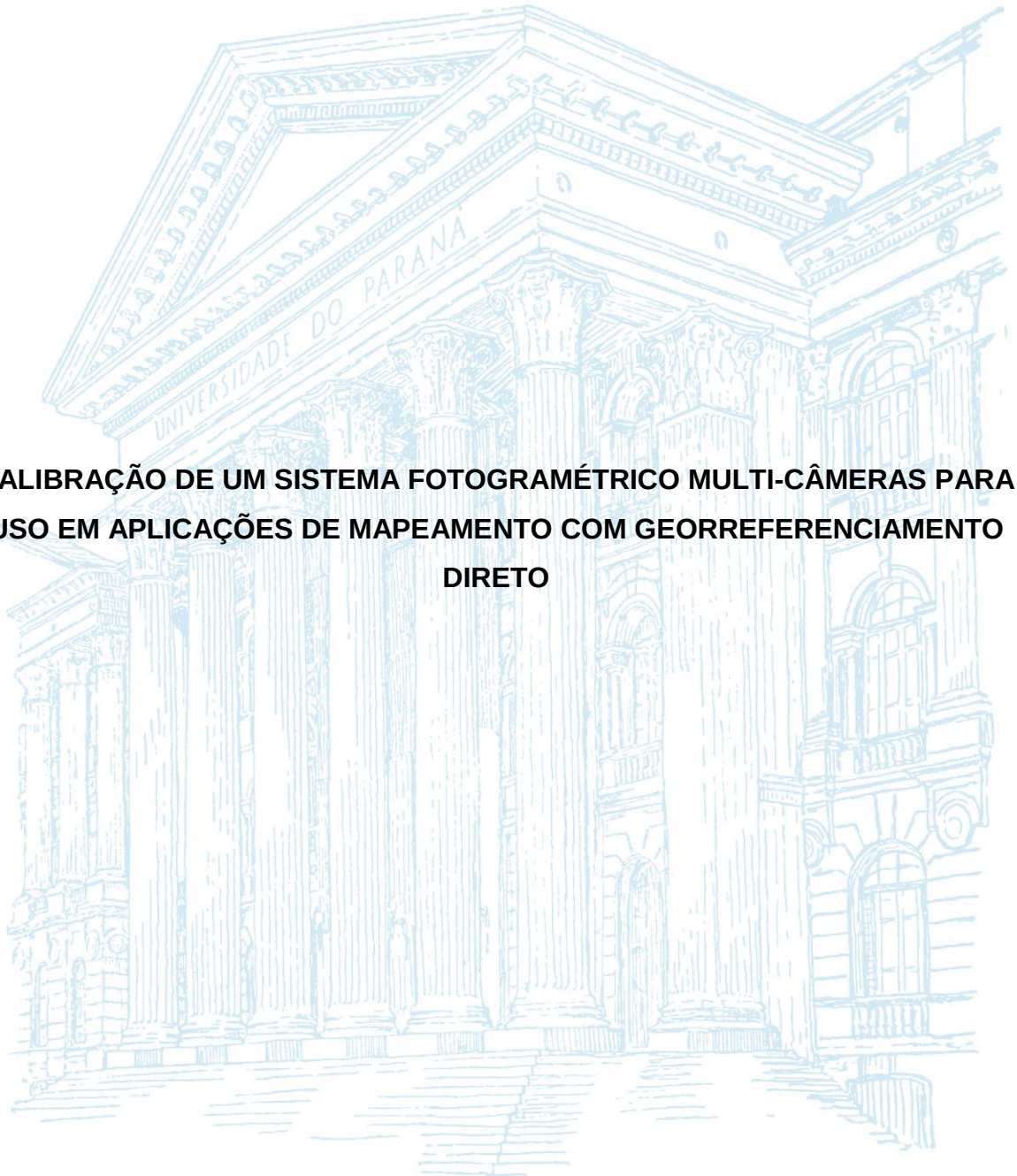
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO ERCOLIN FILHO



CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO MULTI-CÂMERAS PARA USO EM APLICAÇÕES DE MAPEAMENTO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

CURITIBA

2017

LEONARDO ERCOLIN FILHO

CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO MULTI-CÂMERAS PARA USO EM APLICAÇÕES DE MAPEAMENTO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

Co-orientadora: Dra. Ana Paula Baungarten Kersting

CURITIBA

2017

E65c Ercolin Filho, Leonardo
Calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto / Leonardo Ercolin Filho. – Curitiba, 2017.
154f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2017.

Orientador: Edson Aparecido Mitishita. -- Coorientadora: Ana Paula Baungarten Kersting.

1. Fotogrametria. 2. Georreferenciamento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mitishita, Edson Aparecido. III. Kersting, Ana Paula Baungarten. IV. Título.

CDD: 526.982

TERMO DE APROVAÇÃO

LEONARDO ERCOLIN FILHO

"CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO MULTI-CÂMERAS PARA USO EM APLICAÇÕES DE MAPEAMENTO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO"

Tese nº 104 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR

Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli
Universidade Estadual Paulista, UNESP

Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski
Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC

Prof. Dr. Tony Vinicius Moreira Sampaio
Departamento de Geografia, UFPR

Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 31 de março de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e à minha querida esposa Ariana Maciel pelo carinho, amor e apoio incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita pela confiança depositada, amizade e orientação.

À Dra. Ana Paula Baungarten Kersting pelas sugestões e pelo apoio na realização dos testes de calibração com o programa MSAT da *University of Calgary*.

Aos professores Dr. Daniel Rodrigues dos Santos e Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli pelas discussões e sugestões na fase de qualificação.

À Profa. Dra. Luciene Stamato Delazari pela amizade, ideias e pelo apoio fundamental na revisão do texto.

À empresa Engefoto Engenharia e Aerolevantamentos S.A. pelo fornecimento dos dados do sistema TACx4.

Aos demais colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

EPÍGRAFE

“.... Concluo que viver demanda uma dose constante de apreciação e pressa. Apreciação pelo momento, pela imensa oportunidade que é estar vivo. E pressa porque nosso tempo é limitado e devemos aproveitá-lo da forma mais harmoniosa e consciente possível ...”.

Guilherme Cavallari – Expedição Transpatagônia, 2012.

RESUMO

Os sistemas fotogramétricos multi-câmeras são equipamentos utilizados na Fotogrametria que possuem um conjunto de câmeras digitais devidamente montadas e sincronizadas para capturar e gerar imagens sintéticas com maior área de cobertura. Em geral, esses equipamentos são integrados a sistemas de navegação global por satélites e navegação inercial (GNSS+INS) que registram a posição e orientação do sistema de imageamento no instante de aquisição de imagens. O processo de calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras pode ser dividido em três etapas: [1] determinação dos parâmetros de orientação interior (POI) das câmeras que compõem o sistema de imageamento, [2] determinação e refinamento dos parâmetros de posição e orientação das câmeras em relação ao sistema de referência da imagem sintética, cuja etapa é também conhecida como “calibração de plataforma” e [3] determinação dos parâmetros de montagem que representam a posição relativa e os ângulos de desalinhamento existentes entre os sistemas de referência da imagem sintética e da unidade de medição inercial (IMU) do sistema GNSS+INS. Em geral, os fabricantes dos modelos comerciais como DMC (*Digital Mapping Camera*) da Hexagon/Integraph e UC (*UltraCam*) da Microsoft Vexcel utilizam métodos de laboratório para realizar a determinação dos POI e a calibração de plataforma, bem como a geração da imagem sintética. A determinação dos parâmetros de montagem da imagem sintética em relação ao sistema GNSS+INS é feita a partir de valores nominais do projeto de instalação entre a IMU e o conjunto de câmeras e não utiliza modelos matemáticos. Neste contexto, este trabalho apresenta diferentes metodologias bem como os resultados obtidos na calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras modelo *Trimble Aerial Camera x4* (TACx4) equipado com um sistema GNSS+INS modelo Applanix POS-AV para uso em aplicações de georreferenciamento direto. Diferentemente dos métodos de laboratório utilizados pelos fabricantes, as metodologias desenvolvidas neste trabalho utilizam imagens aéreas e métodos de campo em todas as etapas de calibração, ou seja, determinação dos POI das câmeras que compõem o sistema de imageamento, calibração de plataforma bem como determinação dos parâmetros de montagem, incluindo novos POI da imagem sintética. A eficiência e viabilidade do uso das metodologias em aplicações com georreferenciamento direto são analisadas utilizando blocos de imagens com diferentes configurações bem como a exatidão posicional para uso em projetos de mapeamento em escala cadastral.

Palavras-chave: Sistema Fotogramétrico Multi-câmeras; Georreferenciamento Direto; Calibração.

ABSTRACT

The photogrammetric multi-camera systems are equipment's composed of a set of digital cameras properly mounted and synchronized to acquire and generate synthetic images with greater coverage area, as well as being integrated with a global navigation satellite and inertial navigation system (GNSS+INS) which provide the position and orientation of the imaging system at the time of image acquisition during a photogrammetric survey. The calibration process of a multi-camera can be divided basically into three steps: [1] determination of the interior orientation parameters (IOPs) of each camera comprising the imaging system, [2] determination and refinement of the position and orientation parameters of the cameras related to the synthetic reference image system, a step which is also known as "platform calibration" and [3] determination of the mounting parameters that represent the relative position and misalignment angles existing between the synthetic image and inertial measurement unit (IMU) reference systems. In general, the multi-camera system manufacturers as DMC (Digital Mapping Camera) from Hexagon/Intergraph and UC (UltraCam) from Microsoft Vexcel use laboratory methods for the IOPs determination and the platform calibration as well the synthetic image generation. The determination of the mounting parameters of the synthetic image in relation to GNSS+INS is made from nominal values of the installation project between the IMU and the set of cameras and does not use mathematical models. Based on this context, this research presents alternative methods and obtained results in the calibration of a multi-head camera system Trimble Aerial Camera x4 (TACx4) equipped with a GNSS+INS model Applanix POS-AV system for use in direct georeferencing applications. Unlike the laboratory methods used by the manufacturers, the methodologies developed in this work use aerial images and field methods in all calibration steps, i.e. determination of IOPs of each camera that composes the imaging system, platform calibration and determination of mounting parameters, including new IOPs of the synthetic image. The efficiency and feasibility to use the methodologies with direct georeferencing applications are analyzed using image blocks with different configurations as well the positional accuracy for use in mapping projects registration scale.

Keywords: Photogrammetric Multi-Camera System; Direct Georeferencing; Calibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - MODELOS DE CÂMERAS KODAK DCS. 11
FIGURA 2 - SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS ADPS E TETRACAM. 12
FIGURA 3 - SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS E CÂMERAS DE MÉDIO FORMATO. 13
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO SISTEMA ADS. 15
FIGURA 5 - PRINCÍPIO DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DO SISTEMA DMC. 16
FIGURA 6 - CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DO SISTEMA DMC. 16
FIGURA 7 - CALIBRAÇÃO DE PLATAFORMA DO SISTEMA DMC. 17
FIGURA 8 - SISTEMA VEXCEL UCD. 18
FIGURA 9 - MÉTODO DE AQUISIÇÃO DO SISTEMA VEXCEL UCD. 19
FIGURA 10 - LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA VEXCEL UCD. 19
FIGURA 11 - PROCESSO DE FUSÃO DE IMAGENS POR PANSHARPENING. 20
FIGURA 12 - FLUXO DE ETAPAS DO PROCESSO DE PANSHARPENING. 21
FIGURA 13 - SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS MULTI-CAMERAS. 22
FIGURA 14 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE LABORATÓRIO: MULTICOLIMADOR. 25
FIGURA 15 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO CAMPO: CAMPOS MISTOS. 26
FIGURA 16 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE CAMPO: CÂMERAS CONVERGENTES. 27
FIGURA 17 - SATÉLITES DO SISTEMA NAVSTAR-GPS. 30
FIGURA 18 - SATÉLITES DO SISTEMA GLONASS. 32
FIGURA 19 - ESTRUTURA DO SISTEMA GALILEO. 34
FIGURA 20 - EVOLUÇÃO DO SISTEMA BEIDOU. 36
FIGURA 21 - SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL DESENVOLVIDO EM 1950. 37
FIGURA 22 - PLATAFORMAS DE SISTEMA INERCIAL. 38
FIGURA 23 - SISTEMAS DE COORDENADAS ENVOLVIDOS NO SISTEMA INERCIAL. 39
FIGURA 24 - ELEMENTOS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POR ETAPAS. 45
FIGURA 25 - ELEMENTOS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO SIMULTÂNEA. 49
FIGURA 26 - SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO TRIMBLE AERIAL CAMERA x4. 53
FIGURA 27 - FLUXO DE PROCESSAMENTO DE TRAJETÓRIAS DO GNSS+INS. 54
FIGURA 28 - ESPECIFICAÇÕES DE PRECISÃO DOS MODELOS APPLANIX POS AV. 55
FIGURA 29 - PRINCÍPIO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO SISTEMA TACx4. 56
FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO DE ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO. 57
FIGURA 31 - BLOCO DE IMAGENS USADO PARA A DETERMINAÇÃO DE POI DOS SENSORES. 59
FIGURA 32 - IMAGEM MODELO PARA A CALIBRAÇÃO DE PLATAFORMA. 60
FIGURA 33 - ESQUEMA DE PONTOS EXTRAÍDOS NAS ÁREAS DE SOBREPOSIÇÃO. 62
FIGURA 34 - DEFINIÇÃO DO REFERENCIAL DA IMAGEM SINTÉTICA. 63
FIGURA 35 - ESQUEMA DAS IMAGENS QUE COMPÕEM A IMAGEM SINTÉTICA. 68
FIGURA 36 - PONTOS EXTRAÍDOS PARA A ANÁLISE DE QUALIDADE GEOMÉTRICA. 68
FIGURA 37 - BLOCO DE IMAGENS USADO PARA A DETERMINAÇÃO DE POI E PARÂMETROS DE MONTAGEM DA IMAGEM SINTÉTICA. 71
FIGURA 38 - BLOCO DE IMAGENS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR, POSIÇÃO RELATIVA E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO. 76
FIGURA 39 - DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS NO ESPAÇO OBJETO POR GEORREFERENCIAMENTO DIRETO. 77
FIGURA 40 - DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS NO ESPAÇO OBJETO POR INTERSEÇÃO FOTOGRAMÉTRICA. 78

FIGURA 41 - GRÁFICO DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DAS CÂMERAS..... 86
FIGURA 42 - GRÁFICO DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA RESIDUAL DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO POR ETAPAS. 91
FIGURA 43 - GRÁFICO DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA RESIDUAL DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 95
FIGURA 44 - FLUXO DE VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO. 98
FIGURA 45 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO POR ETAPAS. 100
FIGURA 46 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 101
FIGURA 47 - BLOCO DE IMAGENS DO PROJETO 1. 105
FIGURA 48 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 106
FIGURA 49 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO 107
FIGURA 50 - BLOCO DE IMAGENS DO PROJETO 2. 109
FIGURA 51 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 111
FIGURA 52 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO 111
FIGURA 53 - BLOCO DE IMAGENS DO PROJETO 3. 114
FIGURA 54 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 115
FIGURA 55 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO 115

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA PLANIMÉTRICA DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD). 80
TABELA 2 - PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA ALTIMÉTRICA DOS PONTOS COTADOS E DO MDT, MDE E MDS DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD)..... 80
TABELA 3 - POI DAS CÂMERAS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO. 85
TABELA 4 - MATRIZES DE PORCENTAGEM MÉDIA DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS..... 87
TABELA 5 - PARÂMETROS DAS CÂMERAS NO REFERENCIAL DA IMAGEM SINTÉTICA. 88
TABELA 6 – RESULTADOS DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DA IMAGEM SINTÉTICA.... 88
TABELA 7 - COEFICIENTES DE CORREÇÃO PARA A GERAÇÃO DA IMAGEM SINTÉTICA. 89
TABELA 8 - PARÂMETROS DEFINIDORES DA IMAGEM SINTÉTICA. 89
TABELA 9 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO POR ETAPAS..... 90
TABELA 10 - MATRIZ DE PORCENTAGEM MÉDIA DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS PELO MÉTODO POR ETAPAS. 93
TABELA 11 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E DE MONTAGEM DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 94
TABELA 12 - MATRIZ DE PORCENTAGEM MÉDIA ABSOLUTA DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 97
TABELA 13 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO..... 100
TABELA 14 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO POR ETAPAS. 102
TABELA 15 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 102
TABELA 16 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO POR ETAPAS. 102
TABELA 17 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORRFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 103
TABELA 18 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1. . 106
TABELA 19 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 108
TABELA 20 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 108
TABELA 21 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 108
TABELA 22 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 108
TABELA 23 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2. . 110
TABELA 24 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 112

TABELA 25 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 112
TABELA 26 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 113
TABELA 27 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 113
TABELA 28 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3. . 115
TABELA 29 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 116
TABELA 30 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 117
TABELA 31 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO POR ETAPAS. 117
TABELA 32 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO. 117

LISTA DE SIGLAS

AAF	American Air Force
ADC	Airborne Digital Camera
ADPS	Aerial Digital Photographic System
ADS	Airborne Digital Sensor
AHRS	Attitude Heading Reference System
AIC	Aerial Industrial Camera
AMDC	Airborne Multiespectral Digital Camera
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
BBA	Bundle Block Adjustment
CalQC	Calibration Quality and Control
CCD	Charged-Coupled Device
CIR	Color Infrared
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DCS	Digital Camera System
DG	Direct Georeferencing
DGCP	Direct Georeferencing Checker Program
DGPS	Differential Global Positioning System
DiMAC	Digital Modular Aerial Camera
DLR	Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
DLT	Direct Linear Transformation
DMC	Digital Mapping Camera
DoD	Department of Defense
DSS	Digital Sensor System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EP	Erro Padrão
ESA	European Space Agency
ETADGV	Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
FBM	Feature Based Matching
FMS	Flight Management System
GCC	Galileo Control Center
GIOVE	Galileo in-Orbit Validation Element
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNSS+INS	Global Navigation Satellite System and Inertial Navigation System
GPS	Global Positioning System
GPS+INS	Global Positioning System and Inertial Navigation System
GSS	Galileo Sensor Stations
HCD	Harris Corner Detector
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	International Civil Aviation Organization
IGS	International GNSS Service
IHS	Intensity, Hue and Saturation
IMU	Inertial Measurement Unit
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INS	Inertial Navigation System
ISO	Integrated Sensor Orientation
ISPRS	International Society of Photogrammetry and Remote Sensing
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging
LSM	Least Square Matching
MCS	Multi-Camera Array
MDE	Modelos Digitais de Elevação

MDS	Modelos Digitais de Superfície
MDT	Modelos Digitais de Terreno
MIT	Massachusetts Institute of Technology's Instrumentation Laboratory
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MMR	Method of Mixed Ranges
MMS	Mobile Mapping System
MS	Multispectral Image
MSAT	Multi-Sensor Aerial Triangulation
NAVSTAR-GPS	NAVigation Satellite with Time and Ranging–Global Positioning System
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NIR	Near Infrared
NIST	National Institute of Standards and Technology
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OEEPE	European Organization for Experimental Photogrammetric Research
PAN	Panchromatic Image
PCA	Principal Component Analysis
PECPCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
POE	Parâmetros de Orientação Exterior
POI	Parâmetros de Orientação Interior
POSAV	Position and Orientation System for Airborne Vehicles
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	Precise Positioning Service
RANSAC	RANdon SAmple Consensus
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RGB	Red, Green and Blue
SAAPI	Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens digitais
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBET	Smoothed Best Estimate of Trajectory
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SIGP	Synthetic Image Generation Program
SPS	Standard Positioning Service
SWDC-4	Siwei Digital Camera-4
TACx4	Trimble Aerial Camera x4
TSICP	Two-Step Inertial Calibration Program
U.S. Army	United States Army
UCD	UltraCamD
UHRRC	Ultra High Resolution Reconnaissance Camera
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USAF	United State Air Force
USGS	United States Geological Survey
USPIC	United State Photographic Interpretation Center
WT	Wavelet Transform

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 1

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1

1.2 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES DA TESE 4

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS 8

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 8

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 10

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 10

2.2 CÂMERAS E SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITAIS 10

2.3 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS FOTOGRAMÉTRICAS DIGITAIS 22

2.4 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL E NAVEGAÇÃO INERCIAL 29

2.5 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DO SENSOR 40

2.6 GEORREFERENCIAMENTO INTEGRADO DO SENSOR 42

2.7 CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITAIS 43

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS 52

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 52

3.2 SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO TRIMBLE AERIAL CAMERA x4 52

3.3 CAMPO DE CALIBRAÇÃO DE GUARAPUAVA-PR 56

3.4 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO 58

3.5 GERAÇÃO DA IMAGEM SINTÉTICA E ANÁLISE DE QUALIDADE 65

3.6 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA 70

3.7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR, POSIÇÃO RELATIVA E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA 72

3.8 VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA PARA USO EM APLICAÇÕES DE MAPEAMENTO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO 76

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS 84

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 84

4.2 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO 84

4.3 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA 90

4.4 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR, POSIÇÃO RELATIVA E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA 93

4.5 VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO BLOCO DE CALIBRAÇÃO 98

4.6 VALIDAÇÃO DO GEORREFEFENCIAMENTO DIRETO EM BLOCOS DE PROJETOS FOTOGRAMÉTRICOS INDEPENDENTES 104

4.6.1 Projeto Fotogramétrico Independente 1 105

4.6.2 Projeto Fotogramétrico Independente 2 109

4.6.3 Projeto Fotogramétrico Independente 3 113

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 119

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 123

Apêndice 1 – CÓDIGO DO PROGRAMA SIGP (MATLAB) 133

Apêndice 2 – CÓDIGO DO PROGRAMA TSICP (MATLAB) 144

Apêndice 3 – DESCRITIVO DO PROGRAMA DGCP (RAD STUDIO C++) 147

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A calibração ou determinação dos parâmetros de orientação interior (POI) é uma etapa fundamental do processo fotogramétrico quando se deseja extrair informações de fotografias ou imagens digitais com exatidão compatível para uso em aplicações de mapeamento fotogramétrico. Surgiu em 1920 depois que experiências realizadas na Primeira Guerra Mundial demonstraram a importância da calibração do sistema de lentes de câmeras para aumentar a precisão das informações extraídas nas atividades de mapeamento fotogramétrico por estereoscopia. Registros históricos mostram que a primeira câmera aérea foi calibrada em Ottawa, Canadá, em 1920 pelo Dr. E. G. Deville através de colimadores de um laboratório utilizado para calibrar níveis geodésicos e câmeras terrestres. Nos Estados Unidos, a calibração de câmeras passou a ser realizada no final dos anos 30 pelo USBS (*United State Bureau of Standards*) com os primeiros testes utilizando câmeras métricas. Esse processo evoluiu ao longo dos anos 40 até que nos anos 50, o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) estabeleceu padrões para o uso de fotografias analógicas na calibração de câmeras. Com o desenvolvimento da Fotogrametria no cenário civil e militar, outras agências governamentais como o USPIC (*United State Photographic Interpretation Center*), USAF (*United State Air Force*), *Fairchild Camera Corporation* e o USGS (*United States Geological Survey*) também passaram a desenvolver métodos de calibração de câmeras com multicolimadores para uso em processos fotogramétricos (CLARKE; FRYER, 1998).

Nos anos 60, Duane C. Brown (BROWN, 1968) definiu a calibração como "*um processo de obtenção de um conjunto de parâmetros de orientação interior que inclui a modelagem das distorções provocadas pelo sistema de lentes*" e realizou importantes experimentos de calibração com uma câmera Fairchild KC-6A operando no sistema USQ-28 da USAF a bordo de uma aeronave RC-130. Nos anos 70, Dean C. Merchant (MERCHANT, 1971) realizou estudos sobre métodos para calibração de câmeras analógicas e criou um campo de calibração com pontos de controle com o objetivo de reduzir a correlação existente elementos como a distância focal e a altura de voo. Nos anos 80 e 90, o NOAA (*National Oceanic and Atmospheric*

Administration), utilizou um receptor de sinais GPS (*Global Positioning System*) instalado em uma aeronave equipada com uma câmera fotogramétrica analógica modelo RC-10 para obtenção das as coordenadas tridimensionais da câmera, possibilitando assim a execução de levantamentos fotogramétricos utilizando menor quantidade de pontos de controle em campo (MERCHANT, 2012).

Segundo Churchill Eisenhart (EISENHART, 1963), o processo de calibração de uma câmera envolve formas refinadas mensuração e como tal deve atender aos seguintes princípios: (1) o método de mensuração deve ser completamente conhecido; (2) as mensurações devem possuir uma forma de controle estatístico; e (3) o método de calibração deve ser tão próximo quanto possível das condições normais de uso do instrumento, ou seja, deve ser calibrado o sistema de mensuração. Andrade (2003) definiu que "*a calibração é imprescindível nas atividades da Fotogrametria, pois permite o conhecimento da geometria do conjunto de lentes e possibilita reconstruir corretamente os feixes de raios formadores da imagem, através do modelo matemático das equações de colinearidade que relacionam uma determinada posição no espaço imagem com a sua respectiva posição no espaço objeto*". Sendo assim, uma câmera fotogramétrica pode ser considerada calibrada quando os parâmetros que representam matematicamente os aspectos físicos da geometria interna do sistema de lentes são conhecidos, ou seja: distância principal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada, bem como os coeficientes de afinidade, sendo estes últimos determinados apenas para câmeras digitais.

Outra etapa fundamental do processo fotogramétrico consiste na determinação dos parâmetros de orientação exterior (POE), ou seja, a posição e orientação de uma fotografia ou imagem digital em relação a um referencial geodésico tridimensional. Na Fotogrametria aérea, essa determinação é conhecida como aerotriangulação e ocorre através de um ajustamento simultâneo de feixes de raios perspectivos pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) utilizando coordenadas geodésicas tridimensionais (X, Y, Z) de pontos de controle no terreno e coordenadas bidimensionais (x, y) de pontos de controle e pontos fotogramétricos distribuídos de forma homogênea no bloco de imagens. Utilizando essas observações e os parâmetros de orientação interior da câmera utilizada, a posição e orientação do centro de perspectiva da câmera e as coordenadas dos pontos fotogramétricos são

determinados no referencial geodésico tridimensional adotado utilizando o modelo matemático das equações de colinearidade.

Desde o seu surgimento, a aerotriangulação ou georreferenciamento indireto vendo sendo utilizada no mapeamento devido a sua eficiência e robustez na minimização dos erros aleatórios das observações e fatores externos como variações de temperatura, pressão e parâmetros de orientação interior da câmera utilizada. No entanto, a partir dos anos 90, a possibilidade de obtenção da posição e orientação do centro perspectivo da câmera no instante de aquisição das imagens com o uso do Sistema de Posicionamento Global e Navegação Inercial (GPS+INS) permitiu um grande avanço nos processos fotogramétricos convencionais. Um deles consistiu na possibilidade de realizar uma aerotriangulação sem a necessidade de pontos de controle no terreno para uso em projetos de mapeamento em média e pequena escala (SCHWARZ et al., 1984).

Nos últimos 20 anos, a utilização da posição e orientação extraídos da trajetória de um Sistema de Navegação Global por Satélites e Navegação Inercial (GNSS+INS) em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto (DG) ou georreferenciamento integrado (ISO) é um tema amplamente discutido e pesquisado na comunidade mundial de Fotogrametria. O uso cada vez mais frequente do GNSS+INS conectado a câmeras fotogramétricas digitais equipados com uma câmera ou um sistema multi-câmeras, permite obter a posição e orientação das imagens de forma direta e assim reduzir a quantidade de pontos de controle necessários na aerotriangulação ou até mesmo eliminar o uso de pontos de controle em algumas aplicações de mapeamento.

O georreferenciamento direto mostra-se viável na determinação direta de coordenadas tridimensionais no terreno com precisões planimétricas e altimétricas da ordem de 5-20 cm e 10-25 cm respectivamente (CRAMER et al., 2000). Entretanto, para que as informações de posição e orientação fornecidas pela trajetória do GNSS+INS possam ser determinadas para o centro de perspectiva da câmera com exatidão compatível para uso em aplicações de mapeamento, é fundamental que haja o conhecimento prévio dos parâmetros de montagem que relacionam os referenciais do centro de perspectiva da câmera e da unidade de medição inercial (IMU) do sistema GNSS+INS (SKALOUD et al, 1996; SKALOUD, 1999; CRAMER, 2001; HABIB et al., 2002; JACOBSEN, 2001; HEIPKE et al., 2002; HONKAVAARA et al., 2003).

Sem o conhecimento prévio desses parâmetros, a exatidão das informações extraídas no terreno e consequentemente a exatidão do produto final são diretamente comprometidas.

A calibração dos parâmetros de montagem inclui a determinação da posição relativa e dos ângulos de desalinhamento existentes entre os referenciais do centro de perspectiva da câmera e da unidade de medição inercial (IMU), bem como a determinação dos parâmetros de orientação interior da câmera e pode ser feita por etapas ou de forma simultânea (SCHWARZ et al., 1993; SKALOUD et al., 1996; EL-SHEIMY, 1996; MOSTAFA et al., 1997; HAALA et al., 1998; SKALOUD, 1999; CRAMER, 2001; JACOBSEN, 2001; HEIPKE et al., 2002). No método por etapas, a posição relativa e os ângulos de desalinhamento são determinados separadamente, utilizando informações de posição e orientação da trajetória do GNSS+INS em um instante “t” e as correspondentes obtidas na aerotriangulação. No método simultâneo, a posição relativa e os ângulos de desalinhamento bem como os parâmetros de orientação interior da câmera são determinados simultaneamente em uma única etapa, utilizando um bloco de imagens com configuração apropriada e uma quantidade mínima de pontos de controle no terreno (KERSTING, 2011).

1.2 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A calibração de sistemas fotogramétricos digitais multi-câmeras surgiu com o lançamento dos sistemas comerciais DMC (*Digital Mapping Camera*) da Z/I Imaging e Vexcel UCD (*UltraCamD*) da Microsoft Vexcel que ocorreu respectivamente nos anos de 1999 (HINZ et al., 2001) e 2003 (LEBERL e GRUBER, 2003). Esses sistemas são formados por diversas câmeras no seu conjunto de imageamento e utilizam métodos específicos de calibração de laboratório. Nessa calibração são determinados os parâmetros de orientação interior das câmeras bem como a posição e orientação de cada câmera em relação a um referencial “virtual da imagem sintética”. Além dos parâmetros que possibilitam a geração de imagens sintéticas, a determinação dos parâmetros de montagem e de orientação interior da própria imagem sintética é uma etapa fundamental para que as informações de posição e orientação da trajetória do GNSS+INS possibilitem determinar coordenadas tridimensionais no terreno com exatidão compatível para aplicações de mapeamento com georreferenciamento

direto. Entretanto, os fabricantes desses sistemas fornecem apenas os parâmetros de montagem em valores nominais e aproximados. Dessa forma, o refinamento desses parâmetros é uma etapa fundamental para que o georreferenciamento direto alcance a exatidão necessária para ser utilizado em aplicações de mapeamento em escalas cadastrais.

No que diz respeito à calibração de sistemas fotogramétricos multi-câmeras para a geração de imagens sintéticas, inúmeras pesquisas foram realizadas desde que os sistemas DMC e UCD foram lançados. Tang et al. (2000), Hinz et al. (2001), Zeitler e Dörstel (2002), Dörstel et al. (2003), Dörstel (2002), Madani et al. (2004), Alamús et al. (2006), Dörstel (2007), Hefele (2006), Alamús e Kornus (2008) e Madani e Shkolnikov (2008) investigaram os métodos de calibração de laboratório e a qualidade geométrica das imagens sintéticas do sistema DMC para uso em aplicações de mapeamento e analisaram os fatores que influenciam na exatidão das informações derivadas desse sistema. Leberl e Gruber (2003), Leberl et al. (2003), Kröpfl et al. (2004), Smith et al. (2005), Gruber e Ladstädter (2006), Baz et al. (2007), Smith et al. (2007), Gruber e Ladstädter (2008), Mansholt e Ladstädter (2008), Qtaishat et al. (2008a, b), Ladstädter et al. (2010), Smith et al. (2010) e Gruber e Walcher (2014) investigaram os métodos de laboratório utilizados na calibração do sistema UCD para a geração de imagens sintéticas e analisaram a qualidade geométrica das imagens sintéticas para uso em aplicações de mapeamento. Tais pesquisas serão detalhadas no Capítulo 2 que trata da revisão de literatura.

Pesquisas realizadas por Jacobsen (2000), Habib e Schenk (2001), Heipke et al. (2002), Wegmann (2002), Khoshelham et al. (2007), Habib et al. (2011) e Kersting (2011) investigaram os fatores envolvidos na calibração de um sistema fotogramétrico com uma câmera e um GNSS+INS com o objetivo de refinar os POI e POE da câmera utilizando informações de posição e orientação da trajetória do GNSS+INS. Tais pesquisas evidenciaram que a influência da alta correlação entre POI e POE, a oscilação dos POI devido a variações de condições atmosféricas, bem como imprecisões da trajetória do GNSS+INS, são fatores críticos na calibração de sistemas fotogramétricos para uso em aplicações de mapeamento em escalas cadastrais com georreferenciamento direto. Para tentar minimizar a influência desses fatores e melhorar a exatidão do georreferenciamento direto, diversos modelos matemáticos e configurações de voo para calibrar um sistema fotogramétrico já foram desenvolvidos

e testados (HONKAVAARA et al., 2003; HONKAVAARA, 2004 e KERSTING et al., 2012). Em se tratando de sistemas fotogramétricos multi-câmeras, a influência desses fatores é ainda mais crítica pois um dos referenciais envolvidos é o da imagem sintética que é definido matematicamente para a geração de imagens sintéticas e não possui referências físicas de medida. Nesse caso, é fundamental garantir que todos os parâmetros determinados matematicamente estejam o mais próximo possível das características físicas do sistema.

Há também os sistemas desenvolvidos a partir de pesquisas científicas como é o caso do SWDC-4 (*Siwei Digital Camera-4*) que passou a ser fabricado pela Beijing Geo-Vision Technologies Co. Ltd. (LI et al., 2008) e o SAAPI (Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens digitais) fabricado pela empresa Sensormap Geotecnologia e que consiste de um sistema dual de câmeras integradas a um GNSS+INS. Desenvolvido em parceria com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (FCT-UNESP), esse sistema utiliza métodos de laboratório para determinar os parâmetros necessários para a geração de imagens sintéticas (TOMMASELLI et al., 2009).

Além dos sistemas já mencionados, a empresa Engefoto Engenharia e Aerolevantamentos S.A., sediada na cidade de Curitiba-PR, adquiriu em 2010 da Trimble Germany um sistema fotogramétrico multi-câmeras TACx4 (*Trimble Aerial Camera x4*) e um GNSS+INS *Applanix POS-AV510*^{TM} da empresa Applanix Corporation. Esse sistema possui um conjunto de imageamento composto de quatro câmeras digitais que capturam imagens de forma sincronizada utilizando comandos manuais e externos através de um programa desenvolvido pela própria Trimble. Entretanto, ao contrário dos sistemas mencionados, o sistema TACx4 não possui um *workflow* de calibração e processamento para a geração de imagens sintéticas. Dessa forma, foi necessário avaliar a utilização de um método de calibração para determinar os parâmetros de orientação interior das câmeras bem como a posição e orientação de cada câmera em relação a um referencial virtual que possibilitasse a geração de imagens sintéticas.

Inicialmente, avaliou-se a possibilidade de uso dos métodos de calibração de laboratório para determinar os parâmetros necessários para a geração de imagens sintéticas. Entretanto, devido à distância focal nominal das câmeras e também à montagem das câmeras no conjunto de imageamento, a utilização dos métodos de

laboratório foi descartada pela impossibilidade de uso de um laboratório com dimensões compatíveis com a área de cobertura e a profundidade de campo dos sistemas de lentes. Para contornar tal impossibilidade, avaliou-se um método de calibração baseado em imagens aéreas tomadas em um campo de calibração que permitisse determinar os parâmetros necessários. Em seguida, para utilizar as informações de posição e orientação da trajetória do GNSS+INS no referencial da imagem sintética com exatidão compatível para uso em aplicações de mapeamento em escala cadastral com georreferenciamento direto, avaliou-se o estado da arte sobre as metodologias de calibração de sistemas com uma única câmera e um GNSS+INS utilizando métodos com imagens aéreas e a possibilidade de uso dessas metodologias na calibração do sistema TACx4.

Diante do contexto apresentado, este trabalho visa contribuir com uma pesquisa aplicada sobre o uso de um método de calibração com imagens aéreas para determinar os parâmetros necessários para a geração de imagens sintéticas do sistema TACx4. Além disso, espera-se contribuir de forma aplicada na análise de dois métodos de calibração com imagens aéreas para determinar os parâmetros de montagem do sistema TACx4 com o GNSS+INS *Applanix POS-AV510*^{TM} e a viabilidade do uso dessa calibração em aplicações de mapeamento em escala cadastral com georreferenciamento direto.

No que se refere à calibração de sistemas fotogramétricos, é importante destacar que se trata de um tema amplamente discutido e pesquisado no âmbito da Fotogrametria mundial. Entretanto, não há registros de pesquisas publicadas com o uso de métodos de calibração utilizando imagens aéreas adquiridas por sistemas fotogramétricos multi-câmeras para determinar os parâmetros necessários para a geração de imagens sintéticas, bem como os parâmetros de montagem entre os referenciais da imagem sintética e do GNSS+INS. Por fim, além da calibração do sistema TACx4, este trabalho apresenta um método automático para avaliar o georreferenciamento direto e que possibilita determinar coordenadas tridimensionais no terreno por interseção fotogramétrica e classificar os resultados obtidos de acordo com critérios de precisão e exatidão pré-estabelecidos. Neste caso, a análise automática é uma ferramenta fundamental devido à sua rapidez e eficiência para avaliar a qualidade do georreferenciamento direto e sua viabilidade em aplicações de mapeamento.

