD das imagens adquiridas variaram entre 2 e 3 mm.

Usando-se a implementação desenvolvida por Silva et al. (2014), os alvos codificados foram reconhecidos automaticamente e os cantos do quadrado externo foram extraídos com precisão subpixel. Os oito cantos do quadrado sobre a placa de controle também foram igualmente extraídos. As coordenadas terrestres desses oito cantos da placa entraram no ajustamento por feixe de raios como pontos de controle. Pelo fato de suas coordenadas objeto no sistema local serem conhecidas com acurácia, um desvio-padrão de $\sigma = 0,5$ mm foi adotado. No espaço imagem, todos os pontos foram localizados automaticamente e um desvio-padrão de $\sigma = 0,5$ pixel foi considerado.

Os valores iniciais dos POEs foram introduzidos como injunções no ajustamento, considerando-se a determinação direta de suas medidas obtidas no campo. Estes valores foram determinados inicialmente usando-se: a distância diretamente medida entre o receptor GNSS e o tripé da câmara; as alturas medidas com um distanciômetro eletrônico manual e o *lever arm*, o qual foi diretamente medido, com paquímetro, pela distância entre o ponto nodal da lente externa e a plataforma sustentada pelo bastão da câmara.

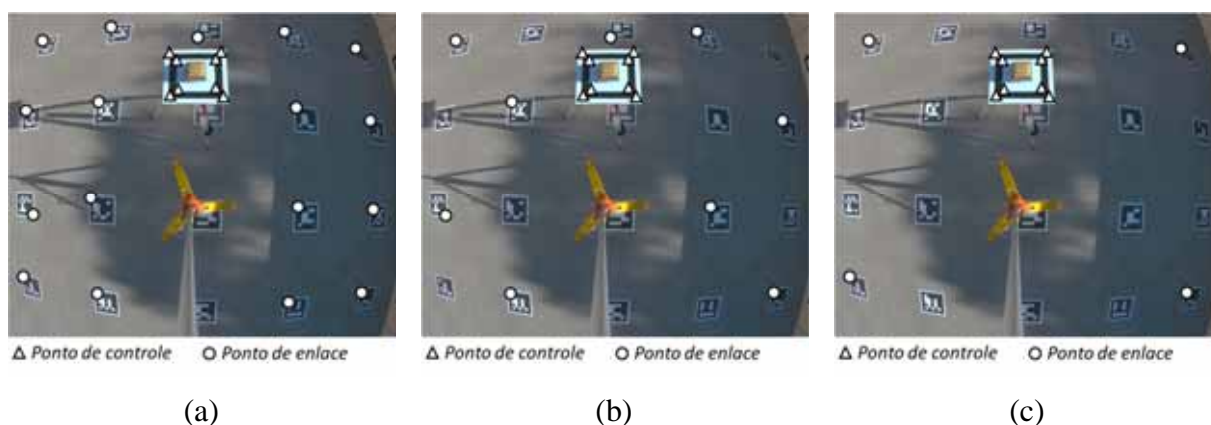
Os desvios-padrão das posições da câmara foram considerados com $\sigma = 10$ cm em (X_{CP}, Y_{CP}) e $\sigma = 5$ mm em Z_{CP} . Os desvios-padrão em (X_{CP}, Y_{CP}) são maiores devido aos deslocamentos e movimentos realizados para elevar a câmara. Para os ângulos de atitude, o desvio-padrão de $\sigma = 10^\circ$ foi assumido, porque são menos significativos e podem entrar no ajustamento como incógnitas.

A avaliação experimental baseou-se em discrepâncias obtidas em pontos de verificação independentes, os quais foram topograficamente medidos no campo e não inseridos no ajustamento por feixe de raios. A Figura 38(b) anterior mostra uma das três imagens usadas nessa avaliação. Os cantos dos alvos Aruco (um canto de cada alvo visível) foram inseridos no ajustamento como pontos de enlace para estimar suas coordenadas 3D. Assim, pode-se fazer a comparação entre essas coordenadas estimadas dos pontos de enlace com aquelas terrestres verdadeiras (dos pontos de verificação). A diferença entre as coordenadas determinou a acurácia dos pontos reconstruídos no espaço objeto.

O número e a distribuição dos pontos de enlace também tiveram o efeito resultante verificado. Três grupos de pontos, como mostrado na Figura 39, foram organizados sob a regra de cobrir toda a área de interesse e ter pontos nas posições mais críticas (nos limites da área):

- Grupo I: dezessete pontos de enlace cobrindo toda a área de interesse (Figura 39(a));
- Grupo II: nove pontos de enlace, o que representa metade do total (Figura 39(b));
- Grupo III: quatro pontos de enlace nos cantos do modelo (Figura 39(c)).

Figura 39 – Área de avaliação com oito pontos de controle sobre a placa e variando-se o número de pontos de enlace: (a) 17, (b) 9 e (c) 4.



Fonte: Tommaselli e Berveglieri (2014).

A partir disso, o modelo multiescala de imagens originais *fisheye* foi ajustado por feixe de raios em um sistema local usando o software CMC com o modelo equidistante (TOMMASELLI et al., 2014; MARCATO JUNIOR et al., 2014).

A Tabela 8 apresenta os REQMs resultantes do ajustamento por feixe de raios realizado com as observações com os três grupos de pontos de enlace. Os valores foram

obtidos a partir das diferenças entre as coordenadas estimadas dos pontos de enlace e as respectivas coordenadas verdadeiras dos pontos de verificação no espaço objeto, nas mesmas distribuições e quantidades dos pontos de enlace mostrados na Figura 39. Isto foi possível porque os pontos de enlace tinham suas coordenadas de terreno conhecidas e, portanto, foram consideradas como pontos de verificação na avaliação das discrepâncias.

Tabela 8 – REQM nos pontos de verificação resultante do ajustamento do modelo multiescala para os três grupos de pontos de enlace.

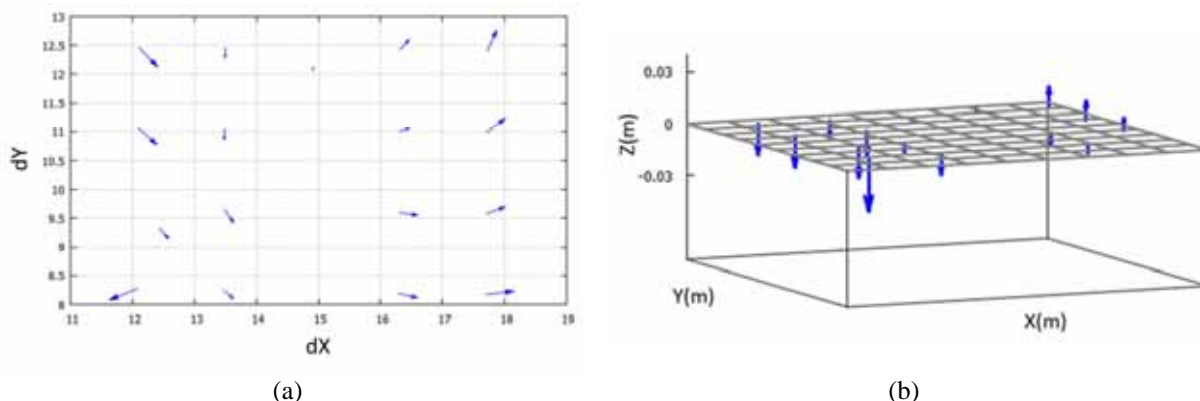
Grupo I (17 pontos)			Grupo II (9 pontos)			Grupo III (4 pontos)		
REQM (cm)			REQM (cm)			REQM (cm)		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1,3	1,7	1,3	1,3	1,9	1,0	2,6	3,2	1,1

Os resultados alcançados com os Grupos I e II foram similares, indicando que nove pontos são suficientes para atingir uma acurácia em torno de 1,5 cm para os pontos reconstruídos. Entretanto, quando somente quatro pontos de enlace foram usados, a acurácia alcançada foi aproximadamente 3 cm para as três coordenadas nos limites do modelo. A distribuição do Grupo III é importante para demonstrar a magnitude dos erros no pior caso, ou seja, quando um mínimo de pontos é usado nos limites da área. Neste caso, o valor REQM foi menor que 3,5 cm, o que já é suficiente para os propósitos deste estudo.

A Figura 40(a) ilustra um mapa de agulhas para as discrepâncias nas coordenadas XY no espaço objeto com os 17 pontos de enlace na área. É possível observar um efeito sistemático, o qual era previsto devido à fraca geometria proporcionada pela placa de controle. Como esperado, o estreito feixe de raios foi capaz de orientar o modelo na região central das imagens, produzindo coordenadas terrestres mais acuradas na área central. No entanto, esta acurácia diminui à medida que os pontos gerados estão mais afastados do alvo de controle.

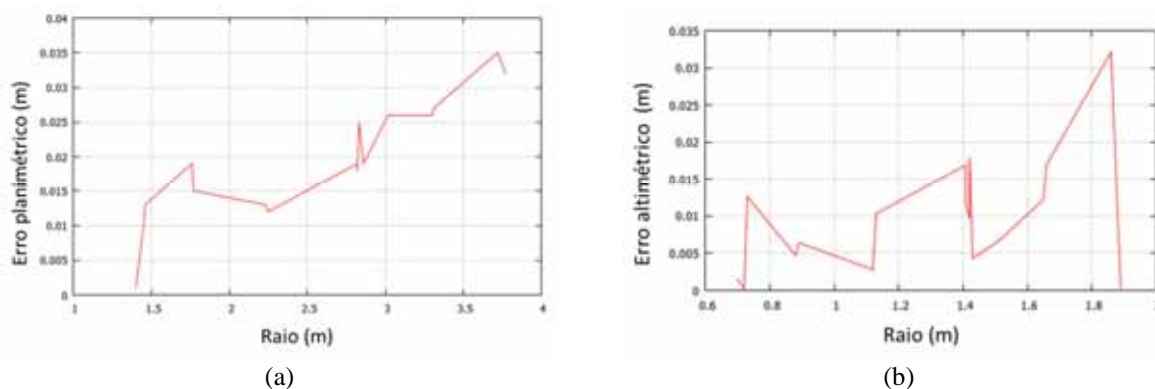
A Figura 40(b) exhibe um gráfico das discrepâncias obtidas na coordenada Z. Um efeito de inclinação a partir das coordenadas ajustadas é observado, o que indica valores mais acurados no centro e discrepâncias maiores para os pontos mais distantes. As diferenças variaram de -3,2 a 1,2 cm com um desvio-padrão $\sigma = 0,8$ cm, e os sigmas *a posteriori* para os experimentos resultaram em aproximadamente $\sigma = 0,01$. Ainda assim, estes valores de acurácia são suficientes para o uso de cenas de controle.

Figura 40 – Mapa de agulhas no campo de calibração: (a) Coordenadas XY; (b) Coordenada Z geradas a partir das discrepâncias entre as coordenadas 3D estimadas e seus 17 pontos de verificação.



Outra análise gráfica pode ser feita sobre as coordenadas XY e Z geradas. A Figura 41(a) apresenta um gráfico gerado pelos erros planimétricos em função da distância radial a partir do centro da placa. Os erros planimétricos foram menores que 2 cm em um raio de 1,4 m e aumentaram para 3,5 cm em um raio de 2 m. Já a Figura 41(b) mostra os erros altimétricos calculados na coordenada Z. Os erros altimétricos foram menores que 2 cm em um raio de 1,7 m. Porém, somente um ponto produziu o pico no gráfico. Os demais pontos resultaram em erros variando de 0,2 a 1,8 mm.

Figura 41 – Gráfico produzido pela comparação dos REQMs em relação a distância radial a partir do centro da placa de controle: (a) Erro planimétrico em XY; (b) Erro altimétrico em Z.



Em resumo, a área experimental foi avaliada considerando posições críticas com diferentes arranjos de pontos. Com base nos experimentos, os resultados demonstraram que coordenadas 3D podem ser reconstruídas com REQMs menores que 2 cm, e assegura-se que áreas com cerca de 16 m² podem ser usadas para gerar produtos como pequenos MDTs,

MDEs, ortoimagens ou recortes de imagens para cenas de controle, com a técnica apresentada.