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é a calibração do sistema fotogramétrico multi-câmeras TACx4 utilizando métodos com imagens aéreas para a geração de imagens sintéticas e para o uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Como objetivos específicos pretende-se a:

I. Determinação dos POI das câmeras e parâmetros de posição e orientação de cada câmera no referencial da imagem sintética;
II. Geração da imagem sintética e análise da qualidade geométrica da imagem;
III. Determinação dos POI e parâmetros de montagem (somente ângulos de desalinhamento) entre os referenciais da imagem sintética e do GNSS+INS utilizando o método por etapas;
IV. Determinação dos POI e parâmetros de montagem (posição relativa e ângulos de desalinhamento) entre os referenciais da imagem sintética e do GNSS+INS utilizando o método simultâneo;
V. Análise do georreferenciamento direto com a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos de controle no campo de calibração;
VI. Análise do georreferenciamento direto com a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos de controle em projetos fotogramétricos independentes;
VII. Análise estatística de tendência e exatidão dos resultados obtidos no campo de calibração e nos projetos fotogramétricos independentes; e
VIII. Classificação dos resultados obtidos de acordo com critérios do Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) conforme preconizado nas especificações técnicas definidas pelos órgãos reguladores da cartografia nacional para mapeamento em escala cadastral.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresentou as considerações iniciais, justificativas e contribuições da tese bem como os objetivos

gerais e específicos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica com ênfase no estado da arte sobre calibração de sistemas fotogramétricos para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados, detalhando as características do sistema TACx4, o campo de calibração, os modelos matemáticos de calibração e os algoritmos computacionais desenvolvidos, bem como os experimentos realizados. O Capítulo 4 apresenta uma análise estatística dos resultados obtidos no campo de calibração e nos projetos fotogramétricos independentes e a classificação conforme critérios estabelecidos nas especificações técnicas da cartografia nacional. Por último, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho, bem como as recomendações e sugestões para a continuidade de pesquisas relacionadas com o tema.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura e fundamentação teórica dos tópicos relacionados com o presente trabalho. Os itens 2.2 e 2.3 descrevem respectivamente sobre câmeras e sistemas fotogramétricos digitais bem como os métodos de calibração existentes. O item 2.4 descreve sobre os aspectos teóricos dos sistemas de posicionamento global e navegação inercial e os itens 2.5 e 2.6 descrevem, respectivamente, sobre o georreferenciamento direto e integrado do sensor. Por fim, o item 2.7 descreve os aspectos teóricos e práticos sobre a calibração de sistemas fotogramétricos digitais.

2.2 CÂMERAS E SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITAIS

As câmeras fotogramétricas digitais surgiram entre os anos de 1990 e 2000 e marcaram a transição dos processos analógico e analógico-digital da Fotogrametria para o processo integralmente digital de aquisição de imagens, processamento e extração de informações. Para impactar décadas de existência e hegemonia das câmeras analógicas no mercado mundial, as câmeras digitais apresentam alguns diferenciais frente às câmeras analógicas como: grande campo de visão e área de abrangência, alta resolução geométrica e radiométrica, sensores lineares (*pushbroom linear sensor*) e matriciais (*frame sensor*) que possibilitam a aquisição de imagens multiespectrais, além de possibilitar a visualização de imagens em ambiente estéreo (FRICKER, 2001).

Apesar da rápida aceitação da tecnologia fotogramétrica digital no mercado mundial, um longo período de transição foi necessário até que as câmeras fotogramétricas digitais pudessem substituir definitivamente as câmeras analógicas. Um aspecto fundamental das câmeras digitais que contribuiu sobremaneira para que essa substituição ocorresse mais rapidamente foi o fato de que o método de aquisição de imagens passou a ser feito com sensores de estado sólido tipo CCD (*Charged-Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), instalados diretamente no plano focal da câmera, substituindo o filme fotográfico.

No mercado mundial de Fotogrametria, as câmeras digitais matriciais para uso em aplicações de mapeamento fotogramétrico foram classificadas inicialmente de acordo com a resolução do sensor em megapixels, que representa o número total de pixels do sensor. (1) câmeras de pequeno formato com sensores de dimensão inferior a 16 megapixels; (2) câmeras de médio formato com sensores de dimensões entre 16 e 50 megapixels e (3) câmeras de grande formato com sensores de dimensão superior a 50 megapixels (PETRIE, 2003). Além da resolução do sensor, as câmeras também foram classificadas quanto a capacidade de capturar imagens monocromáticas (imagens com 1 banda) ou imagens coloridas em composição cor-verdadeira ou falsa-cor (imagens com 3 bandas). Os modelos de pequeno formato DCS-200 (Figura 1a), DCS-420 e DCS-460 da série DCS (*Digital Camera System*) foram os primeiros lançados pela Kodak Nikon entre anos de 1992 e 1996 com sensores CCD com dimensão de 1.5 megapixel. Os modelos DCS-560, DCS-660 e DCS-760 (Figura 1b), foram lançados entre os anos de 1996 e 2001 com sensores CCD de dimensão de até 6 megapixels. Em seguida, esses modelos foram substituídos pelos modelos DCS Pro 14n (Figura 1c) e DCS Pro 14n SLR equipados com sensores CMOS com resolução de 13.5 megapixels (PETRIE, 2003).

FIGURA 1 - MODELOS DE CÂMERAS KODAK DCS.

(a) (b) (c)

FONTE: MCGARVEY (2004).
LEGENDA: (a) DCS-200, (b) DCS-760 e (c) DCS Pro 14n.

Um dos primeiros sistemas fotogramétricos equipado com câmeras de pequeno formato da série DCS e sistemas de posicionamento global e navegação inercial foi desenvolvido na *University of Calgary* do Canadá e utilizou duas câmeras modelo DCS-420, sendo uma instalada na posição vertical e outra na posição inclinada com um ângulo de 30°. Esse sistema foi equipado com um sensor inercial da *Honeywell* e um receptor de sinais GPS da *Ashtech* para registro e obtenção de

informações de posição e atitude que eram utilizadas na fase de retificação das imagens (PETRIE, 2003). Outro sistema fotogramétrico equipado com câmera de pequeno formato foi desenvolvido na *Bath Spa University College* do Reino Unido com a finalidade de ser utilizado em aplicações de mapeamento de áreas costeiras (PETRIE, 2003). O ADPS (*Aerial Digital Photographic System*) era equipado com uma câmera modelo DCS-420/460 instalada sobre um berço com amortecedores e também com um receptor de sinais GPS para fornecer informações de posicionamento, além de uma unidade de controle (Figura 2a). Há também outros sistemas fotogramétricos como a MCS (*Multi-Camera Array*) e os modelos ADC (*Airborne Digital Camera*) e AMDC (*Airborne Multiespectral Digital Camera*) da Tetracam (Figura 2b) que foram desenvolvidos utilizando câmeras digitais de pequeno formato com sensores CCD e CMOS combinando três ou quatro sensores no sistema para a aquisição de imagens multiespectrais sem a necessidade de utilizar recursos de interpolação. Todos esses são exemplos de sistemas que passaram a ser amplamente utilizados nos Estados Unidos devido a integração de câmeras com sensores GPS+INS fornecendo uma solução integrada para se obter o georreferenciamento e possibilitar a retificação das imagens coletadas durante um voo. Esses sistemas passaram a ser empregados principalmente em atividades de levantamento fotogramétrico para monitoramento de agricultura e áreas de reflorestamento (PETRIE, 2003).

FIGURA 2 - SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS ADPS E TETRACAM.

(a) (b)

FONTE: PETRIE (2003); TETRACAM (2016).
LEGENDA: (a) ADPS e (b) TETRACAM ADC.

As câmeras fotogramétricas digitais de médio formato foram lançadas logo após as de pequeno formato e equipadas com sensores CCD de resolução de 16 a 50 megapixels. Os principais fabricantes de sensores passaram inicialmente a

desenvolver as câmeras fotogramétricas de médio formato com sensores CCD da Kodak com resolução de 4k x 4k pixels (16 megapixels) a 4k x 5.4k pixels (22 megapixels) com filtros “padrão bayer” para coleta de imagens em composição de cor verdadeira (RGB) ou falsa cor (CIR) (PETRIE, 2003). De maneira similar às câmeras de pequeno formato, os principais fabricantes passaram a desenvolver sistemas fotogramétricos com câmeras de médio formato para fins de mapeamento e dentre os principais sistemas fotogramétricos desenvolvidos está o DSS (*Digital Sensor System*) da empresa Applanix (Figura 3a). Esse sistema é equipado com uma câmera digital de médio formato modelo 322 com resolução de 22 megapixels, conjunto de lentes da *Carl Zeiss* com distância focal de 35, 45, 60 e 80 mm e integrada ao sistema GNSS+INS modelo POS-AV^{TM} fabricado pela própria Applanix. Outros exemplos de câmeras de médio formato para fins fotogramétricos são a DigiCAM da empresa IGI equipada com uma câmera *Hasselblad* com resolução de 22 e 39 megapixels (Figura 3b) e também a AIC (*Aerial Industrial Camera*) desenvolvida pela empresa *Rollei* e equipada com uma câmera PhaseOne com resolução de 16 e 39 megapixels e conjunto de lentes com distância focal de 35, 47, 60 e 72 mm (Figura 3c). Atualmente, os sistemas fotogramétricos DSS, DigiCAM e AIC são oferecidos com câmeras fotogramétricas digitais classificadas como de grande formato, ou seja, com sensores CCD que possuem resolução superior a 50 megapixels bem como coleta simultânea de imagens multiespectrais (RGB+NIR).

FIGURA 3 - SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS E CÂMERAS DE MÉDIO FORMATO.

(a) (b) (c)

FONTE: PETRIE (2005).
LEGENDA: (a) APPLANIX DSS, (b) IGI DigiCAM e (c) Rollei AIC.

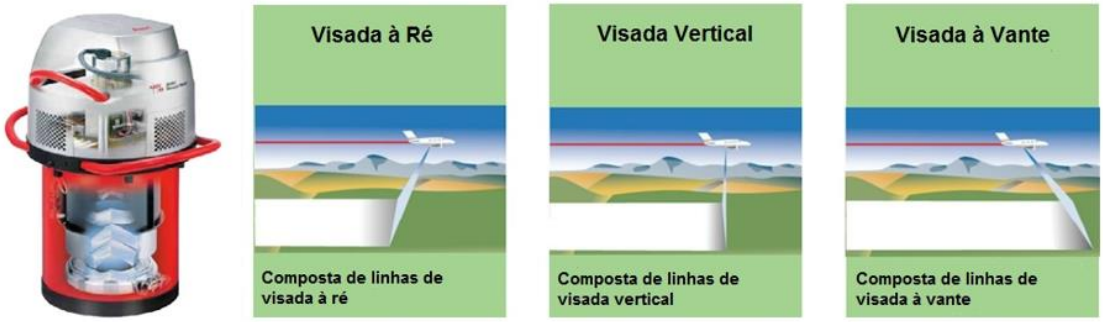
As câmeras fotogramétricas digitais de grande formato surgiram com duas tecnologias no sistema de captura e geração de imagens: (1) único sensor (*single cameras*) e (2) múltiplos sensores (*multiple cameras*), além de um modelo com

sensores de varredura (*linear array*). Os primeiros modelos de câmeras fotogramétricas digitais de grande formato de único sensor foram fabricados nos Estados Unidos para serem utilizados pela força aérea e por agências do governo. Um deles utilizou o sensor CA-260/50 fabricado pela Recon/Optical e equipado com um sensor CCD de 5k x 10k pixels (50 megapixels) fabricado pela Dalsa. Outro modelo conhecido como UHRRC (*Ultra High Resolution Reconnaissance Camera*) foi desenvolvido pela BAE Systems para uso da U.S. Navy e utilizou um sensor CCD de 9.2k x 9.2k pixels (85 megapixels) fabricado pela Fairchild Imaging. Devido ao alto custo e ao nível de complexidade na produção de sensores CCD com dimensões superiores a 50 megapixels, os modelos comerciais de câmeras fotogramétricas digitais com um único sensor evoluíram lentamente no mercado mundial. Atualmente, a evolução tecnológica e a diminuição dos custos na produção de sensores CCD com dimensões superiores a 50 megapixels possibilita a fabricação de modelos de câmeras fotogramétricas equipadas com um único sensor com dimensões entre 80 e 120 megapixels. Frente a isso, as câmeras equipadas com a tecnologia de múltiplos sensores passaram a ser desenvolvidas comercialmente devido a capacidade de combinar diversos sensores CCD para capturar e gerar imagens com maior área de cobertura. Os modelos de câmeras fotogramétricas digitais de grande formato com múltiplos sensores possuem uma abordagem significativamente diferente quando comparadas aos modelos com um único sensor. Em geral, são equipados com câmeras de médio formato que são instaladas em um sistema de imageamento que possibilita a captura imagens de forma sincronizada ou sinóptica. As imagens resultantes (ou sub-imagens) de cada câmera são então retificadas e mosaicadas para formar uma única imagem de maior dimensão que é conhecida como “imagem sintética ou virtual” resultante da combinação de duas ou mais imagens.

A ADS (*Airborne Digital Sensor*) foi o primeiro e único modelo comercial de câmera fotogramétrica digital de varredura lançado no mercado e foi apresentado pela Leica Geosystems no congresso da ISPRS (*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) que ocorreu em julho do ano 2000 em Amsterdam. O princípio de aquisição de imagens é baseado no sistema de varredura tri-linear desenvolvido pelo DLR (*Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*) da Alemanha cujas faixas de imagem são obtidas nas posições de visada anterior, nadir e posterior, possibilitando a geração de imagens estereoscópicas (Figura 4). Cada sensor CCD possui 12000

pixels de dimensão com resolução radiométrica de 12 bits (4096 níveis de cinza) por CCD e sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB) e infravermelho próximo (NIR) (SANDAU et al., 2000). Durante a aquisição de imagens, os objetos presentes na cena são coletados simultaneamente por todos os sensores formando faixas com 100% de sobreposição (FRICKER, 2001). Na etapa de processamento, as imagens brutas são retificadas utilizando informações da unidade GNSS+INS que determina continuamente a posição e orientação dos sensores possibilitando o georreferenciamento direto das imagens (CRAMER; STALLMANN, 2001; CRAMER, 2003).

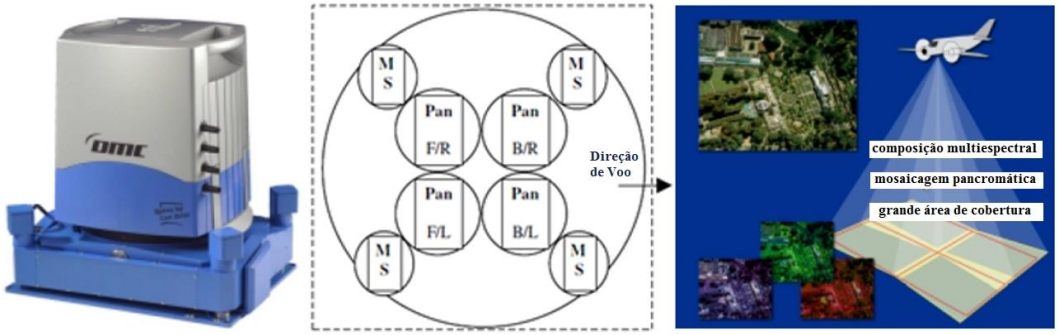
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO SISTEMA ADS.



FONTE: FRICKER (2001).

A DMC (*Digital Mapping Camera*) foi o primeiro modelo comercial de câmera fotogramétrica digital de grande formato com tecnologia de múltiplos sensores lançado no mercado pela Z/I Imaging em setembro de 1999, alguns meses antes da Leica Geosystems apresentar o sistema ADS40. Esse sistema é composto de um total de oito câmeras sendo quatro centrais (PAN) e quatro periféricas (MS). As câmeras centrais capturam imagens pancromáticas com dimensão de 7k x 4k pixels enquanto as câmeras periféricas capturam imagens com sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB) e infravermelho próximo (NIR) com dimensão de 3k x 2k pixels (Figura 5). As câmeras pancromáticas estão posicionadas de modo oblíquo possibilitando a geração de áreas de sobreposição destinadas à extração de pontos homólogos e as câmeras multiespectrais capturam imagens que correspondem a toda a área de imageamento. Todas as câmeras (pancromáticas e multiespectrais) possuem sincronismo para disparo simultâneo e são utilizadas na etapa de geração da imagem sintética multiespectral com dimensão de 13k x 8k pixels (TANG et al., 2000).

FIGURA 5 - PRINCÍPIO DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DO SISTEMA DMC.



FONTE: TRADUZIDO E ADAPTADO DE TANG et al. (2000); HEIER et al. (2002).

A calibração do sistema DMC para geração de imagens sintéticas envolve duas etapas denominadas de “calibração de sensores” e “calibração de plataforma” (HEIER et al., 2002; ZEITLER; DÖRSTEL, 2002). A calibração de sensores é dividida em duas fases. A primeira compreende a determinação da geometria do sistema de lentes de cada sensor, ou seja, distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2) e parâmetros de afinidade e não ortogonalidade (b_1, b_2) e é realizada por métodos de laboratório (colimadores) e o programa computacional *Australis* (FRASER, 1997). A segunda fase compreende a calibração radiométrica das imagens visando corrigir variações de sensibilidade dos sensores de modo a permitir a geração de uma imagem sintética radiometricamente homogênea (Figura 6).

FIGURA 6 - CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DO SISTEMA DMC.

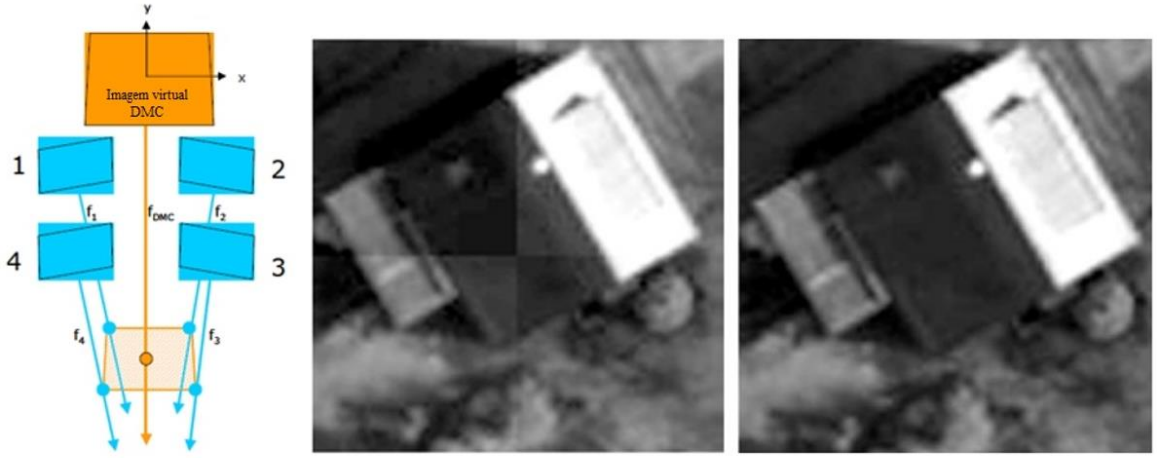
(a) (b) (c)

FONTE: HEIER et al. (2002).
LEGENDA: (a) SENSOR DO SISTEMA DMC, (b) IMAGEM ORIGINAL e (c) IMAGEM RADIOMETRICAMENTE CORRIGIDA.

A calibração de plataforma consiste na determinação dos parâmetros que possibilitam a geração da imagem sintética e também é dividida em duas fases. A primeira consiste no refinamento dos parâmetros de posição e orientação dos sensores em relação ao sistema de projeção da imagem sintética, cujos valores iniciais foram obtidos diretamente através de medidas realizadas em laboratório. Esses valores são refinados a partir de um ajustamento simultâneo (*Bundle Block Adjustment–BBA*) pelo MMQ que utiliza como observações as coordenadas de pontos homólogos extraídos nas áreas de sobreposição. Após o refinamento dos parâmetros de orientação relativa, a segunda fase compreende a retificação e mosaicagem de cada uma das sub-imagens no plano da imagem sintética com uma distância focal sintética pré-estabelecida (em geral utiliza-se f_{DMC} igual a 120 mm) para modelar eventuais diferenças de escala existentes em cada sensor.

Em seguida, para gerar a imagem sintética multiespectral, os parâmetros de transformação das imagens de cada banda de cor (R, G, B e NIR) em relação à imagem sintética pancromática são determinados a partir de pontos extraídos por técnicas de correlação de imagens com LSM (*Least Square Matching*). Por último, eventuais diferenças radiométricas existentes na imagem sintética são corrigidas utilizando o mesmo procedimento de calibração radiométrica aplicado aos sensores individuais (Figura 7).

FIGURA 7 - CALIBRAÇÃO DE PLATAFORMA DO SISTEMA DMC.



(a) (b) (c)

FONTE: TRADUZIDO DE HEIER et al. (2002).
LEGENDA: (a) PROJEÇÃO DAS IMAGENS, (b) SUB-IMAGENS DA IMAGEM SINTÉTICA E (c) IMAGEM SINTÉTICA RADIOMETRICAMENTE CORRIGIDA.

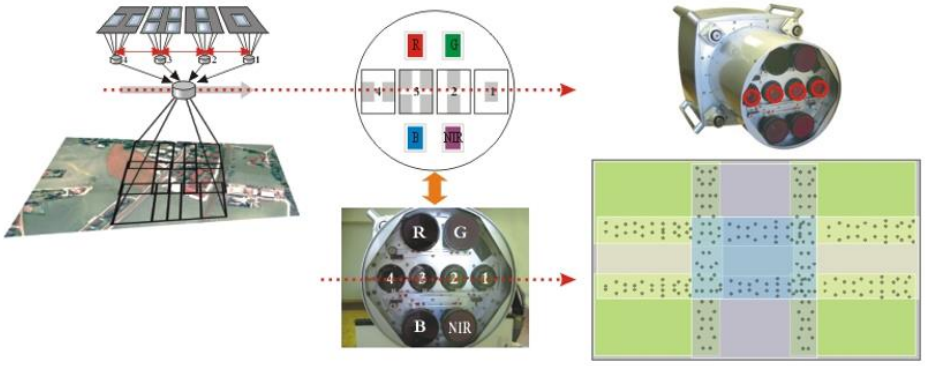
A câmera VEXCEL UCD (UltraCamD) foi o segundo modelo comercial de câmera fotogramétrica digital de grande formato com tecnologia de múltiplos sensores lançado no mercado em 2003 pela Vexcel-Imaging Áustria (atualmente Microsoft Vexcel). Trata-se também de um sistema de oito câmeras sendo quatro delas pancromáticas e alinhadas em um plano focal. Essa configuração permite gerar imagens sintéticas a partir da combinação de sub-imagens em relação a um sensor de referência denominado de “sensor mestre” que define um sistema de coordenadas para geração de uma imagem sintética com dimensões de 11.5k x 7.5k pixels (LEBERL; GRUBER, 2003). Além dos sensores pancromáticos, o sistema possui quatro sensores com sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB) e infravermelho próximo (NIR) dimensões de 4k x 2.7k pixels que possibilita a geração de imagens sintéticas multiespectrais (Figura 8).

FIGURA 8 - SISTEMA VEXCEL UCD.

FONTE: LEBERL; GRUBER (2003).

Diferentemente do sistema DMC no qual a aquisição das imagens pancromáticas e multiespectrais ocorre de forma sincronizada, no sistema UCD a aquisição das imagens ocorre de forma sequencial denominada de “sinóptica” que significa “mesmo lugar”. No método sinóptico, um dos sensores pancromáticos (sensor mestre) é utilizado para definir o sistema de coordenadas da imagem sintética e comandar o disparo sequencial dos demais sensores em intervalos pré-definidos (Figura 9). Deve-se notar que nesse método, tanto o sensor mestre quanto os demais são disparados na mesma posição tridimensional, porém, as imagens são adquiridas com intervalos de um milissegundo e durante o movimento da aeronave (LEBERL; GRUBER, 2003).

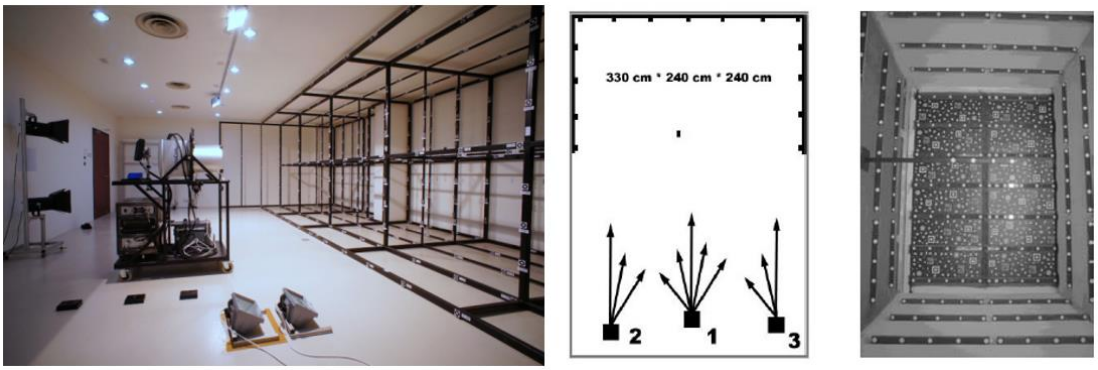
FIGURA 9 - MÉTODO DE AQUISIÇÃO DO SISTEMA VEXCEL UCD.



FONTE: LEBERL; GRUBER (2003).

A calibração do sistema UCD para geração de imagens sintéticas é realizada em um laboratório com 240 alvos fixados nas paredes laterais, no teto e no chão, além de alvos adicionais localizados na área central (Figura 10), cujas coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) são conhecidas com precisão de 50µm. Nesse laboratório, são obtidos conjuntos de imagens a partir de três estações pré-definidas onde a câmera é inclinada e rotacionada para se obter uma completa distribuição de pontos e um conjunto de observações com alta redundância (Figura 10). Isso resulta em um total de aproximadamente 14.000 observações de coordenadas bidimensionais extraídas nas imagens pancromáticas e multiespectrais com precisão estimada de 1,3µm. O ajustamento para obtenção dos parâmetros dos sensores é realizado de forma simultânea (*Bundle Block Adjustment–BBA*) utilizando o programa BINGO. Nesse processo são determinadas a posição de cada sensor, além da distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2) e parâmetros de afinidade e não ortogonalidade (b_1, b_2) (KROPFL et al., 2004).

FIGURA 10 - LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA VEXCEL UCD.



FONTE: ADAPTADO DE KROPFL et al. (2004); IMAGEMAPS (2016).

Embora os sistemas DMC e UCD possuam diferentes métodos de aquisição de imagens (sincronizado e sinóptico), ambos possuem o mesmo sistema de sensores pancromáticos com maior resolução geométrica quando comparados com os sensores multiespectrais. Dessa forma, para gerar imagens sintéticas com a máxima resolução geométrica e espectral do sistema de imageamento, as imagens multiespectrais são fusionadas com as imagens pancromáticas em um processo conhecido como "*panchromatic sharpening*" ou simplesmente "*pansharpening*" e que envolve uma transformação entre as bandas pancromáticas e multiespectrais (Figura 11) (PERKO et al., 2004).

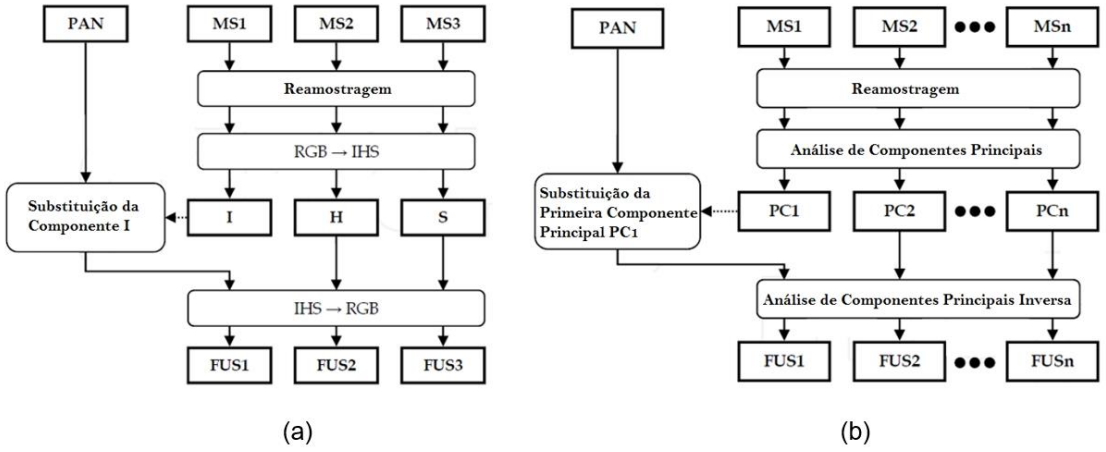
FIGURA 11 - PROCESSO DE FUSÃO DE IMAGENS POR *PANSHARPENING*.

FONTE: TRADUZIDO DE PERKO et al. (2004).

Dentre os principais modelos utilizados na fusão de imagens por pansharpening, destacam-se o de transformada Wavelet (*Wavelet Transform–WT*), transformada RGB<>IHS e análise de componentes principais (*Principal Component Analysis–PCA*). No modelo RGB<>IHS, as bandas multiespectrais são transformadas do modelo de cor RGB para o modelo IHS (*Intensity, Hue and Saturation*) e a componente "I" é substituída pela banda pancromática (PAN). Aplicando-se a transformação inversa (IHS para RGB) obtém-se uma imagem multiespectral com a resolução geométrica da imagem pancromática (Figura 12a). No modelo de transformação por análise de componentes principais, as bandas multiespectrais são

transformadas em componentes principais (denominadas de PC_1, PC_2 e PC_3) e a primeira componente principal (PC_1) é substituída pela banda pancromática (PAN). Aplicando-se a transformação inversa (componentes principais para RGB) obtém-se uma imagem multiespectral com a resolução geométrica da imagem pancromática (Figura 12b) (FONSECA et al., 2011).

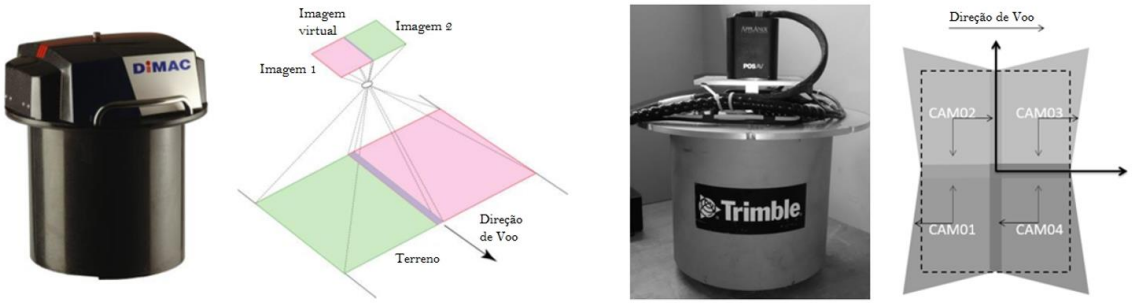
FIGURA 12 - FLUXO DE ETAPAS DO PROCESSO DE *PANSHARPENING*.



FONTE: TRADUZIDO DE FONSECA et al. (2011).
LEGENDA: (a) MODELO RGB<>IHS e (b) MODELO PCA.

Outros modelos comerciais de câmeras fotogramétricas digitais de grande formato com tecnologia de múltiplos sensores não utilizam recursos de fusão para geração de imagens sintéticas como é o caso das câmeras DiMAC (*Digital Modular Aerial Camera*) e AIC (*Aerial Industrial Camera*) desenvolvidas pela DiMAC Systems e RolleiMetric (Figura 13a). Esses sistemas possuem configurações compostas de duas ou quatro câmeras no sistema de imageamento para adquirir e gerar imagens sintéticas multiespectrais de forma direta por interpolação, sem a necessidade de utilizar o método de fusão de imagens. O sistema AIC com a configuração com quatro câmeras é também conhecido como TACx4 (*Trimble Aerial Camera*) e é composto de quatro câmeras fotogramétricas digitais de médio formato equipadas com sensores PhaseOne P65+ de 60,5Mp com sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB), com resolução radiométrica de 16bit por sensor, além de possuir um sistema de lentes Schneider Apo-Digitar com distância focal nominal de 72 mm (Figura 13b). As câmeras são fixadas em posições oblíquas no sistema de imageamento que possibilitam a aquisição de imagens com áreas de sobreposição que são utilizadas na etapa de geração da imagem sintética.

FIGURA 13 - SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS MULTI-CAMERAS.



(a) (b)

FONTE: TRADUZIDO DE PETRIE E WALKER (2007); O autor (2014).
LEGENDA: (a) DiMAC e (b) TACx4.

A calibração do sistema TACx4 para geração de imagens sintéticas e integração com uma unidade GNSS+INS para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto é um dos objetos da presente pesquisa e maiores detalhes sobre esse processo serão apresentados no Capítulo 3.

2.3 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS FOTOGRAMÉTRICAS DIGITAIS

Conforme mencionado no capítulo anterior, a calibração de uma câmera fotogramétrica digital segue os princípios estabelecidos por Churchill Eisenhart (EISENHART, 1963), ou seja, envolve formas refinadas de mensuração e como tal devem atender aos seguintes princípios: (1) o método de mensuração deve ser completamente conhecido; (2) as mensurações devem possuir um estado de controle estatístico; e (3) o método de calibração deve ser tão próximo quanto possível das condições normais de uso do instrumento, ou seja, deve ser calibrado o sistema de mensuração. Duane C. Brown define a calibração como sendo um processo de obtenção de um conjunto de parâmetros de orientação interior que inclui a modelagem das distorções provocadas pelo sistema de lentes (BROWN, 1968). Assim como definida por Andrade (2003), a calibração é imprescindível nas atividades da Fotogrametria pois permite conhecer a geometria projetiva das imagens e reconstruir corretamente os feixes de raios através do modelo matemático das equações de colinearidade. Sendo assim, uma câmera fotogramétrica pode ser considerada calibrada quando os parâmetros que representam matematicamente os aspectos

físicos da geometria interna do sistema de lentes são conhecidos, ou seja: distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2), bem como os coeficientes de afinidade (b_1, b_2), sendo os últimos determinados para câmeras digitais com sensores de estado sólido (CCD e CMOS).

Uma definição mais atual sobre calibração de câmeras e o seu uso na Fotogrametria é obtida em Honkavaara (2004) que a define como "*um procedimento que estabelece, sob condições específicas, os modelos e parâmetros que relacionam as medições de um instrumento com os valores de suas grandezas estabelecidos através de padrões*". De um modo geral, a calibração de uma câmera fotogramétrica, tanto analógica quanto digital, consiste em determinar os parâmetros que representam matematicamente os aspectos físicos da geometria interna da câmera. Nesse processo, tais parâmetros são considerados como incógnitas no modelo matemático das equações de colinearidade (1) e (2). Esses parâmetros permitem que a condição de colinearidade existente entre um ponto no espaço objeto (X_A, Y_A, Z_A), o centro de perspectiva da câmera (X_0, Y_0, Z_0) e o ponto correspondente no espaço imagem (x_a, y_a) no instante da captura da imagem seja estabelecida matematicamente.

$$x_a = x_p - f\frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{21}(Y_A - Y_0) + m_{31}(Z_A - Z_0)}{m_{13}(X_A - X_0) + m_{23}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} + \Delta x \quad (1)$$

$$y_a = y_p - f\frac{m_{12}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{32}(Z_A - Z_0)}{m_{13}(X_A - X_0) + m_{23}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} + \Delta y \quad (2)$$

$$r = \sqrt{\left(x_a - x_p\right)^2 + \left(y_a - y_p\right)^2} \quad (3)$$

$$\Delta_x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x_a - x_p) + P_1\left[r^2 + 2\left(x_a - x_p\right)^2\right] + 2P_2(x_a - x_p)(y_a - y_p) + b_1(x_a - x_p) + b_2(y_a - y_p) \quad (4)$$

$$\Delta_y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y_a - y_p) + 2P_1(x_a - x_p)(y_a - y_p) + P_2\left[r^2 + 2(y_a - y_p)^2\right] + b_1(y_a - y_p) \quad (5)$$

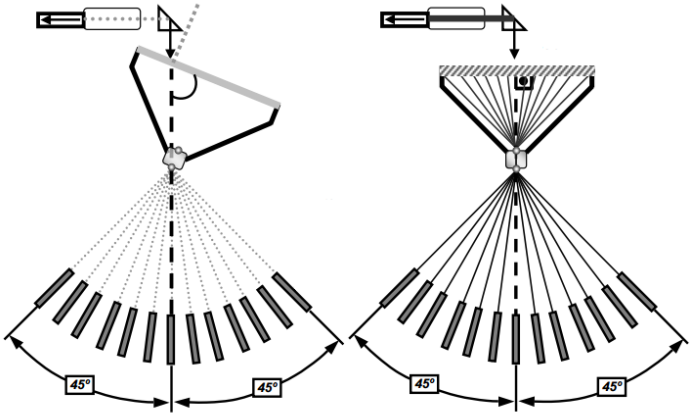
$$M_Z(\kappa).M_Y(\varphi).M_X(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} = cos\varphi.cos\kappa \\ m_{12} = cos\omega.sen\kappa + sen\omega.sen\varphi.cos\kappa \\ m_{13} = sen\omega.sen\kappa - cos\omega.sen\varphi.cos\kappa \\ m_{21} = -cos\varphi.sen\kappa \\ m_{22} = cos\omega.cos\kappa - sen\omega.sen\varphi.sen\kappa \\ m_{23} = sen\omega.cos\kappa + cos\omega.sen\varphi.sen\kappa \\ m_{31} = sen\varphi \\ m_{32} = -sen\omega.cos\varphi \\ m_{33} = cos\omega.cos\varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

Nas equações (1) e (2), X_0, Y_0, Z_0 e X_A, Y_A, Z_A representam respectivamente as coordenadas tridimensionais do centro de perspectiva da câmera e de um ponto "A", ambos no sistema referencial do espaço objeto (terreno). Ainda nas equações (1) e (2), x_a, y_a e x_p, y_p representam respectivamente as coordenadas bidimensionais do ponto "A" e as coordenadas do ponto principal da câmera, ambas no sistema referencial do espaço imagem. Os elementos m_{11} a m_{33} (6) representam a matriz de rotação em relação aos ângulos de Euler $M_Z(\kappa).M_Y(\varphi).M_X(\omega)$ da câmera no sistema referencial do espaço objeto. Os elementos Δx (4) e Δy (5) representam a correção das distorções do sistema de lentes no modelo de Conrady-Brown (BROWN, 1971) onde os elementos K_1, K_2, K_3 representam os coeficientes de distorção radial simétrica e P_1, P_2 representam os coeficientes de distorção descentrada. Os elementos b_1, b_2 representam os coeficientes de afinidade que modelam a possibilidade de diferença de escala e não ortogonalidade dos elementos do sensor CCD, ou seja, os pixels que compõem o sensor podem possuir diferentes dimensões bem como o eixo óptico não ser perfeitamente perpendicular ao plano do sensor CCD (GALO, 1993). No entanto, com o avanço tecnológico atual na construção dos sensores CCD e CMOS das câmeras digitais, esses parâmetros tem se mostrado insignificantes na etapa de calibração (REMONDINO; FRASER, 2006).

A calibração de uma câmera fotogramétrica digital é feita de maneira similar às câmeras analógicas e utiliza métodos de laboratório ou de campo. A calibração de laboratório geralmente é executada pelas empresas fabricantes das câmeras e utiliza métodos baseados em multicolimadores sob um ambiente devidamente controlado (CLARKE; FRYER, 1998, MIKHAIL et al., 2001, ANDRADE, 2003 e CRAMER, 2004). O método do multicolimador (Figura 14) utiliza um conjunto de colimadores montados em um arranjo angular conhecido e preciso. O colimador é um projetor óptico com uma cruz montada em seu plano com foco no infinito. Dessa forma, a luz que projeta

a cruz emerge do colimador em raios paralelos e quando projetada em uma câmera é focalizada em seu plano focal (ANDRADE, 2003).

FIGURA 14 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE LABORATÓRIO: MULTICOLIMADOR.

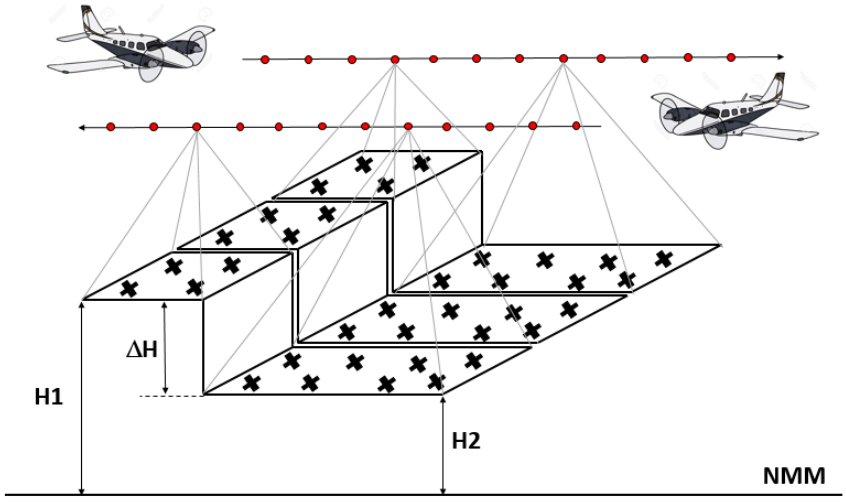


FONTE: ADAPTADO DE ANDRADE (2003).

Os métodos de campo oferecem soluções mais completas para a calibração de câmeras fotogramétricas, pois o grande número de observações e graus de liberdade resultantes no ajustamento possibilita controlar estatisticamente o processo de calibração (ANDRADE, 2003). Além disso, a influência das condições externas (como variação de pressão, temperatura, umidade, entre outros fatores) contribui para determinar parâmetros em condições próximas das operacionais. De acordo com Jacobsen (2001), Wegmann (2002), Jacobsen (2004b), Honkavaara et al. (2003) e Honkavaara et al. (2008), a necessidade de se refinar os parâmetros de calibração da geometria interna de uma câmera fotogramétrica deve ser considerada sempre que possível. Parâmetros como a distância focal e as coordenadas do ponto principal possuem variações temporais e essa variação no processo de orientação direta da câmera não é absorvida pelos parâmetros de orientação exterior (HABIB; MORGAN, 2005). Dentre os métodos de campo utilizados para calibrar uma câmera fotogramétrica, o de Campos Mistos (*Method of Mixed Ranges–MMR*) teve sua origem em uma pesquisa desenvolvida por Dean Merchant, em 1967 onde se sugeriu a utilização de um campo tridimensional para calibração de sistemas fotográficos, com o objetivo de minimizar a correlação existente entre os elementos de orientação interior e exterior de uma câmera. O método baseia-se na variação altimétrica de pontos de campo (Figura 15), como forma de eliminar a dependência linear entre elementos de orientação interna e elementos de orientação externa da câmera (X_0/x_p,

Y_0/y_p e Z_0/f) através da adoção de um campo de calibração com grande variação de altitude no relevo e alvos sinalizados (MERCHANT, 1972).

FIGURA 15 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO CAMPO: CAMPOS MISTOS.

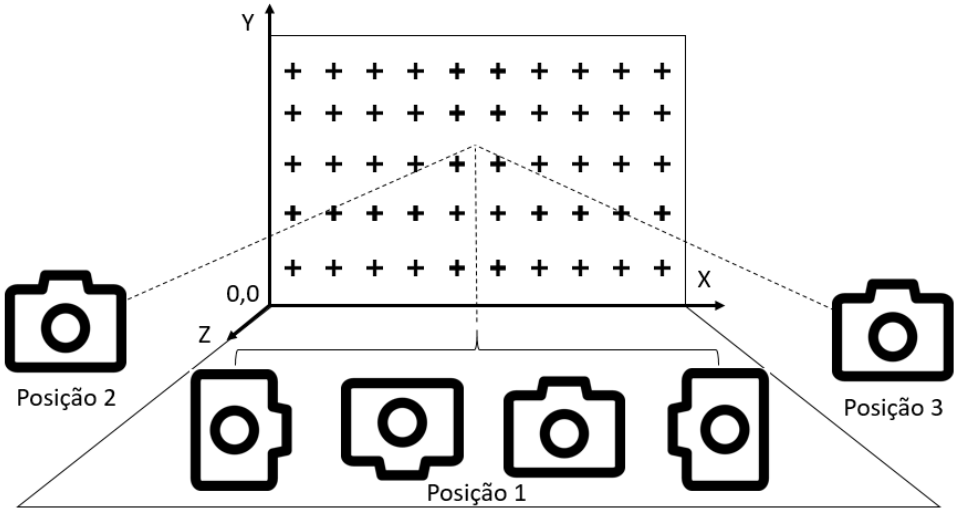


FONTE: ADAPTADO DE MERCHANT (1971).

Outro método de campo também utilizado é o de Câmeras Convergentes que emprega o uso de imagens tomadas em ângulos convergentes e rotacionadas em torno do eixo Z em ângulos de 90° (BROWN, 1971). Essa técnica foi desenvolvida por Duane C. Brown em 1971 para calibrar uma câmera fotogramétrica utilizada na Missão Apolo 14 uma vez que a tomada de fotos em posição convergente possibilita minimizar a correlação existente entre os parâmetros de distância focal e ponto principal com as coordenadas do centro de perspectiva, além de separar os coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada (BROWN, 1971). Segundo Andrade (2003), utilizando as fotos tomadas com um ângulo de convergência de 90°, a deficiência de posto da matriz dos coeficientes das equações normais é reduzida de 8 para 7. Diferentemente do Método de Campos Mistos onde são necessários 8 graus de liberdade, sendo 7 para materializar o referencial e o oitavo para definir a escala vertical, no Método de Câmeras Convergentes, a convergência das fotos sob um ângulo próximo de 90°, elimina a necessidade do oitavo grau de liberdade, necessitando apenas fixar arbitrariamente o referencial. Esse procedimento pode ser realizado fixando-se o centro de perspectiva e os ângulos de orientação de uma foto com valores iguais a zero, permitindo que se utilize marcas artificiais nas fotos quando não é possível estabelecer alvos.

Na prática, a calibração de uma câmera pelo Método de Câmeras Convergentes pode ser realizada utilizando uma parede com alvos que possuem coordenadas vinculadas a um sistema cartesiano tridimensional local cuja origem está localizada no canto inferior esquerdo, o eixo X está orientado no sentido horizontal da esquerda para a direita, o eixo Y está orientado no sentido vertical de baixo para cima e o eixo Z é ortogonal ao plano XY definindo um sistema dextrógiro. A obtenção das imagens é feita a partir das posições 1, 2 e 3 sendo que na posição 1 as imagens são tomadas com diferentes rotações (Figura 16).

FIGURA 16 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE CAMPO: CÂMERAS CONVERGENTES.



FONTE: ADAPTADO DE ANDRADE (2003).

Os métodos de calibração utilizados para determinar os parâmetros da geometria interna de uma câmera aérea bem como os requisitos necessários para sua utilização no georreferenciamento direto são objetos de estudo de diversos pesquisadores. Jacobsen (2001) utilizou blocos de imagens com diferentes configurações de faixas de voo da OEEPE (*European Organization for Experimental Photogrammetric Research*) para determinar a distância focal, elementos de posição relativa e os ângulos de desalinhamento de uma câmera equipada com um sensor GPS/IMU. Wegmann (2002) avaliou os resultados obtidos na determinação dos parâmetros de distância focal, coordenadas do ponto principal, elementos de posição relativa e ângulos de desalinhamento utilizando blocos de imagens com faixas de voo em diferentes escalas e direções. Honkavaara (2003), avaliou blocos de imagens com diferentes configurações de faixas de voo e distribuição de pontos de controle na

determinação dos parâmetros de orientação interior e de montagem de um sistema fotogramétrico. Honkavaara (2004) também analisou a significância e a correlação dos parâmetros de orientação interior de um sistema fotogramétrico e apresentou uma configuração mínima de faixas de voo indicadas para os processos de calibração. Blázquez e Colomina (2010) pesquisaram sobre o processo de calibração dos parâmetros da geometria interna de um sistema fotogramétrico multi-câmeras envolvendo a determinação dos parâmetros de distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada para cada câmera que compõem o sistema. Mitishita et al. (2009) realizaram pesquisas para verificar a estabilidade do sistema óptico de uma câmara de baixo custo sob temperaturas de 0° e 25° tendo como objetivo principal verificar o comportamento dos parâmetros de orientação interior e sua estabilidade sob diferentes temperaturas. Em Mitishita et al. (2010) foram realizadas pesquisas com a calibração de uma câmera de baixo custo utilizando as metodologias de calibração independente e calibração em serviço (*On the Job Calibration*) com o objetivo de avaliar as influências de cada metodologia na determinação dos parâmetros de orientação interior. Debiasi (2012) investigou diferentes metodologias de calibração de uma câmera de baixo custo integrada fisicamente a um sistema de tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) com o objetivo de avaliar a precisão e exatidão de trabalhos fotogramétricos realizados com a integração destes sensores.

Todos os métodos de calibração desenvolvidos possuem um desafio em comum que surge ao fixar valores numéricos para os parâmetros do modelo matemático adotado. Os modelos matemáticos utilizados na Fotogrametria são derivados de equações projetivas centrais, portanto, há uma forte correlação entre os parâmetros de orientação exterior (coordenadas do centro de perspectiva X_0, Y_0, Z_0) e de orientação interior (x_p, y_p, f) e entre os próprios parâmetros de orientação interior (x_p, y_p, f, K_1, K_2, K_3, P_1 e P_2) para o caso de imagens aéreas verticais adquiridas em um terreno plano. Nos processos de calibração que utilizam métodos analíticos, todos os parâmetros são recuperados em um mesmo ajustamento com o método dos mínimos quadrados, logo, a matriz das derivadas parciais apresenta dependência linear dos seguintes pares de parâmetros: X_0/x_p, Y_0/y_p e $(Z-Z_0)/f$ sendo esse último mais presente em terrenos planos. Os métodos de campo para calibração de câmeras diferem entre si, essencialmente pela forma de minimizar a correlação entre os

parâmetros de orientação interior e exterior da câmera de modo a obter parâmetros mais próximos dos valores físicos.

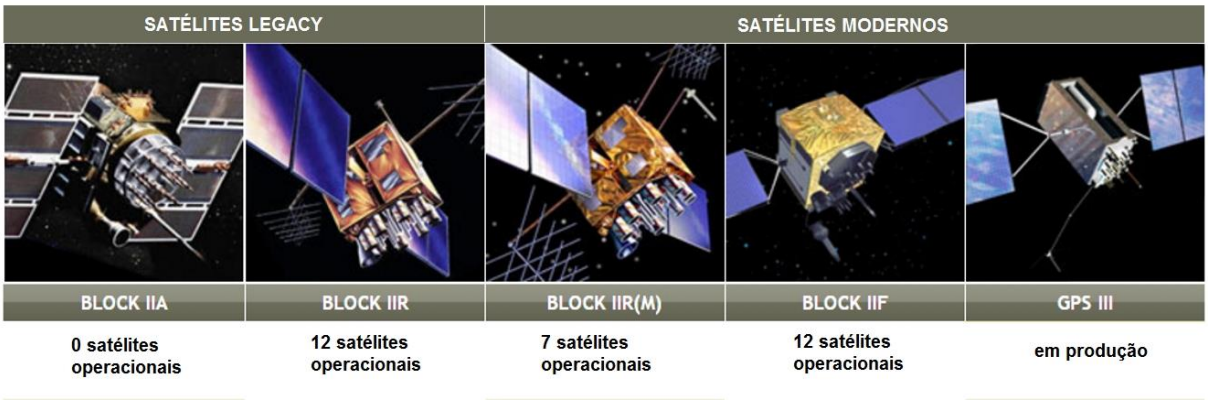
2.4 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL E NAVEGAÇÃO INERCIAL

O sistema de posicionamento global e navegação inercial, cuja sigla atual é “GNSS+INS”, consiste na integração de um receptor de sinais do sistema de navegação global por satélites (GNSS) e uma unidade de medição inercial (IMU). A sigla GNSS (*Global Navigation Satellite System*) surgiu na década de 90 durante a 10° Conferência de Navegação Aérea e os principais sistemas que compõem o GNSS são: GPS, GLONASS, GALILEO e mais recentemente o BeiDou. Essa sigla foi também reconhecida pela Associação Internacional de Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization–ICAO*) como fonte primária de navegação no século XXI, pois o uso integrado desses sistemas revolucionou as atividades que necessitam de navegação e posicionamento (MONICO, 2007).

O NAVSTAR-GPS (*NAVigation Satellite with Time and Ranging–Global Positioning System*) ou simplesmente GPS é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo DoD (*Department of Defense*) dos Estados Unidos com o intuito de ser o principal sistema de radionavegação para uso das Forças Armadas Norte-Americanas (*U.S. Army*). Esse sistema é resultado da fusão de dois programas de radionavegação de abrangência global, o *Timation* e o *System 621B* de responsabilidade da Marinha e Força Aérea, respectivamente. Em razão da exatidão proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil como navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, etc. O NAVSTAR-GPS foi considerado operacional em abril de 1985 com 24 satélites em órbita, no entanto, desde 1983 o sistema já era utilizado para fins de posicionamento geodésico. Em setembro de 2005 foi lançado o primeiro satélite GPS modernizado e em novembro de 2012 foram lançados 10 satélites sendo 7 do bloco IIRM e 3 do bloco IIF que transmitem sinais de uma nova fase onde portadora denominada L5. O último lançamento do bloco IIF foi realizado em fevereiro de 2016 completando a constelação de 12 satélites. Maiores informações sobre o sistema GPS podem ser obtidas no site oficial *GPS: The Global Positioning System*

pertencente ao governo dos Estados Unidos. Atualmente, a constelação NAVSTAR-GPS conta com 31 satélites operacionais (MONICO, 2007). A Figura 17 apresenta a evolução do sistema de satélites da constelação NAVSTAR-GPS.

FIGURA 17 - SATÉLITES DO SISTEMA NAVSTAR-GPS.



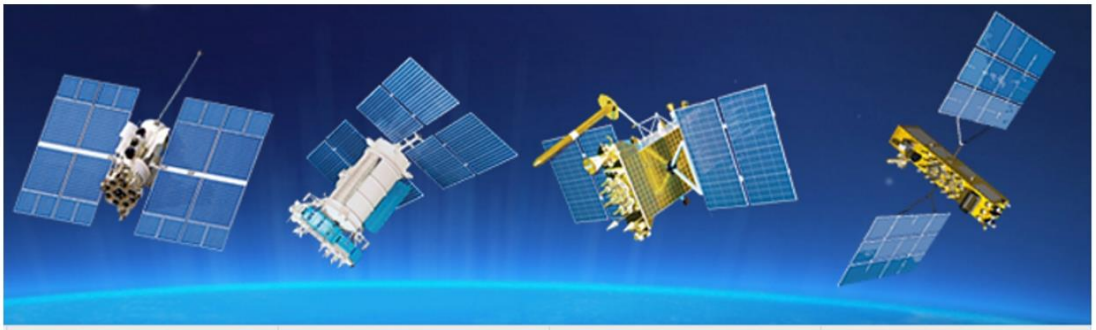
FONTE: TRADUZIDO DE *GPS: The Global Positioning System* (2016).

O princípio básico de navegação através do sistema NAVSTAR-GPS consiste na determinação de coordenadas a partir de medidas de distância entre o usuário e quatro satélites, no mínimo. Conhecendo-se as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas tridimensionais da antena no receptor do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. O problema reduziria à solução de um sistema de três equações, à três incógnitas. A quarta medida é necessária devido ao não sincronismo entre os relógios dos satélites com o do usuário, adicionando uma incógnita (MONICO, 2007). A navegação, bem como o posicionamento com o sistema NAVSTAR-GPS, pode ser obtida através do Serviço de Posicionamento Padrão (*Standard Positioning Service–SPS*) ou Serviço de Posicionamento Preciso (*Precise Positioning Service–PPS*). O GPS é composto de três segmentos principais: (1) segmento espacial: consiste no mínimo de 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, em uma altitude de aproximadamente 20.200 km. A inclinação do plano orbital em relação ao Equador é de 55° e o período orbital é de 12 horas siderais. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora. Na concepção original, quatro tipos de satélites fizeram parte do projeto. Eles são denominados satélites do Bloco I, II, IIA e IIR (IIRM). A quarta

geração de satélites, os do Bloco IIR, denomina-se Bloco IIF ("F" refere-se à *Follow-on* – continuação). Esses satélites incorporaram a modernização do GPS (MONICO, 2007). (2) segmento de controle: é composto de estações monitoras em terra e tem como objetivo principal monitorar continuamente o sistema de satélites, determinar o sistema de tempo GPS, predizer as efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites e atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite. Essas cinco estações de monitoramento, pertencem à AAF (*American Air Force*), em conjunto com as sete do NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*) compõem as estações monitoras GPS do DoD (*Department of Defense*) (MONICO, 2007). (3) segmento de usuários: é constituído pelos receptores GPS, os quais devem ser apropriados para os propósitos a que se destinam, tal como em Navegação, Geodésia ou outra atividade qualquer. A categoria de usuários pode ser dividida em civil e militar. Os militares fazem uso dos receptores de sinais GPS para estimar suas posições e deslocamentos quando realizam manobras de combate e de treinamento. Durante a operação *Desert Storm*, na Guerra do Golfo em 1991, vários receptores de sinais GPS foram utilizados para auxílio no deslocamento nas regiões desérticas. Muitas outras atividades militares fazem uso do posicionamento com receptores de sinais GPS, como por exemplo, na navegação de mísseis. Atualmente, há uma grande quantidade de receptores no mercado civil, para as mais diversas aplicações, limitadas apenas pela imaginação dos usuários, o que demonstra que o GPS realmente atingiu sua maturidade (MONICO, 2007).

O GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), cujo princípio é similar ao NAVSTAR-GPS, é outro sistema de posicionamento desenvolvido na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) para fornecer o posicionamento tridimensional e velocidades, além de informações do tempo em diversas condições climáticas e de amplitude local, regional ou global. Foi declarado operacional em 1995, mas não teve a devida manutenção por alguns anos. Atualmente encontra-se com a constelação completa (31 satélites), entretanto, em novembro de 2012 apenas 24 satélites estavam em operação (Figura 18). Todas as informações sobre o desenvolvimento do GLONASS bem como dados do sistema podem ser obtidas no site oficial *GIAC: GLONASS Information and Analysis Center* pertencente ao governo da Rússia.

FIGURA 18 - SATÉLITES DO SISTEMA GLONASS.



GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K	GLONASS-K2
1982-2005	2003-2016	2011-2018	2017+
Descontinuado	Em uso	Desenvolvimentos de validação da órbita	Em desenvolvimento

FONTE: TRADUZIDO DE *GIAC: GLONASS Information and Analysis Centre* (2016).

De maneira similar ao NAVSTAR-GPS, o sistema GLONASS é composto de três segmentos principais: (1) segmento espacial: consiste de uma constelação de satélites que estão distribuídos em três planos orbitais separados de 120º e inclinação de 64,8º, cada um com oito satélites igualmente espaçados. As órbitas são aproximadamente circulares e arranjadas de forma que não ocorra o fenômeno de ressonância, ou seja, uma perturbação adicional na órbita do satélite devido à comensurabilidade do período do satélite com o período de rotação da Terra (MONICO, 2007). Como consequência, o mesmo período orbital se repete somente a cada 8 dias siderais. Por outro lado, um dos satélites de cada um dos planos orbitais, irá ocupar a mesma posição no céu no mesmo instante em cada dia. A altitude dos satélites é da ordem de 19.100 km e período orbital de 11 horas e 15 minutos. O GLONASS transmite sinais em duas bandas, também denominadas portadoras L1 e L2, as quais são moduladas por dois códigos binários e as mensagens de navegação. Entretanto, cada satélite tem sua própria frequência, diferentemente do GPS. Como as frequências do GPS e GLONASS são relativamente próximas, isso permite o uso de uma antena combinada e um amplificador comum no mesmo equipamento, o que tem facilitado o desenvolvimento de equipamentos que rastreiam satélites de ambos os sistemas simultaneamente (SEEBER, 2003).

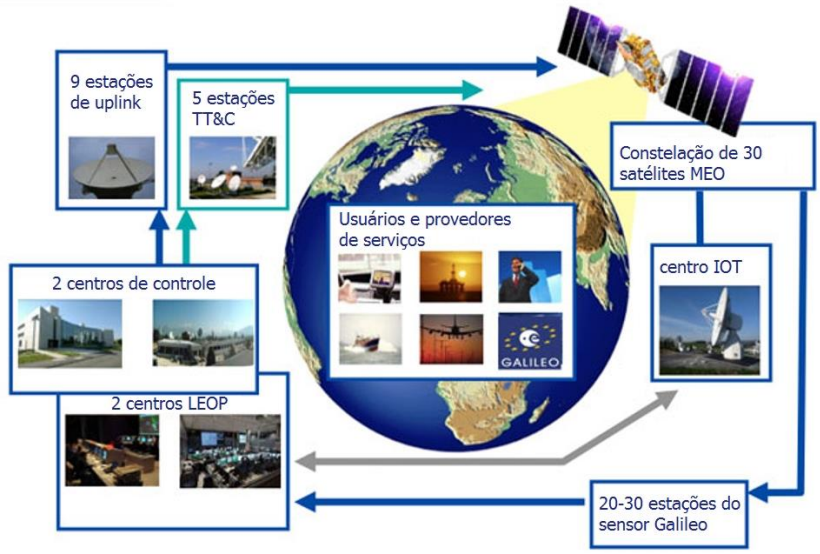
As mensagens de navegação transmitidas nas ondas portadoras contêm informações sobre as órbitas (efemérides), almanaque e a situação dos satélites. As

efemérides são atualizadas a cada 30 minutos e tem como origem o centro do intervalo de 30 minutos. Elas contêm posições e velocidade, além de acelerações para a época de referência. A geração de satélites desenvolvida para substituir os satélites mais antigos é denominada GLONASS-M (M para modificado). Em relação aos satélites mais antigos, ela deverá ter vida útil de 7 anos, melhor estabilidade dos relógios, comunicação entre os satélites, operação autônoma e estrutura do formato de navegação alterada. Tratam-se de algumas características bastante similares ao do Bloco IIR do GPS (MONICO, 2007). (2) segmento de controle: é responsável por predizer as órbitas dos satélites, transferir as efemérides, corrigir os relógios e almanaques em cada um dos satélites, sincronizar os relógios dos satélites com o sistema de tempo do GLONASS e estimar as discrepâncias entre o sistema de tempo do GLONASS e o TUC$_{US}$. O segmento de controle é composto pelo sistema de controle central, central de sincronização de tempo (*Central Synchronizer*), estações de comando e rastreio e estações de rastreamento a LASER. O centro de controle terrestre é localizado em Moscou e as estações de monitoramento são distribuídas homogeneamente no território da antiga União Soviética. (3) segmento de usuários: O segmento de usuários está diretamente associado aos receptores, tal como no GPS. Embora o GLONASS seja efetivamente um sistema de posicionamento e navegação por satélite, o número de receptores GLONASS disponíveis é bastante reduzido, se comparado com o GPS (MONICO, 2007).

O GALILEO surgiu após a decisão do governo americano não autorizar outras nações a participarem do controle do sistema NAVSTAR-GPS. A partir dessa decisão a União Europeia recomendou o desenvolvimento de um sistema de navegação e posicionamento para uso próprio. Em 1999, o Ministério de Transportes Europeu definiu que o sistema de navegação denominado GALILEO iria contribuir com o sistema GNSS como sendo um sistema de navegação global de controle civil e totalmente compatível com o sistema NAVSTAR-GPS e GLONASS. A fase de desenvolvimento teve como objetivo principal o estudo dos requisitos iniciais e de arquitetura do sistema. Após aprovação da continuidade do projeto, iniciou-se o desenvolvimento do sistema. Essa fase teve como objetivo principal a consolidação dos requisitos iniciais, desenvolvimento dos satélites e das estações em terra, bem como, validação da órbita. O lançamento do primeiro satélite (GIOVE-A e GIOVE-B) experimental ocorreu em 2005 e foi denominado de GIOVE (*Galileo in-Orbit Validation*

Element). O lançamento do segundo satélite ocorreu em 2007 e em 2008 foram lançados os quatro primeiros satélites operacionais de um total de 30 satélites. Após inúmeros atrasos no projeto, em 2011 a ESA (*European Space Agency*) confirmou o lançamento dos primeiros satélites apelidados de "validação em órbita". Todas as informações sobre o desenvolvimento do GALILEO bem como dados do sistema podem ser obtidas no site oficial *GIC: GALILEO Information Centre* pertencente à União Europeia.

FIGURA 19 - ESTRUTURA DO SISTEMA GALILEO.



FONTE: TRADUZIDO DE *GIC: GALILEO Information Centre* (2016).

Da mesma forma que o GLONASS e o NAVSTAR-GPS, o sistema GALILEO é composto de 3 segmentos: (1) segmento espacial: consiste atualmente de uma constelação de 18 satélites em órbita e a previsão é que essa constelação esteja completa com 30 satélites em 2020 sendo 27 operacionais e 3 de reserva (Figura 19). Os satélites desse sistema possuem órbita de 23.600 km altura e a disposição dos satélites também é diferenciada de maneira a cobrir qualquer ponto da superfície terrestre, até mesmo latitudes próximas aos polos (acima dos 75 graus). Os satélites do GALILEO circulam em três órbitas diferentes com 10 satélites em cada órbita e distantes 120° uma da outra (MONICO, 2007). (2) segmento de controle: a estrutura disponível para o EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) está sendo aproveitada ao máximo, com o acréscimo de algumas estações, em razão da abrangência global. Ao todo, aproximadamente 30 estações distribuídas globalmente, GSS (*Galileo Sensor Stations*) darão suporte a determinação de órbitas e

sincronização de tempo. Elas proporcionarão os dados para os dois GCC (*Galileo Control Center*). Um desses centros será responsável pela geração das mensagens de navegação e sistema de tempo, enquanto o outro fica responsável pelo controle da integridade. Esse segmento será interconectado por uma rede de comunicação, com duas cadeias independentes, com operação quase autônoma. Isso garantirá o controle da integridade interna e das operações. (3) segmento de usuários: da mesma forma que nos demais sistemas, o segmento de usuários do Galileo envolverá os vários tipos de receptores que serão industrializados, sendo que atualmente já existem receptores com a capacidade para rastrear os sinais do GIOVE A e do GIOVE B (MONICO, 2007).

O *BeiDou Navigation Satellite System* ou simplesmente BeiDou ("Ursa Maior" em chinês) é um sistema de navegação global por satélite desenvolvido de maneira independente pela República Popular da China. A ideia surgiu em 1983 da iniciativa de desenvolver um sistema de posicionamento de abrangência global utilizando satélites geoestacionários oferecendo um serviço com tecnologia estável e confiável e com tecnologia acessível aos usuários contribuindo para as atividades de navegação por satélite e consequentemente para o desenvolvimento econômico e social do país (MONICO, 2007). O sistema BeiDou é composto de três partes: (1) segmento espacial que contém 5 satélites em órbita geoestacionária e 30 satélites em órbita não geoestacionária. (2) segmento de controle compreende as estações de controle e de monitoramento e (3) segmento de usuários inclui todos os usuários com receptores compatíveis com o sistema além de outros sistemas de navegação por satélite. Em 2000 o sistema BEIDOU iniciou os primeiros experimentos com o lançamento de 2 satélites experimentais. Entre 2003 e 2007 o sistema lançou 3 satélites sendo 2 experimentais e 1 operacional. Em 2009 foi lançado somente 1 satélite operacional, sendo esse número aumentado para 5 satélites operacionais em 2010. Entre 2011 e 2012 foram lançados um total 9 satélites, todos operacionais (Figura 20). Quando totalmente implementado, o sistema irá fornecer cobertura global com serviços de posicionamento e navegação incluindo dois tipos de modos de serviço: um serviço aberto e um serviço autorizado. O serviço aberto fornecerá a localização, velocidade e tempo com precisão de posicionamento absoluto de 10 metros, a velocidade com precisão de 0,2m/s e o tempo com precisão de 10ns. O

serviço autorizado fornecerá a posição, velocidade e tempo com maiores níveis de precisão.

FIGURA 20 - EVOLUÇÃO DO SISTEMA BEIDOU.

FONTE: TRADUZIDO *BNSS: BeiDou Navigation Satellite System* (2016).

O INS (*Inertial Navigation System*) ou AHRS (*Attitude Heading Reference System*) é um sistema de navegação e orientação composto por uma unidade de medição inercial (*Inertial Measurement Unit–IMU*) e um módulo de navegação. A unidade de medição inercial é constituída de três acelerômetros e três giroscópios que medem respectivamente as acelerações lineares e de gravidade em um referencial tridimensional específico (baseada nas leis do movimento de Newton) bem como as variações angulares de cada eixo no respectivo referencial. Umas das grandes vantagens do sistema inercial é que uma vez que sua origem esteja definida, a navegação e registro da trajetória ocorrem de forma independente. Entretanto, o acúmulo de erros ao longo do tempo faz com que sua navegação seja confiável apenas para curtos períodos de tempo.

Os sensores inerciais têm sido utilizados para orientação, navegação e controle desde o ano de 1920, no entanto, Charles Stark Draper, engenheiro e cientista americano, fundador do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), é considerado o “pai da navegação inercial” por ter demonstrado em 1949 o potencial do uso de um sistema inercial para navegação a bordo de aeronaves e submarinos militares e comerciais (Figura 21), cujo princípio de funcionamento exclui a dependência de referências externas ou fontes de sinal (DRAPER, 1981). No final da década de 60 e início da década de 70, os sistemas inerciais tipo *strapdown*, equipados com giroscópios a LASER e computadores de alto desempenho, capazes

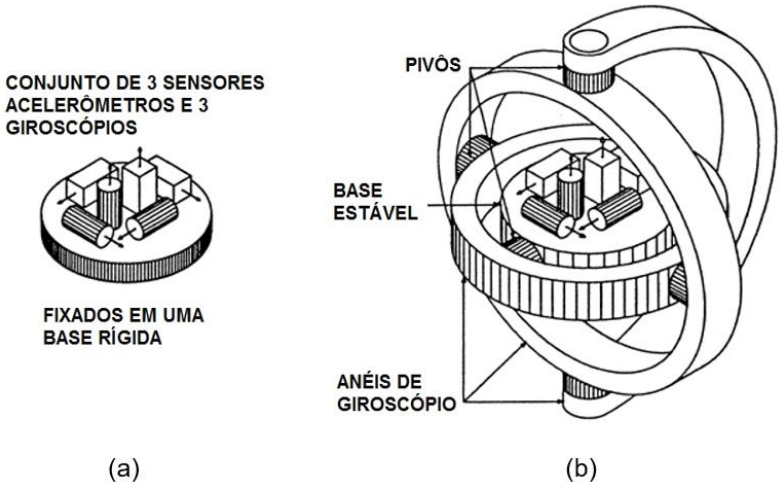
de processar uma grande quantidade de dados de navegação passaram ser utilizados em aplicações militares e na Geodésia (BRUTON et al., 2001).

FIGURA 21 - SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL DESENVOLVIDO EM 1950.

FONTE: *SMITHSONIAN National Air and Space Museum* (2016).

De um modo geral, um sistema inercial pode ser classificado em dois tipos, ou seja, plataforma mecânica (*gimballed platform*) ou plataforma analítica (*strapdown platform*) (KING, 1998; KOCAMAN, 2003) (Figura 25). O termo *strapdown* é utilizado para designar um sistema sensor que possui três acelerômetros e três giroscópios montados sobre eixos paralelos e ortogonais de modo que as informações de posição e orientação estejam vinculadas a um sistema de referência. Quando esse sistema sensor é montado juntamente com um sistema eletrônico de controle, tem-se uma unidade de medição inercial (IMU). Os sistemas de plataforma mecânica utilizam uma plataforma servo-mecânica para registrar os movimentos lineares e angulares. Os sistemas de plataforma analítica determinam os movimentos lineares e angulares utilizando recursos computacionais. Na plataforma analítica, a aceleração linear e os movimentos angulares ao longo dos três eixos são registrados respectivamente pelos acelerômetros e giroscópios a partir dos movimentos do veículo (aéreo ou terrestre) no qual o sistema está instalado. Esses sistemas não possuem os dispositivos mecânicos como os existentes nos sistemas de plataforma mecânica e geralmente são utilizados pelas empresas em sistemas comerciais de navegação e sistemas fotogramétricos de aquisição de imagens (LIMA, 2005 e MARQUES FILHO, 2011).

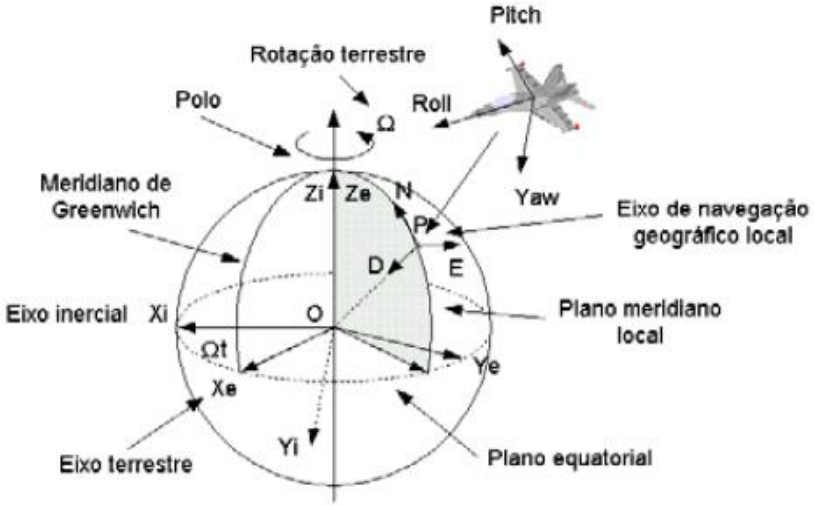
FIGURA 22 - PLATAFORMAS DE SISTEMA INERCIAL.



FONTE: TRADUZIDO DE GREWAL et al. (2007).
LEGENDA: (a) MODELO *STRAPDOWN* e (b) MODELO *GIMBALLED*.

Os sistemas de coordenadas são utilizados para referenciar geograficamente um determinado corpo ou veículo. Portanto para se definir a posição de um objeto, deve-se especificar o sistema de coordenadas no qual o objeto está inserido. Os sistemas de coordenadas utilizados em navegação inercial consistem de três eixos ortogonais entre si, sendo que os mais utilizados são (GREWAL et al., 2007) (1) Sistema ECI (*Earth-Centered-Inertial*): sua origem está no centro de massa da Terra sendo que seu eixo “Xi” aponta para a linha do Equador, seu eixo “Zi” aponta para o Pólo Norte e seu eixo “Yi” define um sistema dextrógiro. O sistema ECI é dito “inercial” por ser fixado com relação a um corpo estelar distante; (2) Sistema ECEF (*Earth-Centered, Earth-Fixed*): sua origem está no centro de massa da Terra sendo que seu eixo “Xe” passa pelo cruzamento entre a linha do Equador e o Meridiano de Greenwich, seu eixo “Ze” passa pelo pólo norte e seu eixo “Ye” define um sistema dextrógiro; (3) Sistema NED (*North-East-Down*): conhecido também como sistema de navegação local, sua origem pode ser estabelecida em qualquer ponto do globo terrestre, sendo que seu eixo X (N) aponta para o norte geográfico, seu eixo Z (D) aponta para o centro da Terra e seu eixo Y (E) define um sistema dextrógiro e (4) Sistema RPY (*Roll-Pitch-Yaw*): sistema cujos eixos são fixos num veículo, constituindo assim uma estrutura denominada plataforma. O eixo X (*Roll*) do sistema RPY deve apontar para a direção frontal do movimento do veículo, o eixo Y (*Pitch*) deve ser ortogonal a X e apontar para a direita enquanto que o eixo Z (*Yaw*) aponta para baixo. A Figura 23 apresenta um esquema destes sistemas de referência.

FIGURA 23 - SISTEMAS DE COORDENADAS ENVOLVIDOS NO SISTEMA INERCIAL.



FONTE: SANTANA et al. (2004).

O GNSS+INS é sistema amplamente utilizado no georreferenciamento de nuvens de pontos de sistemas de varredura LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e câmeras fotogramétricas analógicas e digitais uma vez que o GPS/GNSS fornece medidas precisas de posição e o INS medidas de orientação e aceleração durante a sua trajetória. A grande vantagem do uso do GNSS+INS é que os sistemas atuam de forma complementar, ou seja, enquanto o GPS+GNSS fornece informações de posição em baixa frequência e por longos períodos de tempo, o INS fornece informações de orientação e aceleração em alta frequência. Isso permite obter o posicionamento GPS/GNSS sob condições em que há perda na solução das ambiguidades ou perda de sinal de satélites, determinando uma trajetória mais precisa e confiável em qualquer aplicação que seja utilizada, seja para fins civis ou militares. A integração das informações de um GNSS+INS normalmente é feita através do Filtro do Kalman que é um método matemático utilizado para predizer valores a partir de um conjunto de observações, estimando a sua incerteza entre o valor predito e o valor medido. Nesse processo, o maior peso é dado para observações com menor grau de incerteza, permitindo que os valores preditos estejam mais próximos dos valores de referência (KALMAN, 1960).