5.3.3 Orientação e ortorretificação automatizadas de áreas de controle

A técnica automática de orientação e ortorretificação foi testada em situações reais. Duas áreas com relevo inclinado e algumas variações de altitude na superfície foram selecionadas para serem reconstruídas e avaliadas no espaço objeto.

Na aquisição de imagens das duas áreas de estudo, as alturas da câmara medidas com um distanciômetro eletrônico manual foram em torno de: 3,1 m; 3,7 m e 4,4 m (essa mesma medição também poderia ser realizada com precisão igual ou superior usando a escala do bastão graduado). A especificação técnica do sistema de aquisição de imagens e os POIs estão descritos na Seção 5.3.1. Para o levantamento das coordenadas dos pontos de controle, um receptor GNSS (Hiper SR – Topcon) de dupla frequência foi usado.

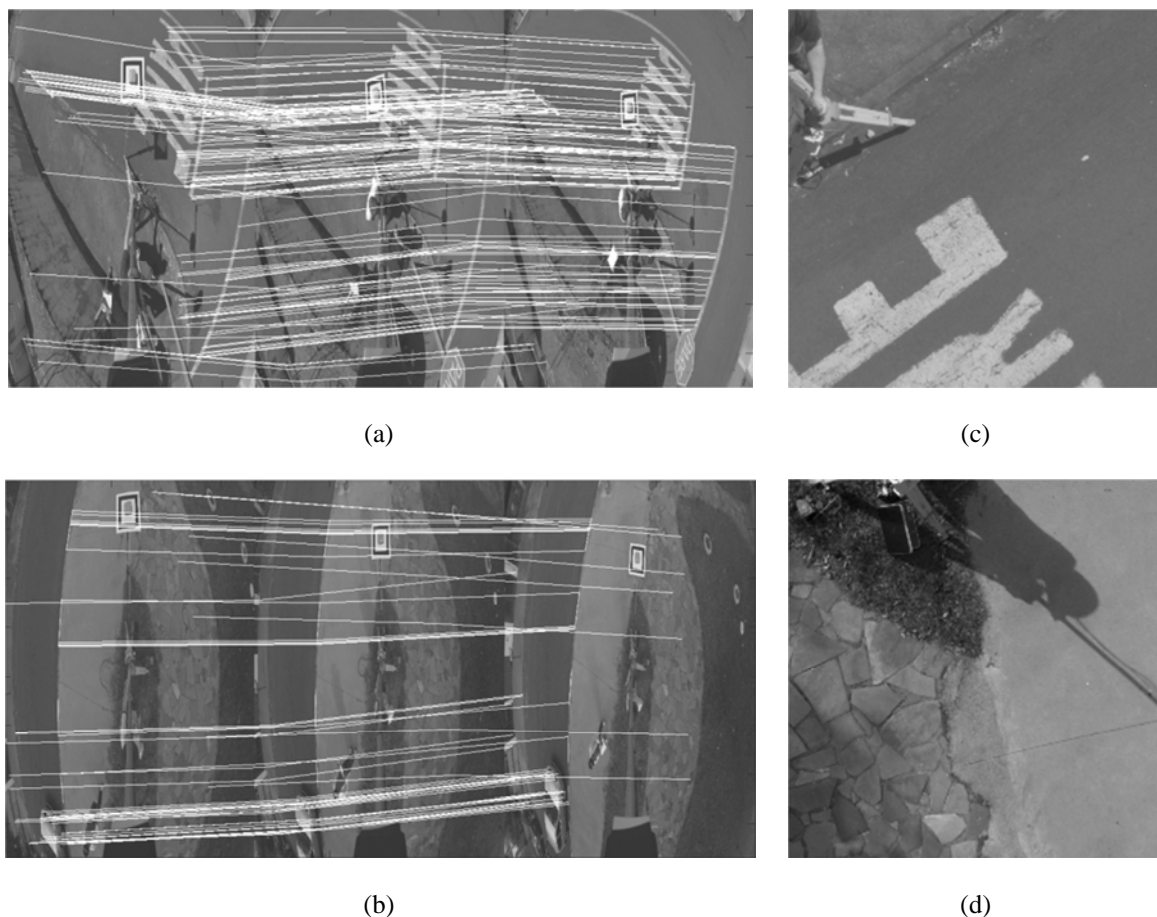
5.3.3.1 Orientação dos modelos das áreas de controle

O conjunto de imagens de cada ponto de controle forma um modelo multiescala. Assim, a técnica SIFT foi aplicada sobre cada modelo para gerar pontos de enlace automaticamente, e os resultados da correspondência aparecem nas Figuras 42(a) e (b), considerando as imagens de controle das duas áreas, as quais também tiveram os cantos da placa de controle localizados por processamento de imagens.

As coordenadas imagem de cada imagem foram inseridas no projeto fotogramétrico como observações para processar a triangulação pelo software CMC com modelo equidistante para lente *fisheye*. Nesse procedimento de triangulação, definiu-se, no espaço imagem, o desvio-padrão de $\sigma = 0,5$ pixel para as coordenadas. Em relação ao espaço objeto, as coordenadas de controle sobre a placa de controle (oito cantos), por serem conhecidas com precisão, foram fixadas como injunções com desvio-padrão de $\sigma = 0,5$ mm. Os valores iniciais dos POEs foram definidos com base na determinação direta das medidas obtidas em campo, sendo fixados por injunções relativas com desvios-padrão de:

- $\sigma = 30^\circ$ para os ângulos de atitude, que não afeta significativamente os resultados;
- $\sigma = 10$ cm para a posição XY, devido aos movimentos e deslocamentos para levantar a câmara, e $\sigma = 5$ mm para Z.

Figura 42 – Pontos de enlace, determinados pela técnica SIFT, entre as três imagens do modelo com a placa de controle. São mostradas as regiões: (a) Área I; (b) Área II; (c) e (d) respectivas áreas ortorretificadas com GSD de 1 cm e centro no ponto de controle.



Usando ajustamento por feixes de raios, cada modelo multiescala foi ajustado, resultando nos sigmas *a posteriori* de 0,0096 (< 2 pixels) e 0,0137 (< 3 pixels) para as Áreas I e II, respectivamente, sendo que o sigma *a priori* atribuído foi de 0,0142 (~ 3 pixels), por causa dos efeitos de borrramento da lente *fisheye*.

As coordenadas terrestres dos pontos de enlace da região do ponto de controle foram determinadas por intersecção fotogramétrica no espaço objeto, gerando um conjunto de pontos 3D. Para cada área, produziu-se um MDT local com grade regular e elemento de resolução de 1 cm, usando o software Surfer[®]. A técnica de interpolação usou a ponderação pelo inverso do quadrado da distância. Outro espaçamento também poderia ser utilizado, uma vez que as imagens originais possuem GSD entre 2 e 3 mm.

Desse modo, utilizando-se o procedimento descrito na Seção 4.4.2.1, o MDT e a respectiva ortoimagem foram produzidos com GSD de 1 cm, conforme as dimensões da área de interesse. Um software desenvolvido por Tommaselli e Ruy (2004) e

Tommaselli et al. (2013) para retificação de imagem foi modificado para gerar a ortoimagem das cenas de controle, bem como a retificação com o ponto de controle no centro da imagem. As Figuras 42(c) e (d) apresentam as ortomagens geradas com interpolação bilinear e ponto de controle no centro.

5.3.3.2 Validação das ortomagens locais

Para validar a qualidade das ortomagens locais, conduziu-se um levantamento topográfico por nivelamento trigonométrico para se obter amostras discretas das altitudes das áreas experimentais. A escolha do método deve-se às pequenas dimensões das áreas.

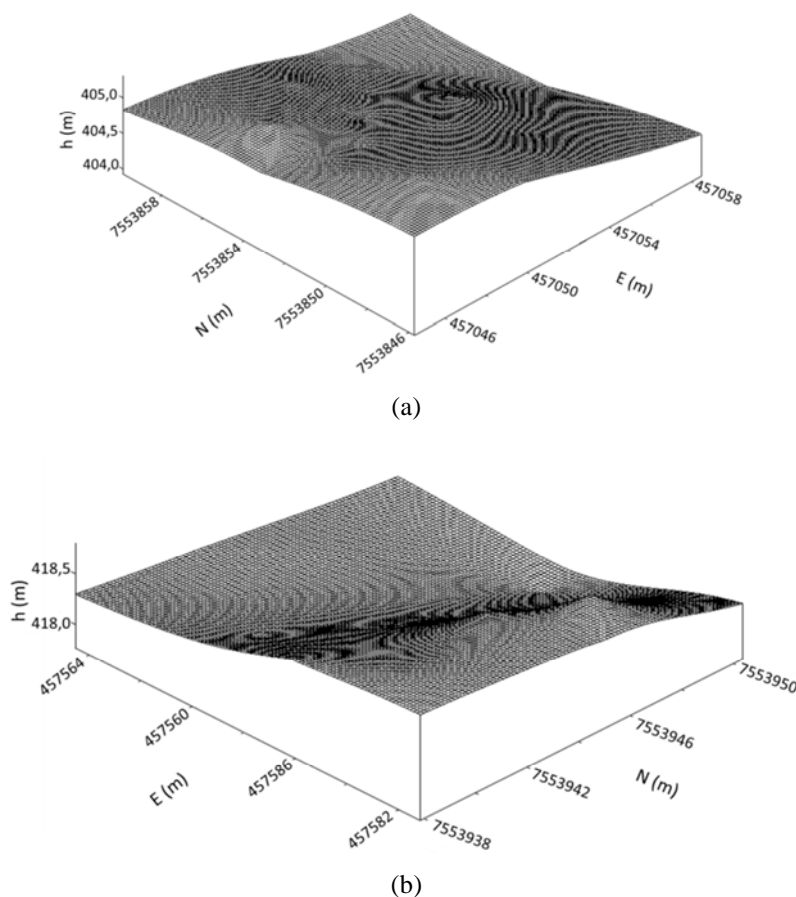
Em campo, posicionou-se no mesmo ponto de levantamento GNSS uma estação total (Topcon GPT-7005) para fazer o levantamento por irradiação de pontos no entorno, os quais foram ocupados por um bastão com prisma refletor. A região do ponto de controle (área com cerca de 5×5 m) foi levantada, coletando-se coordenadas de pontos com espaçamento de 0,5 m ou 1 m, no máximo, com erro estimado de 5 mm. A Figura 43 exibe a variação da superfície das duas áreas testes da Figura 42, a partir do levantamento de campo.

Como já mencionado, devido ao tipo de geometria da placa de controle, que é posicionada para a parte central das imagens, apenas o entorno dos pontos de controle é reconstruído. Não é finalidade reconstruir todo o espaço coberto pelo modelo multiescala, pois as áreas de interesse apresentam dimensões de 2×2 ou 3×3 m e são recortadas e usadas como cenas de controle (ou *templates* ou *chips* de imagens).

Pelo fato dos pontos de enlace serem determinados automaticamente e não serem necessariamente cantos, não é possível sua localização exata em campo. Desse modo, as coordenadas topograficamente medidas foram interpoladas para as mesmas posições das coordenadas 3D geradas pela triangulação do modelo. As diferenças entre as coordenadas trianguladas e as interpoladas possibilitaram uma avaliação sobre a qualidade do MDT local e, conseqüentemente, da ortoimagem.

As amostras de campo foram interpoladas espacialmente usando a média ponderada das quatro amostras mais próximas ao ponto em análise. Os pesos foram definidos baseados no inverso do quadrado da distância, e um cálculo de discrepâncias foi realizado considerando as coordenadas topográficas interpoladas como referência. A partir disso, calculou-se o valor do REQM das altitudes dos pontos.

Figura 43 – MDTs das áreas teste: (a) Área I e (b) Área II.



Os resultados estatísticos da avaliação estão apresentados na Tabela 9. O número de pontos de enlace foi definido pelo processo de geração automática com SIFT, que depende das feições distinguíveis de cada área. As discrepâncias das estimativas altimétricas na região ortorretificada indicaram REQMs inferiores a 2 cm para as Áreas I e II. A maior média nas discrepâncias foi obtida na Área I, sendo igual a 6 mm, e os desvios-padrão de ambas as áreas resultaram em valores também abaixo de 2 cm.

Tabela 9 – Resultado das discrepâncias altimétricas calculadas pela diferença entre as coordenadas trianguladas e as interpoladas topograficamente.