Para o georreferenciamento direto de câmeras fotogramétricas, é necessário que o tempo de disparo da câmera esteja sincronizado ao tempo do GNSS+INS de modo que os parâmetros de orientação exterior (posição e orientação) possam ser

obtidos de forma precisa no instante de aquisição da imagem (CRAMER; STALLMANN, 2001). Além disso, para que as informações de posição de orientação sejam determinadas para o centro de perspectiva da câmera, é necessário que haja o conhecimento dos parâmetros de montagem (que compreendem elementos de posição relativa e ângulos de desalinhamento) existentes entre a unidade de medição inercial e o centro de perspectiva da câmera. Esses parâmetros são obtidos a partir de um procedimento de calibração que compara os parâmetros fornecidos pela unidade de medição inercial e os parâmetros de orientação exterior obtidos de forma indireta a partir de pontos de controle (PINTO; FORLANI, 2002; NIU et al., 2006).

2.5 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DO SENSOR

O georreferenciamento consiste na obtenção de informações de um objeto no tempo e no espaço e essas informações compreendem um conjunto de parâmetros tais como: tempo, posição, velocidade e orientação de um objeto (SKALOUD, 1999). Na Fotogrametria, por exemplo, a posição e orientação de uma imagem pode ser obtida de duas maneiras. A primeira é conhecida como “georreferenciamento indireto” e ocorre através de cálculos baseados em modelos matemáticos e um conjunto de observações realizadas no espaço imagem e no espaço objeto. A segunda é conhecida como “georreferenciamento direto” e ocorre através da medição direta da posição e orientação de sensor, seja uma câmera ou um sensor de varredura LASER, em um determinado instante “t”. No georreferenciamento direto para uso em aplicações fotogramétricas, a posição e orientação do centro de perspectiva de uma câmera no instante de aquisição da imagem, é derivada de um GNSS+INS e utilizada de forma direta através dos parâmetros de calibração do sistema, possibilitando que as coordenadas dos pontos de interesse no espaço objeto sejam determinadas por interseção fotogramétrica, ou seja, sem a necessidade de se utilizar um processo de ajustamento simultâneo (JACOBSEN, 2004a; CRAMER, 2005). O uso integrado do sistema de posicionamento global e de navegação inercial em aplicações fotogramétricas de georreferenciamento direto surgiu na década de 80 (SCHWARZ et al., 1984) e há mais de 25 anos vem sendo pesquisado pela comunidade mundial. As primeiras pesquisas investigaram as fontes de erro e a precisão da integração de um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS) com um sistema de navegação

inercial (INS) no posicionamento cinemático em ambientes terrestres e aéreos. Além disso, investigou-se a aplicação do filtro de Kalman na incorporação das medições de dupla frequência com informações de um sistema inercial (DGPS+INS) aerotransportado na aerotriangulação sem nenhum ponto de controle e com uma quantidade reduzida de pontos de controle em campo (CANNON; SCHWARZ, 1991 e SCHWARZ et al., 1993).

Schwarz et al. (1993) apresentaram um modelo geral para determinar a posição e atitude do centro de perspectiva de uma câmera a partir de medições de um sistema GPS+INS e também discutiram as vantagens de utilização em projetos desenvolvidos na *University of Calgary* no Canadá. A determinação de informações de posição e orientação de um GPS+INS modelo *Liton* LTN-90-100 e o uso do filtro de Kalman foi investigada em um projeto fotogramétrico na escala 1:6000, junto às universidades de Calgary e Stuttgart. Os resultados de posição e orientação do centro de perspectiva da câmera foram comparados com valores obtidos em aerotriangulação e as discrepâncias encontradas nos pontos de controle indicaram a necessidade de modelar os erros de sincronismo entre a câmera e o sistema GPS+INS (SKALOUD et al., 1996; HAALA et al.,1998).

Pesquisas realizadas entre os anos de 1999 e 2000 avaliaram os aspectos relacionados com a integração de informações de posição e orientação de um sistema GPS+INS utilizando filtros de Kalman, visando a redução parcial e total de pontos de controle na aerotriangulação. As precisões obtidas foram analisadas com especificações técnicas de projetos de mapeamento fotogramétrico e homologadas pela OEEPE durante a realização testes de integração de sistemas GPS+INS para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto e comparação com processos como a aerotriangulação (CRAMER, 1999; SKALOUD, 1999; ABDULLAH, 2000; HEIPKE, 2000; HEIPKE et al., 2002; MOSTAFA; SCHWARZ, 2000; SKALOUD; SCHWARZ, 2000, CRAMER; STALLMANN, 2001; JACOBSEN, 2001; MOSTAFA; HUTTON, 2001; KOCAMAN, 2003). Nos anos seguintes, pesquisas realizadas com o georreferenciamento direto, identificaram a existência de paralaxe vertical nos modelos estereoscópicos que resultaram em uma baixa precisão na determinação das coordenadas no espaço objeto, impossibilitando o uso em algumas aplicações de mapeamento fotogramétrico. Um dos fatores relacionados com esse efeito é a qualidade dos parâmetros de orientação interior da câmera e a influência

dos erros aleatórios da trajetória fornecidas pelo sistema GPS+INS (conhecidos como *shift* e *drift*) que provocam deslocamentos lineares na posição e rotação no eixo Z (*heading*) ao longo do tempo, quando alinhado em uma determinada faixa de voo. Para que esses efeitos sejam minimizados, é necessário que as precisões da posição e orientação fornecida pelo sistema GPS+INS sejam mantidas na trajetória durante a fase de aquisição de imagem (HABIB; SCHENK, 2001; MIKHAIL et al., 2001, HEIPKE et al., 2002; WEGMANN, 2002; TACHIBANA et al., 2004; KHOSHELHAM et al. 2007)

2.6 GEORREFERENCIAMENTO INTEGRADO DO SENSOR

O georreferenciamento integrado ou orientação integrada do sensor possibilita incorporar as informações de posição e orientação fornecidas por um GNSS+INS ao centro de perspectiva de uma câmera. Neste método, as informações de posição e orientação do centro de perspectiva no instante de aquisição da imagem são utilizadas no ajustamento da aerotriangulação juntamente com coordenadas de pontos fotogramétricos extraídos no bloco de imagens e coordenadas tridimensionais de pontos no espaço objeto. Após o processo de ajustamento, os parâmetros de posição e orientação de cada imagem são refinados satisfazendo as condições estabelecidas nas equações de colinearidade (KREMER; KRUCK, 2003; JACOBSEN, 2004a; IP et al., 2004).

Pesquisas também realizadas entre os anos de 1999 e 2000 avaliaram a geometria de blocos de imagens com diferentes configurações de faixas e distribuição de pontos de controle no terreno para determinar os parâmetros de montagem de orientação interior, possibilitando assim aumentar a exatidão da orientação integrada do sensor. Testes similares foram realizados pela OEEPE comprovando que o aumento na exatidão de um sistema fotogramétrico composto de uma câmera integrada a um GNSS+INS está diretamente relacionado à qualidade dos parâmetros de montagem e de orientação interior (CRAMER, 1999; HEIPKE et al., 2002; WEGMANN, 2002; KREMER; KRUCK, 2003; JACOBSEN, 2004a). Pesquisas realizadas por Khoshelham et al. (2007) investigaram a influência do número e distribuição de pontos fotogramétricos na orientação integrada do sensor. Foram apresentadas experiências com vários números de pontos de ligação distribuídos de forma regular e aleatória e os resultados obtidos mostraram que o aumento no número

de pontos de ligação em até um ponto por modelo reduz consideravelmente o erro médio no espaço imagem.

No georreferenciamento integrado do sensor, o principal fator que influencia a precisão dos resultados é a estabilidade dos parâmetros de montagem (elementos de posição relativa e ângulos de desalinhamento) entre a unidade de medição inercial e o sensor, bem como os parâmetros de orientação interior. Isso se deve ao fato de que as imprecisões na determinação da posição e orientação do centro de perspectiva e a correlação existente entre os parâmetros de orientação interior e exterior são propagados diretamente para as coordenadas no espaço objeto. Diferentemente do processo convencional de aerotriangulação, na orientação integrada do sensor, as imprecisões existentes nos parâmetros de orientação interior não são absorvidas pelos parâmetros de orientação exterior (KERSTING, 2011).

2.7 CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITAIS

Neste trabalho, o termo “sistema fotogramétrico digital” define um equipamento utilizado para fins fotogramétricos composto por uma câmera fotogramétrica com um único sensor ou múltiplos sensores, integrada a um sistema de posicionamento global e navegação inercial (GNSS+INS) para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto ou integrado do sensor. No caso de um sistema multi-câmeras, a calibração dos parâmetros de um sistema fotogramétrico digital compreende a determinação dos elementos que representam matematicamente os aspectos físicos da geometria interna e relativa das câmeras para geração da imagem sintética, bem como a determinação dos elementos de posição relativa e ângulos de desalinhamento entre o centro de perspectiva e o sistema GNSS+INS. As primeiras pesquisas envolvendo metodologias para calibrar os parâmetros de um sistema fotogramétrico utilizando dados terrestres e aéreos foram realizadas ainda na década de 90 (MOSTAFA et al., 1997; TOTH; GREJNER-BRZEZINSKA, 1997). Desde então, inúmeras pesquisas sobre a calibração de sistemas fotogramétricos foram realizadas juntamente com o estudo aprofundado dos processos de georreferenciamento direto e integrado do sensor, uma vez que a calibração do sistema passou a ser um pré-requisito para se obter informações precisas de posição de orientação a partir de informações fornecidas por um

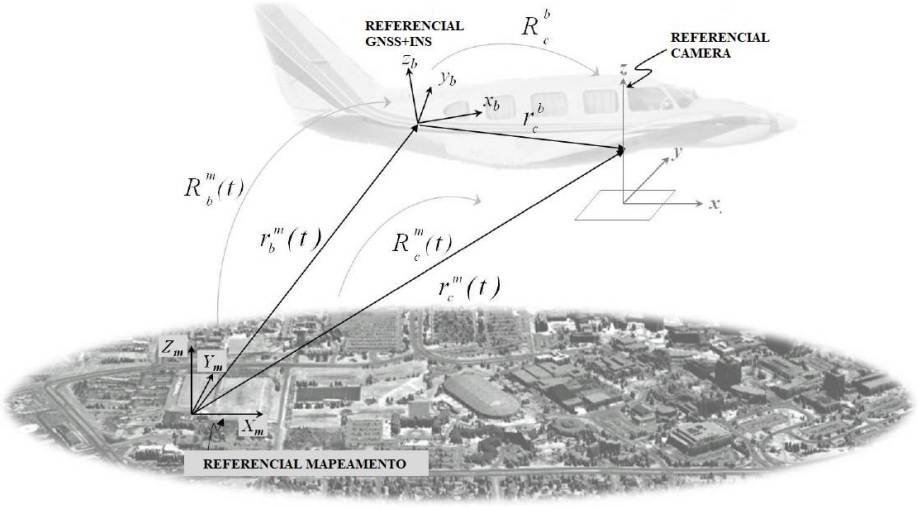
GNSS+INS. Algumas das principais pesquisas podem ser encontradas em: Cramer (2001), Grejner-Brzezinska (2001), Honkavaara (2001), Jacobsen(2001), Cramer e Stallmann (2002), Honkavaara et al. (2002), Jacobsen (2002), Mostafa (2002), Pinto e Forlani (2002), Pinto et al. (2002), Honkavaara et al. (2003), Kremer e Kruck (2003), Skaloud (2003), Honkavaara (2004), Yastikli (2004), Hutton e Mostafa (2005), Yastikli e Jacobsen (2005); Honkavaara et al. (2006) e Lee et al. (2010).

Os principais fabricantes de sistemas fotogramétricos digitais como o DMC e UCD investiram nas últimas décadas em desenvolvimento tecnológico de *hardware* e *software* que permitem obter matematicamente os parâmetros de montagem que representam o relacionamento existente entre a unidade de medição inercial e o centro de perspectiva do sensor para ser utilizado no georreferenciamento direto (SMITH et al., 2005; HONKAVAARA et al., 2006; SMITH et al., 2006; SMITH et al., 2007; QTAISHAT et al., 2008a, b). Um exemplo de sistema fotogramétrico de imageamento foi desenvolvido comercialmente pela Applanix Corporation. O DSS (*Digital Sensor System*) é um sistema de imageamento que possui configurações para uso com uma ou duas câmeras de médio formato (39 ou 80 megapixels) montadas em uma estrutura na qual os elementos de posição relativa existentes entre as câmeras e a unidade de medição do sistema inercial são determinados durante a montagem do sistema. As câmeras possuem pixels com dimensão de 9μm e sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB) e infravermelho próximo (NIR), além de objetivas com distância focal de 60 mm e 40 mm. Para refinar os elementos de posição relativa e determinar os ângulos de desalinhamento existentes entre a unidade de medição inercial e o sistema de câmeras, é utilizado um programa denominado CalQC (*Calibration Quality and Control*) que possibilita determinar e refinar os parâmetros de montagem utilizando dados obtidos sobre um campo de calibração com pontos de controle levantados no terreno (MOSTAFA, 2003). Lee et al. (2010) calibraram um sistema fotogramétrico multi-câmeras convencional utilizando injunção dos parâmetros de orientação exterior obtidos em um ajustamento simultâneo pelo MMQ e os fornecidos por um sistema GNSS+INS bem como o modelo das equações de colinearidade. Os resultados obtidos mostraram que a injunção de parâmetros determina os parâmetros de montagem de um sistema fotogramétrico multi-câmeras com maior precisão do que os métodos convencionais que não utilizam injunções.

A calibração dos parâmetros de sistemas fotogramétricos compreende a determinação dos parâmetros de orientação interior e também os elementos de posição relativa e ângulos de desalinhamento, conhecidos como "*lever-arm offsets*" e "*boresight angles*". Tais parâmetros são determinados a partir de informações de posição e orientação do centro de perspectiva da câmera obtidas indiretamente na aerotriangulação e as informações de posição e orientação fornecidas pelo sistema GNSS+INS em um instante "t", ambas no mesmo sistema de referência (SCHWARZ, 1996; EL-SHEIMY, 1996; SKALOUD et al., 1996; ABDULLAH, 1997; MOSTAFA, 2001a, b; MOSTAFA; HUTTON, 2001).

Um dos métodos de calibração dos parâmetros de sistemas fotogramétricos é conhecido como "Método por Etapas" ou "*Two-Step Procedure*". Esse método determina a posição relativa e os ângulos de desalinhamento a partir das diferenças existentes entre as informações de posição e orientação fornecidas pelo sistema GNSS+INS para um bloco de imagens e as informações correspondentes obtidas no ajustamento simultâneo de feixes de raios perspectivos pelo Método dos Mínimos Quadrados (KERSTING, 2011).

FIGURA 24 - ELEMENTOS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POR ETAPAS.



FONTE: TRADUZIDO DE KERSTING (2011).

Na Figura 24, o elemento $r_c^m(t)$ é o vetor (representado pela notação "r") das coordenadas tridimensionais da posição do centro de perspectiva da câmera (representado pela notação "c") no instante "t" de aquisição em relação ao referencial de mapeamento (representado pela notação "m"). O elemento $R_c^m(t)$ é a matriz de

rotação (representado pela notação “R”) dos ângulos de orientação da câmera no instante “t” de aquisição também em relação ao referencial de mapeamento. O elemento $r_b^m(t)$ é o vetor das coordenadas tridimensionais de posição da unidade de medição do sistema de navegação inercial (representado pela notação “b”) no instante “t” de aquisição e o elemento $R_b^m(t)$ é a matriz de rotação dos ângulos de orientação da unidade de medição do sistema de navegação inercial no instante “t”, ambos também em relação ao referencial de mapeamento. O elemento r_c^b é o vetor de posição relativa (ΔX, ΔY, ΔZ) e R_c^b é a matriz de rotação dos ângulos de orientação (Δω, Δφ, Δκ) da câmera em relação à unidade de medição do sistema de navegação inercial. Os elementos de posição relativa (r_c^b) e ângulos de desalinhamento (R_c^b) são obtidos a partir das equações (6) e (7) utilizando transposta da matriz $\mathrm{R_b^m}$.

$$r_c^b|_t = R_m^b(t).(r_c^m(t) - r_b^m(t)) \tag{6}$$

$$R_c^b|_t = R_m^b(t).R_c^m(t) \tag{7}$$

$$r_c^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_c^m \tag{8}$$

$$R_c^m = \begin{bmatrix} m_{11_c} = cos\varphi_c.cos\kappa_c \\ m_{12_c} = cos\omega_c.sen\kappa_c + sen\omega_c.sen\varphi_c.cos\kappa_c \\ m_{13_c} = sen\omega_c.sen\kappa_c - cos\omega_c.sen\varphi_c.cos\kappa_c \\ m_{21_c} = -cos\varphi_c.sen\kappa_c \\ m_{22_c} = cos\omega_c.cos\kappa_c - sen\omega_c.sen\varphi_c.sen\kappa_c \\ m_{23_c} = sen\omega_c.cos\kappa_c + cos\omega_c.sen\varphi_c.sen\kappa_c \\ m_{31_c} = sen\varphi_c \\ m_{32_c} = -sen\omega_c.cos\varphi_c \\ m_{33_c} = cos\omega_c.cos\varphi_c \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$r_b^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_b^m \tag{10}$$

$$R_b^m = \begin{bmatrix} m_{11_b} = cos\varphi_b . cos\kappa_b \\ m_{12_b} = cos\omega_b . sen\kappa_b + sen\omega_b . sen\varphi_b . cos\kappa_b \\ m_{13_b} = sen\omega_b . sen\kappa_b - cos\omega_b . sen\varphi_b . cos\kappa_b \\ m_{21_b} = -cos\varphi_b . sen\kappa_b \\ m_{22_b} = cos\omega_b . cos\kappa_b - sen\omega_b . sen\varphi_b . sen\kappa_b \\ m_{23_b} = sen\omega_b . cos\kappa_b + cos\omega_b . sen\varphi_b . sen\kappa_b \\ m_{31_b} = sen\varphi_b \\ m_{32_b} = -sen\omega_b . cos\varphi_b \\ m_{33_b} = cos\omega_b . cos\varphi_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

Substituindo as equações (8), (9), (10) e (11) em (6) e (7) tem-se:

$$r_c^b = \left[\begin{pmatrix} m_{11_b} & m_{21_b} & m_{31_b} \\ m_{12_b} & m_{22_b} & m_{32_b} \\ m_{13_b} & m_{23_b} & m_{33_b} \end{pmatrix} . \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_c^m - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_b^m \right) \right] \quad (12)$$

$$R_c^b = \left[\begin{pmatrix} m_{11_b} & m_{21_b} & m_{31_b} \\ m_{12_b} & m_{22_b} & m_{32_b} \\ m_{13_b} & m_{23_b} & m_{33_b} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} m_{11_c} & m_{12_c} & m_{13_c} \\ m_{21_c} & m_{22_c} & m_{23_c} \\ m_{31_c} & m_{32_c} & m_{33_c} \end{pmatrix} \right] \quad (13)$$

Com base nos resultados obtidos nas equações (12) e (13), os ângulos de desalinhamento (R_c^b) são obtidos a partir das seguintes equações:

$$\varphi_c^b = \Delta\varphi = sin^{-1}\left(m_{13}{}_c^b\right) \quad (14)$$

$$\omega_c^b = \Delta\omega = tan^{-1}\left(\frac{\frac{-m_{23}{}_c^b}{cos\left(\varphi_c^b\right)}}{\frac{m_{33}{}_c^b}{cos\left(\varphi_c^b\right)}} \right) \quad (15)$$

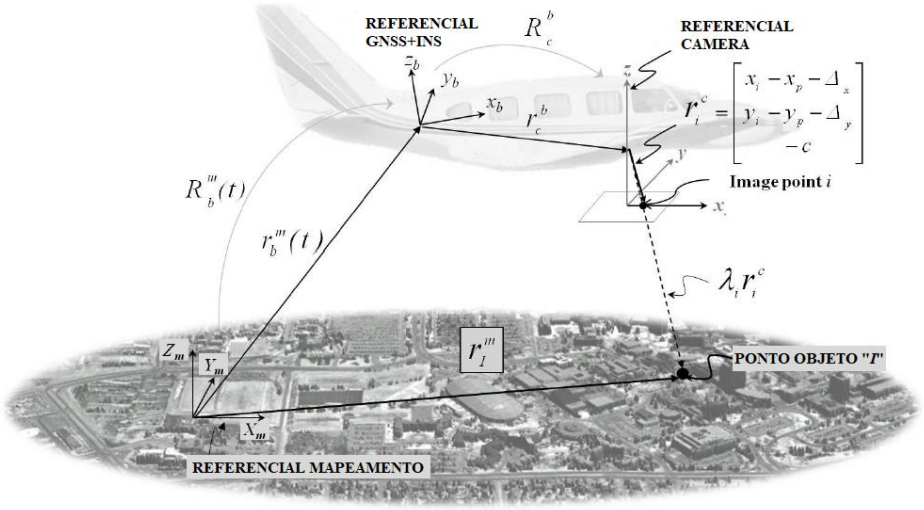
$$K_c^b = \Delta\kappa = tan^{-1}\left(\frac{\frac{-m_{12}{}_c^b}{cos\left(\varphi_c^b\right)}}{\frac{m_{11}{}_c^b}{cos\left(\varphi_c^b\right)}} \right) \quad (16)$$

A partir dos valores obtidos nas equações (14), (15) e (16), os elementos de posição relativa e ângulos de desalinhamento são obtidos a partir das diferenças existentes entre os parâmetros de posição e orientação fornecidos pelo GNSS+INS e os correspondentes obtidos no ajustamento simultâneo pelo MMQ. O método de calibração por etapas possibilita determinar as componentes de posição relativa e

ângulos de desalinhamento de forma direta. Entretanto, a qualidade dos parâmetros de montagem está diretamente relacionada com a precisão dos parâmetros de posição e orientação obtidos no ajustamento. Pesquisas realizadas com o método por etapas avaliaram a precisão dos parâmetros de calibração de um bloco fotogramétrico, cujas imagens localizadas nos extremos das faixas foram eliminadas e os parâmetros de orientação exterior desconsiderados. Esse procedimento foi realizado uma vez que as imagens localizadas nos extremos das faixas possuem menor precisão quando comparadas com as imagens da região central do bloco (SKALOUD, 1999; JACOBSEN, 2000).

Outro método de calibração de sistemas fotogramétricos é conhecido como "Método Simultâneo" ou "*Single-Step Procedure*" (PINTO; FORLANI, 2002). Esse método foi utilizado para determinar a posição e orientação bem como parâmetros de orientação interior de um sistema MMS (*Mobile Mapping System*) composto de um conjunto de câmeras e um sistema de navegação inercial. Os parâmetros de montagem (componentes de posição relativa e ângulos de desalinhamento) desse sistema bem como o relacionamento de cada câmera com o sistema de navegação inercial foram determinados e os resultados obtidos com dados experimentais simulados mostraram que a metodologia pode ser aplicada para calibrar um sistema de mapeamento móvel (HABIB et al., 2011; KERSTING, 2011). O método de calibração simultânea determina os parâmetros de montagem incorporando os elementos de posição relativa (r_c^b) e ângulos de desalinhamento (R_c^b) no modelo matemático das equações de colinearidade bem como os parâmetros de orientação interior (r_i^c) que são considerados incógnitas no ajustamento (Figura 25).

FIGURA 25 - ELEMENTOS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO SIMULTÂNEA.



FONTE: TRADUZIDO DE KERSTING (2011).

O modelo matemático do método de calibração simultânea é também conhecido como “modelo das equações de colinearidade modificadas” e é obtido através da soma de três vetores após a aplicação das matrizes de rotação e um fator de escala conforme modelo a seguir:

$$r_i^m = r_b^m(t) + R_b^m(t).r_c^b + \lambda_i.R_b^m(t).R_c^b.r_i^c \tag{17}$$

$$r_i^c = \begin{bmatrix} x_i - x_p - \Delta_x \\ y_i - y_p - \Delta_y \\ -f \end{bmatrix} \tag{18}$$

Substituindo as equações (10), (11), (12), (13) e (18) em (17) tem-se:

$$r_i^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_b^m + \begin{pmatrix} m_{11_b} & m_{21_b} & m_{31_b} \\ m_{12_b} & m_{22_b} & m_{32_b} \\ m_{13_b} & m_{23_b} & m_{33_b} \end{pmatrix}.\left[\begin{pmatrix} m_{11_b} & m_{21_b} & m_{31_b} \\ m_{12_b} & m_{22_b} & m_{32_b} \\ m_{13_b} & m_{23_b} & m_{33_b} \end{pmatrix}.\left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_c^m - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_b^m\right)\right] +$$
$$\lambda_i.\begin{pmatrix} m_{11_b} & m_{21_b} & m_{31_b} \\ m_{12_b} & m_{22_b} & m_{32_b} \\ m_{13_b} & m_{23_b} & m_{33_b} \end{pmatrix}.\left[\begin{pmatrix} m_{11_b} & m_{21_b} & m_{31_b} \\ m_{12_b} & m_{22_b} & m_{32_b} \\ m_{13_b} & m_{23_b} & m_{33_b} \end{pmatrix}.\begin{pmatrix} m_{11_c} & m_{12_c} & m_{13_c} \\ m_{21_c} & m_{22_c} & m_{23_c} \\ m_{31_c} & m_{32_c} & m_{33_c} \end{pmatrix}\right].\begin{bmatrix} x_i - x_p - \Delta_x \\ y_i - y_p - \Delta_y \\ -f \end{bmatrix} \tag{19}$$

O método de calibração simultânea, quando comparado com o método por etapas é considerado mais robusto tendo em vista que os parâmetros de orientação interior e de montagem do sistema fotogramétrico são determinados de forma simultânea bem como a correlação existente entre esses parâmetros. Para isso é

necessário que se utilize um bloco de imagens com configuração apropriada (CRAMER; STALLMANN, 2001).

A calibração dos parâmetros de orientação interior e de montagem de sistemas fotogramétricos para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto tem sido alvo de pesquisas constantes de diversos autores na área da Fotogrametria. Jacobsen (2001), avaliou diferentes configurações de voo para determinar a distância focal bem como as componentes de posição relativa e ângulos de desalinhamento. Para minimizar a correlação existente entre a altura de voo e a distância focal foram utilizados voos com duas altitudes distintas além de informações de posição e orientação de um sistema de navegação inercial incorporadas em um ajustamento simultâneo pelo MMQ. A configuração de voo foi composta de duas faixas com sobreposição lateral de 100% e uma faixa cruzada, além de cinco faixas em altitude duas vezes superior, sendo quatro faixas com sobreposição lateral convencional de 30% e uma faixa cruzada. Wegmann (2002), analisou diferentes configurações de voo para a calibração da distância focal e coordenadas do ponto principal de um sistema fotogramétrico de aquisição de imagens. Nesta pesquisa também foram utilizadas faixas de voo em diferentes altitudes e direções opostas além de pontos sinalizados em campo. Entretanto, é possível determinar esses parâmetros utilizando faixas de voo em uma única altitude.

Pinto e Forlani (2002) e Honkavaara et al. (2003), analisaram a calibração dos parâmetros de um sistema fotogramétrico de aquisição de imagens testando diferentes configurações de voo e distribuição de pontos no terreno para determinar a distância focal, coordenadas do ponto principal bem como os ângulos de desalinhamento. A qualidade dos parâmetros de calibração foi analisada através do desvio-padrão bem como coeficientes de correlação. Honkavaara et al. (2008) e Yuan (2008) investigaram as configurações de voo e controles necessários para calibrar um sistema fotogramétrico de aquisição de imagens utilizando o método simultâneo.

Todos os estudos apresentados tiveram como objetivo principal avaliar metodologias de calibração de sistemas fotogramétricos. Neste trabalho, os conceitos da calibração de sistemas fotogramétricos foram aplicados no sistema multi-câmeras TACx4 para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Além da calibração, foram realizadas análises de qualidade posicional dos resultados obtidos de acordo com critérios do padrão de exatidão cartográfica de produtos

cartográficos digitais (PEC-PCD) conforme preconizado nas instruções normativas e especificações definidas pelos órgãos reguladores da cartografia nacional. Através desse procedimento, espera-se não só aumentar a qualidade posicional do georreferenciamento direto, mas também reduzir o tempo de processamento e consequentemente os custos para a execução de projetos de Fotogrametria.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no presente trabalho. Os itens 3.2 e 3.3 descrevem as especificações técnicas do sistema fotogramétrico TACx4 e o campo de calibração implantado na cidade de Guarapuava/PR e que foi utilizado na calibração do sistema. Os itens 3.4 e 3.5 apresentam aspectos relacionados com a determinação dos parâmetros do sistema de imageamento, bem como geração e análise da qualidade da imagem sintética. Os itens 3.6 e 3.7 apresentam respectivamente as metodologias utilizadas na calibração do sistema e por fim, o item 3.8 apresenta a metodologia utilizada para validar a calibração tanto no campo de calibração quanto em projetos independentes em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto.

3.2 SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO *TRIMBLE AERIAL CAMERA x4*

A *Trimble Aerial Camera x4* (TACx4) é uma câmera fotogramétrica digital de múltiplos sensores lançada pela Trimble Germany em 2010 e classificada como câmera fotogramétrica digital de grande formato (Figura 26). O seu conjunto de imageamento é composto por quatro câmeras fotogramétricas digitais equipadas com sensores CCD (*digital back*) modelo PhaseOne P65+ com dimensão de 60,5 megapixels (8984 x 6732 pixels) e pixels de 6 μm. Os sensores CCD possuem sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB) e resolução radiométrica de 16 bit por banda, além de sensibilidade ISO que varia de 50 a 800. Cada câmera possui um conjunto de lentes modelo Schneider Apo-Digitar com distância focal nominal de 72 mm e diafragma com abertura máxima de 5.6 e obturador com velocidades que variam de 1/1000s a 60s. Todas as configurações de sensibilidade, velocidade do obturador e disparo do conjunto de imageamento são controladas através de um programa gerenciador desenvolvido pela própria Trimble (CamControl) que permite que as câmeras sejam configuradas e operem de forma sincronizada por acionamento manual (*manual release*) ou externo (*extern release*) a

partir de comandos enviados por um programa de gerenciamento de voo (*Flight Management System-FMS*).

FIGURA 26 - SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO *TRIMBLE AERIAL CAMERA x4*.

FONTE: O autor (2016).

O sistema TACx4 também possui um GNSS+INS modelo Applanix POS-AV™ desenvolvido e fabricado pela empresa canadense Applanix Corporation. Trata-se de um sistema de navegação global por satélites e navegação inercial utilizado em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto de sensores aerotransportados como câmeras analógicas e digitais de quadro e varredura, além de sensores de perfilamento LASER e SAR (*Synthetic Aperture Radar*). O sistema possui quatro componentes principais: (1) unidade de medição inercial (IMU), (2) unidade de navegação por satélite (GNSS), (3) módulo de controle e (4) módulo de processamento e cálculo de trajetórias (MOSTAFA, 2001a, b).

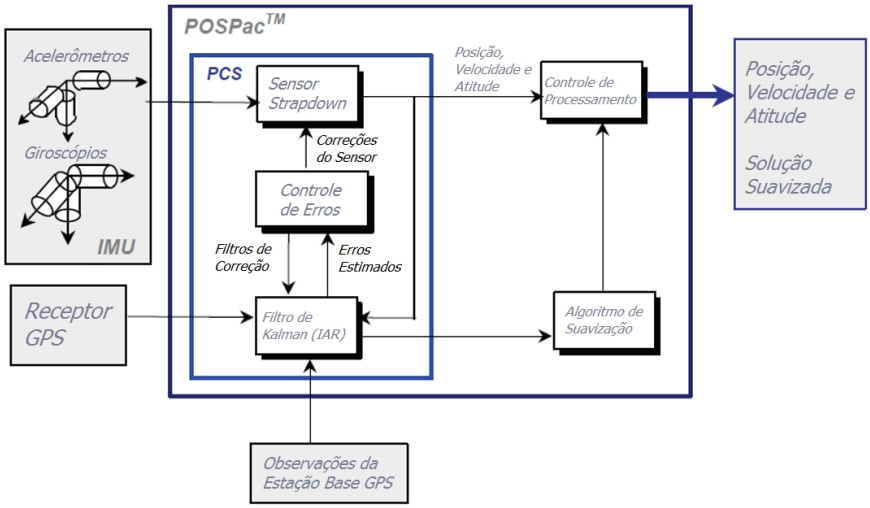
A unidade de medição inercial (IMU) utiliza o modelo LN-200 do tipo *strapdown* fabricado pela empresa norte americana Northrop Grumman Corporation e possui três acelerômetros e três giroscópios que registram informações de aceleração e giro em taxas que variam de 200 a 1000 Hz. Essas informações são integradas pelo módulo de controle para obtenção da velocidade, posição e orientação tridimensional, vinculadas a um sistema de coordenadas com origem no centro de massa da Terra.

A unidade GNSS é composta de uma antena e um receptor GNSS que registram informações de código e fase das ondas portadoras dos satélites que compõem os sistemas NAVSTAR-GPS, GLONASS e GALILEO a taxas de coleta que

variam de 1 a 50 Hz. A partir dessas informações e de dados provenientes de bases GNSS em solo utilizando técnicas de Posicionamento Relativo ou ainda de serviços de processamento que utilizam dados do IGS (*International GNSS Service*) como é o caso do PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), as coordenadas da antena da unidade GNSS são determinadas ao longo da trajetória do sistema GNSS+INS. No sistema TACx4, a posição relativa (d_X, d_Y, d_Z) entre a referência da antena GNSS instalada na aeronave e a referência da unidade de medição inercial (também conhecida como "*GNSS Offset*") foi determinada por sessões de levantamento topográfico convencional com precisão de 1 mm em todas as componentes.

O módulo de processamento e cálculo de trajetórias (POSPac^{TM}) integra informações de velocidade, posição (X, Y, Z) e orientação (*roll, pitch, heading*) tridimensional da IMU com observações da unidade GNSS bem como efemérides da base GNSS ou serviço de processamento para determinação da melhor estimativa suavizada da trajetória (*Smoothed Best Estimate of Trajectory–SBET*). Para estimar e modelar os erros provenientes da IMU a partir de observações GNSS na trajetória, aplica-se a técnica do filtro de *Kalman* em duas etapas: processamento direto (*forward processing*) e inverso (*reverse processing*) (MOSTAFA et al., 2001). O fluxo completo de processamento e cálculo de trajetórias segue apresentado na Figura 27.

FIGURA 27 - FLUXO DE PROCESSAMENTO DE TRAJETÓRIAS DO GNSS+INS.



FONTE: TRADUZIDO DE MOSTAFA; HUTTON (2001).

O GNSS+INS Applanix POS-AV^{TM} possui quatro modelos (310, 410, 510 e 610) que possuem a mesma precisão na posição, porém, diferentes precisões na

orientação devido à IMU utilizada. Para cada modelo, existem quatro modos de processamento e cálculo de trajetórias no módulo POSPac^{TM}: (1) posicionamento absoluto (*SPS*), posicionamento diferencial em tempo real (*RTX*), posicionamento diferencial pós-processado (*RTX Post-Processed*) e posicionamento diferencial pós-processado com bases curtas (*SmartBase Post-Processed*), conforme apresentado na Figura 28. O sistema TACx4 possui um GNSS+INS POS AV modelo 510 e todas as trajetórias são processadas utilizando o modo diferencial pós-processado com bases curtas (*SmartBase Post-Processed*) no qual são utilizadas bases GNSS em solo com raio máximo de 30 km, o que resulta em trajetórias com precisão na posição horizontal (X, Y) de 5 cm e vertical (Z) de 10 cm, bem como precisão angular de 0.005° (18”) em *roll* (X) e *pitch* (Y) e 0.008° (28.8”) em *heading* (Z).

FIGURA 28 - ESPECIFICAÇÕES DE PRECISÃO DOS MODELOS APPLANIX POS AV.

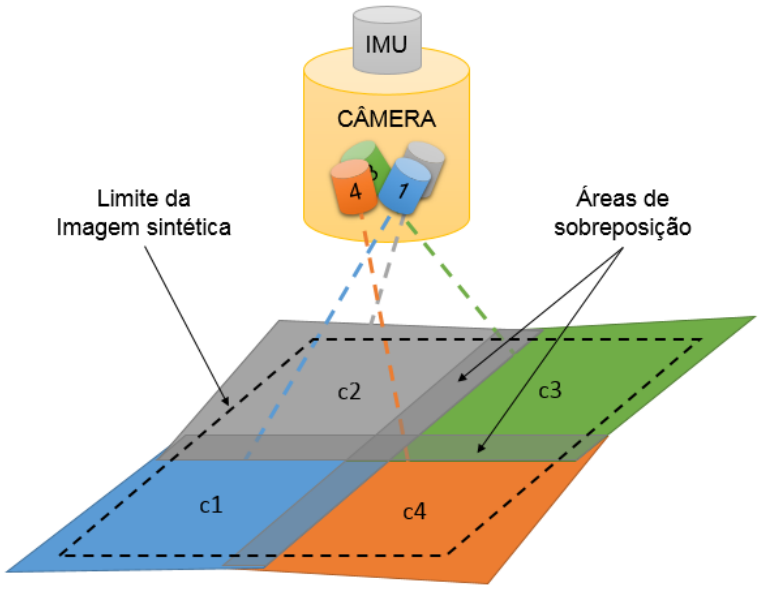
POS AV	310 Absoluto	310 RTX	310 RTX pós-processado	310 SmartBase pós-processado	410 Absoluto	410 RTX	410 RTX pós-processado	410 SmartBase pós-processado
Posição (m)	1.5 H 3 V	<0.1 H <0.2 V	<0.1 H <0.2 V	<0.05 H <0.1 V	1.5 H 3 V	<0.1 H <0.2 V	<0.1 H <0.2 V	<0.05 H <0.1 V
Velocidade (m/s)	0.05	0.05	0.010	0.010	0.050	0.050	0.005	0.005
Roll e Pitch (°)	0.03	0.02	0.015	0.015	0.020	0.015	0.008	0.008
Heading (°)	0.10	0.08	0.035	0.035	0.080	0.040	0.020	0.020

POS AV	510 Absoluto	510 RTX	510 RTX pós-processado	510 SmartBase pós-processado	610 Absoluto	610 RTX	610 RTX pós-processado	610 SmartBase pós-processado
Posição (m)	1.5 H 3 V	<0.1 H <0.2 V	<0.1 H <0.2 V	<0.05 H <0.1 V	1.5 H 3 V	<0.1 H <0.2 V	<0.1 H <0.2 V	<0.05 H <0.1 V
Velocidade (m/s)	0.050	0.050	0.005	0.005	0.030	0.030	0.0050	0.0050
Roll e Pitch (°)	0.008	0.008	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0025[5]	0.0025[5]
Heading (°)	0.070	0.040	0.008	0.008	0.030	0.020	0.0050	0.0050

FONTE: TRADUZIDO DE APPLANIX (2015).