Ortoimagem	Nº de pontos	REQM (cm)	Média (cm)	Desvio-padrão (cm)
Área I	14	1,5	0,6	1,4
Área II	8	1,9	0,2	1,9

No estudo realizado por Tommaselli e Berveglieri (2014), foi demonstrado em campo de calibração que áreas de até 20 m² podem ser reconstruídas pela técnica proposta com

discrepâncias menores que 2 cm. Isto é suficiente para o propósito de gerar cenas de controle, já que os levantamentos tradicionais de pontos de apoio têm acurácia inferior a esse valor.

Usando os MDTs gerados, as imagens originais e respectivos parâmetros (POE e POI), as ortoimagens foram produzidas com as orientações próximas ao norte geográfico. É importante ressaltar que o pixel central da ortoimagem tem coordenada precisa, pois corresponde ao ponto levantado com GNSS, mas os demais pixels podem apresentar uma pequena rotação, devido às incertezas nas medições do azimute aproximado no levantamento de campo. Esta rotação não afetará o processo posterior de correspondência com imagens aéreas ou orbitais, porque os algoritmos de LSM absorverão esta pequena rotação. Entretanto, esse problema pode ser resolvido simplesmente pela introdução de um segundo receptor GNSS junto à câmara. O posicionamento relativo entre o receptor GNSS da câmara e o receptor GNSS sobre a placa de controle possibilita obter um azimute acurado da imagem. Em seguida, o recorte ao redor do ponto de controle pode ser feito para gerar a cena de controle.

5.4 Teste com a geração de cena de controle e localização subpixel de ponto de controle

Esta seção apresenta a prova dos conceitos da abordagem automática. São mostrados os experimentos e os resultados alcançados com o fluxo automático para localizar o ponto de controle na imagem aérea. Um modelo com GSD de 15 cm e um pequeno bloco com GSD de 10 cm foram usados para os testes. Ambos foram testados com a geração da cena de controle pelas técnicas de retificação e ortorretificação de imagens e, ainda, variando-se algumas configurações do projeto fotogramétrico.

5.4.1 Especificação dos dados imagem

As imagens aéreas foram adquiridas com a câmara digital especificada no Quadro 4.

Quadro 4 – Características técnicas da câmara digital usada para adquirir as imagens aéreas.

Elementos	Imagem aérea
Modelo de câmara	Hasselblad H3DII-50
Distância focal nominal	50 mm
Tamanho do pixel	6,0 μ m
Dimensões do sensor	53,7 \times 40,2 mm
Dimensões da imagem	8176 \times 6132 (50 megapixel)

Previamente, essa câmara foi calibrada com procedimentos em serviço e os POIs foram determinados com o software INBblock –INPHO (Trimble) pela empresa Sensorap, a qual também realizou o levantamento aéreo em duas altitudes de voo (1300 e 1700 m) em abril de 2013, coletando dados de orientação direta com sistemas integrados GNSS/inercial (Applanix POS/AV 510).

Quanto às imagens terrestres, estas foram adquiridas seguindo os procedimentos descritos na Seção 4.3.2 com a placa de controle, em setembro de 2013. O sistema de aquisição de imagens e a calibração da câmara foram os mesmos especificados na Seção 5.3.1.

O levantamento de campo foi planejado para usar os mesmos pontos de controle nas imagens aéreas das duas alturas. Essa área comum de controle é referente ao campus da FCT/UNESP e seu entorno. A seleção dos pontos de controle considerou, além das condições básicas de visibilidade dos pontos, áreas com variações na superfície, conforme a disponibilidade no local planejado geometricamente para apoio.

5.4.2 Testes em modelos de imagens

O objetivo deste experimento foi comparar os resultados da medição subpixel dos pontos de controle em dois tamanhos de GSD da imagem aérea (GSD original e superamostragem para 1/3 do GSD), usando os dados de orientação direta como aproximações iniciais para os POEs na aerotriangulação. A Figura 44 mostra a geometria dos modelos com a distribuição de 5 pontos de controle e 4 pontos de verificação.

Para localizar todos esses pontos de controle e verificação nas imagens aéreas, as técnicas desenvolvidas foram aplicadas para gerar as cenas de controle por retificação e ortorretificação, nas formas adaptadas.

As cenas de controle geradas por retificação (Seção 4.4.2.2) foram produzidas usando:

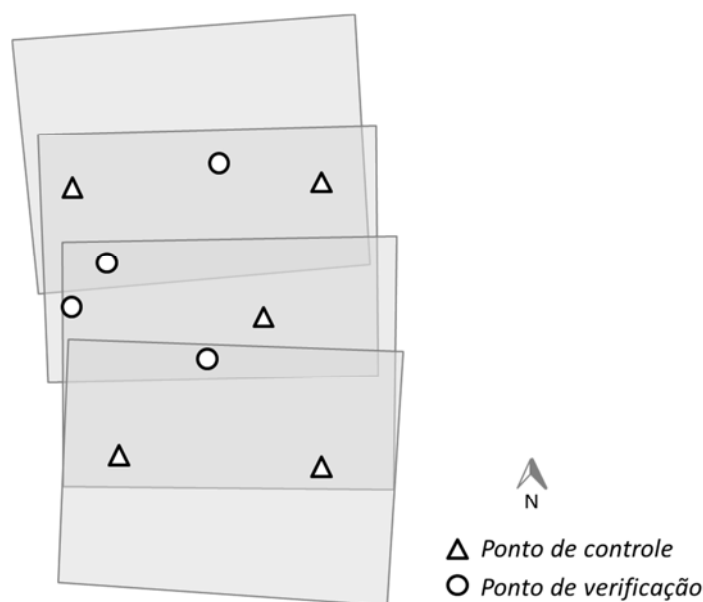
- Reconhecimento automático do alvo na placa de controle por um código adaptado por Silva et al. (2014);
- Ressecção espacial pelo software CMC desenvolvido por Ruy et al. (2009);
- Extração e correspondência de pontos-chave SIFT, implementado por Lowe (2005);
- Registro de imagens pelo software desenvolvido por Tommaselli e Lopes (2011);

- Retificação das cenas de controle por uma modificação implementada, nesta tese, no software originalmente desenvolvido por Tommaselli e Ruy (2004).

Para a ortorretificação das cenas de controle (Seção 4.4.2.1), os seguintes recursos de software foram necessários:

- Reconhecimento automático do alvo na placa de controle – Silva et al. (2014);
- Extração e correspondência de pontos-chave SIFT – Lowe (2005);
- Ajustamento por feixe de raios pelo software CMC – Ruy et al. (2009);
- Geração do MDT pelo software Surfer[®];
- Ortorretificação das cenas de controle por uma adaptação realizada no software desenvolvido por Tommaselli e Ruy (2004).

Figura 44 – Geometria da faixa (3 modelos) com cinco pontos de controle e quatro de verificação.



Os passos seguintes referem-se à localização dos pontos nas imagens aéreas e foram desenvolvidos em linguagem C/C++ para realizar a extração do recorte terrestre, a correspondência de imagens e o refinamento subpixel por LSM combinado com eliminação de diferenças.

Para os testes, assim como já utilizado nos experimentos das Seções 5.1 e 5.2, um único projeto foi configurado no ERDAS-LPS[®] para realizar:

- Medição manual monoscópica por um operador experiente;

- Geração automática de pontos de enlace por LSM;
- Transferência automática de coordenadas de controle para imagens adjacentes;
- Ajustamento por feixe de raios das imagens.

No projeto, cada coordenada foi medida somente em uma imagem e, depois, transferida por correspondência automática e mínimos quadrados pelo próprio LPS para outras posições homólogas nas demais imagens. Os experimentos da Seção 5.1 demonstraram que essa técnica híbrida proporcionou melhores resultados na localização do ponto. Então, apenas as coordenadas imagem dos pontos de controle foram substituídas por aquelas medidas automaticamente realizando-se uma transferência por LSM no LPS. Desse modo, assegura-se que os parâmetros do projeto sejam iguais, e a comparação pode ser realizada entre as técnicas de medição com as mesmas condições.

A partir da definição do projeto base, três experimentos foram conduzidos para avaliar o potencial da medição subpixel em dois níveis de GSD e também a precisão e a acurácia alcançadas quando os dados de orientação direta são usados como injunções nos POEs. Para isso, os seguintes experimentos foram organizados:

- **Experimento I:** aerotriangulação com a medição subpixel automática dos pontos de controle na resolução original da imagem aérea (GSD de 15 cm), usando os dados de orientação direta dos POEs como aproximações iniciais e com injunção;
- **Experimento II:** aerotriangulação com a medição subpixel automática do ponto de controle na imagem aérea superamostrada para 1/3 de seu GSD, usando-se os dados de orientação direta dos POEs como aproximações iniciais e com injunção;
- **Experimento III:** Idem ao anterior, porém alterando a injunção da posição do CP, mas com os mesmos ângulos de atitude.

Com a definição desses três grupos de experimentos, o ajustamento do modelo foi realizado para cada um deles com três técnicas de medição de coordenadas imagem: (1) manual; (2) localização automática com cena de controle retificada e (3) localização automática com cena de controle ortorretificada. A seguir, os resultados serão apresentados com base na análise sobre os pontos de controle e de verificação em ambos os espaços imagem e objeto.

5.4.2.1 Experimento I

Para este experimento, os parâmetros do projeto fotogramétrico foram definidos com: POIs fixados; desvio-padrão no espaço imagem de $\sigma = 0,5$ pixel e desvio-padrão de $\sigma = 5$ cm no espaço objeto para os pontos de controle. Os dados da orientação direta foram usados como injunções aos POEs, adotando pesos correspondentes aos desvios-padrão de $\sigma_{XYZ} = 10$ cm em posição e $\sigma = 2^\circ$ em atitude.

A Tabela 10 mostra os valores dos REQMs resultantes do ajustamento por feixe de raios nas coordenadas imagem dos pontos de controle e verificação.

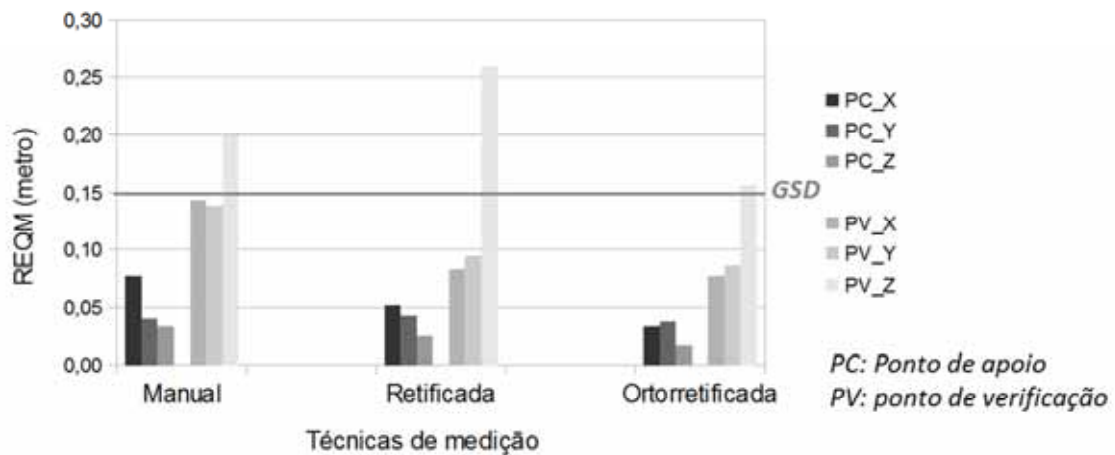
Tabela 10 – REQMs nos pontos após o ajustamento por feixe de raios no espaço imagem.

Técnica	Pontos de controle		Pontos de verificação		Sigma <i>a posteriori</i>
	x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)	
Manual	0,63	0,40	0,34	0,10	0,38
Cena retificada	0,46	0,46	0,34	0,10	0,37
Cena ortorretificada	0,34	0,40	0,33	0,09	0,36

As três técnicas de medição foram usadas e, como se vê na comparação com a técnica manual, as técnicas automáticas de retificação e ortorretificação de cenas de controle atingiram valores mais precisos nas coordenadas imagem dos pontos de controle, exceto na coordenada y da cena retificada. Já para as coordenadas imagem dos pontos de verificação, os resultados foram muito similares. Os resultados do sigma *a posteriori* (com sigma *a priori* = 1) não apresentaram diferenças significativas entre as técnicas de medição.