O princípio de aquisição de imagens do sistema TACx4 é baseado nos seguintes aspectos: (1) o conjunto de câmeras é montado em uma estrutura onde são fixadas em posições oblíquas para adquirir imagens com áreas de sobreposição que são utilizadas para extração de pontos homólogos na etapa de determinação dos parâmetros do sistema de imageamento e geração da imagem sintética (Figura 29), (2) o disparo das câmeras no instante de aquisição da imagem ocorre de forma simultânea devido ao sincronismo existente e (3) as câmeras que compõem o sistema de imageamento possuem pixels com a mesma dimensão (6 μm), sensibilidade na faixa do espectro eletromagnético visível (RGB) e resolução radiométrica de 16bit por banda.

FIGURA 29 - PRINCÍPIO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO SISTEMA TACx4.



FONTE: O autor (2016).

Devido ao fato de não haver sensores com pixels de diferentes resoluções e bandas espectrais, na etapa de geração da imagem sintética não há processo de fusão por *pansharpening*, ou seja, são utilizados apenas programas de reamostragem na etapa de mosaicagem, o que possibilita a geração de uma imagem final com configurações similares às imagens originais. Maiores detalhes sobre o processo de geração da imagem sintética serão apresentados no item 3.5.

3.3 CAMPO DE CALIBRAÇÃO DE GUARAPUAVA-PR

O campo de calibração de Guarapuava-PR foi implantado pela empresa Engefoto Engenharia e Aerolevantamentos S.A. no ano de 2015 para ser utilizado como campo de calibração de câmeras fotogramétricas. A ideia surgiu do interesse da empresa em implantar um campo de calibração com alvos sinalizados e distribuídos em uma área que permitisse executar voos de calibração utilizando duas altitudes (método também conhecido como "*In-Situ* com Duas Altitudes") para simular as condições previstas no método dos "Campos Mistos", cujo objetivo é reduzir ou eliminar a dependência linear entre elementos de orientação interna e elementos de orientação externa da câmera (X_0/x_p, Y_0/y_p e Z_0/f) utilizando imagens com grande variação de altitude e alvos sinalizados (MERCHANT, 1972). Para implantar o campo

de calibração foram planejados 56 alvos distribuídos regularmente com espaçamento médio de 350 m. Cada local de implantação foi previamente identificado em campo e em seguida sinalizado com um gabarito circular de 60 cm de diâmetro e tinta branca de modo a produzir um maior contraste com os locais definidos, resultando em melhor identificação nas imagens áreas adquiridas em ambas as altitudes de voo (Figura 30).

FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO DE ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO.

FONTE: O autor (2016).

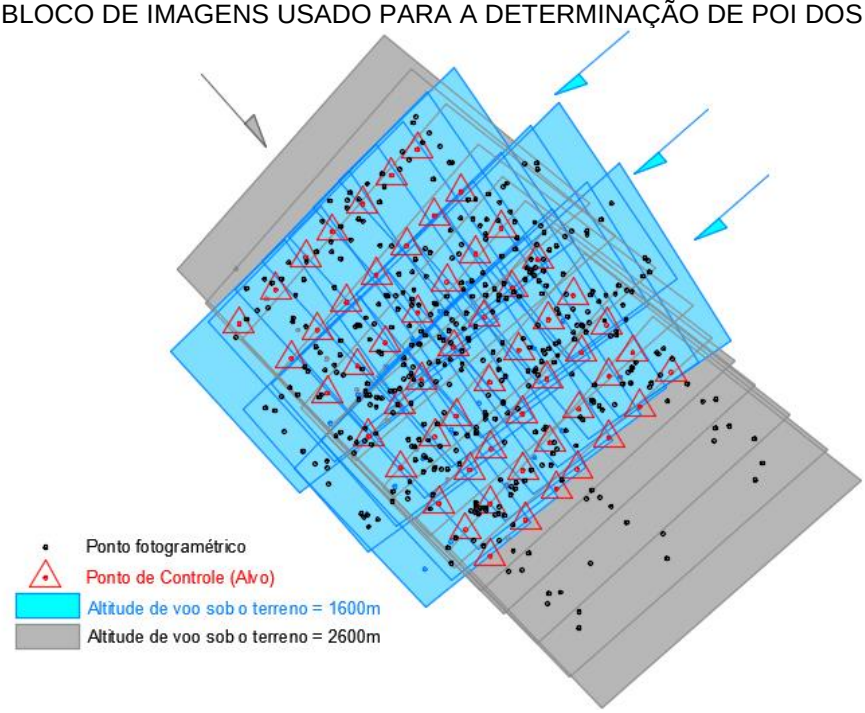
As coordenadas geodésicas tridimensionais (X, Y, Z) de cada alvo foram determinadas a partir de dados de rastreio coletados com receptores GNSS de dupla frequência aplicando técnicas de posicionamento Relativo Estático Rápido com sessões de 15 minutos e intervalo de coleta do batimento da fase da onda portadora de 5 segundos. Para obter as coordenadas ajustadas de cada alvo com precisão compatível para serem utilizadas em processos de calibração, utilizou-se dados de rastreio da estação “96049-PRGU” pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RBMC-IBGE). Ao final da etapa de processamento, a precisão horizontal e vertical alcançada nas coordenadas de todos os alvos foi de 1 cm e 2 cm respectivamente.

3.4 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO

A determinação dos parâmetros do sistema de imageamento compreende duas etapas principais: (1) determinação dos parâmetros de orientação interior das câmeras e (2) determinação dos parâmetros de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética, cujo processo é conhecido como “calibração de plataforma”. No presente trabalho, ambas as etapas utilizam imagens aéreas que foram obtidas no campo de calibração de Guarapuava utilizando o método “*In-Situ* com Duas Altitudes”.

Na etapa (1), a determinação dos POI de cada câmera compreende a obtenção dos valores de coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2), exceto a distância focal (f) cujo valor foi fixado como sendo igual a 74 mm para eliminar possíveis variações de escala nas imagens de cada câmera. Para determinar tais parâmetros, utilizou-se 4 blocos de 31 imagens organizadas em faixas de voo, sendo que cada bloco corresponde a uma câmera que compõe o sistema de imageamento. Para cada um dos 4 blocos foi adquirida uma faixa com 10 imagens tomadas a 2600 m de altura de voo sobre o terreno, o que resultou em um pixel com resolução espacial aproximada de 22 cm, além de 3 faixas com 7 imagens por faixa tomadas a 1600 m de altura de voo sob o terreno, o que resultou em um pixel com resolução espacial aproximada de 13 cm. A sobreposição longitudinal e lateral das imagens foi de respectivamente 80% e 50% em todas as faixas de voo (Figura 31). Tendo em vista a posição e orientação das câmeras no conjunto de imageamento, as faixas em altitude de 1600 m foram adquiridas na mesma direção de voo para se obter a mesma sobreposição longitudinal e lateral simultaneamente para todas as câmeras durante a etapa de aquisição.

FIGURA 31 - BLOCO DE IMAGENS USADO PARA A DETERMINAÇÃO DE POI DOS SENSORES.



FONTE: O autor (2016).

Para determinar os parâmetros de orientação interior das câmeras que compõem o sistema de imageamento, utilizou-se o programa “CALIBRAV” pertencente ao Laboratório de Fotogrametria da UFPR. Esse programa determina os POI de uma câmera a partir de um ajustamento simultâneo de feixes de raios perspectivos pelo Método dos Mínimos Quadrados, cujo modelo matemático é o das equações de colinearidade com parâmetros adicionais conforme equações apresentadas na seção 2.3. Para essa determinação utilizou-se observações de fotocoordenadas de aproximadamente 3000 pontos fotogramétricos (i) extraídos automaticamente com algoritmos de correlação de imagens com LSM (*Least Square Matching*) em bloco de imagens de cada uma das quatro câmeras (k) $[(x_i \ y_i)_{i=1\approx3000}]_{k=1:4}$ e coordenadas dos 56 alvos do campo de calibração (j) no referencial geodésico tridimensional denominado de “R1” $(X_j^{R1} \ Y_j^{R1} \ Z_j^{R1})_{j=1:56}$.

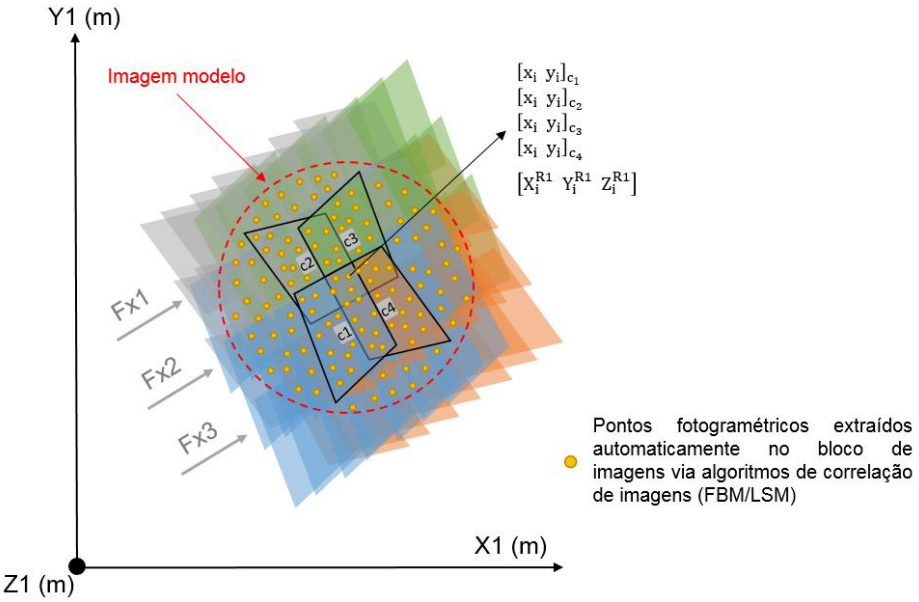
Esse procedimento foi aplicado para o conjunto de dados de cada câmera, visando determinar os parâmetros de orientação exterior (posição e orientação) $\left[(X0_l^{R1} \ Y0_l^{R1} \ Z0_l^{R1} \ \omega_l^{R1} \ \varphi_l^{R1} \ \kappa_l^{R1})_{l=1:31}\right]_{k=1:4}$ do bloco de 31 imagens, bem como as coordenadas tridimensionais pontos fotogramétricos $(X_i^{R1} \ Y_i^{R1} \ Z_i^{R1})_{i=1\approx3000}$ no referencial adotado, além dos POI (x_p, y_p, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2) de cada câmera. Após a

etapa de ajustamento, foram obtidos conjuntos de parâmetros de orientação exterior e interior conforme equação (20).

$$\begin{bmatrix} x_p \;\; y_p \;\; K_1 \;\; K_2 \;\; K_3 \;\; P_1 \;\; P_2 \\ X0_1 \;\; Y0_1 \;\; Z0_1 \;\; \omega_1 \;\; \varphi_1 \;\; \kappa_1 \\ . \\ . \\ . \\ X0_{31} \;\; Y0_{31} \;\; Z0_{31} \;\; \omega_{31} \;\; \varphi_{31} \;\; \kappa_{31} \\ X_1 \;\; Y_1 \;\; Z_1 \\ . \\ . \\ . \\ X_i \;\; Y_i \;\; Z_i \end{bmatrix}_{k=1:4}^{R1} \tag{20}$$

Após a obtenção das coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos, parâmetros de orientação exterior do bloco de imagens de parâmetros de orientação interior de cada câmera, iniciou-se a etapa (2) que consistiu na seleção de um conjunto de quatro imagens, sendo uma de cada câmera, na altura de voo de 1600 m e localizado na região central do bloco. Esse procedimento foi adotado uma vez que a região central de cada bloco possui maior rigidez e melhor distribuição de pontos fotogramétricos, resultando em melhor precisão na determinação dos parâmetros no referencial da imagem sintética (Figura 32).

FIGURA 32 - IMAGEM MODELO PARA A CALIBRAÇÃO DE PLATAFORMA.



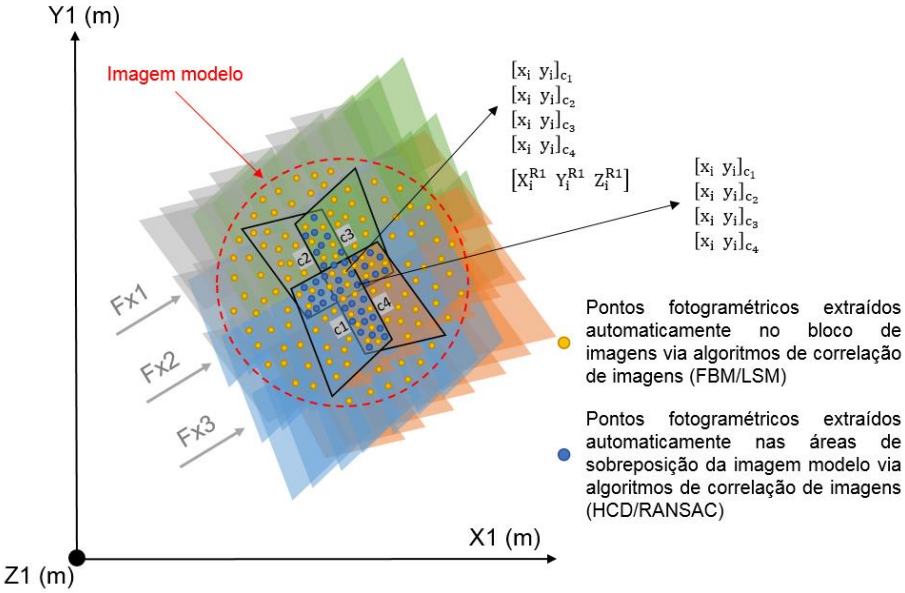
FONTE: O autor (2016).

Para um melhor entendimento do processo, esse conjunto de imagens será chamado de “imagem modelo” e a principal característica é a de possuir observações de fotocoordenadas $[(x_i\ y_i)_{i=1:n}]_{k=1:4}$ de pontos fotogramétricos extraídos automaticamente nas áreas de sobreposição e utilizadas na etapa de determinação dos POI das câmeras na etapa (1). Essas informações, juntamente com as coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos $(X_i^{R1}\ Y_i^{R1}\ Z_i^{R1})$ no referencial geodésico tridimensional “R1”, compreendem o conjunto de observações necessárias para determinar os parâmetros de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética. Tal processo será descrito com maiores detalhes a seguir.

Com o objetivo de aumentar a densidade de pontos fotogramétricos nas regiões de sobreposição das imagens e consequentemente aumentar a precisão na determinação dos parâmetros de posição e orientação de cada câmera no referencial da imagem sintética, utilizou-se o programa Geokosmos SynthX4 baseado nos algoritmos HCD (*Harris Corner Detector*), Correlação Cruzada (*Cross-Correlation*) e RANSAC (*RANdon SAmple Consensus*) para extrair, correlacionar e selecionar um total de aproximadamente 2000 pontos homólogos adicionais nas regiões de sobreposição. O HCD é um dos algoritmos de visão computacional mais comuns para se extrair pontos em uma imagem. O princípio de detecção do algoritmo HCD se baseia na análise e seleção de locais que apresentem diferenças de valores de intensidade de níveis de cinza na imagem, cujos locais com essa característica são encontrados nos cantos de objetos presentes na imagem (HARRIS; STEPHENS, 1988). Em aplicações fotogramétricas, por exemplo, é possível extrair pontos em um conjunto de imagens utilizando o algoritmo HCD e encontrar os pontos homólogos utilizando algoritmos de Correlação Cruzada e RANSAC para definir o conjunto de correspondências e reconstruir os objetos de interesse. O RANSAC é um algoritmo utilizado para o cálculo de correspondências de um conjunto de valores previamente selecionados. Nesse processo, um algoritmo seleciona um conjunto de pontos e determina as suas correspondências utilizando uma transformação linear direta. No algoritmo RANSAC, para que haja sucesso na seleção das correspondências, um limiar de distância é estabelecido previamente de tal forma que a sua correspondência seja verdadeira considerando um nível de confiança. Na prática, esse limiar pode ser escolhido de forma empírica de modo que a probabilidade entre os pontos e as suas

correspondências seja de, no mínimo, 95%. A partir das correspondências verdadeiras, as falsas correspondências são rejeitadas utilizando-se um parâmetro de erro definido, e em seguida, recalcula-se a correspondência de forma iterativa (FISCHLER; BOLLES, 1981).

FIGURA 33 - ESQUEMA DE PONTOS EXTRAÍDOS NAS ÁREAS DE SOBREPOSIÇÃO.



FONTE: O autor (2016).

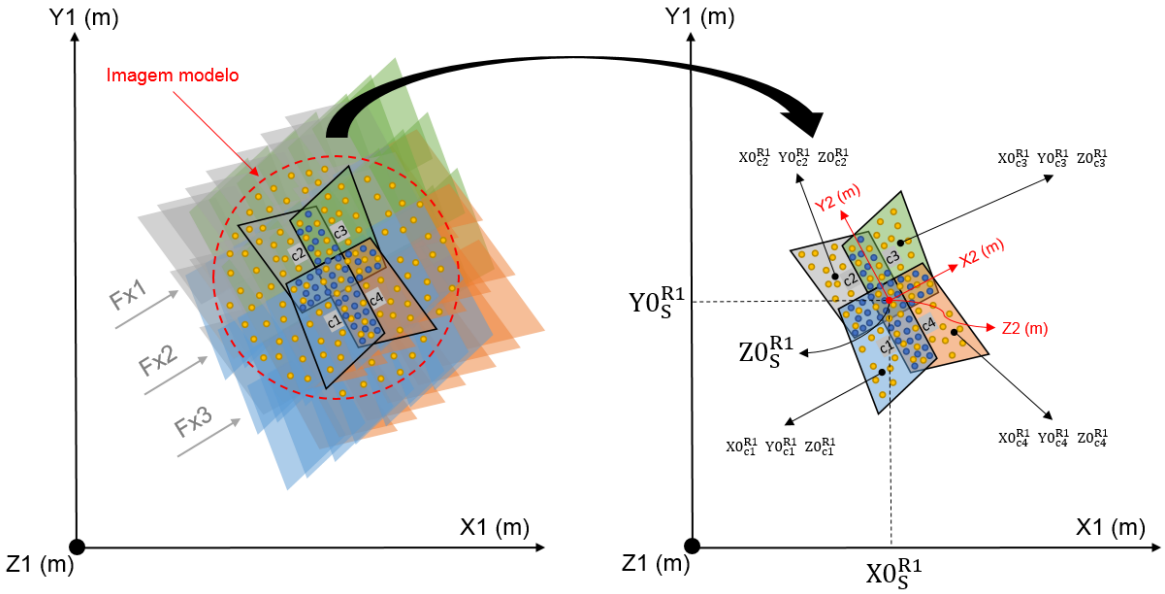
Depois de finalizada a etapa de extração e correlação de pontos fotogramétricos nas áreas de sobreposição das imagens que compõem a imagem modelo, as novas observações extraídas automaticamente $[(x_i\ y_i)_{i=1:n}]_{k=1:4}$ são adicionadas ao bloco original de imagens da etapa (1) para o cálculo das coordenadas no referencial geodésico tridimensional "R1" $(X_i^{R1}\ Y_i^{R1}\ Z_i^{R1})_{i=1\approx2000}$ através de ajustamento simultâneo pelo MMQ utilizando os POI de cada câmera obtidos na etapa (1). Para esse cálculo foram utilizadas as equações (21) e (22).

$$[x_i]_{k=1:4} = -f_k \frac{m_{11}{}_k^{R1}(X_i^{R1}-X0_k^{R1})+m_{12}{}_k^{R1}(Y_i^{R1}-Y0_k^{R1})+m_{13}{}_k^{R1}(Z_i^{R1}-Z0_k^{R1})}{m_{31}{}_k^{R1}(X_i^{R1}-X0_k^{R1})+m_{32}{}_k^{R1}(Y_i^{R1}-Y0_k^{R1})+m_{33}{}_k^{R1}(Z_i^{R1}-Z0_k^{R1})} \quad (21)$$

$$[y_i]_{k=1:4} = -f_k \frac{m_{21}{}_k^{R1}(X_i^{R1}-X0_k^{R1})+m_{22}{}_k^{R1}(Y_i^{R1}-Y0_k^{R1})+m_{23}{}_k^{R1}(Z_i^{R1}-Z0_k^{R1})}{m_{31}{}_k^{R1}(X_i^{R1}-X0_k^{R1})+m_{32}{}_k^{R1}(Y_i^{R1}-Y0_k^{R1})+m_{33}{}_k^{R1}(Z_i^{R1}-Z0_k^{R1})} \quad (22)$$

Para definir o referencial da imagem sintética (denominado de “R2”), foi necessário definir as coordenadas de origem desse referencial ($X0_S^{R1}$ $Y0_S^{R1}$ $Z0_S^{R1}$) no referencial geodésico tridimensional “R1” a partir da média aritmética das coordenadas de posição do centro de perspectiva das quatro imagens que compõem a imagem modelo. Os ângulos de orientação ω_S^{R1} e φ_S^{R1} do referencial da imagem sintética foram definidos como sendo iguais a zero e o ângulo κ_S^{R1} como sendo o ângulo existente entre os eixos X2, Y2 do referencial da imagem sintética “R2” e os eixos X1, Y1 do referencial geodésico tridimensional “R1”, conforme esquema da Figura 34.

FIGURA 34 - DEFINIÇÃO DO REFERENCIAL DA IMAGEM SINTÉTICA.



FONTE: O autor (2016).

Após definir o referencial da imagem sintética “R2”, utilizou-se as informações de origem do referencial adotado ($X0_S^{R1}$ $Y0_S^{R1}$ $Z0_S^{R1}$ ω_S^{R1} φ_S^{R1} κ_S^{R1}), juntamente com as coordenadas tridimensionais (X_i^{R1} Y_i^{R1} Z_i^{R1}) dos pontos fotogramétricos e de controle no referencial geodésico tridimensional “R1” bem como a distância focal nominal definida para imagem sintética ($f_S = 74mm$) para determinar as coordenadas (x_i^{R2} y_i^{R2}) dos pontos fotogramétricos e de controle no referencial da imagem sintética “R2”, utilizando o modelo das equações de colinearidade das equações (23), (24) e (25), cuja unidade de medida resultante está em milímetros (mm).

$$\begin{cases} m_{11_S^{R1}} = cos\varphi_S^{R1}.cos\kappa_S^{R1} \\ m_{12_S^{R1}} = cos\omega_S^{R1}.sen\kappa_S^{R1} + sen\omega_S^{R1}.sen\varphi_S^{R1}.cos\kappa_S^{R1} \\ m_{13_S^{R1}} = sen\omega_S^{R1}.sen\kappa_S^{R1} - cos\omega_S^{R1}.sen\varphi_S^{R1}.cos\kappa_S^{R1} \\ m_{21_S^{R1}} = -cos\varphi_S^{R1}.sen\kappa_S^{R1} \\ m_{22_S^{R1}} = cos\omega_S^{R1}.cos\kappa_S^{R1} - sen\omega_S^{R1}.sen\varphi_S^{R1}.sen\kappa_S^{R1} \\ m_{23_S^{R1}} = sen\omega_S^{R1}.cos\kappa_S^{R1} + cos\omega_S^{R1}.sen\varphi_S^{R1}.sen\kappa_S^{R1} \\ m_{31_S^{R1}} = sen\varphi_S^{R1} \\ m_{32_S^{R1}} = -sen\omega_S^{R1}.cos\varphi_S^{R1} \\ m_{33_S^{R1}} = cos\omega_S^{R1}.cos\varphi_S^{R1} \end{cases} \quad (23)$$

$$[x_i]^{R2} = -f_S \frac{m_{11_S^{R1}}(X_i^{R1} - X0_S^{R1}) + m_{12_S^{R1}}(Y_i^{R1} - Y0_S^{R1}) + m_{13_S^{R1}}(Z_i^{R1} - Z0_S^{R1})}{m_{31_S^{R1}}(X_i^{R1} - X0_S^{R1}) + m_{32_S^{R1}}(Y_i^{R1} - Y0_S^{R1}) + m_{33_S^{R1}}(Z_i^{R1} - Z0_S^{R1})} \quad (24)$$

$$[y_i]^{R2} = -f_S \frac{m_{21_S^{R1}}(X_i^{R1} - X0_S^{R1}) + m_{22_S^{R1}}(Y_i^{R1} - Y0_S^{R1}) + m_{23_S^{R1}}(Z_i^{R1} - Z0_S^{R1})}{m_{31_S^{R1}}(X_i^{R1} - X0_S^{R1}) + m_{32_S^{R1}}(Y_i^{R1} - Y0_S^{R1}) + m_{33_S^{R1}}(Z_i^{R1} - Z0_S^{R1})} \quad (25)$$

Após obter as coordenadas dos pontos fotogramétricos e de controle no referencial da imagem sintética “R2”, finalmente determinou-se os parâmetros de posição e orientação de cada uma das câmeras no referencial da imagem sintética. Para isso, todas as coordenadas obtidas na etapa anterior foram definidas como coordenadas tridimensionais de “pontos de controle da imagem sintética”, ou seja, $(x_i^{R2}\ \ y_i^{R2}, com\ z_i^{R2} = 0)$. Em seguida, utilizou-se as fotocoordenadas $[(x_i\ \ y_i)]_{k=1:4}$ das imagens que compõem a imagem modelo nas equações (26) e (27) para determinar a posição e orientação de cada câmera no referencial da imagem sintética “R2” através de ajustamento simultâneo pelo MMQ com injunção absoluta em todos os pontos de controle da imagem sintética.

$$[x_i]_{k=1:4} = -f_S \frac{m_{11_k^{R2}}(x_i^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{12_k^{R2}}(y_i^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{13_k^{R2}}(z_i^{R2} - Z0_k^{R2})}{m_{31_k^{R2}}(x_i^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{32_k^{R2}}(y_i^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{33_k^{R2}}(z_i^{R2} - Z0_k^{R2})} \quad (26)$$

$$[y_i]_{k=1:4} = -f_S \frac{m_{21_k^{R2}}(x_i^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{22_k^{R2}}(y_i^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{23_k^{R2}}(z_i^{R2} - Z0_k^{R2})}{m_{31_k^{R2}}(x_i^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{32_k^{R2}}(y_i^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{33_k^{R2}}(z_i^{R2} - Z0_k^{R2})} \quad (27)$$

A obtenção dos parâmetros de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética “R2” encerrou a calibração de plataforma e

consequentemente a determinação dos parâmetros do sistema de imageamento. Na etapa seguinte, a qualidade dos parâmetros de posição e orientação das câmeras foi analisada individualmente bem como a necessidade dos parâmetros de posição e orientação de cada câmera serem refinados para que a imagem sintética não apresente distorções nas áreas de junção e que a qualidade geométrica e radiométrica seja compatível com aplicações de mapeamento fotogramétrico.

3.5 GERAÇÃO DA IMAGEM SINTÉTICA E ANÁLISE DE QUALIDADE

A geração da imagem sintética é uma das etapas fundamentais do processamento de dados do sistema TACx4 pois permite produzir uma imagem virtual única a partir da junção do conjunto de quatro imagens geradas pelo sistema em cada instante de aquisição. Esse processo é feito pelo programa “SIGP” (*Synthetic Image Generation Program*) que foi desenvolvido neste trabalho no Laboratório de Fotogrametria da UFPR e o seu código implementado na plataforma Matlab segue apresentado no Apêndice 1. Durante a geração da imagem sintética, utilizam-se os POI e POE das câmeras que foram obtidos na etapa de determinação dos parâmetros do sistema de imageamento (item 3.4) bem como o modelo matemático das equações de colinearidade conforme apresentado nas equações (28), (29), (30) e (31).

$$x_i{}^{R2} = (pixelx_{sint} - Cx_{sint}) * dimpixel_{sint} + (\delta x_k * dimpixel_{sint}) \tag{28}$$

$$y_i{}^{R2} = (-pixely_{sint} - Cy_{sint}) * dimpixel_{sint} + (\delta y_k * dimpixel_{sint}) \tag{29}$$

$$[x_i]_{k=1:4} = -f_s \frac{m_{11}{}_k^{R2}(x_i{}^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{12}{}_k^{R2}(y_i{}^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{13}{}_k^{R2}(z_i{}^{R2} - Z0_k^{R2})}{m_{31}{}_k^{R2}(x_i{}^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{32}{}_k^{R2}(y_i{}^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{33}{}_k^{R2}(z_i{}^{R2} - Z0_k^{R2})} \tag{30}$$

$$[y_i]_{k=1:4} = -f_c \frac{m_{21}{}_k^{R2}(x_i{}^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{22}{}_k^{R2}(y_i{}^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{23}{}_k^{R2}(z_i{}^{R2} - Z0_k^{R2})}{m_{31}{}_k^{R2}(x_i{}^{R2} - X0_k^{R2}) + m_{32}{}_k^{R2}(y_i{}^{R2} - Y0_k^{R2}) + m_{33}{}_k^{R2}(z_i{}^{R2} - Z0_k^{R2})} \tag{31}$$

Nas equações (30) e (31), os valores de $(x_i^{R2}\ y_i^{R2}, com\ z_i^{R2} = 0)$ são as coordenadas da imagem sintética que são convertidas do referencial de imagem (*pixels*) para o referencial da imagem sintética “R2” cuja unidade de medida é

milímetros. Os valores de $(X0_k^{R2}\ Y0_k^{R2}\ Z0_k^{R2})_{k=1:4}$ e $(m_{11_k}^{R2} \dots m_{33_k}^{R2})_{k=1:4}$ correspondem respectivamente às coordenadas da posição do centro de perspectiva e à matriz de rotação dos ângulos de Euler das câmeras no referencial da imagem sintética. Os valores de $[(x_i\ \ y_i)]_{k=1:4}$ são as coordenadas dos pixels no referencial fotogramétrico da câmera correspondente à posição do pixel na imagem sintética. A conversão das coordenadas do referencial de imagem (*pixels*) para o referencial da imagem sintética em milímetros é obtida através das equações (28) e (29) onde $(pixelx_{sint}\ \ pixely_{sint})$ são as coordenadas da imagem sintética em pixels, cuja dimensão do pixel da imagem sintética $(dimpixel_{sint})$ é igual a 5.6µm. Os valores de Cx_{sint} e Cy_{sint} correspondem às coordenadas do centro da imagem sintética e são calculados por $Cx_{sint} = \frac{12000}{2}$ e $Cy_{sint} = \frac{16200}{2}$, onde 12000 x 16200 pixels equivale à dimensão da imagem sintética, ou seja, 194.4 megapixels. Os valores de $\delta x_k\ \delta y_k$ compreendem às correções residuais de distorção de cada câmera e tais valores são calculados na etapa de análise da qualidade. Em geral, esses valores devem ser iguais a zero, porém, dependendo da qualidade dos parâmetros obtidos na etapa de calibração, esses valores podem ser determinados para corrigir resíduos da calibração das câmeras e eliminar possíveis variações geométricas existentes na área de junção da imagem sintética. Sendo assim, com base nas coordenadas $([x_i]_k\ [y_i]_k)$ dos pixels da imagem sintética correspondentes à cada câmera, utilizando os valores de POI da câmera correspondente, determinam-se as coordenadas com distorção $([x_i]_k^d\ [y_i]_k^d)$ utilizando as equações (32), (33), (34), (35) e (36).

$$r_k = \sqrt{\left(x_{i_k}\right)^2 + \left(y_{i_k}\right)^2} \tag{32}$$

$$\Delta_{x_k} = \left(K_{1_k} {r_k}^2 + K_{2_k} {r_k}^4 + K_{3_k} {r_k}^6\right) x_{i_k} + P_{1_k}\left({r_k}^2 + 2{x_{i_k}}^2\right) + 2P_{2_k} x_{i_k} y_{i_k} \tag{33}$$

$$\Delta_{y_k} = \left(K_{1_k} {r_k}^2 + K_{2_k} {r_k}^4 + K_{3_k} {r_k}^6\right) y_{i_k} + 2P_{1_k} x_{i_k} y_{i_k} + P_{2_k}\left({r_k}^2 + 2{y_{i_k}}^2\right) \tag{34}$$

$$[x_i]_k^d = x_{i_k} + x_{p_k} + \Delta_{x_k} \tag{35}$$

$$[y_i]_k^d = y_{i_k} + y_{p_k} + \Delta_{y_k} \tag{36}$$

Após a obtenção das coordenadas com distorção ($[x_i]_k^d$ $[y_i]_k^d$), essas foram transformadas do referencial fotogramétrico em milímetros para o referencial de imagem (pixels). Em seguida, os valores RGB da imagem correspondente são obtidos através de interpolação bilinear conforme equações (37), (38), (39), (40) e (41).

$$pixelx_k = \left(\frac{[x_i]_k^d}{dimpixel_k}\right) + Cx_k \tag{37}$$

$$pixely_k = -\left(\frac{[y_i]_k^d}{dimpixel_k}\right) + Cy_k \tag{38}$$

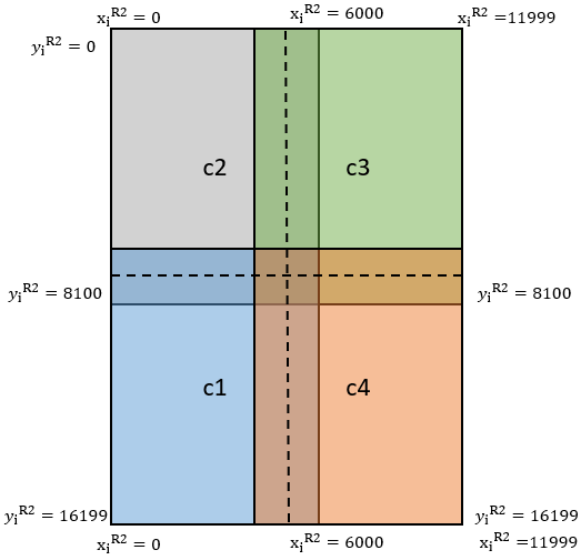
$$dx_k = pixelx_k - int(pixelx_k) \tag{39}$$

$$dy_k = pixely_k - int(pixely_k) \tag{40}$$

$$RGB_k = RGB_{pixelx_k,pixely_k} + \left[dx_k.\left(RGB_{pixelx+1_k,pixely_k} - RGB_{pixelx_k,pixely_k}\right)\right] + \\ +\left[dy_k.\left(RGB_{pixelx_k,pixely+1_k} - RGB_{pixelx_k,pixely_k}\right)\right] + \left[dxy_k.\left(RGB_{pixelx_k,pixely_k} - \right.\right. \\ \left.\left. RGB_{pixelx+1_k,pixely_k} - RGB_{pixelx_k,pixely+1_k} + RGB_{pixelx+1_k,pixely+1_k}\right)\right] \tag{41}$$

Durante a geração da imagem sintética, esse processo foi repetido para todas as câmeras do sistema TACx4 cujas coordenadas dos pixels da imagem sintética correspondem aos pixels da posição de cada câmera conforme esquema de posicionamento apresentado na Figura 35. Ressalta-se também que durante a fase de geração da imagem, algoritmos de equalização e balanceamento de imagens (*dodging*) bem como algoritmos de mosaicagem foram utilizados de modo que a imagem resultante não apresente descontinuidade radiométrica nas áreas de junção.

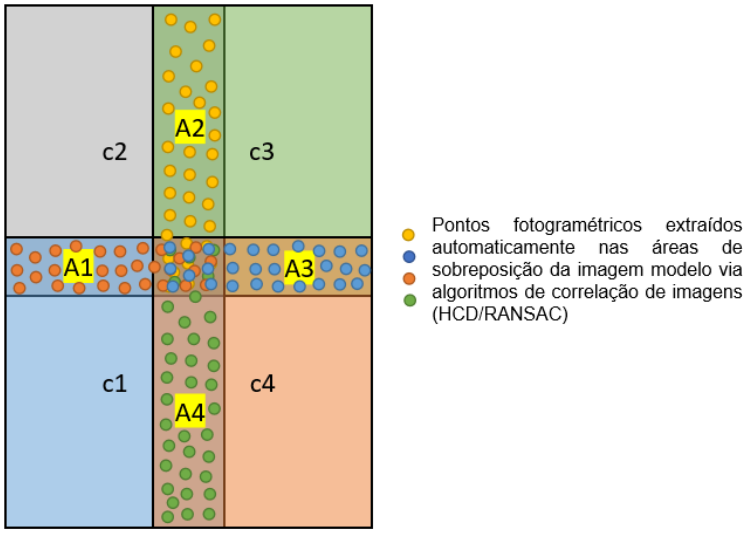
FIGURA 35 - ESQUEMA DAS IMAGENS QUE COMPÕEM A IMAGEM SINTÉTICA.



FONTE: O autor (2016).

Depois de finalizada a etapa de geração da imagem sintética, a sua qualidade geométrica foi analisada para verificar à existência de descontinuidades nas áreas de junção das imagens. Essa análise foi realizada nas áreas de sobreposição das imagens projetadas no plano da imagem sintética, cujas áreas são denominadas “A1”, “A2”, “A3” e “A4” conforme apresentado na Figura 36.

FIGURA 36 - PONTOS EXTRAÍDOS PARA A ANÁLISE DE QUALIDADE GEOMÉTRICA.



FONTE: O autor (2016).