O gráfico da Figura 45 representa os REQMs obtidos com o ajustamento em 5 pontos de controle e 4 pontos de verificação no espaço objeto. Ambas as técnicas automáticas resultaram em REQMs de, no máximo, 5 cm em XYZ para os pontos de controle, ao passo que a técnica manual obteve um valor REQM de 8 cm em X. Nos pontos de verificação, as técnicas automáticas também indicaram maior acurácia, principalmente quando usados os recortes ortorretificados, em que os REQMs resultaram abaixo de 9 cm em planimetria e 15,6 cm em elevação, portanto próximo a 1 GSD.

Figura 45 – Experimento I: REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto.



Embora o uso de recortes retificados tenha permitido atingir acurácia com valores abaixo de 10 cm em XY, o resultado em Z foi maior do que nas outras técnicas, o que indica a introdução de erro por desconsiderar a variação do relevo. Por isso, pode ser necessária a ortorretificação para alguns locais. A técnica manual, por sua vez, resultou em discrepâncias maiores do que aquelas das técnicas automáticas, sendo os valores REQMs um pouco abaixo de 15 cm (1 GSD) em planimetria e 20 cm em na coordenada Z, como era esperado.

5.4.2.2 Experimento II

Neste experimento, os parâmetros do projeto fotogramétrico foram definidos com: POIs fixados; desvio-padrão nas coordenadas do espaço imagem de $\sigma = 0,5$ pixel e desvio-padrão de $\sigma = 5$ cm no espaço objeto para os pontos de controle. As coordenadas imagem dos pontos de controle foram obtidas com a medição subpixel automática nas imagens aéreas superamostradas para 1/3 de seu GSD e com dados de orientação direta para os POEs, adotando-se a injunção de posição em $\sigma_{XYZ} = 10$ cm e em atitude, $\sigma = 2^\circ$.

Os REQMs no espaço imagem resultantes do ajustamento estão mostrados na Tabela 11. Assim como no Experimento I, as técnicas automáticas foram mais precisas na localização das coordenadas dos pontos de controle nas imagens em comparação à técnica manual. Já no caso da localização das coordenadas dos pontos de verificação, os REQMs foram equivalentes. Neste Experimento II, os sigmas *a posteriori* (com sigma *a priori* = 1)

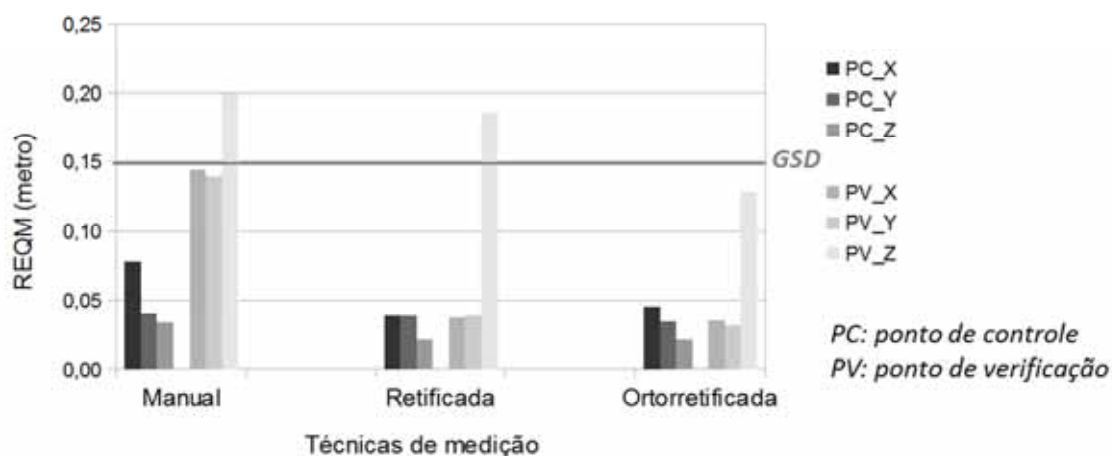
das três técnicas também apresentaram pouca diferença (igual a 0,02) entre a medição manual e as técnicas automáticas.

Tabela 11 – REQMs do ajustamento no espaço imagem.

Técnica	Pontos de controle		Pontos de verificação		Sigma <i>a posteriori</i>
	x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)	
Manual	0,63	0,40	0,34	0,10	0,38
Cena retificada	0,37	0,40	0,34	0,10	0,36
Cena ortorretificada	0,41	0,37	0,34	0,09	0,36

Outra comparação pode ser feita com base no gráfico da Figura 46, o qual apresenta os REQMs para os pontos de controle e verificação, tendo em vista as características dos experimentos.

Figura 46 – Experimento II: REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto.



A medição das coordenadas nesse nível de $1/3$ GSD da imagem aérea proporcionou um ajuste subpixel melhor do que aquele feito direto no nível original da imagem. Conseqüentemente, as técnicas automáticas no Experimento II alcançaram resultados mais acurados e precisos na comparação com o Experimento I. O uso de recortes tanto retificados quanto ortorretificados proporcionaram REQMs nos pontos de controle abaixo de 5 cm em XYZ. Nos pontos de verificação, os REQMs para a planimetria foram menores 4 cm e os REQMs para a coordenada Z foram em torno de 18,6 cm, ao usar recortes retificados e

12,9 cm ao usar recortes ortorretificados. Todos estes valores são menores do que aqueles resultantes da medição manual, a qual obteve nos pontos de controle REQMs abaixo de 8 cm em XYZ e nos pontos de verificação, REQMs um pouco abaixo de 15 cm em XY e 20 cm em Z.

5.4.2.3 Experimento III

O Experimento III considerou também a medição subpixel automática dos pontos de controle nas imagens aéreas superamostradas para 1/3 GSD e dados de orientação direta como injeção para os POEs. Os mesmos parâmetros do projeto fotogramétrico configurado para o Experimento II foram utilizados neste, exceto pela injeção da posição do CP alterada para $\sigma_{XYZ} = 20$ cm, mas mantendo os mesmos ângulos de atitude com desvio-padrão de $\sigma = 2^\circ$.

A Tabela 12 fornece os REQMs deste experimento no espaço imagem. Assim como nos dois experimentos anteriores, o mesmo efeito resultante foi constatado, as técnicas automáticas, em geral, alcançaram um pouco mais de precisão no ajuste dos pontos de controle, em comparação com a técnica manual. No ajuste dos pontos de verificação, os resultados obtiveram aproximadamente os mesmos valores residuais.

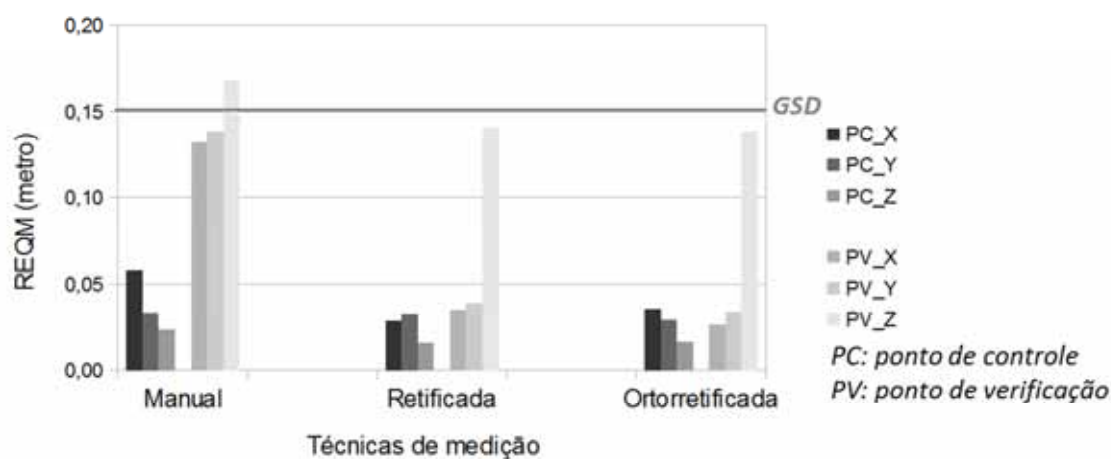
Tabela 12 – REQMs do ajustamento no espaço imagem.

Técnica	Pontos de controle		Pontos de verificação		Sigma <i>a posteriori</i>
	x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)	
Manual	0,48	0,31	0,28	0,08	0,36
Cena retificada	0,31	0,34	0,28	0,08	0,35
Cena ortorretificada	0,35	0,31	0,28	0,08	0,35

Na comparação gráfica entre os resultados das técnicas, como mostrado na Figura 47, verifica-se que os REQMs são menores para ambas as técnicas automáticas, sendo que os REQMs dos pontos de controle são menores que 5 cm em XYZ e nos pontos de verificação, os REQMs são menores que 5 cm em planimetria e em torno de 15 cm em elevação. Com a medição manual, os pontos de controle apresentaram REQMs abaixo de 6 cm, e os pontos de verificação, REQMs abaixo de 14 cm para XY e REQM um pouco acima de 16 cm em Z. Estes valores são maiores quando comparados com as duas técnicas automáticas. Neste

Experimento III, os sigmas *a posteriori* (com sigma *a priori* = 1) das três técnicas também apresentaram pouca diferença (igual a 0,01) entre a medição manual e as técnicas automáticas.

Figura 47 – Experimento III: REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto.



Em geral, as técnicas automáticas proporcionaram erros menores em comparação com a medição manual. No espaço imagem, houve pouca diferença nos resíduos das coordenadas, não sendo significativas. Entretanto, no espaço objeto, a melhoria com a localização automática atingiu resultados expressivos, principalmente com a técnica de ortoretificação, a qual atingiu na planimetria aproximadamente 1/5 GSD e na altimetria, menos de 1 GSD.

Quanto ao ajuste subpixel, embora tenha ocorrido melhoria com a localização automática no nível original da imagem aérea, os resultados do ajuste foram melhores quando as imagens aéreas foram superamostradas para 1/3 GSD e usadas para estabelecer correspondência nesta resolução de GSD. Em testes preliminares, verificou-se que a correspondência entre imagens terrestres e aéreas apresentou maior correlação quando realizada em níveis intermediários.

Na comparação entre as duas técnicas automáticas de medição nos Experimentos I, II e III, os REQMs obtidos com a configuração dos Experimentos II e III foram melhores em relação ao Experimento I, indicando maior precisão no ajustamento por feixe de raios nos pontos de controle e maior acurácia na avaliação dos pontos de verificação. Entre os Experimentos II e III, os REQMs nos pontos de controle e verificação foram similares, com exceção dos REQMs em elevação nos pontos de verificação do Experimento II, o qual obteve

um melhor resultado usando a ortorretificação das cenas de controle, que atingiu um $REQM_Z < 1$ GSD da imagem aérea. No Experimento III, os resultados em $REQM_Z$ das duas técnicas automáticas foram similares.

Os resultados obtidos nos experimentos usando as três técnicas de medição foram realizados em modelos de imagem. Na próxima seção, as mesmas três técnicas serão mostradas no ajustamento de bloco de imagens.

5.4.3 Teste em um bloco de imagens

Nesta seção, os experimentos foram conduzidos para avaliar as técnicas automáticas em um bloco de imagens. Na seção anterior, verificou-se que a localização subpixel atinge melhores resultados quando feita em um nível intermediário de resolução entre as imagens terrestre e aérea. Logo, as medições automáticas foram realizadas sobre as imagens aéreas superamostradas para $1/3$ GSD e, a partir delas, o ajustamento do bloco foi verificado em três configurações: a primeira, usando os dados da orientação direta com injunções aos POEs; para a segunda configuração, repetiu-se a primeira configuração, porém com uma injunção com menos peso e, na terceira configuração, realizou-se um ajustamento considerando os POEs apenas como valores iniciais para caracterizar uma orientação indireta.

Preliminarmente, apresenta-se a geometria do bloco e o cálculo da precisão esperada para fins de avaliação.