Durante a verificação da qualidade geométrica da imagem sintética, aplica-se uma análise estatística de diferenças existentes entre as coordenadas dos pares de

pontos homólogos extraídos em cada área de sobreposição. Essa análise considera hipótese de que em uma imagem sintética sem distorções geométricas, as médias aritméticas das diferenças de coordenadas ($dx_k\ dy_k$) dos pares de pontos homólogos, quando extraídos nas imagens projetadas no plano da imagem sintética, sejam aproximadamente iguais a zero e com um desvio-padrão inferior a 0,5 pixel. Para o cálculo das diferenças de coordenadas dos pontos homólogos são utilizadas as equações (42) e (43).

$$dx_k = \begin{bmatrix} x1_k - x1_{k+1} \\ x2_k - x2_{k+1} \\ x3_k - x3_{k+1} \\ \vdots \\ xn_k - xn_{k+1} \end{bmatrix}_{k=1:4} \tag{42}$$

$$dy_k = \begin{bmatrix} y1_k - y1_{k+1} \\ y2_k - y2_{k+1} \\ y3_k - y3_{k+1} \\ \vdots \\ yn_k - yn_{k+1} \end{bmatrix}_{k=1:4} \tag{43}$$

O procedimento apresentado anteriormente é aplicado em todas as áreas de sobreposição combinando todos os pares de pontos homólogos extraídos para o cálculo das estatísticas. Caso os valores de média das diferenças sejam superiores aos limiares pré-estabelecidos, determinam-se coeficientes de correção de cada câmera ($\delta x_k\ \delta y_k$) a partir da média aritmética das diferenças encontradas. Esses coeficientes são então utilizados nas equações (43) e (44) para a geração de uma nova imagem sintética bem como análise de qualidade, até que as diferenças sejam inferiores aos limiares estabelecidos, garantindo assim a qualidade geométrica da imagem sintética.

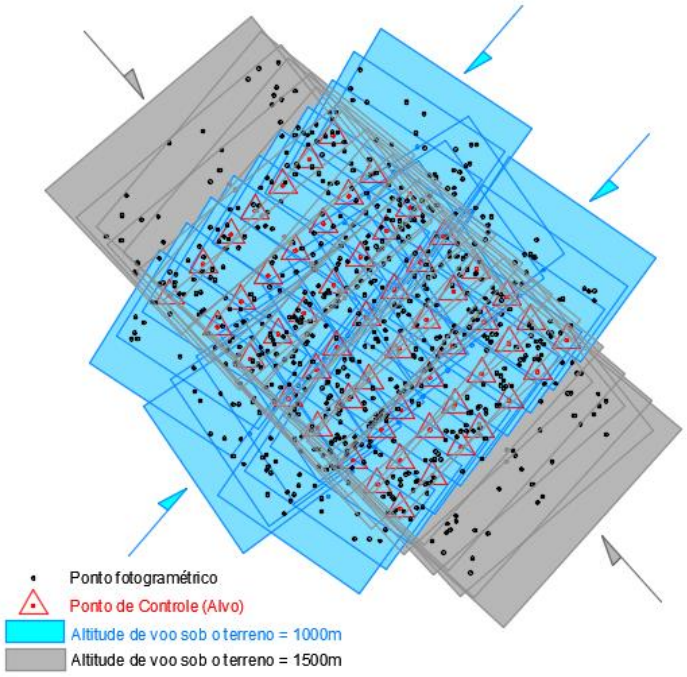
A análise da qualidade geométrica da imagem sintética e determinação de coeficientes de correção, quando necessário, são realizadas anualmente e sempre na fase de calibração do conjunto de imageamento do sistema TACx4. Entretanto, a verificação da qualidade geométrica da imagem sintética é realizada sistematicamente

no conjunto de imagens de cada missão de voo, permitindo assim que tanto os POI quanto os POE das câmeras sejam constantemente monitorados a cada voo executado. Isso permite detectar eventuais variações na geometria do sistema de imageamento imediatamente após a realização de um voo, bem como determinar novos coeficientes de correção a partir da análise de diferenças entre os pares de pontos homólogos, assegurando assim a qualidade geométrica da imagem sintética.

3.6 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA

A determinação dos parâmetros de orientação interior e ângulos de desalinhamento da imagem sintética do sistema TACx4 é a primeira de duas estratégias avaliadas neste trabalho para calibrar o sistema após a obtenção da imagem sintética. Essa etapa é fundamental para que se determinem os parâmetros de relacionamento entre os referenciais da IMU e da imagem sintética possibilitando assim o seu uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto de imagens. Para determinar tais parâmetros, utilizou-se de um bloco de 52 imagens organizado em 5 faixas de imagens sintéticas. O primeiro conjunto contém 3 faixas com 10 imagens por faixa, em direções opostas e tomadas a 1000 m de altura de voo, o que resultou em um pixel com resolução espacial aproximada de 8 cm. O segundo conjunto contém 2 faixas com 11 imagens por faixa, também em direções opostas e tomadas a 1500 m de altura de voo, o que resultou em um pixel com resolução espacial aproximada de 12 cm. A sobreposição longitudinal e lateral das imagens do primeiro conjunto foi de respectivamente 80% e 50% em todas as faixas de voo. No segundo conjunto, a sobreposição longitudinal das imagens foi também de 80%, entretanto, a sobreposição lateral foi de 100% conforme esquema apresentado na Figura 37.

FIGURA 37 - BLOCO DE IMAGENS USADO PARA A DETERMINAÇÃO DE POI E PARÂMETROS DE MONTAGEM DA IMAGEM SINTÉTICA.



FONTE: O autor (2016).

De maneira similar ao procedimento de determinação dos POI de cada câmera, determinou-se os parâmetros de orientação interior da imagem sintética, ou seja, distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2). Para isso, utilizou-se também o ajustamento simultâneo pelo MMQ do modelo matemático das equações de colinearidade com parâmetros adicionais apresentadas na seção 2.3. Para isso utilizou-se observações de fotocoordenadas $(x_i \ y_i)_{sint}$ de pontos fotogramétricos extraídos automaticamente com algoritmos de correlação de imagens com LSM (*Least Square Matching*) no bloco de imagens sintéticas e coordenadas de pontos de controle no referencial geodésico tridimensional "R1" $(X_j^{R1} \ Y_j^{R1} \ Z_j^{R1})_{j=1:56}$. Entretanto, diferentemente da determinação dos POI de cada câmera, os parâmetros de posição $(X0_l^{R1} \ Y0_l^{R1} \ Z0_l^{R1})$ das imagens do bloco não foram considerados como incógnitas no ajustamento, mas sim fixados com valores fornecidos pela trajetória da unidade de medição do sistema inercial com precisão equivalente à solução da trajetória no modo "*SmartBase pós-processado*" com base de rastreio GNSS em solo, alcançando valores de precisão conforme apresentados na Figura 28 (pág. 55). Com esse procedimento, as observações de posição $(X0_l^{R1} \ Y0_l^{R1} \ Z0_l^{R1})_{INS}$ fornecidas pela unidade de medição do sistema inercial foram consideradas como coincidentes com

a origem do referencial da imagem sintética. Para determinar os POI da imagem sintética utilizou-se também o programa CALIBRAV.

Após a determinação dos POI da imagem sintética, foram obtidos os ângulos de desalinhamento ($\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, $\Delta\kappa$) existentes entre os referenciais da imagem sintética e da unidade de medição do sistema inercial. Nessa etapa, utilizou-se o modelo matemático das equações (7), (14), (15) e (16) do método de calibração por etapas (*Two-Step Procedure*) conforme apresentado na seção 2.7. Esse modelo determina os elementos da matriz de rotação dos ângulos de desalinhamento (R_c^b) existentes entre os referenciais da IMU e da imagem sintética a partir das diferenças existentes entre os elementos da matriz de rotação dos ângulos de orientação do referencial da IMU (R_b^m) e os elementos da matriz de rotação dos ângulos de orientação do referencial da imagem sintética (R_c^m), ambos vinculados a um dado referencial geodésico tridimensional "R1". Para isso, os parâmetros de orientação exterior no referencial da imagem sintética $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1}\ \omega_l^{R1}\ \varphi_l^{R1}\ \kappa_l^{R1})$ foram obtidos previamente a partir de um ajustamento simultâneo pelo MMQ baseado no modelo matemático das equações de colinearidade. A determinação dos ângulos de desalinhamento foi feita pelo programa "TSICP" (*Two-Step Inertial Calibration Program*) que foi desenvolvido neste trabalho no Laboratório de Fotogrametria da UFPR e o seu código implementado na plataforma Matlab segue apresentado no Apêndice 2.

3.7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR, POSIÇÃO RELATIVA E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA

A determinação dos parâmetros de orientação interior, posição relativa e ângulos de desalinhamento do sistema TACx4 é a segunda de duas abordagens que foram avaliadas neste trabalho para calibrar o sistema após a obtenção da imagem sintética. Essa abordagem é semelhante a primeira pois também determina os POI da imagem sintética juntamente com os ângulos de desalinhamento. Entretanto, o que a difere da primeira abordagem é a determinação das componentes de posição relativa (ΔX, ΔY, ΔZ) existentes entre os referenciais da imagem sintética e da unidade de medição do sistema inercial. Nessa etapa, utilizou-se o modelo matemático das equações (17) e (18) do método de calibração simultânea (*Single-Step Procedure*)

conforme apresentado na seção 2.7. Esse modelo determina os parâmetros de montagem incorporando os elementos de posição relativa (r_c^b) e ângulos de desalinhamento (R_c^b), ambos vinculados a um dado referencial “R1”, aos parâmetros de orientação interior (r_i^c) como incógnitas em um modelo matemático modificado das equações de colinearidade através da soma de três vetores após a aplicação das matrizes de rotação e um fator de escala. A demonstração abaixo mostra a dedução do modelo matemático da equação (17) no modelo de equações de colinearidade modificadas (PINTO; FORLANI, 2002; KERSTING, 2011).

$$r_i^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i^m = r_b^m(t) + R_b^m(t).r_c^b + \lambda_i.R_b^m(t).R_c^b.r_i^c \tag{44}$$

A equação (44) representa o modelo matemático utilizado no método de calibração simultânea onde:

- $r_i^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i^m$ representa as coordenadas tridimensionais de um ponto em um referencial geodésico tridimensional “R1”;
- $r_b^m(t)$ representa as coordenadas tridimensionais da unidade de medição inercial no referencial geodésico tridimensional R1 no instante de tempo “t”;
- $R_b^m(t)$ representa a matriz de rotação do referencial da unidade de medição inercial no referencial geodésico tridimensional R1 no mesmo instante de tempo “t”;
- r_c^b representa os elementos de posição relativa entre o referencial da unidade de medição inercial e o referencial da imagem sintética;
- λ_i representa o fator de escala que relaciona os referenciais de espaço imagem e espaço objeto;
- R_c^b representa a matriz de rotação dos ângulos de desalinhamento do referencial da unidade de medição inercial e o referencial da imagem sintética no mesmo instante de tempo “t”; e

- $r_i^c = \begin{bmatrix} x_i - x_p - \Delta_x \\ y_i - y_p - \Delta_y \\ -f \end{bmatrix}$ é o vetor que conecta um ponto no espaço imagem ao espaço objeto.

Isolando os termos da equação (44) conforme preconizado nas equações de colinearidade, é possível escrever essa equação em função das observações de fotocoordenadas conforme modelo abaixo.

$$r_i^c = \begin{bmatrix} x_i - x_p - \Delta_x \\ y_i - y_p - \Delta_y \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_i} R_b^c (R_m^b(t)[r_i^m - r_b^m(t)] - r_c^b) = \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} N_x^c \\ N_y^c \\ D^c \end{bmatrix} \quad (45)$$

Com:

- $N_x^c = m_{11}(X_i^{R1} - X_c^{R1}) + m_{21}(Y_i^{R1} - Y_c^{R1}) + m_{31}(Z_i^{R1} - Z_c^{R1})$;
- $N_y^c = m_{12}(X_i^{R1} - X_c^{R1}) + m_{22}(Y_i^{R1} - Y_c^{R1}) + m_{23}(Z_i^{R1} - Z_c^{R1})$;
- $D^c = m_{13}(X_i^{R1} - X_c^{R1}) + m_{23}(Y_i^{R1} - Y_c^{R1}) + m_{33}(Z_i^{R1} - Z_c^{R1})$; e
- $M_Z(\kappa).M_Y(\varphi).M_X(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} = cos\varphi.cos\kappa \\ m_{12} = cos\omega.sen\kappa + sen\omega.sen\varphi.cos\kappa \\ m_{13} = sen\omega.sen\kappa - cos\omega.sen\varphi.cos\kappa \\ m_{21} = -cos\varphi.sen\kappa \\ m_{22} = cos\omega.cos\kappa - sen\omega.sen\varphi.sen\kappa \\ m_{23} = sen\omega.cos\kappa + cos\omega.sen\varphi.sen\kappa \\ m_{31} = sen\varphi \\ m_{32} = -sen\omega.cos\varphi \\ m_{33} = cos\omega.cos\varphi \end{bmatrix}$

Onde:

- $X_i^{R1}, Y_i^{R1}, Z_i^{R1}$ representa as coordenadas tridimensionais de um ponto “i” em um referencial geodésico tridimensional R1;
- $X_c^{R1}, Y_c^{R1}, Z_c^{R1}$ representa as coordenadas tridimensionais do centro de perspectiva da câmera no referencial no referencial geodésico tridimensional R1; e

- $M_Z(\kappa).M_Y(\varphi).M_X(\omega)$ representa os elementos (m_{11} ... m_{33}) da matriz de rotação dos ângulos de orientação do centro de perspectiva da câmera no referencial geodésico tridimensional R1.

A partir da equação (45), é possível obter o modelo matemático das equações de colinearidade conforme equações (46) e (47):

$$x_i = x_p - f\ \frac{N_x^c}{D^c} + \Delta_x \tag{46}$$

$$y_i = y_p - f\ \frac{N_y^c}{D^c} + \Delta_y \tag{47}$$

A partir das equações (46) e (47) é possível aplicar o modelo de ajustamento simultâneo pelo MMQ utilizando o Método Paramétrico (48) expressando as observações em função de suas incógnitas ($L_a = F(X_a)$), ou seja:

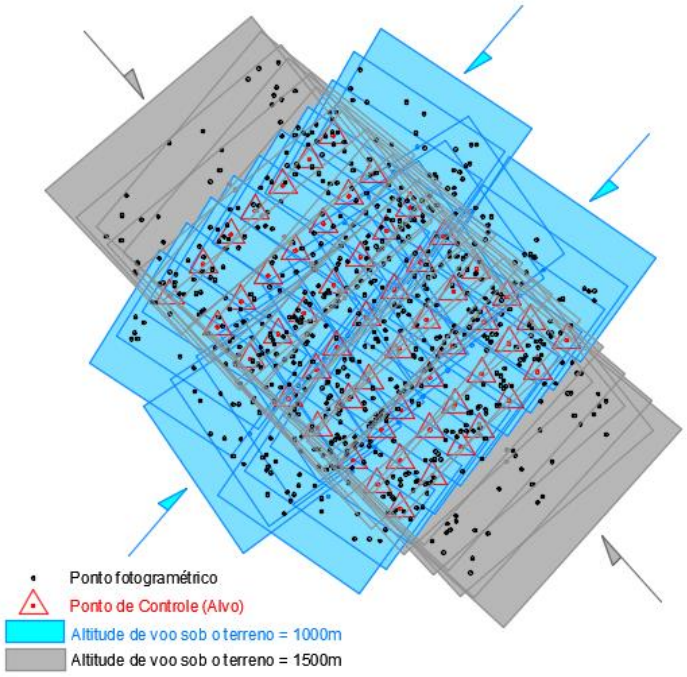
$$\vec{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P \vec{y} \tag{48}$$

Onde:

- $\vec{x}$ representa o vetor de parâmetros (incógnitas) que compreendem os parâmetros de orientação interior, posição relativa e ângulos de desalinhamento);
- A representa a matriz de derivadas parciais das observações em função das incógnitas;
- P representa a matriz de pesos determinados a partir da matriz variância-covariância das observações: $P = \frac{1}{\Sigma_{\vec{x}}{}^2}$; e
- $\vec{y}$ representa o vetor de observações (fotocoordenadas).

Para determinar os parâmetros na calibração simultânea, utilizou-se o mesmo bloco utilizado na primeira abordagem e que contém 52 imagens organizado em 5 faixas de imagens sintéticas, conforme Figura 38.

FIGURA 38 - BLOCO DE IMAGENS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR, POSIÇÃO RELATIVA E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO.



FONTE: O autor (2016).

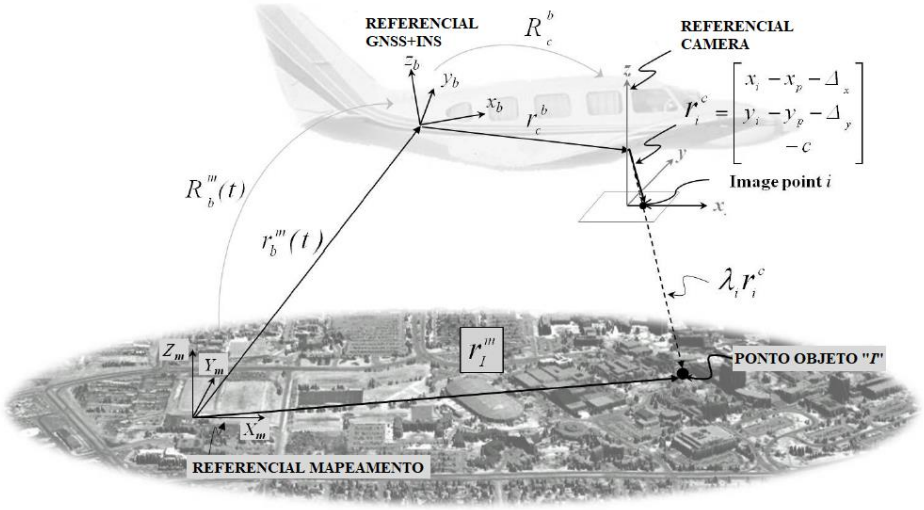
Para determinar todos os parâmetros envolvidos na calibração simultânea, utilizou-se o programa “MSAT” (*Multi-Sensor Aerial Triangulation*) desenvolvido na *University of Calgary*. Durante esse processamento, foram utilizadas as mesmas observações utilizadas na primeira abordagem de calibração, ou seja, fotocoordenadas, coordenadas de pontos de controle, além de posição e orientação provenientes da unidade de medição inercial do sistema GNSS+INS, cuja precisão na posição e orientação também equivale à precisão da trajetória no modo “*SmartBase pós-processado*” com base de rastreio GNSS em solo, alcançando valores de precisão conforme apresentados na Figura 28 (pág. 55).

3.8 VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA PARA USO EM APLICAÇÕES DE MAPEAMENTO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

A validação da calibração do sistema TACx4 compreende a última etapa desenvolvida neste trabalho e teve como objetivo principal avaliar a qualidade dos resultados obtidos para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Neste trabalho, o termo “georreferenciamento direto” é utilizado para descrever o processo de determinação do vetor (r_I^m) que representa as coordenadas

tridimensionais de um ponto de interesse em um referencial geodésico tridimensional “R1”, conforme apresentado na Figura 39. Essa determinação ocorre de forma direta a partir das informações de posição e orientação da unidade de medição do sistema GNSS+INS (r_b^m e R_b^m) no referencial geodésico tridimensional “R1” que são projetadas para o referencial da imagem sintética a partir da posição relativa e ângulos de desalinhamento (r_c^b e R_c^b), cuja trajetória possui precisão na posição e orientação equivalente à precisão da trajetória no modo “*SmartBase pós-processado*” com base de rastreio GNSS, conforme apresentado na Figura 28. Além disso, utiliza-se os POI da imagem sintética (r_i^c) que representam a distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2) conforme mostra a figura abaixo.

FIGURA 39 - DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS NO ESPAÇO OBJETO POR GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.

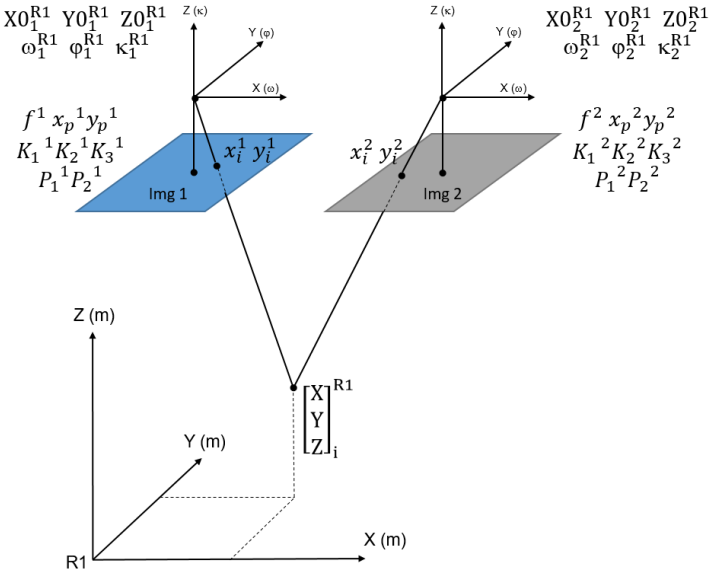


FONTE: TRADUZIDO DE KERSTING (2011).

Em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto, a determinação das coordenadas tridimensionais de um ponto de interesse no referencial geodésico tridimensional adotado, ocorre de forma direta, ou seja, sem a utilização de ajustamento simultâneo pelo MMQ. Neste caso, a determinação das coordenadas tridimensionais ocorre através de interseção fotogramétrica e utiliza observações de fotocoordenadas de um par de imagens juntamente com parâmetros de orientação exterior e interior (Figura 40). No caso de existir mais do que um par de observações de fotocoordenadas para um mesmo ponto, as observações são combinadas par a par para obtenção das coordenadas tridimensionais no espaço

objeto possibilitando assim o cálculo de estatísticas de precisão e exatidão das coordenadas obtidas.

FIGURA 40 - DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS NO ESPAÇO OBJETO POR INTERSEÇÃO FOTOGRAMÉTRICA.



FONTE: O autor (2016).

A determinação das coordenadas tridimensionais no referencial geodésico tridimensional adotado com georreferenciamento direto foi feita por interseção fotogramétrica a partir do modelo matemático das equações de colinearidade. Para isso utilizou-se programa “DGCP” (*Direct Georeferencing Checker Program*) que foi desenvolvido neste trabalho no Laboratório de Fotogrametria da UFPR e a sua interface implementada na plataforma Borland RAD Studio C++ segue apresentada no Apêndice 3. Esse programa utiliza como entrada os seguintes dados:

- Arquivo de POI da imagem sintética (f, x_p, y_p, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2);
- Arquivo de POE da unidade de medição inercial do sistema GNSS+INS (ID X_0, Y_0, Z_0, ω, φ, κ);
- Arquivo de Parâmetros de Montagem que representam a posição relativa e os ângulos de desalinhamento (ΔX, ΔY, ΔZ, $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, $\Delta\kappa$) existentes entre o referencial da unidade de medição do sistema GNSS+INS e da imagem sintética;

- Arquivo de coordenadas no espaço imagem (x, y) contendo medições automáticas de pontos fotogramétricos e medições manuais de pontos de controle; e
- Arquivo de coordenadas no espaço objeto (X, Y, Z) contendo coordenadas de pontos de controle obtidos em campo com receptores GNSS de dupla frequência aplicando técnicas de posicionamento relativo estático.

Inicialmente, utilizou-se o conjunto de dados do campo de calibração para analisar estatisticamente a precisão e exatidão dos resultados obtidos e se a metodologia possibilitou calibrar o sistema de maneira adequada para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Em seguida, foram utilizados conjuntos de dados de três projetos independentes para avaliar a estabilidade da calibração do sistema e a possibilidade de uso em projetos independentes dos utilizados para a calibração. Por fim, os resultados de precisão e exatidão obtidos tanto no campo de calibração como nos projetos independentes foram analisados com os critérios estabelecidos Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) conforme preconizado na Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).

Assim como previsto na ET-ADGV, para que um produto digital possa ser aceito como produto de Referência do SCN (Sistema Cartográfico Nacional), e consequentemente para a INDE, a exemplo do previsto para o PEC (produtos analógicos), noventa por cento (90% ou 1,6449*EP) dos erros de pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas obtidas em campo por técnicas de levantamento GNSS com precisão geodésica, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD, devendo ainda apresentar os valores de EP também iguais, ou inferiores, aos previstos. As escalas abrangidas são: 1:1.000; 1:2.000; 1:5.000; 1:10.000; 1:25.000; 1:50.000; 1:100.000 e 1:250.000. Os produtos digitais foram classificados em 4 classes (“A”, “B”, “C” e “D”), tendo como norteador o Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. Para as escalas não abrangidas por esse decreto foram realizadas extrapolações, mantendo-se os valores previstos do PEC Planimétrico e do PEC Altimétrico. Para alguns produtos

cartográficos digitais foram determinados novos valores, com base nos trabalhos de Merchant (1982), ASPRS (1990) e Ariza (2002).

TABELA 1 - PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA PLANIMÉTRICA DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD).

PEC[1]	PEC -PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A[2]	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B[1]	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C[1]	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D[1]	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

FONTE: DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO (2011).

TABELA 2 - PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA ALTIMÉTRICA DOS PONTOS COTADOS E DO MDT, MDE E MDS DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD).

PEC -PCD [3]	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

FONTE: DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO (2011).

Na Tabela 1, o PEC-PCD Planimétrico e o EP das classes “B”, “C” e “D” correspondem, nessa ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. A Tabela 2 estabelece o PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) e para os Pontos Cotados. Os valores previstos para a classe “A” (PEC-PCD) foram definidos a partir de adaptações dos estudos realizados por Merchant (1982) e ASPRS (1990), nos quais o PEC-PCD =0,27*Equidistância do produto cartográfico e o EP=1/6*equidistância do produto cartográfico. As classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos conforme padrões estabelecidos na PEC-PCD da ET-ADGV, foi necessário aplicar testes estatísticos em duas fases conforme proposto por Dean Merchant (MERCHANT, 1982). A primeira

fase verificou a existência de tendências nas componentes posicionais X, Y, Z baseada na distribuição "*t de Student*" para a detecção de erros sistemáticos. A segunda fase verificou a exatidão das componentes posicionais baseada na distribuição "*Qui-Quadrado*". Tanto a análise de tendências quanto exatidão foram aplicadas aos padrões estabelecidos nas classes A, B, C e D nas escalas 1:1000, 1:2000 e 1:5000 conforme PEC-PCD da ET-ADGV para uso em projetos de mapeamento com escala cadastral. A análise de tendência verificou as discrepâncias entre as coordenadas de referência ($\mathrm{X_i^R\ Y_i^R\ Z_i^R}$) fornecidas pelos pontos de controle, com as coordenadas obtidas no processo de georreferenciamento direto ($\mathrm{X_i^{GD}\ Y_i^{GD}\ Z_i^{GD}}$). Para essa análise, utilizou-se as equações conforme abaixo.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i^R - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i^{GD} \tag{49}$$

A partir dos valores de discrepâncias, a média e a variância amostral da componente posicional "X" foi determinada através das equações (50) e (51).

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i}{n} \tag{50}$$

$$\sigma_{\Delta X}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta X_i - \overline{\Delta X})}{n-1} \tag{51}$$

Onde "n" corresponde ao número de pontos analisados. De maneira similar esse procedimento foi aplicado para as componentes "Y" e "Z".

Para analisar a existência de tendências na componente posicional "X", verificou-se as seguintes hipóteses conforme equações (52) e (53):

$$H_0: \overline{\Delta X} = 0 \tag{52}$$

$$H_1: \overline{\Delta X} \neq 0 \tag{53}$$

Em seguida, determinou-se a estatística amostral “t” para comprovar se a mesma está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

$$t_X = \frac{\overline{\Delta X}}{\sigma_{\Delta X}}\sqrt{n} \tag{54}$$

O intervalo de confiança é dado por $t_{\left(n-1,\frac{\alpha}{2}\right)}$ em que α representa o nível de significância adotado no PEC-PCD da ET-ADGV. A ausência de tendências foi verificada por:

$$|t_X| \leq t_{\left(n-1,\frac{\alpha}{2}\right)}. \tag{55}$$

De maneira similar, a análise de tendência aplicada para as componentes “Y” e “Z” e seus valores avaliados conforme critérios estabelecidos no PEC-PCD.

Para analisar a exatidão das componentes posicionais, foram comparados os valores de desvio-padrão das discrepâncias com o EP conforme especificado nas classes A, B, C e D nas escalas 1:1000, 1:2000 e 1:5000 do PEC-PCD da ET-ADGV (MERCHANT, 1982). Para isso, verificou-se as seguintes hipóteses na componente “X”:

$$H_0: \sigma^2_{\Delta X} = \sigma^2_X \tag{56}$$

$$H_0: \sigma^2_{\Delta X} > \sigma^2_X \tag{57}$$

Onde σ^2_X representa o Erro Padrão conforme especificado na classe e na escala que está sendo verificada.

Em seguida, o valor do Qui-quadrado amostral de cada componente posicional “X” foi calculado e analisado com o valor especificado no intervalo de confiança do nível significância adotado no PEC-PCD da ET-ADGV:

$$\chi_X^2 = (n-1)\frac{\sigma_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (58)$$

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1,\alpha)}^2 \quad (59)$$

Caso a hipótese apresentada em (57) seja atendida, os resultados obtidos são compatíveis com a exatidão da classe e escala que está sendo verificada conforme previsto no PEC-PCD da ET-ADGV. É importante lembrar que de maneira similar à análise de tendência, a análise de exatidão também foi aplicada para as componentes “Y” e “Z” separadamente e seus valores avaliados conforme critérios estabelecidos no PEC-PCD. Conforme descrito anteriormente, a análise estatística apresentada foi aplicada tanto nos resultados obtidos no campo de calibração quanto dos resultados obtidos nos projetos independentes, com o objetivo de avaliar a qualidade bem como estabilidade dos parâmetros obtidos na etapa de calibração e a viabilidade de uso dos resultados em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos na calibração do sistema TACx4 bem como a sua validação para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. O item 4.2 apresenta uma análise de qualidade dos POI de cada uma das câmeras bem como os parâmetros de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética. Em seguida, os itens 4.3 e 4.4 apresentam respectivamente uma análise de qualidade da primeira abordagem de calibração que determinou os parâmetros de orientação interior e ângulos de desalinhamento da imagem sintética pelo método por etapas (*Two-Step Procedure*), bem como a segunda abordagem que determinou os parâmetros de orientação interior, posição relativa e ângulos de desalinhamento da imagem sintética utilizando o método simultâneo (*Single-Step Procedure*). O item 4.5 apresenta uma análise de qualidade da determinação de coordenadas tridimensionais no terreno com georreferenciamento direto no campo de calibração utilizando os parâmetros obtidos nas duas abordagens de calibração. Por fim, o item 4.6 também apresenta uma análise de qualidade da determinação de coordenadas tridimensionais no terreno com georreferenciamento direto utilizando os parâmetros de calibração obtidos nas duas abordagens, entretanto, em três projetos independentes.

4.2 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO

Os parâmetros de orientação interior bem como de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética foram obtidos respectivamente com os programas CALIBRAV e Geokosmos SynthX4. Conforme descrito no item 3.4, para eliminar os efeitos de variação de escala nas imagens bem como a correlação existente entre a distância focal (f) e a componente Z_0 do centro de perspectiva das câmeras, em todos os processos de ajustamento a distância focal foi fixada como sendo igual a 74 mm. Nos blocos de imagens de cada câmera foram utilizadas em média 2970 observações de pontos fotogramétricos de ligação e 56 observações de pontos de controle. Foram utilizados também valores aproximados de parâmetros de

orientação exterior do sistema GNSS+INS, entretanto, esses valores foram utilizados apenas como parâmetros iniciais uma vez que em cada ajustamento foram determinados os POE do conjunto de imagens bem como POI da câmera correspondente ao bloco de imagens. A Tabela 3 apresenta os POI das câmeras que compõem o sistema de imageamento.

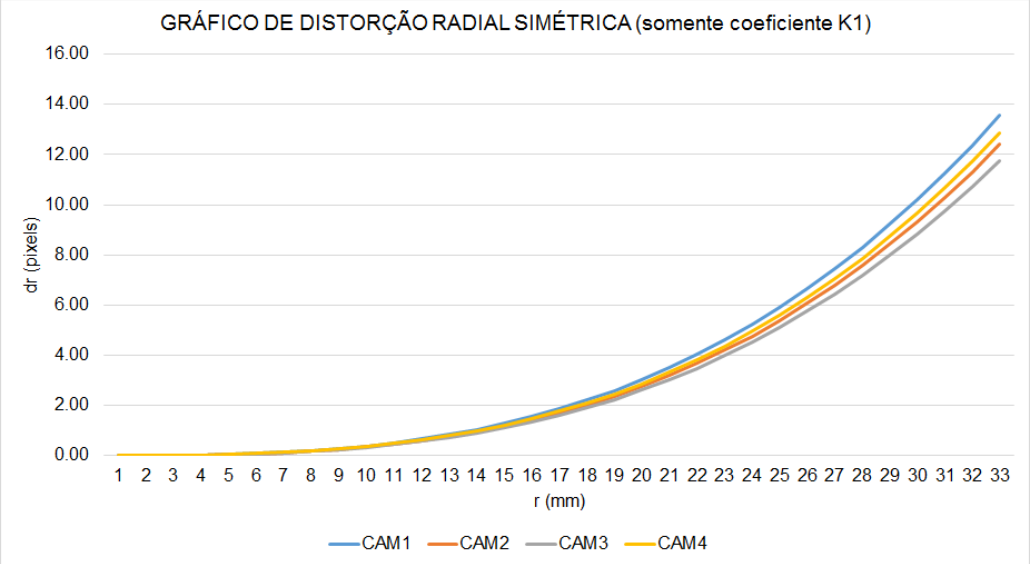
TABELA 3 - POI DAS CÂMERAS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO.

Estatística		**CAM$_1$**	**CAM$_2$**	**CAM$_3$**	**CAM$_4$**
# de observações		3299	2558	2704	3338
DP pontos fotogram.	σ_x (pixels) σ_y (pixels)	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5
DP pontos de controle	σ_X (m) σ_Y (m) σ_Z (m)	0,01 0,01 0,02	0,01 0,01 0,02	0,01 0,01 0,02	0,01 0,01 0,02
Sigma zero a priori (σ_0^2)		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$)		0,2555	0,2265	0,2242	0,2680
EMQ$_x$ (mm) EMQ$_x$ (pixels)		0,00138 0,23	0,00132 0,22	0,00120 0,20	0,00144 0,24
EMQ$_y$ (mm) EMQ$_y$ (pixels)		0,00138 0,23	0,00132 0,22	0,00132 0,22	0,00144 0,24
Parâmetro		**CAM$_1$**	**CAM$_2$**	**CAM$_3$**	**CAM$_4$**
f (mm ± mm)		74,000 ± 0,000	74,000 ± 0,000	74,000 ± 0,000	74,000 ± 0,000
x_p (mm ± mm)		0,0465 ± 0,0029	0,0691 ± 0,0031	0,2619 ± 0,0032	-0,1785 ± 0,0028
y_p (mm ± mm)		-0,0813 ± 0,0023	0,0685 ± 0,0024	-0,0516 ± 0,0024	0,0089 ± 0,0023
K_1 (mm^{-2} ± mm^{-2})		2,27E-06 ± 7,70E-08	2,07E-06 ± 7,98E-08	1,96E-06 ± 7,68E-08	2,15E-06 ± 7,41E-08
K_2 (mm^{-4} ± mm^{-4})		-6,74E-10 ± 1,62E-10	-4,77E-10 ± 1,67E-10	-1,50E-10 ± 1,59E-10	-8,19E-10 ± 1,56E-10
K_3 (mm^{-6} ± mm^{-6})		5,35E-14 ± 1,03E-13	-6,67E-14 ± 1,06E-13	-3,07E-13 ± 9,93E-14	1,18E-13 9,94E-14
P_1 (mm^{-2} ± mm^{-2})		3,29E-06 ± 1,98E-07	-1,11E-06 ± 2,12E-07	-7,36E-06 ± 2,18E-07	1,41E-06 ± 1,89E-07
P_2 (mm^{-2} ± mm^{-2})		-7,17E-06 ± 1,55E-07	-2,77E-06 ± 1,65E-07	5,19E-07 ± 1,63E-07	2,40E-06 ± 1,57E-07
Dimensão do pixel: 0.006 mm					

Analisando os resultados obtidos, identificou-se que todos os blocos apresentam valores similares de sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) bem como o erro médio quadrático (EMQ) dos resíduos nas componentes x e y das observações de fotocoordenadas. Isso mostra que tanto as observações automáticas de pontos fotogramétricos quanto as medições manuais dos pontos de controle possuem o mesmo rigor de qualidade na medição, ainda que tenham sido geradas por processos distintos, ou seja, medição automática por correlação de imagens com LSM (*Least*

Square Matching) e medições manuais em estereoscopia (3D). Analisando o comportamento dos parâmetros de distorção radial simétrica, é possível notar que o coeficiente K_1 se mostrou estatisticamente significativo em todas as câmeras, ao contrário do coeficiente K_2. O coeficiente K_3 apresentou comportamento variado, ou seja, se mostrou estatisticamente significativo nas câmeras 3 e 4 e o contrário nas câmeras 1 e 2. Para comprovar o comportamento e a significância dos parâmetros de distorção, realizou-se novos testes de calibração onde os coeficientes K_2 e K_3 foram fixados para analisar o comportamento do coeficiente K_1, e a variação do sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$). Os resultados obtidos mostraram que mesmo desconsiderando os coeficientes K_2 e K_3, não houve alteração significativa no coeficiente K_1 bem como no indicador estatístico de sigma zero a posteriori. Dessa forma, somente o coeficiente K_1 foi considerado no cálculo da distorção radial simétrica bem como os parâmetros de distorção descentrada (P_1 e P_2) que se mostraram estatisticamente significativos em todas as câmeras. A Figura 41 apresenta o gráfico de distorção radial simétrica das câmeras considerando somente o coeficiente K_1.

FIGURA 41 - GRÁFICO DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DAS CÂMERAS.