5.4.3.1 Geometria do bloco e cálculo da precisão esperada

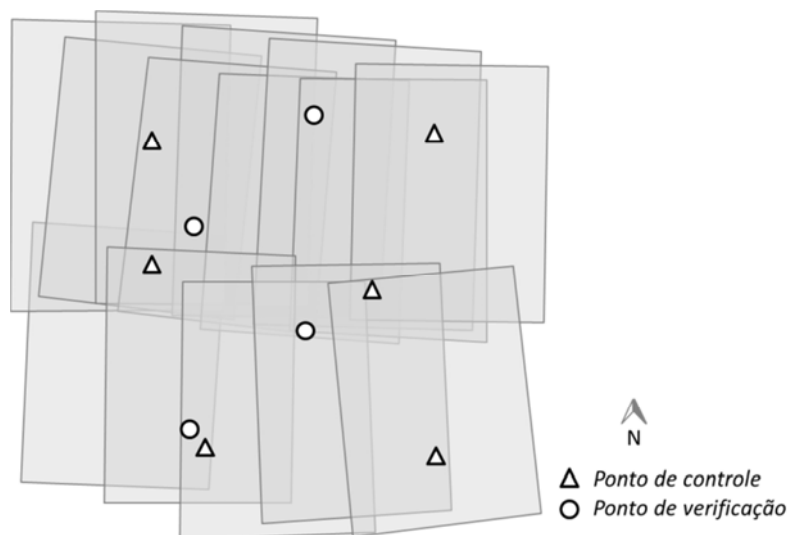
O bloco usado para os experimentos é mostrado na Figura 48, sendo composto por seis pontos de controle em torno do bloco e quatro pontos de verificação em duas faixas de voo com imagens de 10 cm de GSD.

Baseado na teoria dos erros para o caso normal, como apresentado por Kraus (1993, p. 88), a precisão esperada das coordenadas terrestres pode ser calculada, considerando principalmente a razão base-altura ($B/H = 0,34$) e o erro de medição esperado nas coordenadas imagem e nas paralaxes (σ_{pa}).

O erro σ_{pa} pode ser calculado propagando-se os erros das medições de coordenadas imagem, resultando aproximadamente em $\sigma_{pa} = \sigma_x \times 1,4$. Adotando-se um erro de medição na imagem de $1/2$ pixel (0,003 mm em x , y e 0,004 mm em paralaxe), os desvios-padrão

esperados nas coordenadas terrestres serão: $\sigma_x = 0,074$ m, $\sigma_y = 0,088$ m e $\sigma_z = 0,149$ m. Posteriormente, estes valores podem ser comparados com os REQMs resultantes de um ajustamento de bloco.

Figura 48 – Geometria do bloco de imagens com seis pontos de controle e quatro de verificação.



As coordenadas imagem foram localizadas automaticamente nas imagens aéreas com as técnicas de retificação e ortorretificação das cenas de controle, usando os mesmos softwares descritos na Seção 5.4.2. Para o ajustamento do bloco, as coordenadas imagem foram consideradas com desvio-padrão de $\sigma = 0,5$ pixel e, no espaço objeto, com $\sigma = 5$ cm. Os POIs também foram fixados, e apenas os dados de orientação direta tiveram variações em sua precisão para fornecer injunções aos valores dos POEs, produzindo três configurações para a determinação dos POEs.

5.4.3.2 Medição automática com injunção nos POEs

Este experimento considerou os dados de orientação direta como injunções aos POEs usando desvios-padrão de $\sigma = 10$ cm para a posição e $\sigma = 2^\circ$ para a atitude. Então, realizou-se a aerotriangulação do bloco com os seis pontos de controle e os quatro pontos de verificação.

A Tabela 13 apresenta os dados resultantes do ajustamento no espaço imagem para os seis pontos de controle e os quatro pontos de verificação. São mostrados os valores máximos

e mínimos dos resíduos v_x e v_y e os REQMs.

Tabela 13 – Dados resultantes do ajustamento no espaço imagem.

Técnica	Valor	Pontos de controle		Pontos de verificação		Sigma <i>a posteriori</i>
		v_x (pixel)	v_y (pixel)	v_x (pixel)	v_y (pixel)	
Manual	Máximo	0,34	0,80	0,50	0,38	0,35
	Mínimo	-0,67	-0,47	-0,88	-0,65	
	REQM	0,28	0,27	0,32	0,28	
Cena retificada	Máximo	0,35	0,71	0,43	0,39	0,34
	Mínimo	-0,69	-0,44	-0,64	-0,66	
	REQM	0,26	0,25	0,28	0,28	
Cena ortorretificada	Máximo	0,34	0,73	0,45	0,37	0,34
	Mínimo	-0,66	-0,46	-0,81	-0,63	
	REQM	0,24	0,25	0,32	0,25	

Nota-se que todos os resultados são menores que 1 pixel. Em comparação com a medição manual, verifica-se que as técnicas automáticas obtiveram alguns resíduos similares e outros (a maioria), valores menores tanto para os pontos de controle quanto para os pontos de verificação. A dispersão das observações no ajustamento do bloco, dada pelo sigma *a posteriori*, foi similar nas três técnicas (em um sigma *a priori* igual a 1).

A Tabela 14 mostra os REQMs das diferenças entre os pontos de controle medidos em campo com aqueles calculados por intersecção no espaço objeto. Os resultados foram calculados a partir das diferenças entre os valores estimados pela aerotriangulação (intersecção de raios) e os valores levantados por GNSS em campo. Pode-se observar que os resultados obtidos com os POEs estimados com os pontos de controle medidos pelas técnicas automáticas são melhores tanto em planimetria quanto em altimetria.

Tabela 14 – Diferença média entre os seis pontos de controle medidos e calculados por intersecção no espaço objeto.

Técnica	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Manual	5,8	4,7	13,3
Cena retificada	3,6	4,1	12,1
Cena ortorretificada	3,5	4,1	11,3

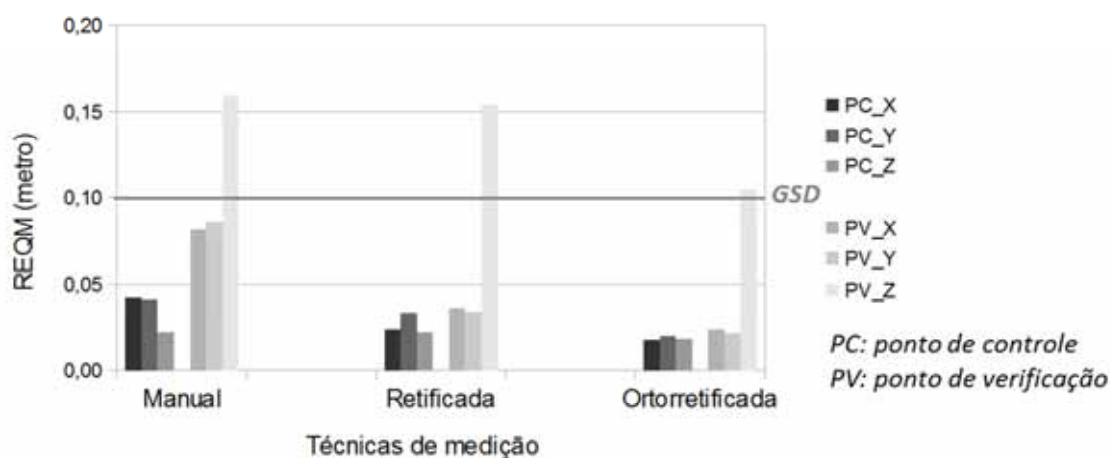
Uma predição sobre a precisão dos erros esperados nas coordenadas dos pontos de controle no espaço objeto é fornecida na Tabela 15. Os valores são estimados pela matriz de variância e covariância e do ajustamento por feixe de raios. Comparando-se a Tabela 15 com a Tabela 14, no caso das técnicas automáticas, observa-se que as diferenças entre os resultados do ajustamento e os pontos determinados em campo são menores do que erro esperado, o que demonstra precisão no ajuste dos pontos de controle.

Tabela 15 – Valor médio dos desvios-padrão estimados dos pontos de controle no espaço objeto.

Técnica de medição	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Manual	4,4	5,1	16,4
Cena retificada	4,3	5,0	16,1
Cena ortorretificada	4,3	5,0	16,0

Os resultados do ajustamento podem ser analisados pela Figura 49. Assim como na Tabela 15, os valores dos REQMs no espaço objeto indicaram melhor ajuste sobre os pontos de controle com as técnicas automáticas. Ambas apresentaram REQMs abaixo de 3,3 cm em XYZ, sendo o melhor caso com a técnica de ortorretificação, a qual demonstrou valor abaixo de 2 cm. No ajuste de pontos de controle, a técnica manual obteve REQMs acima de 4 cm em planimetria.

Figura 49 – REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto. Ajustamento de bloco de imagens usando dados de orientação direta e injunção de $\sigma = 10$ cm na posição dos POEs..

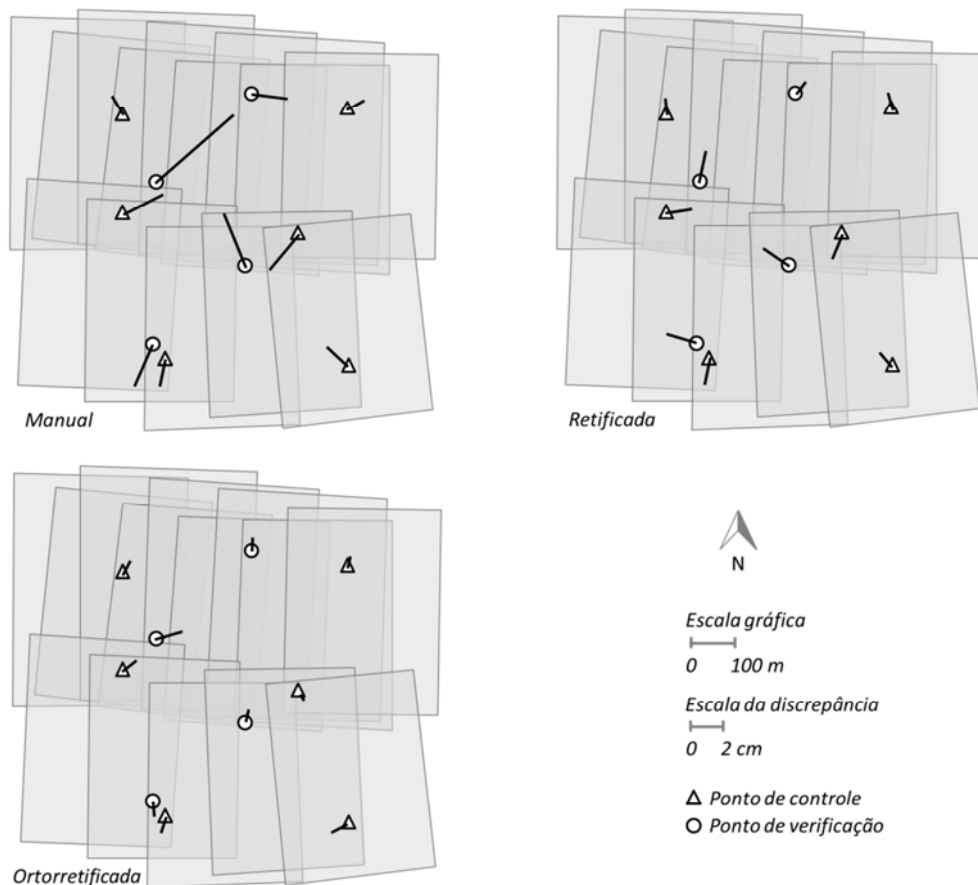


Os REQMs obtidos, principalmente com as cenas de controle ortorretificadas, estão dentro dos limiares pré-definidos pelo cálculo de propagação de erros, realizado na seção anterior, demonstrando que a precisão de medida está menor que 1/2 pixel.

No caso dos pontos de verificação, a técnica manual resultou em REQMs abaixo de 9 cm (~ 1 pixel) para XY e aproximadamente 16 cm para Z, enquanto que as técnicas automáticas produziram REQMs menores, sendo abaixo de 4 cm (1/2 pixel) para a planimetria com a técnica que usa cenas retificadas e abaixo de 2,5 cm ao usar as cenas ortorretificadas. Em Z, o uso de cenas ortorretificadas permitiu o melhor resultado entre as técnicas, alcançando 10,5 cm, ou seja, próximo a 1 GSD em elevação.