Em seguida, verificou-se a correlação existente entre os parâmetros de orientação interior e exterior. A Tabela 4 apresenta a correlação média absoluta existente entre os parâmetros de orientação interior das câmeras e os parâmetros de orientação exterior do bloco de imagens de cada câmera. Analisando esses resultados, nota-se que não há correlação entre a distância focal e os parâmetros de

orientação exterior das imagens. Este resultado já era esperado uma vez que a distância focal foi fixada durante a determinação dos POI das câmeras. A correlação máxima encontrada foi de aproximadamente 50% entre x_p/ω da câmera 4, com destaque para a correlação entre x_p/X_0 e y_p/Y_0 de todas as câmeras, cujo valor não excedeu em 5%. A baixa correlação se deve principalmente ao fato da distância focal (f) ter sido fixada na etapa de ajustamento, mas também à geometria do bloco de imagens com duas altitudes de voo e faixas cruzadas que contribuem para minimizar a correlação existente entre as coordenadas do ponto principal (x_p, y_p) e as coordenadas do centro de perspectiva (X_0, Y_0).

TABELA 4 - MATRIZES DE PORCENTAGEM MÉDIA DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS.

Matriz de Correlação Média – CAM$_1$ (%)								
POE / POI	**f**	**x_p**	**y_p**	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**P_1**	**P_2**
ω	0,0	-48,0	7,9	9,8	0,0	0,0	-49,0	9,4
φ	0,0	-12,7	-35,5	1,4	0,0	0,0	-13,8	-35,0
κ	0,0	-16,2	-19,5	-0,9	0,0	0,0	-15,0	-13,4
X_0	0,0	0,6	7,8	4,0	0,0	0,0	-1,7	0,0
Y_0	0,0	-3,1	1,0	-4,8	0,0	0,0	3,5	-1,0
Z_0	0,0	-7,0	5,8	16,0	0,0	0,0	-1,0	1,7
Matriz de Correlação Média – CAM$_2$ (%)								
POE / POI	**f**	**x_p**	**y_p**	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**P_1**	**P_2**
ω	0,0	-45,0	13,6	3,6	0,0	0,0	-44,1	12,2
φ	0,0	-17,9	-34,3	8,2	0,0	0,0	-19,0	-33,6
κ	0,0	27,0	-35,9	-1,2	0,0	0,0	25,1	-30,4
X_0	0,0	1,0	4,8	3,8	0,0	0,0	-0,4	-0,5
Y_0	0,0	-4,5	2,9	-1,3	0,0	0,0	-0,7	0,9
Z_0	0,0	-7,8	-5,1	14,7	0,0	0,0	-2,9	-1,4
Matriz de Correlação Média – CAM$_3$ (%)								
POE / POI	**f**	**x_p**	**y_p**	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**P_1**	**P_2**
ω	0,0	-44,9	15,6	6,0	0,0	0,0	-44,1	17,9
φ	0,0	-24,6	-32,8	2,9	0,0	0,0	-26,3	-29,7
κ	0,0	-9,9	-20,9	-5,5	0,0	0,0	-7,8	-15,4
X_0	0,0	1,9	6,1	6,6	0,0	0,0	-1,9	0,8
Y_0	0,0	-3,5	4,1	0,3	0,0	0,0	-0,1	1,7
Z_0	0,0	-5,6	7,3	13,1	0,0	0,0	0,5	3,4
Matriz de Correlação Média – CAM$_4$ (%)								
POE / POI	**f**	**x_p**	**y_p**	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**P_1**	**P_2**
ω	0,0	-50,4	9,9	7,1	0,0	0,0	-50,2	7,0
φ	0,0	-11,4	-39,0	10,5	0,0	0,0	-12,8	-37,9
κ	0,0	39,2	-26,2	-1,6	0,0	0,0	37,5	-20,7
X_0	0,0	0,8	5,0	1,5	0,0	0,0	0,2	0,1
Y_0	0,0	-2,6	2,9	-4,2	0,0	0,0	2,0	2,9
Z_0	0,0	-6,5	-6,9	12,7	0,0	0,0	-2,6	-1,4

Após finalizada a determinação dos POI das câmeras que compõem o sistema de imageamento, a etapa seguinte consistiu na determinação dos parâmetros de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética conforme descrito no item 3.4. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de posição e orientação das câmeras bem como ângulos de orientação no referencial da imagem sintética “R2”. É importante lembrar novamente que as coordenadas da posição de cada câmera estão vinculadas ao referencial da imagem sintética “R2” cuja unidade é milímetros.

TABELA 5 - PARÂMETROS DAS CÂMERAS NO REFERENCIAL DA IMAGEM SINTÉTICA.

Parâmetro	CAM_1	CAM_2	CAM_3	CAM_4
$X0^{R2}$ (mm ± mm)	-0,05041 ± 0,00011	0,04312 ± 0,00001	-0,00166 ± 0,00031	-0,00153 ± 0,00021
$Y0^{R2}$ (mm ± mm)	-0,07992 ± 0,00012	0,05323 ± 0,00031	0,06524 ± 0,00011	-0,05768 ± 0,00001
$Z0^{R2}$ (mm ± mm)	74,00016 ± 0,00000	74,27253 ± 0,00021	74,15213 ± 0,00011	74,07261 ± 0,00011
ω^{R2} (° ± seg.)	-14,809011 ± 0,432	14,782598 ± 1,116	14,689320 ± 0,396	-14,920852 ± 0,432
φ^{R2} (° ± seg.)	12,809331 ± 0,036	12,163894 ± 0,036	-9,877792 ± 0,756	-9,596413 ± 0,396
κ^{R2} (° ± seg.)	92,975179 ± 0,036	-93,408507 ± 0,396	-87,634640 ± 0,396	87,434563 ± 0,756

Conforme descrito no item 3.5, utilizando os valores de posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética, a etapa seguinte compreendeu a geração da imagem sintética e análise da qualidade geométrica da imagem resultante. Os resultados obtidos seguem apresentados na Tabela 6:

TABELA 6 – RESULTADOS DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DA IMAGEM SINTÉTICA.

Área de Sobrep.	Par de Imagens	Ptos medidos	Ptos usados	% de uso	Média Dif. X (pixels)	Média Dif. Y (pixels)	Desv.Pad Dif. X (pixels)	Desv.Pad Dif. Y (pixels)
A1	1 – 2	2064	2053	99,47	0,092	-0,024	0,456	0,493
A2	2 – 3	2668	2658	99,63	0,017	-0,016	0,443	0,428
A3	3 – 4	2323	2316	99,70	-0,014	-0,033	0,414	0,453
A4	4 – 1	2733	2720	99,54	-0,108	0,058	0,521	0,449

Analisando os resultados obtidos, é possível verificar que em todas as áreas de sobreposição (Figura 36), a média das diferenças nas direções x e y apresentaram valores diferentes de zero, logo, nota-se a existência presença de pequenos erros sistemáticos. Esse aspecto provavelmente está relacionado com as pequenas

imprecisões resultantes da determinação dos POI bem como posição e orientação das câmeras no referencial da imagem sintética. Por outro lado, verifica-se que a variação máxima encontrada nas áreas de sobreposição (representada pelo desvio-padrão) foi de 0,521 pixels, cujo valor é praticamente igual ao limiar de ½ pixel. Além disso, o desvio padrão médio de todas as áreas de sobreposição (A1, A2, A3 e A4) foi de 0,459 e 0,456 pixels nas componentes x e y respectivamente. Como essa variação está dentro dos critérios de tolerância estabelecidos, a qualidade geométrica da imagem sintética foi considerada adequada, entretanto, para eliminar os erros sistemáticos encontrados nas áreas de sobreposição, foram determinados coeficientes de correção das imagens de cada câmera (δx_k δy_k) e os mesmos foram utilizados nas equações (28) e (29). Esses valores seguem apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 - COEFICIENTES DE CORREÇÃO PARA A GERAÇÃO DA IMAGEM SINTÉTICA.

Câmera	**δx**	**δx (pixels)**	**δy**	**δy (pixels)**
1	0,079054	0,44	0,029152	0,16
2	-0,016356	-0,09	0,008724	0,05
3	-0,037013	-0,21	-0,004278	-0,02
4	-0,025683	-0,14	-0,033598	-0,19
Dimensão do pixel: 0.0056 mm				

Utilizando os coeficientes de correção das imagens, uma nova imagem sintética foi gerada bem como uma nova análise da qualidade geométrica. Os resultados obtidos mostraram que as diferenças médias encontradas foram completamente eliminadas garantindo assim a qualidade geométrica da imagem sintética. A Tabela 8 apresenta os parâmetros definidores da imagem sintética, tais como número de linhas e colunas em pixels bem como dimensão do pixel em milímetros, dimensões da imagem em milímetros e parâmetros de orientação interior.

TABELA 8 - PARÂMETROS DEFINIDORES DA IMAGEM SINTÉTICA.

Parâmetro	**Imagem Sintética**
Dimensão em pixels (coluna x linha)	12000 x 16200 (194,4 MP)
Resolução do pixel (mm)	0,0056 x 0,0056
Dimensão (X e Y) em mm	67,20 x 90,72
f (mm)	74,000
x_p (mm) = y_p (mm)	0,000
K_1 (mm^{-2}) = K_2 (mm^{-4}) = K_3 (mm^{-6})	0,000
P_1 (mm^{-2}) = P_2 (mm^{-2})	0,000

4.3 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA

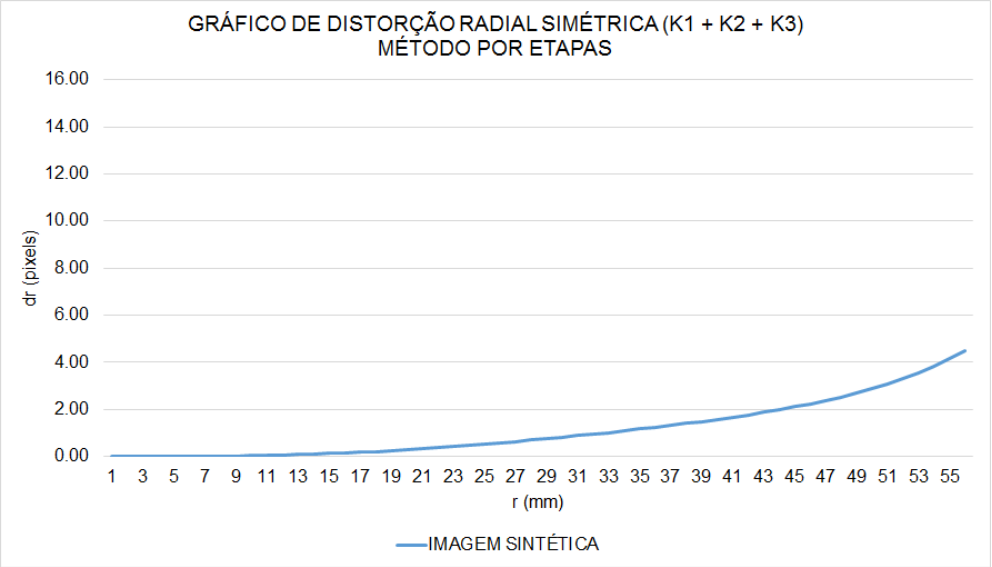
Os parâmetros de orientação interior e os ângulos de desalinhamento do referencial da imagem sintética em relação ao referencial da IMU foram determinados com o programa CALIBRAV e também com o programa TSICP. Conforme descrito no item 3.6, foram obtidos: distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2) da imagem sintética a partir do ajustamento simultâneo pelo MMQ baseado no modelo matemático das equações de colinearidade com parâmetros adicionais. As observações de posição $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1})_{INS}$ fornecidas pela unidade de medição do sistema inercial foram fixadas e o peso das observações de fotocoordenadas com variância igual a ½ pixel ($\sigma_{x,y}^2 = 7{,}84^{-06}$). Os ângulos de desalinhamento ($\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, $\Delta\kappa$) existentes entre os referenciais da imagem sintética e da unidade de medição do sistema inercial foram obtidos pelo método de calibração por etapas. Os resultados de POI da imagem sintética e ângulos de desalinhamento seguem na Tabela 9.

TABELA 9 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO POR ETAPAS.

Parâmetro	**Imagem Sintética**
Número de observações	7576
Sigma zero a prior (σ_0^2)	1,000
Sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$)	1,071
EMQ_x (mm / pixels)	0,00280 / 0,50
EMQ_y (mm / pixels)	0,00263 / 0,47
f (mm ± mm)	74,4511 +/- 0,0007
x_p (mm ± mm)	0,0451 +/- 0,0008
y_p (mm ± mm)	0,0291 +/- 0,0011
K_1 (mm^{-2} ± mm^{-2})	2,57E-07 +/- 2,14E-08
K_2 (mm^{-4} ± mm^{-4})	-1,04E-10 +/- 1,53E-11
K_3 (mm^{-6} ± mm^{-6})	2,28E-14 +/- 3,34E-15
P_1 (mm^{-2} ± mm^{-2})	1,73E-06 +/- 6,12E-08
P_2 (mm^{-2} ± mm^{-2})	2,46E-07 +/- 7,72E-08
Posição relativa ΔX (m ± m)	ND
Posição relativa ΔY (m ± m)	ND
Posição relativa ΔZ (m ± m)	ND
Ângulo de desalinhamento $\Delta\omega$ (° ± seg.)	0,49452 ± 19,9
Ângulo de desalinhamento $\Delta\varphi$ (° ± seg.)	-1,59630 ± 20,4
Ângulo de desalinhamento $\Delta\kappa$ (° ± seg.)	0,08053 ± 15,8
ND: Não Determinado	

Além dos POI apresentados na Tabela 9, a figura abaixo apresenta o gráfico de distorção radial simétrica com os coeficientes K_1, K_2 e K_3 resultantes da imagem sintética com a metodologia de calibração por etapas.

FIGURA 42 - GRÁFICO DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA RESIDUAL DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO POR ETAPAS.



Analisando a distorção radial simétrica da imagem sintética, é possível verificar que a distorção na borda da imagem é de aproximadamente 4,5 pixels. No entanto, verifica-se também que a maior parte da imagem sintética possui distorção inferior a 2 pixels, cujo valor pode estar relacionado com os erros de medida no processo de ajustamento simultâneo durante a determinação de POI e ângulos de desalinhamento da imagem sintética. Analisando a distância focal e as coordenadas do ponto principal, é possível verificar uma variação de cerca de 0,4511 mm no valor da distância focal (f = 74,4511 mm) em relação ao valor nominal da imagem sintética (74 mm). Essa variação é resultante da diferença existente entre as coordenadas Z ($Z0_l^{R1}$) da unidade de medição inercial e as coordenadas Z das imagens no referencial da imagem sintética que foram obtidas no ajustamento durante a etapa de determinação dos POI. De maneira similar, é possível verificar uma variação de cerca de 8 e 5 pixels respectivamente nas coordenadas x e y do ponto principal e que também são resultantes das diferenças das coordenadas X e Y ($X0_l^{R1}$ $Y0_l^{R1}$) da unidade de medição do sistema inercial e as obtidas no ajustamento. Analisando o valor de sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$), é possível concluir que estatisticamente a matriz de pesos das observações utilizada no ajustamento está coerente com a precisão das

observações. Além disso, o erro médio quadrático nas componentes x (EMQ_x) e y (EMQ_y) de cerca de ½ pixel, comprova a ausência de erros grosseiros e reforça a hipótese de qualidade das observações das fotocoordenadas medidas manualmente (pontos de controle) e medidas automaticamente através de programas de correlação de imagem. No que diz respeito aos parâmetros de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2), ainda que na etapa de geração da imagem sintética essa distorção tenha sido corrigida nas imagens individuais, os valores obtidos se mostraram estatisticamente significativos. Testes realizados sem a determinação desses parâmetros, apresentaram um aumento no valor do sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) de 1,071 para 1,389, o que reforça a hipótese de significância desses parâmetros bem como a existência de erros de medida dos pontos fotogramétricos e de apoio.

Analisando os ângulos de desalinhamento apresentados na Tabela 9, verifica-se que a precisão alcançada nesse método foi de respectivamente 1,10σ, 1,13σ e 0,55σ da precisão nominal dos ângulos de orientação em ω, φ, κ conforme especificação da unidade de medição inercial do sistema GNSS+INS (Figura 28). Considerando que o método utilizado obtém os ângulos de desalinhamento através das diferenças angulares existentes entre os valores fornecidos pela unidade de medição inercial e os correspondentes obtidos no ajustamento simultâneo pelo MMQ do bloco de imagens, era esperada uma precisão de 1σ da precisão nominal do equipamento. Isso comprova que a precisão dos valores angulares obtidos no ajustamento é compatível com a precisão angular da unidade de medição inercial. Além disso, nota-se que a precisão obtida não excedeu a 3σ da precisão angular nominal do sistema GNSS+INS, logo na prática, tais resultados foram considerados estatisticamente dentro da tolerância preconizados pelo fabricante. A Tabela 10 apresenta a correlação média absoluta existente entre os parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior da imagem sintética. Como as observações de posição $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1})_{INS}$ foram fixadas como pertencentes ao referencial da imagem sintética, não se obteve a correlação entre esses parâmetros e os POI. Nesse caso, foi obtida somente a correlação entre os POI da imagem sintética e os ângulos de orientação (ω, φ, κ).

TABELA 10 - MATRIZ DE PORCENTAGEM MÉDIA DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS PELO MÉTODO POR ETAPAS.

Matriz de Correlação Média – Imagem Sintética (%)						
POE / POI / Mont.	**X_0**	**Y_0**	**Z_0**	**ω**	**φ**	**κ**
f	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
x_p	0,0	0,0	0,0	18,9	-5,8	-1,4
y_p	0,0	0,0	0,0	8,0	20,8	3,9
K_1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2
K_2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2
K_3	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	-0,1
P_1	0,0	0,0	0,0	17,4	-5,4	-1,5
P_2	0,0	0,0	0,0	7,8	20,3	3,9
ΔX ΔY ΔZ	ND	ND	ND	ND	ND	ND
$\Delta\omega$ $\Delta\varphi$ $\Delta\kappa$	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ND: Não Determinado						

Analisando a Tabela 10, nota-se uma baixa correlação entre POI e ângulos de orientação, sendo que os maiores valores se referem aos ângulos ω e φ com as coordenadas do ponto principal (x_p, y_p) e coeficientes de distorção descentrada (P_1, P_2), entretanto, não foram superiores a 25%. Conforme dito anteriormente, não existe correlação entre as coordenadas do centro de perspectiva (X_0, Y_0, Z_0) com as coordenadas do ponto principal e distância focal (f, x_p, y_p). Isso se deve ao fato de que as observações de posição do sistema inercial $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1})_{INS}$ foram tratadas como injunção absoluta durante a determinação dos POI da imagem sintética, impossibilitando o cálculo dos coeficientes de correlação.

4.4 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR, POSIÇÃO RELATIVA E ÂNGULOS DE DESALINHAMENTO DA IMAGEM SINTÉTICA

Os parâmetros de orientação interior da imagem sintética e de montagem do referencial da imagem sintética em relação ao referencial da IMU foram determinados com o programa MSAT. Conforme descrito no item 3.7, foram obtidos os seguintes parâmetros: distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_p, y_p), coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2), além dos parâmetros de montagem, ou seja, elementos de posição relativa (r_c^b) e ângulos de desalinhamento

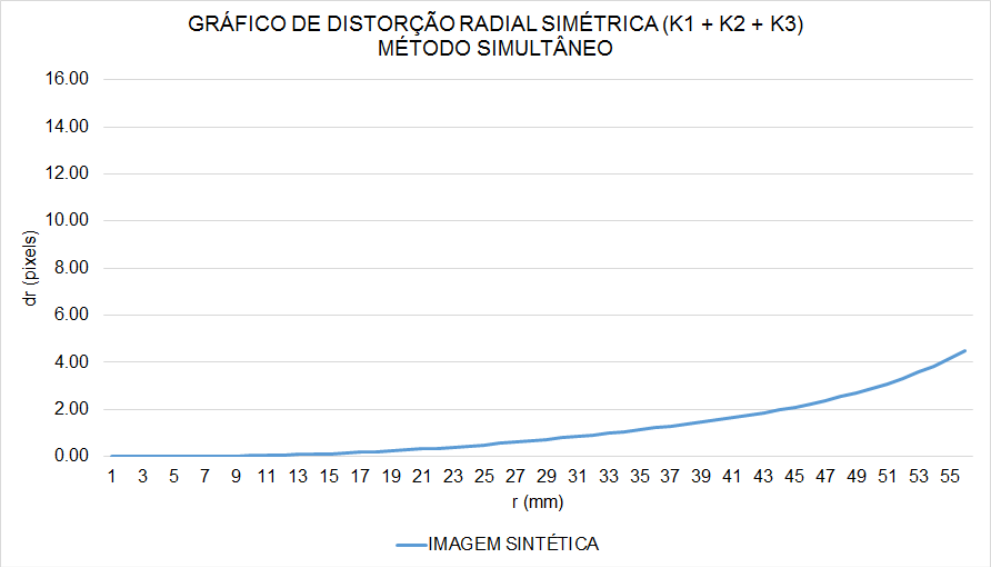
(R_c^b) utilizando o modelo matemático modificado das equações de colinearidade (equação 44), cujo método é conhecido como de calibração simultânea (*Single-Step Procedure*). Conforme também descrito no item 3.7, o que difere esse método de determinação do método por etapas é que todos os parâmetros são obtidos em um único ajustamento, logo, é considerado mais rigoroso do que o método por etapas. Além disso, diferente do método por etapas onde somente as observações de posição foram fixadas, no método de calibração simultânea, as observações de posição e também de orientação da unidade de medição inercial $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1}\ \omega_l^{R1}\ \varphi_l^{R1}\ \kappa_l^{R1})_{INS}$ foram fixadas no referencial da imagem sintética. Nesse caso, adotou-se a variância das observações de posição e orientação equivalentes à precisão nominal do equipamento conforme especificação da unidade de medição inercial do sistema GNSS+INS (Figura 28). A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no método de calibração simultânea.

TABELA 11 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E DE MONTAGEM DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

Parâmetro	**Imagem Sintética**
# de observações	7576
Sigma zero a prior (σ_0^2)	1,000
Sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$)	1,018
EMQ_x (mm / pixels)	0,00255 / 0,46
EMQ_y (mm / pixels)	0,00249 / 0,44
f (mm ± mm)	74,4404 +/- 0,0010
x_p (mm ± mm)	0,0569 +/- 0,0015
y_p (mm ± mm)	0,0063 +/- 0,0017
K_1 (mm^{-2} ± mm^{-2})	2,42E-07 +/- 2,05E-08
K_2 (mm^{-4} ± mm^{-4})	-9,30E-11 +/- 1,47E-11
K_3 (mm^{-6} ± mm^{-6})	2,06E-14 +/- 3,19E-15
P_1 (mm^{-2} ± mm^{-2})	1,70E-06 +/- 5,85E-08
P_2 (mm^{-2} ± mm^{-2})	2,03E-07 +/- 7,35E-08
Posição relativa ΔX (m ± m)	0,223 +/- 0,023
Posição relativa ΔY (m ± m)	-0,399 +/- 0,024
Posição relativa ΔZ (m ± m)	-0,201 +/- 0,015
Ângulo de desalinhamento Δω (° ± seg.)	0,49665 +/- 4,0
Ângulo de desalinhamento Δφ (° ± seg.)	-1,59457 +/- 3,5
Ângulo de desalinhamento Δκ (° ± seg.)	0,07984 +/- 4,3
ND: Não Determinado	

Além dos POI apresentados na Tabela 9, a figura abaixo apresenta o gráfico de distorção radial simétrica com os coeficientes K_1, K_2 e K_3 resultantes da imagem sintética com a metodologia de calibração por etapas.

FIGURA 43 - GRÁFICO DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA RESIDUAL DA IMAGEM SINTÉTICA PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.



Analisando novamente a distorção radial simétrica da imagem sintética, verifica-se o mesmo comportamento obtido com o método de calibração por etapas, ou seja, distorção de 4,5 pixels na borda da imagem e distorção inferior a 2 pixels na maior parte da imagem sintética. Como dito anteriormente, tal característica é resultante dos erros de medida existentes no processo de ajustamento simultâneo que foi utilizado para determinar os POI, posição relativa e ângulos de desalinhamento da imagem sintética. Analisando a distância focal e as coordenadas do ponto principal, é possível verificar uma variação de 0,4404 mm (f = 74,4404 mm) em relação ao valor nominal da imagem sintética (74 mm), cujo valor é bem próximo do valor obtido no método por etapas (f = 74,4511 mm). Essa variação também pode ser explicada como resultante da diferença existente entre as coordenadas Z ($Z0_l^{R1}$) da unidade de medição inercial e as coordenadas Z das imagens no referencial da imagem sintética e que foram obtidas no ajustamento durante a calibração. Entretanto, deve-se considerar a influência do peso resultante da variância da coordenada Z que foi utilizado no ajustamento ($\sigma_{Z0}^2 = 1{,}00^{-02}$). De maneira similar é possível verificar uma variação de cerca de 10 pixels e 1 pixel respectivamente nas coordenadas x e y do ponto principal e que também são resultantes das diferenças das coordenadas X e Y ($X0_l^{R1}$ $Y0_l^{R1}$) da unidade de medição do sistema inercial e as do centro de perspectiva da câmera que foram obtidas no ajustamento. Esses valores são ligeiramente diferentes dos valores obtidos pelo método por etapas (8 e 5 pixels), entretanto, deve-

se considerar aqui dois aspectos importantes: (1) a influência do peso resultante da variância das coordenadas X e Y que foi utilizado no ajustamento ($\sigma^2_{X0Y0} = 2{,}50^{-03}$), e (2) os valores são resultantes de um ajustamento cujo modelo matemático considera também os elementos de posição relativa (ΔX, ΔY, ΔZ) entre o sistema de referência da unidade de medição inercial e o sistema de referência da imagem sintética.

Analisando o valor de sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}^2_0$) de 1,018, é possível concluir que estatisticamente a matriz de pesos das observações utilizada no ajustamento também apresenta coerência com a precisão das observações. Além disso, o valor do erro médio quadrático nas componentes x (EMQ_x) e y (EMQ_y) inferior a ½ pixel, comprova a ausência de erros grosseiros e reforça a hipótese anterior quanto a qualidade das observações de fotocoordenadas medidas manualmente (pontos de controle) e medidas automaticamente através de programas de correlação de imagens por LSM (*Least Square Matching*). Os valores obtidos para os parâmetros de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e descentrada (P_1, P_2), se mostraram estatisticamente significativos, ainda que na etapa de geração da imagem sintética, essa distorção tenha sido corrigida nas imagens individuais. Testes realizados sem a determinação desses parâmetros apresentaram um aumento no valor do sigma zero a posteriori ($\hat{\sigma}^2_0$) de 1.018 para 1.125, o que reforça a hipótese de significância dos parâmetros. Analisando os resultados de posição relativa e ângulos de desalinhamento apresentados na Tabela 11, verifica-se que a precisão alcançada nesse método foi menor que 1.0σ da precisão nominal tanto na posição em X, Y, Z como na orientação em ω, φ, κ conforme especificação da unidade de medição inercial do sistema GNSS+INS (Figura 28). Isso se deve ao fato de que o método de calibração por etapas utiliza um ajustamento para a determinação dos POI e os ângulos de desalinhamento são obtidos a partir da diferença dos ângulos de orientação obtidos. No caso da calibração simultânea, todos os parâmetros são determinados em um único ajustamento, logo, permite minimizar os erros aleatórios envolvidos na calibração e aumentar a precisão dos parâmetros.

De maneira similar ao método de calibração por etapas, a Tabela 12 apresenta a correlação média absoluta existente entre os parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior da imagem sintética. Entretanto, como as observações de posição $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1})_{INS}$ foram tratadas com injunção de peso

resultante das variâncias em X, Y, Z e não como injunções absolutas, a correlação entre a posição e orientação com os POI foi determinada e segue apresentada abaixo.

TABELA 12 - MATRIZ DE PORCENTAGEM MÉDIA ABSOLUTA DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

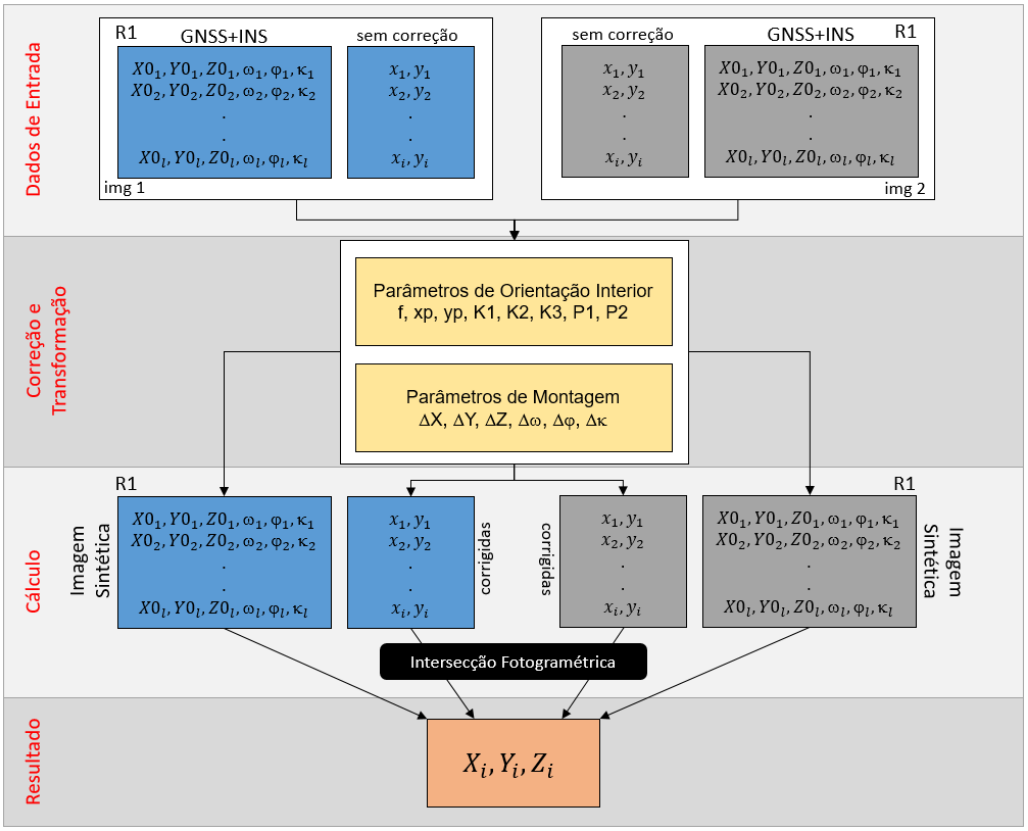
Matriz de Correlação Média – Imagem Sintética (%)						
POE / POI / Mont.	**X_0**	**Y_0**	**Z_0**	**ω**	**φ**	**κ**
f	0.4	0.3	13.6	2.3	2.3	0.6
x_p	1.1	1.2	2.6	14.1	13.1	1.4
y_p	1.0	0.9	1.6	12.3	13.5	1.7
K_1	0.2	0.2	0.9	0.6	0.5	0.3
K_2	0.2	0.2	0.9	0.7	0.6	0.3
K_3	0.2	0.2	0.9	0.6	0.6	0.4
P_1	0.2	0.1	0.8	0.6	0.6	1.2
P_2	0.2	0.2	0.5	1.0	1.3	2.5
ΔX	1.2	1.3	3.2	16.3	15.1	1.5
ΔY	1.2	1.1	2.0	15.3	16.8	1.7
ΔZ	0.4	0.3	15.9	2.3	2.6	0.5
$\Delta\omega$	0.3	0.3	0.5	37.4	40.3	3.0
$\Delta\varphi$	0.2	0.2	1.6	46.0	43.4	1.3
$\Delta\kappa$	0.1	0.1	0.2	1.6	1.2	43.5
ND: Não Determinado						

Diferentemente do método por etapas, a Tabela 12 apresenta a matriz completa de correlação entre POI e POE bem como Parâmetros de montagem. Nesse caso, nota-se também uma baixa correlação entre os POE e POI, sendo que os maiores valores se referem à distância focal (f) e componente Z_0 do centro de perspectiva da câmera, bem como as coordenadas do ponto principal (x_p, y_p) com os ângulos ω e φ, cujos valores não excederam a 15%. Essa baixa correlação está associada à geometria do bloco que foi utilizado neste método bem como aos valores de injunção utilizados na determinação dos POI da imagem sintética. No caso da correlação entre os POE e os Parâmetros de montagem, é possível notar valores superiores aos obtidos com os POI, com destaque para os ângulos de desalinhamento em ω e φ, cujos valores não excederam a 50%. De maneira similar à correlação entre POE e POI, esse resultado também está associado à geometria do bloco que foi utilizado neste método bem como aos valores de injunção utilizados na determinação dos POI da imagem sintética.

4.5 VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO BLOCO DE CALIBRAÇÃO

Conforme descrito no item 3.8, para validar a calibração do sistema TACx4 em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto a partir dos resultados obtidos nas duas metodologias de calibração, utilizou-se o programa DGCP. Esse programa determina as coordenadas tridimensionais do ponto de interesse no espaço objeto $(X_i^{R1}\ Y_i^{R1}\ Z_i^{R1})$ de forma direta por interseção fotogramétrica utilizando observações de fotocoordenadas $(xi_{img1}, yi_{img1}, xi_{img2}, yi_{img2})$ de um par de imagens sintéticas, bem como parâmetros de orientação interior de orientação exterior da unidade de medição do sistema inercial $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1}\ \omega_l^{R1}\ \varphi_l^{R1}\ \kappa_l^{R1})_{INS}$ projetados para a imagem sintética a partir dos parâmetros de montagem (ΔX, ΔY, ΔZ, Δω, Δφ, Δκ). A Figura 44 apresenta um fluxo de etapas de determinação de coordenadas do espaço objeto em aplicação com georreferenciamento direto no bloco de calibração.

FIGURA 44 - FLUXO DE VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO.



Na Figura 44, a etapa de “Dados de Entrada” compreende os valores de posição e orientação $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1}\ \omega_l^{R1}\ \varphi_l^{R1}\ \kappa_l^{R1})_{INS}$ do par de imagens e que são fornecidos pela unidade de medição inercial (GNSS+INS) no instante de aquisição da imagem e as fotocoordenadas $(xi_{img1}, yi_{img1}, xi_{img2}, yi_{img2})$ denominadas “com distorção” pois correspondem às coordenadas extraídas diretamente das imagens sintéticas. Essas coordenadas compreendem as observações de pontos fotogramétricos e de controle que foram realizadas diretamente nas imagens 1 e 2, logo, contém todas as distorções inerentes da imagem utilizada. Na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com o georreferenciamento direto, o uso de coordenadas com distorção extraídas diretamente nas imagens, possibilita testar diferentes valores de POI, em especial, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada, antes de serem utilizadas na determinação das coordenadas no espaço objeto por interseção fotogramétrica. Na etapa “Correção e Transformação”, os parâmetros de orientação interior e de montagem compreendem os valores obtidos em cada metodologia de calibração, sendo que os POI são utilizados para corrigir as fotocoordenadas extraídas em cada imagem e os parâmetros montagem são utilizados para determinar a posição e orientação da imagem sintética a partir da posição e orientação da unidade de medição inercial. No caso específico dos elementos de posição relativa (ΔX, ΔY, ΔZ) pelo Método por Etapas, os mesmos não foram considerados uma vez que não foram determinados. Dessa maneira, as coordenadas $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1})_{INS}$ da imagem sintética correspondem às mesmas coordenadas fornecidas pela unidade de medição inercial do sistema GNSS+INS. No caso dos ângulos de orientação do sistema GNSS+INS $(\omega_l^{R1}\ \varphi_l^{R1}\ \kappa_l^{R1})_{INS}$, os mesmos foram determinados para a imagem sintética a partir dos ângulos de desalinhamento obtidos tanto no método por etapas, quanto no método simultâneo.

Na etapa “Cálculo” que consiste na determinação das coordenadas no espaço objeto por interseção fotogramétrica, os parâmetros de orientação exterior do sistema GNSS+INS foram determinados para a imagem sintética a partir dos parâmetros de montagem, bem como as fotocoordenadas corrigidas a partir dos POI obtidos na calibração. Esses dados foram então inseridos no modelo matemático das equações de colinearidade para obtenção das coordenadas tridimensionais no espaço objeto $(X_i^{R1}\ Y_i^{R1}\ Z_i^{R1})$ através de ajustamento pelo MMQ. As coordenadas do espaço objeto

obtidas por interseção fotogramétrica foram então comparadas com as coordenadas geodésicas dos pontos de controle do campo de calibração. A partir dessas diferenças, foram aplicados testes de tendência e exatidão conforme valores estabelecidos no Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). A Tabela 13 e as figuras 50 e 51 apresentam os resultados obtidos na validação do georreferenciamento direto no campo de calibração utilizando os parâmetros obtidos nas duas metodologias de calibração.

TABELA 13 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO.

Parâmetro e Estatística	**Metodologia 1 (Por Etapas)**	**Metodologia 2 (Simultânea)**
Total de pares de observações	586	586
Total de pontos de controle	56	56
Total de interseções (com sucesso)	586 [100%]	586 [100%]
Total de interseções (com falha)	0 [0%]	0 [0%]
Média X ± σ_X (m)	-0,05 ± 0,07	0,01 ± 0,05
Média Y ± σ_Y (m)	0,13 ± 0,07	0,01 ± 0,05
Média Z ± σ_Z (m)	0,14 ± 0,20	0,03 ± 0,14
EMQ_X (m)	0,09 [1,1 pixels]	0,05 [0,6 pixels]
EMQ_Y (m)	0,15 [1,9 pixels]	0,05 [0,6 pixels]
EMQ_Z (m)	0,24 [3,0 pixels]	0,14 [1,8 pixels]
Discrepâncias XYZ ≤ 3xGSD (0,24 m)	27 [48,21%]	54 [96,43%]
Discrepâncias XYZ > 3xGSD (0,24 m)	29 [51,79%]	02 [3,57%]
Resolução espacial do pixel (GSD): 0,08 m		

FIGURA 45 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO POR ETAPAS.