Para analisar o comportamento das discrepâncias resultantes, produziu-se o mapa de agulhas da Figura 50 ilustrando as discrepâncias nas coordenadas dos pontos de controle e verificação. Como pode ser observado nas três técnicas, o comportamento dos REQMs demonstrou aleatoriedade nas resultantes dos ajustes planimétricos, com variação apenas da escala das discrepâncias.

Figura 50 – Mapa de agulhas para as discrepâncias planimétricas no espaço objeto resultantes do ajustamento nas três técnicas de medição.



5.4.3.3 Medição automática com injeção aos POEs com menor peso

Neste experimento, utilizou-se a mesma configuração do caso anterior, porém diminuindo-se a restrição imposta sobre a posição dos POEs, ou seja, ampliando-se o desvio-padrão da posição para $\sigma = 20$ cm. Quanto aos ângulos de atitude, manteve-se o mesmo valor de $\sigma = 2^\circ$.

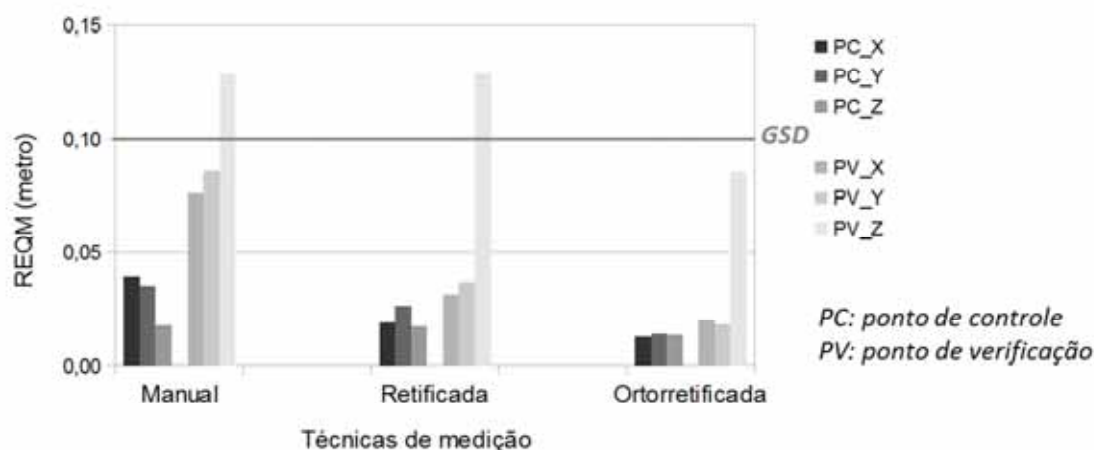
A Tabela 16 mostra os valores dos REQMs resultantes. Como se vê, também nesta configuração, as técnicas automáticas conduziram a um melhor ajuste nas coordenadas imagem, sendo todos os resíduos menores do que aqueles gerados pela técnica manual, exceto por um dos REQMs nos pontos de verificação em y, o qual indicou o mesmo valor (REQM = 0,26 pixel). O sigma *a posteriori* das três técnicas apresentaram valores similares (sendo sigma *a priori* igual a 1).

Tabela 16 – REQMs do ajustamento no espaço imagem.

Técnica	Pontos de controle		Pontos de verificação		Sigma <i>a posteriori</i>
	x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)	
Manual	0,25	0,24	0,28	0,26	0,34
Cena retificada	0,23	0,22	0,23	0,26	0,33
Cena ortorretificada	0,22	0,23	0,27	0,22	0,33

Os valores dos REQMs nos pontos de controle e de verificação no espaço objeto são apresentados no gráfico da Figura 51.

Figura 51 – Bloco de imagens usando dados de orientação direta e injeção de $\sigma = 20$ cm na posição dos POEs. REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto.



Embora a técnica manual tenha obtido valores um pouco menores que 4 cm em XYZ, a técnica usando cenas retificadas apresentou REQMs menores que 2,6 cm, os quais ainda foram melhorados com a técnica usando cenas ortorretificadas que atingiu valores abaixo de 2 cm para as mesmas coordenadas XYZ.

O mesmo efeito também foi obtido em relação aos REQMs nos pontos de verificação. As técnicas automáticas apresentaram discrepâncias menores na comparação com a técnica manual. Com a medição manual, a planimetria atingiu cerca de 4/5 GSD (em média), enquanto que as técnicas automáticas aproximaram-se de 2/5 GSD nas mesmas coordenadas XY. Em elevação, o melhor resultado foi conseguido com o uso de cenas ortorretificadas ($REQM_Z = 8,5$ cm). A técnica manual obteve $REQM_Z = 12,9$ cm.

5.4.3.4 Orientação indireta

O propósito deste terceiro experimento com o bloco foi avaliar o efeito das técnicas de medição automática na orientação indireta de imagens. O mesmo conjunto de imagens foi configurado usando os POEs como incógnitas.

Novamente, a técnica manual também foi usada para fins de comparação. Assim como nos casos anteriores, os REQMs gerados no espaço imagem foram menores com as técnicas automáticas, como mostrado na Tabela 17, indicando melhor ajuste nas coordenadas imagem. O sigma *a posteriori* resultante da aerotriangulação foi igual nas três técnicas comparadas, sendo o valor de 0,34 (para um sigma *a priori* igual a 1).

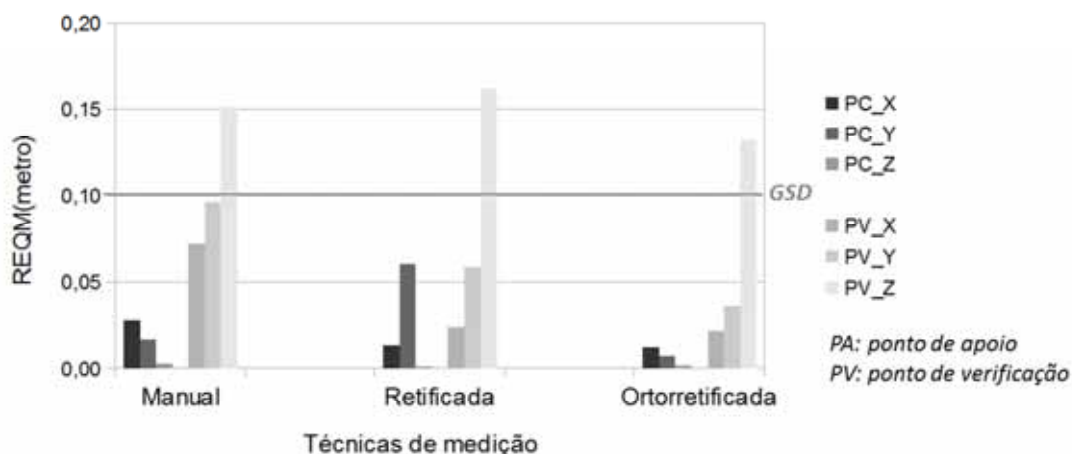
Tabela 17 – REQMs do ajustamento no espaço imagem na orientação indireta.

Técnica	Pontos de controle		Pontos de verificação		Sigma <i>a posteriori</i>
	x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)	
Manual	0,19	0,15	0,25	0,24	0,34
Cena retificada	0,19	0,13	0,20	0,24	0,34
Cena ortorretificada	0,19	0,14	0,23	0,20	0,34

Os resultados no espaço objeto estão resumidos no gráfico da Figura 52. Os REQMs nos pontos de controle com a técnica manual foram menores que 3 cm e, ao usar cenas de controle, foram mais precisos, sendo menores que 1,5 cm. Em relação aos pontos de verificação com a técnica manual, os REQMs obtidos foram menores que 10 cm em

planimetria (< 1 GSD) e aproximadamente 15 cm em Z. Significativamente, os REQMs nos pontos de verificação obtidos com a técnica automática demonstraram-se ainda menores com as cenas ortorretificadas, sendo 4 cm em planimetria ($< 0,4$ GSD) e abaixo de 14 cm em Z.

Figura 52 – Orientação indireta: REQMs resultantes nos pontos de controle e verificação no espaço objeto.



Em uma análise global da aerotriangulação do bloco, tanto a técnica de medição com cenas retificadas quanto a técnica com cenas ortorretificadas alcançaram resultados precisos no ajustamento dos pontos de controle e também acurados na validação pelos pontos de verificação. Ambas apresentaram resultados melhores do que aqueles obtidos com a medição manual.

A localização de pontos com a cena retificada mostrou ser capaz de atingir resultados acurados, porém devido a algumas áreas dos pontos de controle apresentarem certa variação na altura da superfície, a ortorretificação das cenas foi necessária e demonstrou sua eficiência melhorando o ajuste subpixel na correspondência de imagens terrestres e aéreas. Por esta razão, os resultados alcançados com a técnica de cenas ortorretificadas foram melhorados.

Na análise entre as duas técnicas automáticas usando os dados de orientação direta com injunção, a técnica que usa cenas ortorretificadas apresentou melhores resultados, principalmente quando a restrição de 10 cm para a posição do CP foi imposta, indicando que essa técnica proporciona coordenadas imagem mais precisas.

Para observar o efeito da técnica de cenas ortorretificadas em outro cenário, uma orientação indireta do sensor ainda foi realizada e, como resultado, os REQMs obtidos

demonstraram maior precisão e acurácia nos pontos analisados, mostrando que nessa configuração a técnica automática também é recomendada.

Em outros termos, considerando-se o melhor caso, demonstrado pelo ajustamento da Seção 5.4.3.2, as técnicas automáticas podem ser expressas em percentuais de melhoria em relação à medição manual. No espaço imagem, houve melhoria, porém as diferenças não foram expressivas, sendo em torno de 10%. Entretanto, o maior impacto foi obtido no espaço objeto e, por isso, produziu-se a Tabela 18 para mostrar o aumento de precisão e acurácia em cada coordenada terrestre.

Tabela 18 – Percentual de melhoria das técnicas automáticas de geração de cenas de controle em comparação com a técnica manual.

Técnica	Pontos de controle			Pontos de verificação		
	X (%)	Y (%)	Z (%)	X (%)	Y (%)	Z (%)
Cena retificada	44,5	19,5	1,4	55,6	60,7	3,1
Cena Ortorretificada	59,1	52,4	19,6	71,0	75,5	34,0

Como pode ser observado na Tabela 18, tanto a retificação quanto a ortorretificação das cenas de controle proporcionaram melhorias significativas no procedimento de medição de pontos de controle na aerotriangulação. A técnica usando ortorretificação de cenas, que é mais completa, produziu melhorias acima de 50% no ajuste planimétrico dos pontos de controle e aproximadamente 20% em elevação. Nos pontos de verificação, a melhoria obtida resultou em um percentual acima de 70% na acurácia planimétrica e 34% na altimetria. Isto demonstra a capacidade que as técnicas automáticas propostas neste trabalho têm para localizar pontos de controle em imagens aéreas com precisão subpixel.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, um conjunto de técnicas foi proposto e avaliado para adquirir imagens terrestres e gerar cenas de controle que possibilitam localizar automaticamente pontos de controle em imagens aéreas usando correspondência de imagens.

Considerando que a fase de medição de pontos de controle ainda é uma tarefa dependente de uma interação humana, foram desenvolvidas técnicas para automatizar esta fase. Com este propósito, as técnicas basearam-se na correlação entre imagens terrestres e aéreas para transferir coordenadas levantadas em campo por receptor GNSS.

O relacionamento entre os espaços imagem e objeto é principalmente viabilizado pelas equações de colinearidade, as quais dependem dos POEs das imagens. A disponibilidade dos dados de orientação direta por sistemas integrados GNSS/inercial é preferível e melhora a aplicação da abordagem, mas não é uma exigência. Dados do plano de voo com orientações aproximadas ou outra fonte de informação para os POEs podem ser usados nas equações de colinearidade, proporcionando uma primeira aproximação ao ponto correto de correspondência na imagem aérea.

Para o caso de não haver dados de orientação direta ou, se estes forem de baixa qualidade (imprecisos), desenvolveu-se e testou-se uma estratégia para reduzir o espaço de busca e transferir o ponto coletado por receptor GNSS para a imagem aérea. Os testes aplicados em um bloco de imagens mostraram que os pontos de controle foram localizados nas imagens com precisão subpixel, comprovando a eficácia da estratégia.

Algoritmos de correspondência de imagem foram usados para localizar as coordenadas dos pontos de controle nas imagens aéreas, seguidos de um refinamento subpixel por LSM. Os algoritmos basearam-se em correspondência por área, sendo necessário um passo de rotulação e eliminação de pequenas diferenças remanescentes no ajustamento por LSM para melhor determinar os parâmetros geométricos e radiométricos. O experimento da Seção 5.2, utilizando aerotriangulação em bloco de imagens, demonstrou que resultados mais acurados foram alcançados quando as diferenças entre a janela de referência (cena terrestre) e a janela de correspondência (recorte da imagem aérea) foram excluídas na estimação dos parâmetros por LSM.

Outro passo importante para a realização desta tese foi o desenvolvimento das técnicas de aquisição de imagens terrestres usando lentes *fisheye*, podendo ser também uma lente

supergrande angular. Um alvo de controle anexado ao receptor GNSS foi introduzido como parte da técnica de aquisição de imagens terrestres. O posicionamento de todo o conjunto utilizado foi planejado para ser prático e sobre essa técnica de levantamento, algumas limitações e vantagens podem ser mencionadas. Como limitações, têm-se:

- Oclusões podem ocorrer nos limites das imagens multiescalas, mas isto não ocorrerá na área central devido à necessidade de posicionar o receptor em áreas abertas para coletar sinais GNSS;
- A geometria de aquisição dos modelos terrestres multiescala não é ótima, mas é suficiente para reconstruir a parte central da imagem. Se uma segunda estação de câmara for introduzida, a geometria pode ser melhorada, mas adiciona custos operacionais;
- Somente pequenas áreas são reconstruídas, sendo, porém, suficientes para cobrir as principais características da cena.

Por outro lado, como vantagens ou contribuições, têm-se:

- A aquisição de imagens ocorre enquanto um ponto de controle é levantado por GNSS. Somente poucas medições são necessárias (distância horizontal e vertical entre o receptor GNSS e a câmara) e o custo adicional não é significativo. Além disso, todo o sistema de aquisição de imagens é montado em poucos minutos. Não há acréscimo de tempo para essa operação, sendo o tempo necessário compatível com a duração do levantamento;
- Usando o modelo multiescala, não é necessário transladar o tripé da câmara para obter estéreo-pares, como em um levantamento fotogramétrico convencional;
- O operador pode ser o mesmo topógrafo que realiza o levantamento GNSS. Nenhum operador especializado é necessário, como ocorre, por exemplo, no caso de usar um Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT);
- Imagens terrestres de pontos de controle são obtidas com GSD menor que 3 mm. Isto pode ser usado para gerar ortoimagens para um banco de dados de imagem de alta resolução;
- A placa de controle pode ser posicionada em qualquer área cobrindo características distinguíveis. A técnica não depende de feições de pontos, as quais nem sempre estão disponíveis em qualquer lugar;

- Por último, nenhum investimento expressivo é necessário para a aquisição dos materiais.

Experimentos foram realizados para provar os conceitos da abordagem sob a hipótese de que cenas terrestres poderiam ser usadas como um elemento de controle de imagens aéreas, ou seja, como forma de transferir/medir automaticamente pontos de controle e usá-los em procedimentos de orientação indireta ou para corrigir erros sistemáticos e avaliar os dados da orientação direta.

Duas técnicas automáticas usando cenas de controle retificadas e ortorretificadas foram testadas para demonstrar suas potencialidades na localização subpixel de pontos de controle em imagens aéreas. Baseado nos experimentos, pode-se assegurar que a técnica usando cenas retificadas, por ser mais simples, é suficiente para gerar cenas de controle nas áreas dos pontos de controle com pouca variação na superfície. Havendo variações em elevação ou inclinação na superfície da área, a ortorretificação torna-se necessária e demonstrou-se que esta técnica é eficiente na medição dos pontos de controle.

Os testes com modelos de imagem (Seção 5.4.2) avaliaram as técnicas automáticas de medição de imagens aéreas com GSD original e superamostradas para 1/3 do GSD. Nos dois casos, as medições automáticas atingiram a precisão subpixel, porém os resultados foram melhores com a correspondência em imagens aéreas superamostradas. Para os modelos de imagens testados, as técnicas automáticas resultaram em valores mais acurados do que a técnica manual, principalmente a técnica que usa a cena ortorretificada, com a qual foram obtidos os melhores resultados.

Nos experimentos realizados, ambas as técnicas automáticas apresentaram resultados precisos e acurados, também aumentando significativamente a acurácia da medição do ponto quando comparada com a medição manual. Isto foi verificado, por exemplo, com o bloco de imagens (Seção 5.4.3), em que se demonstrou com o ajustamento em bloco uma melhoria de mais de 50% nos resíduos em planimetria nos pontos de controle e mais de 70% nas discrepâncias planimétricas analisadas sobre os pontos de verificação. Estes percentuais indicam uma melhoria significativa nos resultados, quando comparados aos métodos manuais de medição de pontos de controle.

Desse modo, a partir da comprovação da hipótese, pode-se aceitar a cena terrestre como uma fonte de informação de controle, a qual pode ser definida ou caracterizada como um recorte de imagem automaticamente orientado e extraído de uma imagem terrestre

referente a uma pequena área de controle, com vista em perspectiva nadiral e cobrindo alguma feição distinguível em imagens aéreas (ou orbitais).

Em termos gerais, esta tese contribui para a geração de uma primitiva terrestre de controle de alta resolução, além da própria técnica de aquisição de imagens terrestres, a qual pode ser utilizada em outras aplicações.

Um exemplo dessas aplicações pode ser encontrado no trabalho publicado por Tommaselli et al. (2013), em que se apresentou um estudo usando uma adaptação do sistema de aquisição de imagens terrestres para coletar uma faixa de imagens panorâmicas em um cemitério histórico. Outro exemplo, descrito em Berveglieri et al. (2014), é um estudo de viabilidade usando a concepção do modelo multiescala para a medição de troncos de árvores.

Para automatizar ainda mais as técnicas, outros dispositivos podem ser incorporados, como, por exemplo, um receptor GNSS junto à câmara (permite calcular o azimute preciso com relação ao ponto de controle); usar tecnologia sem fio (acelera a transmissão de dados); acoplar um sistema integrado GNSS/inercial na câmara (adquire dados por orientação direta, porém eleva significativamente o custo dos materiais). Havendo a disponibilidade desses recursos, novos experimentos poderão ser realizados para tornar as técnicas apresentadas mais práticas e robustas, aumentando o seu desempenho.

A abordagem originalmente foi concebida para aplicações de orientação em imagens aéreas, mas os mesmos procedimentos podem ser usados em imagens orbitais de alta resolução. Além disso, as técnicas de localização automática também podem contribuir na melhoria do cálculo indireto dos ângulos de *boresight*, visto que a coordenada do ponto de controle medida apresenta alta precisão.

Os resultados apresentados demonstraram um impacto significativo de aumento de exatidão na fototriangulação de imagens e automação em mais uma etapa do processo, o que permite afirmar que a adoção desta técnica nos processos de produção permitirá ganhos de qualidade e custos.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, S.; FÖRSTNER, W. Fish-eye stereo calibration and epipolar rectification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59, n. 5, p. 278–288, 2005.

ACKERMANN, F. High precision digital image correlation. **Institut für Photogrammetrie Schriftenreihe**, v. 9, p. 231–243, 1984.

ACKERMANN, F.; TSINGAS, V. Automation of digital aerial triangulation. In: ASPRS/ACSM ANNUAL CONVENTION, 1995. Reno. **Proceedings...** p. 1–12.

AGOURIS, P.; SCHENK, T. Multiple image matching. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 29(B3), p. 802–807, 1992.

BARNARD, S. T.; THOMPSON, W. B. Disparity analysis of images. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 2, n. 4, p. 333–340, 1980.

BAY, H.; TUYTELAARS, T.; VAN GOOL, L. SURF: speeded up robust features. **Computer Vision – ECCV**, v. 3951, p. 404–417, 2006.

BEAUDET, P. R. Rotationally invariant image operators. In: International Joint Conference on Pattern Recognition, 4. 1978, Kyoto, Japan. **Proceedings...** p. 579–583.

BERVEGLIERI, A.; OLIVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G. A feasibility study on the measurement of tree trunks in forests using multi-scale vertical images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-5, p. 87–92, 2014.

BISCHOF, H.; LEBERL, F. Digital image processing. In: MCGLONE, J. C. (Ed.). **Manual of Photogrammetry**. 6. ed. Bethesda: ASPRS, 2014. cap. 5, p. 451–516.

BLACHUT, T. J.; CHRZANOWSKI, A.; SAASTAMOINEN, J. H. **Urban surveying and mapping**. New York: Springer-Verlag, 1979. 372 p.

BLÁZQUEZ, M.; COLOMINA, I. Relative INS/GNSS aerial control in integrated sensor orientation: Models and performance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 67, p. 120–133, 2012.

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

BROWN, M.; SZELISKI, R.; WINDER, S. Multi-image matching using multi-scale oriented patches. **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, v. 1, p. 510–517, 2005.

BUSCHINELLI, P. D. V.; GONÇALVES JUNIOR, A. A.; FANTINI, A. V. Desenvolvimento de um sistema óptico por triangulação cônica para a inspeção do perfil

interno de dutos. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. 4, 2007, Campinas. **Anais...** 2007. p. 1–10.

CLARKE, T. A.; FRYER, J. F. The development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Record**, v. 16, n. 91, p. 51–66, 1998.

CORRÊA, F. R. **Grades de evidência com visão omnidirecional estéreo**. 2004. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CRAMER, M.; HAALA, N. Direct exterior orientation of airborne sensors - an accuracy investigation of an integrated gps/inertial system. **Journal GIM International**, v. 13, p. 46–49, 1999.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 33(B3). p. 198–205, 2000.

DALAL, N.; TRIGGS, B. Histograms of oriented gradients for human detection. **COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION**. 2005. San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE Computer Society, 2005. p. 886–893.

DAL POZ, A. P.; TOMMASELLI, A. M. G. Automatic space resection using a constrained relational matching. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 33(B3), p.206–213, 2000.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. M. DO; ZANIN, R. B. Extração automática de feições rodoviárias em imagens digitais. **Revista Controle & Automação**, v. 18, n. 1, p. 44–54, 2007.

DÖRSTEL, C.; TANG, L.; MADANI, M. Automatic aerial triangulation software of Z/I imaging. Photogrammetric Week'01. 2001. **Proceedings of Photogrammetric Week 2001**: Hildelberg, 2001, p. 177–181.

DREWNIOK, C.; ROHR, K. Automatic exterior orientation of aerial images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 31(B3), p. 146–152, 1996.

FONSECA, L. M. G.; MANJUNATH, B. S. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 9, p. 1049–1056, 1996.

FÖRSTNER, W. A feature based correspondence algorithm for image matching. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 26, n. 3, p. 150–166, 1986.

FÖRSTNER, W. Image matching. In: R. HARALICK; L. G. SHAPIRO (Ed.). **Computer and Robot Vision**. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1993. cap. 16, p. 289–378.

- FÖRSTNER, W.; GÜLCH, E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and center of circular features. CONFERENCE ON FAST PROCESSING OF PHOTOGRAMMETRIC DATA. 1987, Interlaken. **Proceedings...** 1987, p. 281–305.
- FRASER, C. S.; BALTSAVIAS, E.; GRUEN, A. Processing of Ikonos imagery for submetre 3D positioning and building extraction. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 56, n. 3, p. 177–194, 2002.
- FRYER, J. G.; BROWN, D. C. Lens distortion for close-range photogrammetry. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 51–58, 1986.
- FULLVIEW, Inc. Disponível em: <<http://www.fullview.com/technology.html>>. Acesso em: 22 out. 2012.
- GALO, M. **Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo**. 2003. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- GARRIDO-JURADO, S.; MUÑOZ-SALINAS, R.; MADRID-CUEVAS, F. J.; MARÍN-JIMÉNEZ, M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. **Pattern Recognition**, v. 47, n. 6, p. 2280 – 2292, 2014.
- GIANINETTO, M.; SCAIONI, M. Automated Geometric Correction of High-resolution Pushbroom Satellite Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 1, p. 107–116, 2008.
- GRASSI JR, V.; OKAMOTO JR, J. Development of an omnidirectional vision system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, p. 58–68, 2006.
- GRUEN, A. Least square matching: a fundamental measurement algorithm. In: ATKINSON, K. B. (Ed.). **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Bristol: Whittle Publishing, 1996. cap. 8, p. 217–255.
- GRUEN, A. Development and status of image matching in photogrammetry. **Photogrammetric Record**, v. 27, n. 137, p. 36–57, 2012.
- GÜLCH, E. Automatic control point measurement. In: FRITSCH, D.; HOBBIE, D. (Ed.). **Photogrammetric Week 1995**. Heidelberg: Wichmann Verlag. p. 185–196, 1995.
- GYER, M. Automated stereo photogrammetric terrain elevation extraction. Technical Report, Gyer and Saliba Inc., 1981.
- HABIB, A.; LIN, H. T.; MORGAN, M. Autonomous space resection using point- and line-based representation of free-form control linear features. **Photogrammetric Record**, v. 18, n. 103, p. 244–258, 2003.
- HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. **Computer and robot vision**. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1993. 630 p.

- HARRIS, C.; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. ALVEY VISION CONFERENCE. 4, 1988. **Proceedings...** p. 147–151.
- HEIPKE, C. Automation of interior, relative, and absolute orientation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 1–19, 1997.
- HEIPKE, C.; JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. The OEEPE test on integrated sensor orientation – results of phase I. In: FRITSCH, D.; SPILLER, R. (Ed.). **Photogrammetric Week 2001**. Heidelberg: Wichmann Verlag, p. 195–204, 2001.
- HEIPKE, C.; JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. Analysis of the results of the OEEPE test-integrated sensor orientation. In: OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation. 2001, Hannover. **Proceedings...** 2001, p. 1–19.
- HEITGER, F.; ROSENTHALTER, L.; VON DER HEYDT, R.; PETERHANS, E.; KUEBLER, O. Simulation of neural contour mechanism: from simple to end-stopped cells. **Vision Research**, v. 32, n. 5, p. 963–981, 1992.
- HELAVA, U. V. Digital comparator correlator system. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 27(B2), p. 160–170, 1988.
- HONKAVAARA, E.; JAAKKOLA, J. On properties of automatically measured tie point observations. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 32(B3), p.42–51, 1998.
- IP, A.; EL-SHEIMY, N.; MOSTAFA, M. performance analysis of integrated sensor orientation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 1, p. 89–97, 2007.
- JACOBSEN, K. Direct integrated sensor orientation - pros and cons. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 35(B3), p.829–835, 2004.
- JAW, J.-J.; WU, Y.-S. Control patches for automatic single photo orientation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 2, p. 151–157, 2006.
- JAZAYERI, I.; FRASER, C. Interest operators for feature based matching in close range photogrammetry. **Photogrammetric Record**, v. 25, n.3, p. 24–41, 2010.
- KITCHEN, L.; ROSENFELD, A. Gray-level corner detection. **Pattern Recognition Letters**, v. 1, n. 2, p. 95–102, 1982.
- KRAUS, K. **Photogrammetry: fundamentals and standard processes**. Köln: Dümmler, 1993. 397 p.
- KRAUS, K. **Photogrammetry: geometry from images and laser scans**. 2 ed. Berlin: de Gruyter, 2007. 459 p.
- LÄBE, T.; ELLENBECK, K. H. 3D-wireframe models as ground control points for the automatic exterior orientation. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 31(B2), p.218–223, 1996.

- LANG, F.; FÖRSTNER, W. Matching techniques. In: **Third Course in Digital Photogrammetry**. Bonn, Germany. Institute for Photogrammetry at Bonn University and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. 1998. 41 p.
- LI, N.; HUANG, X.; ZHANG, F.; WANG, L. Registration of aerial imagery and lidar data in desert areas using the centroids of bushes as control information. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 8, p. 743–752, 2013.
- LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION. 1999, Washington. **Proceedings...** Washington: IEEE Computer Society, 1999, v. 2, p.1150–1164.
- LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.
- LOWE, D. G. Demo software: SIFT keypoint detector. Matlab,, 2005. Disponível em: < <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/> >. Acesso em: 03 abr 2014.
- LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: UFPR, 1987. 134 p.
- MALMSTRÖM, H. Measuring ground control points for satellite image rectification. **Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart**. v. 11, p. 127–135, 1986.
- MARCATO JUNIOR, J.; MORAES, M. V. A.; TOMMASELLI, A. M. G. Geometric calibration of a stereographic fisheye lens camera. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2014. (no prelo)
- MARCATO JUNIOR, J.; TOMMASELLI, A. M. G. Exterior orientation of CBERS-2B imagery using multi-feature control and orbital data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 79, p. 219–225, 2013.
- MAYER, H.; SESTER, M.; VOSSelman, G. Basic computer vision techniques. In: MCGLONE, J. C. (Ed.). **Manual of Photogrammetry**. 6. ed. Bethesda: ASPRS, 2013. cap. 6. p. 517–583.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, C. J. **Introduction to modern photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479 p.
- MIKOLAJCZYK, K.; SCHMID, C. Indexing based on scale invariant interest points. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 8, 2001. **Proceedings...** 2001, p. 525–531.
- MIKOLAJCZYK, K.; SCHMID, C. Scale & affine invariant interest point detectors. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 1, p. 63–86, 2004.
- MIKOLAJCZYK, K.; SCHMID, C. A performance evaluation of local descriptors. **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**, v. 27, n. 10, p. 1615–1630, 2005.

MITISHITA, E.; HABIB, A.; CENTENO, J.; MACHADO, A.; LAY, J. WONG, C. Photogrammetric and lidar data integration using the centroid of a rectangular roof as a control point. **Photogrammetric Record**, v. 23, n. 121, p. 19–35, 2008.

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

MORAES, M. V. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, S. L. A.; MARCATO JÚNIOR, J. Implantação de campo terrestre de calibração de câmaras com uso de alvos codificados. In: VIII COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS. 2013. Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2013.

MORAVEC, H. P. Towards automatic visual obstacle avoidance. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 5, 1977, Cambridge. **Proceedings...** 1977.

MOSTAFA, M.; SCHWARZ, K.-P. Digital image georeferencing from a multiple camera system by GPS/INS. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 56, n. 1, p. 1–12, 2001.

NAYAR, S. K.; KARMARKAR, A. 360x360 Mosaics. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. 2000. **Proceedings...** v. 2, p. 388–395.

OLIVETE, A. L. **Utilização de imagens omnidirecionais georreferenciadas como controle de campo para orientação de imagens orbitais**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

PARKER, J. A.; KENYON, R. V.; TROXEL, D. E. Comparison of interpolating methods for image resampling. **IEEE Transaction on medical imaging**, v. MI-2, n. 1, p. 31–39, 1983.

PERLT, A. Digital image correlation with the analytical plotter planicom C 100. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 25(B3), p. 874–882, 1984.

REMONDINO, F. Detectors and descriptors for photogrammetric applications. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 36(3), p. 49–54, 2006.

ROSTEN, E.; DRUMMOND, T. Machine learning for high-speed corner detection. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION. 2006, Graz. **Proceedings...** p. 430–443.

RUY, R.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, MAURÍCIO, M.; HASEGAWA, J. K.; REIS, T. T. Evaluation of bundle block adjustment with additional parameters using images acquired by SAAPI system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, 6., 2009, Presidente Prudente. **Proceedings...** 2006. 6 p.

- SANTOS FILHO, R. B.; GIN, R. B. B.; BIANCHI, R. A. Sistema de visão omnidirecional para monitoramento de descargas atmosféricas. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE e II IEEE LATIN-AMERICANO DE ROBÓTICA. 2005, São Luis. **Anais...** São Luis: UFMA, 2005.
- SCHENK, T. Digital **Photogrammetry**: background, fundamentals, automatic orientation procedures. Laurelville: TerraScience, 1999. 428 p.
- SCHICKLER, W. Feature matching for outer orientation of single images using 3-D wireframe control points. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 29(B3), p.591–598, 1992.
- SCHNEIDER, D.; SCHWALBE, E.; MAAS, H. G. Validation of geometric models for fisheye lenses. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 3, p. 259–266, 2009.
- SILVA, S. L. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados na automação do processo de calibração de câmaras. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 3, p. 636–656, 2014.
- SKALLOUD, J. Reliability of direct georeferencing - beyond the Achilles' heel of modern airborne mapping. In: FRITSCH, D. (Ed.). **Photogrammetric Week 2007**. Stuttgart: Universität Stuttgart, v. 51, p. 227–241, 2007.
- SKEA, D.; BARRODALE, I.; KUWAHARA, D.; POECKERT, R. A control point matching algorithm. **Pattern Recognition**, v. 26, n. 2, p. 269–276, 1993.
- SMITH, S. M.; BRADY, J. M. SUSAN - A new approach to low level image processing. **International Journal of Computer Vision**, v. 23, p. 45–78, 1997.
- STEWART, C. V. Robust parameter estimation in computer vision. **SIAM Reviews**, v. 41, p. 513–537, 1999.
- SWAMINATHAN, A. M. G.; NAYAR, S. K. **Polycameras: camera clusters for wide angle imaging**. 1999. 30p. Technical Report, Department of Computer Science: Columbia University.
- TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G. Determination of the indirect orientation of orbital pushbroom images using control straight lines. **Photogrammetric Record**, v. 25, n. 130, p. 159–179, 2010.
- TOMMASELLI, A. M. G.; BERVEGLIERI, A. automatic orientation of multi-scale terrestrial images for 3D reconstruction. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3020–3040, 2014.
- TOMMASELLI, A. M. G.; LOPES, R. F. Registro semiautomático entre imagens infravermelhas e RGB coletadas por um par de câmaras digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 1, p. 53–74, 2011.

- TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; MORAES, M. V. A.; MARCATO JUNIOR, J.; CALDEIRA, C. R. T.; LOPES, R. F. Generating virtual images from oblique frames. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1875–1893, 2013.
- TOMMASELLI, A. M. G.; MARCATO JR., J.; MORAES, M. V. A.; SILVA, S. L. A.; ARTERO, A. O. Calibration of panoramic cameras with coded targets and a 3D calibration field. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-3/W1, p. 137–142, 2014.
- TOMMASELLI, A. M. G.; POLIDORI, L.; HASEGAWA, J. K.; CAMARGO, P. O.; HIRAO, H.; MORAES, M. V. A.; RISSATE JR, E. A.; HENRIQUE, G. R.; ABREU, P. A. G.; BERVEGLIERI, A.; MARCATO JR, J. Using vertical panoramic images to record a historic cemetery. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. XL-5, p.641–646, 2013.
- TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S. Avaliação experimental de uma metodologia automática para a geração de estereomodelos a partir de dados de orientação direta. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.56, p. 34–46, 2004.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. A recursive approach to space resection using straight lines. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 1, p. 57–66, 1996.
- TOURNAIRE, O.; SOHEILLIAN, B.; PAPANODITIS, N. Towards a sub-decimeter georeferencing of ground-based mobile mapping systems in urban areas: matching ground-based and aerial-based imagery using roadmarks. **Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection**, v. 185, p. 84–89, 2007.
- TRAJKOVIC, M.; HEDLEY, M. Fast corner detection. **Image and Vision Computing**, v. 16, p. 75–87, 1998.
- TSINGAS, V. Automatische aerotriangulation. Photogrammetric Week'91. 1991. **Proceedings of Photogrammetric Week 1991**: Stuttgart, 1991. p. 253–258.
- WANG, H.; BRADY, M. Real-time corner detection algorithm for motion estimation. **Image and Vision Computing**, v. 13, n. 9, p. 695–703, 1995.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry**. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 608 p.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 4th. McGraw Hill: New York, 676 p.
- YANNIRIS, Y. **Improvements to the off-line epipolar correlation**. 1974. 154 p. Master of Sciences - University of New Brunswick, Fredericton, Canada.
- YASTIKLI, N.; JACOBSEN, K. Direct sensor orientation for large scale mapping potential, problems, solutions. **Photogrammetric Record**, v. 20, n. 111, p. 274–284, 2005.

YUAN, X. Quality assessment for GPS-supported bundle block adjustment based on aerial digital frame imagery. **Photogrammetric Record**, v. 24, n. 126, p. 139–156, 2009.

ZHENG, Z.; WANG, H.; TEOH, E. K. Analysis of gray level corner detection. **Pattern Recognition Letters**, v. 20, p. 149–162, 1999.