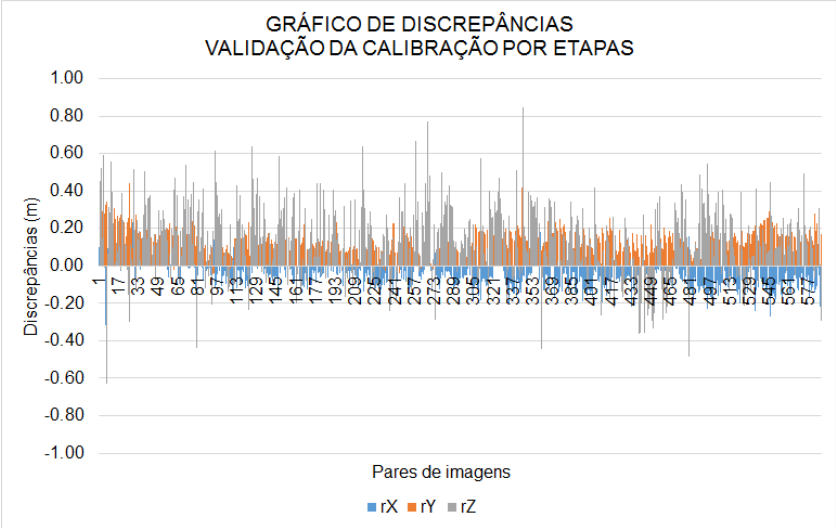
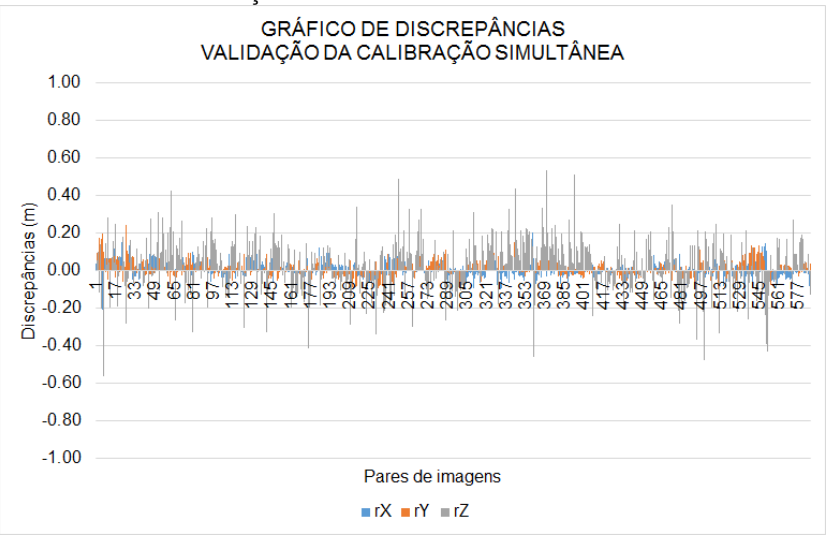


FIGURA 46 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.



Conforme resultados apresentados na Tabela 13, nota-se que ambas as metodologias obtiveram exatidão (erro médio quadrático, média e desvio-padrão) dentro dos critérios de tolerância compatíveis com aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto que é de, no máximo, 3xGSD para as componentes X, Y, Z (MOSTAFA, 2003). Isso comprova que ambas as metodologias possibilitaram calibrar o sistema fotogramétrico utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Analisando a média e o desvio-padrão da metodologia por etapas, nota-se que há uma tendência planimétrica de cerca de 14 cm (1,75 pixels) com desvio-padrão de 7 cm (0,8 pixels) e altimétrica também de 14 cm (1,75 pixels), porém, com desvio-padrão de 20 cm (2,5 pixels). Isso mostra que utilizando essa metodologia de calibração, houve uma maior dispersão altimétrica na obtenção das coordenadas tridimensionais no espaço objeto com georreferenciamento direto e isso pode estar relacionado com imprecisões na determinação das coordenadas do ponto principal (x_p, y_p) e da distância focal (f), uma vez que os parâmetros de posição $(X0_l^{R1}\ Y0_l^{R1}\ Z0_l^{R1})_{INS}$ provenientes do sistema GNSS+INS foram completamente fixados. Dessa maneira, as imprecisões relacionadas com a determinação da trajetória do sistema GNSS+INS foram totalmente fixadas e não foram completamente compensadas pelas coordenadas do ponto principal e pela distância focal.

Analisando agora a média e desvio-padrão da metodologia simultânea, é possível verificar que não há tendência planimétrica e altimétrica significativa, sendo detectada apenas uma variação altimétrica de 14 cm (1,75 pixels). Esses resultados

mostram que a metodologia simultânea de calibração minimizou os erros aleatórios envolvidos neste processo uma vez que tanto os parâmetros de orientação interior quanto de montagem são obtidos em um único processo de ajustamento, ao contrário da metodologia por etapas na qual os POI e os ângulos de desalinhamento foram obtidos em duas etapas distintas. Além disso, a incorporação dos elementos de posição relativa (ΔX, ΔY, ΔZ) ao modelo matemático de calibração contribui sobremaneira para uma maior acurácia dos resultados uma vez que esses parâmetros compensam as imprecisões relacionadas com a posição na determinação da trajetória do sistema GNSS+INS. As tabelas 14, 15, 16 e 17 apresentam as análises de tendência e exatidão do georreferenciamento direto no bloco de calibração conforme valores estabelecidos no PEC-PCD para escalas de mapeamento cadastral.

TABELA 14 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=55)**			1,674	1,674	1,674
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	2,368	5,797	6,088
1:2000	A	0,34	0,17	1,184	2,898	6,088
1:5000	A	0,85	0,34	0,474	1,159	3,044
Possui tendências						
Livre de tendências						

TABELA 15 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=55)**			1,674	1,674	1,674
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	0,386	0,602	1,309
1:2000	A	0,34	0,17	0,193	0,301	1,309
1:5000	A	0,85	0,34	0,077	0,120	0,654
Possui tendências						
Livre de tendências						

TABELA 16 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=55)**			68,782	68,782	68,782
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	20,035	17,070	74,183
1:2000	A	0,34	0,17	5,009	4,267	74,183
1:5000	A	0,85	0,34	0,801	0,683	18,546
Não possui exatidão						
Possui exatidão						

TABELA 17 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORRFERENCIAMENTO DIRETO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=55)**			68,782	68,782	68,782
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	7,715	8,063	39,619
1:2000	A	0,34	0,17	1,929	2,016	39,619
1:5000	A	0,85	0,34	0,309	0,323	9,905

Não possui exatidão
Possui exatidão

Analisando a tendência na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com georreferenciamento direto no bloco de calibração conforme valores estabelecidos no PEC-PCD para escalas de mapeamento cadastral (Tabela 14), nota-se que os resultados obtidos com os parâmetros da metodologia de calibração por etapas possuem tendência planialtimétrica na escala 1:1000, tendência altimétrica e planimétrica na componente “Y” da escala 1:2000 e tendência altimétrica na escala 1:5000. Esses resultados apenas reforçam as evidências já encontradas nas estatísticas de média apresentadas na Tabela 13 e que apontaram para a existência de tendência tanto planimétrica quanto altimétrica. Essa característica está relacionada com o método de calibração por etapas uma vez que a modelagem das correlações existentes entre POI e POE e dos erros aleatórios envolvidos na determinação dos POI e dos ângulos de desalinhamento ocorreu em duas etapas distintas e não de forma simultânea. Nos resultados obtidos com os parâmetros da metodologia simultânea (Tabela 15), nota-se a inexistência de tendência planialtimétrica em todas as escalas. De maneira similar ao método por etapas, esses resultados também reforçam as evidências já encontradas nas estatísticas de média apresentadas na Tabela 13 e que apontaram para a inexistência de tendência planialtimétrica.

Analisando a exatidão na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com georreferenciamento direto no bloco de calibração conforme valores estabelecidos no PEC-PCD para escalas de mapeamento cadastral (Tabela 16), nota-se que os resultados obtidos com os parâmetros da metodologia de calibração por etapas possuem exatidão planimétrica compatível em todas as escalas. Por outro lado, a exatidão altimétrica se apresentou compatível apenas na escala 1:5000 e não atingiu as maiores escalas de mapeamento cadastral, ou seja, 1:1000 e 1:2000. Nos resultados obtidos com os parâmetros da metodologia simultânea

(Tabela 17), nota-se que a exatidão planialtimétrica se mostrou compatível com todas as escalas de mapeamento cadastral, ou seja, 1:1000, 1:2000 e 1:5000.

Com base nas análises de tendência e exatidão apresentadas, é possível comprovar que o método de calibração simultânea possibilita a determinação de parâmetros de calibração com maior exatidão quando comparado com o método por etapas. Entretanto, esses resultados já eram esperados, pois neste caso, os parâmetros de orientação interior e exterior utilizados nas interseções fotogramétricas foram os mesmos determinados na calibração, diferentemente da calibração por etapas que utilizou parâmetros de orientação interior e exterior determinados de forma independente. Na etapa seguinte, os parâmetros obtidos em cada método de calibração foram avaliados em três projetos fotogramétricos independentes e com características distintas das utilizadas na calibração. Esse procedimento teve como objetivo analisar a estabilidade dos parâmetros em condições diferentes das utilizadas no bloco de calibração e a possibilidade de uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto.

4.6 VALIDAÇÃO DO GEORREFEFENCIAMENTO DIRETO EM BLOCOS DE PROJETOS FOTOGRAMÉTRICOS INDEPENDENTES

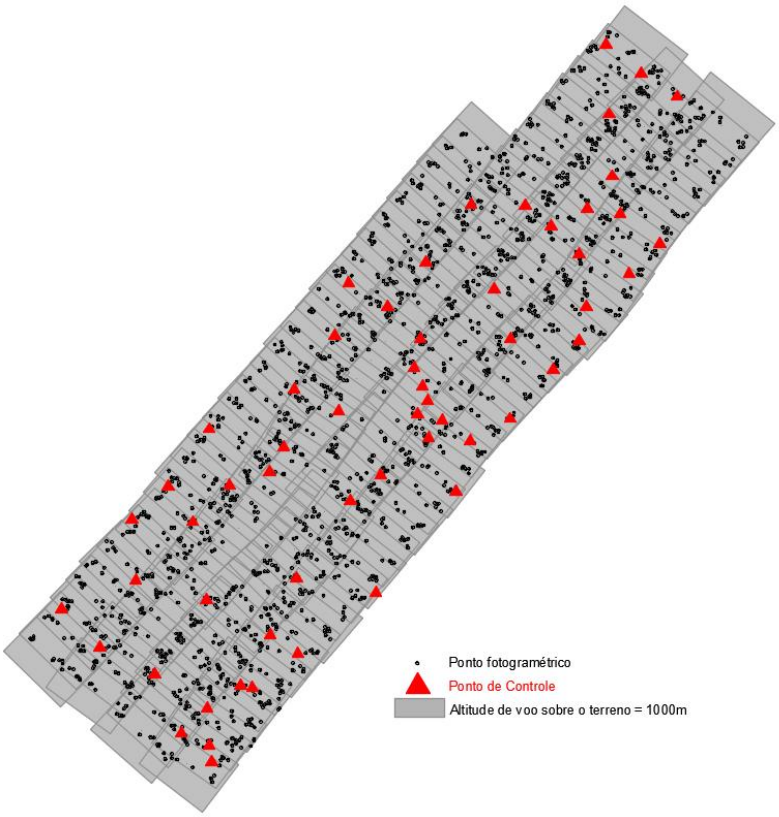
A validação da obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com georreferenciamento direto em blocos de projetos fotogramétricos independentes teve como objetivo principal avaliar a precisão dos parâmetros de cada metodologia de calibração, bem como a influência dos erros aleatórios em blocos de imagens distintos dos utilizados para a calibração. Foram utilizados 3 blocos de imagens de projetos fotogramétricos independentes sendo dois blocos com faixas paralelas adjacentes com sobreposição longitudinal de 60% e lateral de 30% e um bloco com faixas lineares com sobreposição longitudinal de 60%. Em todos os blocos foram utilizados pontos de controle identificáveis nas imagens, cujas coordenadas geodésicas tridimensionais (X, Y, Z) foram determinadas a partir de dados de rastreio coletados com receptores de sinais GNSS de dupla frequência e técnicas de posicionamento relativo estático rápido com sessões de 15 minutos e intervalo de taxa de gravação de 5 segundos. Ao final da etapa de processamento, a precisão horizontal

e vertical alcançada nas coordenadas de todos os pontos de controle foi de 1 e 2 cm respectivamente.

4.6.1 Projeto Fotogramétrico Independente 1

O primeiro bloco de projeto independente possui 137 imagens sintéticas organizadas em 4 faixas adjacentes com sobreposição longitudinal de 60% e lateral de 30%, tomadas a uma altura de voo de 1000 m, o que resultou em um pixel com resolução espacial aproximada de 8 cm. O bloco de imagens possui um total de 57 pontos de controle distribuídos em toda a área do bloco, conforme esquema apresentado na Figura 47.

FIGURA 47 - BLOCO DE IMAGENS DO PROJETO 1.



Os parâmetros de orientação exterior do sistema GNSS+INS foram determinados para o referencial da imagem sintética a partir dos parâmetros de montagem, bem como as fotocoordenadas com distorção que foram corrigidas utilizando os POI obtidos em cada metodologia de calibração. Essas informações foram inseridas no modelo matemático das equações de colinearidade e as

coordenadas no espaço objeto (X_i^{R1} Y_i^{R1} Z_i^{R1}) foram obtidas por interseção fotogramétrica a partir dos pares de fotocoordenadas. Em seguida, foram calculadas discrepâncias a partir das coordenadas obtidas por interseção fotogramétrica e as coordenadas geodésicas dos pontos de controle. Com base nos resultados obtidos foram aplicados testes estatísticos de precisão e exatidão conforme valores estabelecidos no PEC-PCD. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos na validação do georreferenciamento direto e as figuras 48 e 49 apresentam as discrepâncias obtidas com as duas metodologias de calibração.

TABELA 18 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1.

Parâmetro e Estatística	**Metodologia 1 (Por Etapas)**	**Metodologia 2 (Simultânea)**
Total de pares de observações	299	299
Total de pontos de controle	57	57
Total de interseções (com sucesso)	299 [100%]	299 [100%]
Total de interseções (com falha)	0 [0%]	0 [0%]
Média X ± σ_X (m)	0,05 ± 0,26	0,05 ± 0,27
Média Y ± σ_Y (m)	0,05 ± 0,32	0,05 ± 0,32
Média Z ± σ_Z (m)	-0,04 ± 0,38	-0,05 ± 0,38
EMQ_X (m)	0,25 [3,1 pixels]	0,25 [3,1 pixels]
EMQ_Y (m)	0,30 [3,7 pixels]	0,30 [3,7 pixels]
EMQ_Z (m)	0,35 [4,9 pixels]	0,35 [4,4 pixels]
Discrepâncias XYZ ≤ 3xGSD (0,24 m)	16 [28,07%]	16 [28,07%]
Discrepâncias XYZ > 3xGSD (0,24 m)	41 [71,93%]	41 [71,93%]
Resolução espacial do pixel (GSD): 0,08 m		

FIGURA 48 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

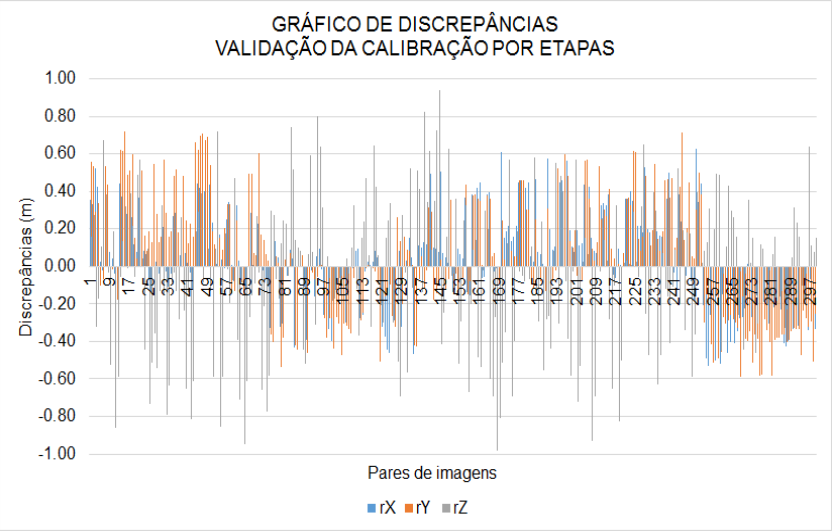
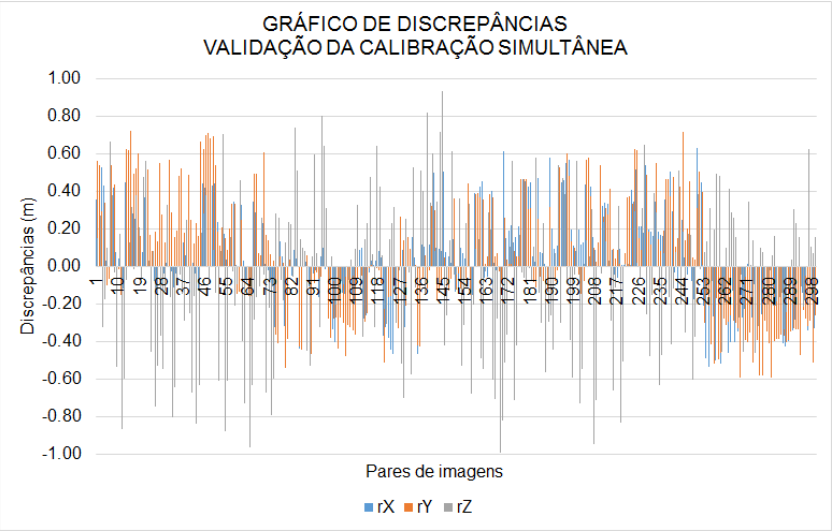


FIGURA 49 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.



Analisando os resultados apresentados na Tabela 18, nota-se que em ambas as metodologias de calibração, cerca de 72% dos pontos de controle apresentaram discrepâncias acima da tolerância planialtimétrica compatível com aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto que é de, no máximo, 3xGSD (MOSTAFA, 2003). Em comparação com os resultados obtidos no campo de calibração, nota-se que voos que possuem características temporais e de geometria de faixas diferentes das utilizadas na calibração e a presença de erros aleatórios relacionados com a variação de pressão e temperatura da câmera e variações na solução da trajetória no sistema GNSS+INS, influenciam diretamente na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com exatidão dentro da tolerância preconizada para aplicações de georreferenciamento direto. Na Tabela 18, nota-se que ambas as metodologias de calibração produziram resultados muito semelhantes, ou seja, inexistência de tendência planialtimétrica significativa. Entretanto, é possível notar um desvio-padrão planimétrico de cerca de 3,5 pixels e altimétrico de cerca de 5 pixels. Para verificar a qualidade dos resultados de acordo com os valores estabelecidos no PEC-PCD para as escalas de mapeamento cadastral, foram realizadas análises de precisão e exatidão e os resultados seguem apresentados nas tabelas 19, 20, 21 e 22 a seguir.

TABELA 19 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=56)**			1,674	1,674	1,674
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	2,228	2,037	1,685
1:2000	A	0,34	0,17	1,114	1,018	1,685
1:5000	A	0,85	0,34	0,446	0,407	0,842
Possui tendências						
Livre de tendências						

TABELA 20 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=56)**			1,674	1,674	1,674
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	2,242	2,023	2,118
1:2000	A	0,34	0,17	1,121	1,011	2,118
1:5000	A	0,85	0,34	0,448	0,405	1,059
Possui tendências						
Livre de tendências						

TABELA 21 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=56)**			68,782	68,782	68,782
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	272,104	387,518	273,272
1:2000	A	0,34	0,17	68,026	96,879	273,272
1:5000	A	0,85	0,34	10,884	15,501	68,318
Não possui exatidão						
Possui exatidão						

TABELA 22 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 1 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=56)**			68,782	68,782	68,782
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	274,720	394,470	275,597
1:2000	A	0,34	0,17	68,680	98,617	275,597
1:5000	A	0,85	0,34	10,989	15,779	68,899
Não possui exatidão						
Possui exatidão						

Analisando os resultados da análise de precisão e exatidão conforme critérios estabelecidos no PEC-PCD para a classe A das escalas de mapeamento cadastral, nota-se o mesmo comportamento para ambas as metodologias de calibração. Nas tabelas 19 e 20, nota-se uma tendência planialtimétrica na escala 1:1000 e altimétrica

na escala 1:2000, ficando somente a escala 1:5000 livre de tendências tanto em planimetria quanto em altimetria. Nas tabelas 21 e 22, nota-se que a escala 1:1000 não apresentou exatidão planialtimétrica compatível para a classe A, assim como a escala 1:2000 na componente planimétrica (Y) e em altimetria. A escala 1:5000 apresentou exatidão planimétrica compatível com a classe A, no entanto, ainda que o valor calculado do Qui-quadrado amostral para a altimetria tenha ficado próximo do valor tabelado, não foi possível classificar os resultados obtidos em altimetria.

4.6.2 Projeto Fotogramétrico Independente 2

O segundo bloco de projeto possui 407 imagens sintéticas organizadas em 8 faixas lineares com sobreposição somente longitudinal de 60%, tomadas a uma altura de voo de 1300 m, o que resultou em um pixel com resolução espacial aproximada de 10 cm. O bloco de imagens possui um total de 72 pontos de controle distribuídos aos pares quando possível e com intervalo médio de 15 fotobases em toda a área do bloco, conforme esquema apresentado na Figura 50.

FIGURA 50 - BLOCO DE IMAGENS DO PROJETO 2.

De maneira similar ao primeiro bloco de projeto independente, os parâmetros de orientação exterior do sistema GNSS+INS foram determinados para o referencial da imagem sintética a partir dos parâmetros de montagem, bem como as fotocoordenadas com distorção que foram corrigidas utilizando os POI obtidos em ambas as metodologias de calibração. Essas informações foram inseridas no modelo matemático das equações de colinearidade e as coordenadas no espaço objeto $(X_i^{R1}\ Y_i^{R1}\ Z_i^{R1})$ foram obtidas por interseção fotogramétrica a partir dos pares de fotocoordenadas. Em seguida, foram calculadas discrepâncias a partir das coordenadas obtidas por interseção fotogramétrica e as coordenadas geodésicas dos pontos de controle. Com base nos resultados obtidos foram aplicados testes estatísticos de precisão e exatidão conforme valores estabelecidos no PEC-PCD. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos na validação do georreferenciamento direto e as figuras 51 e 52 apresentam as discrepâncias obtidas com as duas metodologias de calibração.

TABELA 23 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2.

Parâmetro e Estatística	**Metodologia 1 (Por Etapas)**	**Metodologia 2 (Simultânea)**
Total de pares de observações	278	278
Total de pontos de controle	72	72
Total de interseções (com sucesso)	278 [100%]	278 [100%]
Total de interseções (com falha)	0 [0%]	0 [0%]
Média X ± σ_X (m)	0,05 ± 0,47	0,05 ± 0,51
Média Y ± σ_Y (m)	0,07 ± 0,33	-0,05 ± 0,40
Média Z ± σ_Z (m)	-0,04 ± 0,44	0,04 ± 0,49
EMQ_X (m)	0,42 [4,2 pixels]	0,46 [4,6 pixels]
EMQ_Y (m)	0,31 [3,1 pixels]	0,36 [3,6 pixels]
EMQ_Z (m)	0,40 [4,0 pixels]	0,44 [4,4 pixels]
Discrepâncias XYZ ≤ 3xGSD (0,30 m)	26 [36,11%]	26 [36,11%]
Discrepâncias XYZ > 3xGSD (0,30 m)	46 [63,89%]	46 [63,89%]
Resolução espacial do pixel (GSD): 0,10 m		

FIGURA 51 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

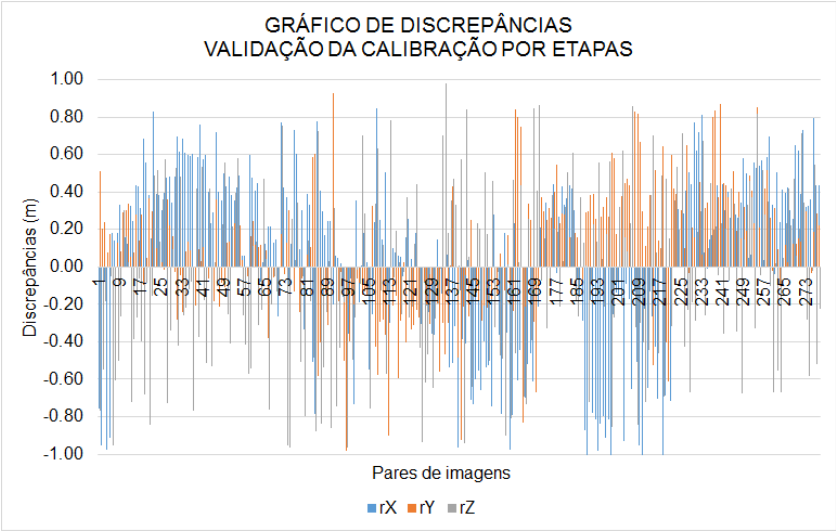
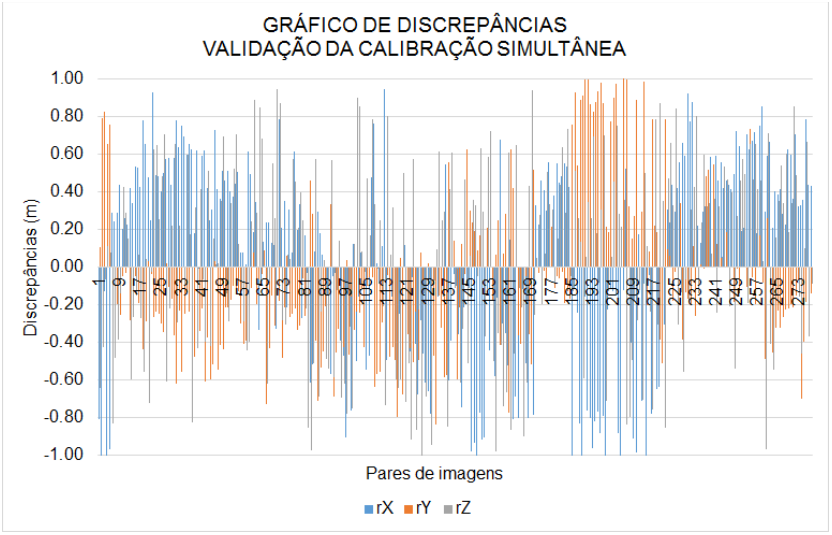


FIGURA 52 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.



Analisando os resultados apresentados na Tabela 23, nota-se que em ambas as metodologias de calibração, cerca de 64% dos pontos de controle apresentaram discrepâncias acima da tolerância planialtimétrica compatível com aplicações de mapeamento com georreferenciamento. Em comparação com o projeto fotogramétrico independente 1, os resultados obtidos são ligeiramente superiores, entretanto, nota-se também que as características temporais e de geometria de faixas são diferentes das utilizadas na calibração, bem como a presença de erros aleatórios relacionados com a variação de pressão e temperatura da câmera e variações na solução da trajetória no sistema GNSS+INS, influenciam diretamente na obtenção de

coordenadas tridimensionais no espaço objeto com exatidão dentro da tolerância preconizada para aplicações de georreferenciamento direto.

Na Tabela 23, nota-se que ambas as metodologias de calibração novamente produziram resultados muito semelhantes, ou seja, inexistência de tendência planialtimétrica significativa (acima de 1xGSD). Entretanto, nota-se um desvio-padrão planialtimétrico de cerca 5 pixels, cujo valor é ligeiramente superior aos resultados obtidos no projeto anterior. Essa característica está relacionada com dois fatores principais, ou seja, a altura de voo superior (cerca de 300 m) que aumenta a imprecisão da interseção fotogramétrica e também a variação relativa entre trajetórias GNSS+INS uma vez que o bloco foi obtido em várias missões de voo. Para verificar a qualidade dos resultados de acordo com os valores estabelecidos no PEC-PCD para as escalas de mapeamento cadastral, foram realizadas as mesmas análises de precisão e exatidão e os resultados seguem apresentados nas tabelas 24, 25, 26 e 27 a seguir.

TABELA 24 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=71)**			1,668	1,668	1,668
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	2,386	3,677	2,047
1:2000	A	0,34	0,17	1,193	1,839	2,047
1:5000	A	0,85	0,34	0,477	0,735	1,024

Possui tendências
Livre de tendências

TABELA 25 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=71)**			1,668	1,668	1,668
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	2,505	2,481	1,923
1:2000	A	0,34	0,17	1,253	1,241	1,923
1:5000	A	0,85	0,34	0,501	0,496	0,961

Possui tendências
Livre de tendências

TABELA 26 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=71)			85,527	85,527	85,527
	Classe PEC-PCD	EP Planimetria	EP Altimetria	X	Y	Z
1:1000	A	0,17	0,17	1063,300	550,039	483,405
1:2000	A	0,34	0,17	265,825	137,510	483,405
1:5000	A	0,85	0,34	42,532	22,002	120,851

Não possui exatidão
Possui exatidão

TABELA 27 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 2 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=71)			85,527	85,527	85,527
	Classe PEC-PCD	EP Planimetria	EP Altimetria	X	Y	Z
1:1000	A	0,17	0,17	1292,960	798,045	584,873
1:2000	A	0,34	0,17	323,240	199,511	584,873
1:5000	A	0,85	0,34	51,718	31,922	146,218

Não possui exatidão
Possui exatidão

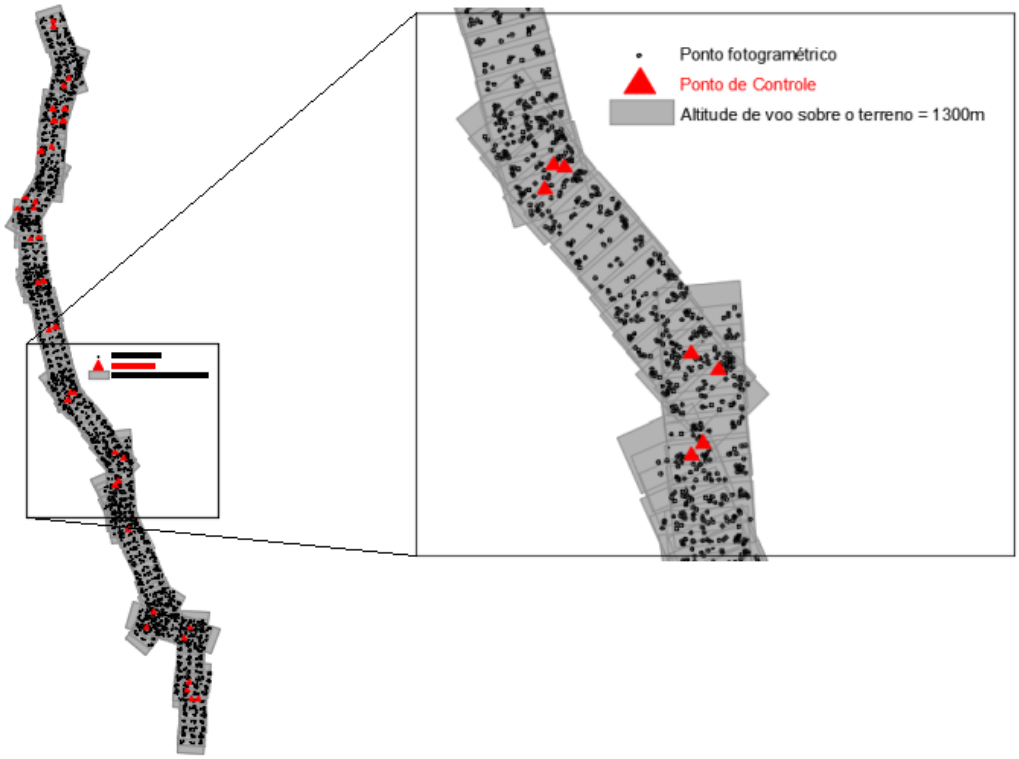
Analisando os resultados da análise de precisão e exatidão conforme critérios estabelecidos no PEC-PCD para a classe A das escalas de mapeamento cadastral, nota-se um comportamento similar ao obtido no projeto fotogramétrico 1. Nas tabelas 24 e 25, nota-se uma tendência planialtimétrica na escala 1:1000, bem como planimétrica na componente “Y” e altimétrica na escala 1:2000, ficando novamente a escala 1:5000 livre de tendências tanto em planimetria quanto em altimetria. Nas tabelas 26 e 27, nota-se que as escalas 1:1000 e 1:2000 não apresentaram exatidão planialtimétrica compatível para a classe A. Novamente a escala 1:5000 apresentou exatidão planimétrica compatível com a classe A, no entanto, o valor calculado do Qui-quadrado amostral altimétrico ficou significativamente acima do valor tabelado, logo, também não foi possível classificar os resultados obtidos em altimetria.

4.6.3 Projeto Fotogramétrico Independente 3

O terceiro e último bloco de projeto possui 268 imagens sintéticas organizadas em 20 faixas lineares com sobreposição somente longitudinal de 60%, tomadas a uma altura de voo de 1300 m, resultando em um pixel com resolução espacial aproximada de 10 cm. O bloco também possui um total de 36 pontos de controle distribuídos aos

pares quando possível e com intervalo de 10 fotobases em toda a área do bloco, conforme Figura 53.

FIGURA 53 - BLOCO DE IMAGENS DO PROJETO 3.



De maneira similar aos projetos fotogramétricos 1 e 2, os parâmetros de orientação exterior do sistema GNSS+INS foram determinados para o referencial da imagem sintética a partir dos parâmetros de montagem, bem como as fotocoordenadas corrigidas a partir dos POI obtidos em ambas as metodologias de calibração. Essas informações foram inseridas no modelo matemático das equações de colinearidade cujas incógnitas são as coordenadas no espaço objeto $(X_i^{R1}\ Y_i^{R1}\ Z_i^{R1})$ do ponto correspondente ao par de fotocoordenadas extraído das imagens. As coordenadas do espaço objeto obtidas por interseção fotogramétrica foram então comparadas com as coordenadas geodésicas dos pontos de controle. A partir dessas diferenças, foram aplicados testes estatísticos de precisão e exatidão conforme valores estabelecidos no PEC-PCD. A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos na validação do georreferenciamento direto e as figuras 54 e 55 apresentam as discrepâncias obtidas com as duas metodologias de calibração.

TABELA 28 - VALIDAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3.

Parâmetro e Estatística	**Metodologia 1 (Por Etapas)**	**Metodologia 2 (Simultânea)**
Total de pares de observações	262	262
Total de pontos de controle	36	36
Total de interseções (com sucesso)	262 [100%]	262 [100%]
Total de interseções (com falha)	0 [0%]	0 [0%]
Média X ± σ_X (m)	0,05 ± 0,51	0,04 ± 0,51
Média Y ± σ_Y (m)	-0,06 ± 0,50	-0,06 ± 0,53
Média Z ± σ_Z (m)	-0,06 ± 0,49	0,06 ± 0,52
EMQ_X (m)	0,44 [4,4 pixels]	0,44 [4,4 pixels]
EMQ_Y (m)	0,44 [4,4 pixels]	0,46 [4,6 pixels]
EMQ_Z (m)	0,43 [4,3 pixels]	0,45 [4,5 pixels]
Discrepâncias XYZ ≤ 3xGSD (0,30 m)	14 [38,89%]	14 [38,89%]
Discrepâncias XYZ > 3xGSD (0,30 m)	22 [61,11%]	22 [61,11%]
Resolução do pixel (GSD): 0,10 m		

FIGURA 54 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

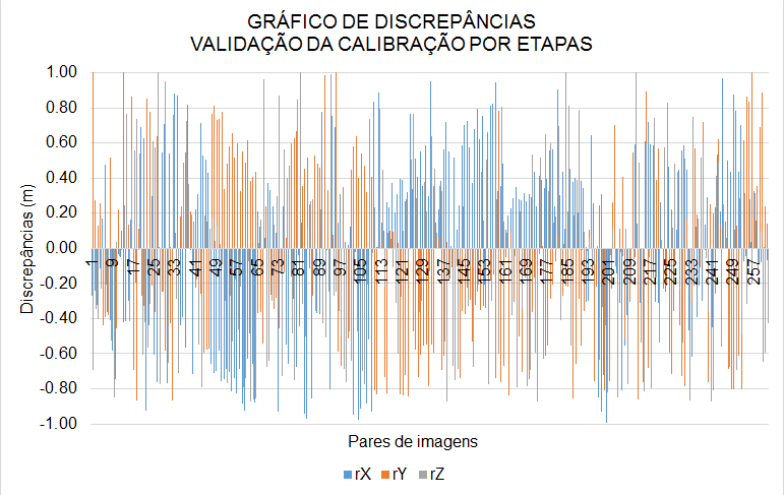
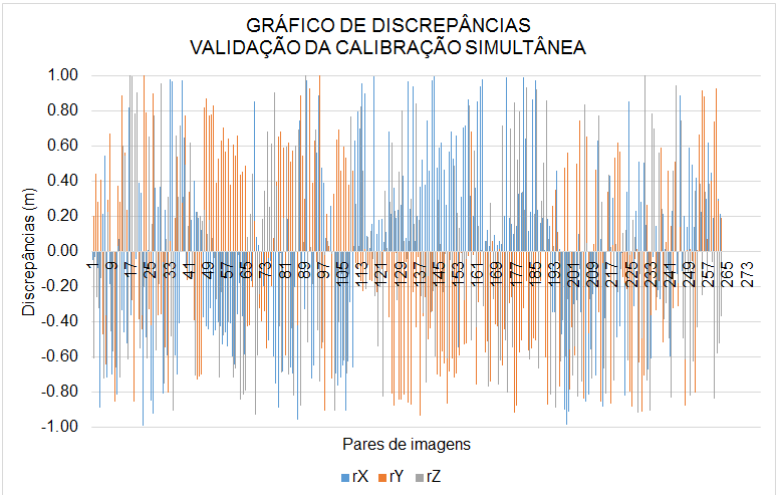


FIGURA 55 - DISCREPÂNCIAS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.



Analisando os resultados apresentados na Tabela 28, nota-se que em ambas as metodologias de calibração, cerca de 61% dos pontos de controle apresentaram discrepâncias acima da tolerância planialtimétrica compatível com aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Em comparação com os projetos fotogramétricos independentes 1 e 2, os resultados obtidos são ligeiramente superiores. Entretanto, nota-se também que as características temporais e de geometria de faixas diferentes das utilizadas na calibração, bem como a presença de erros aleatórios relacionados com a variação de pressão e temperatura da câmera e variações na solução da trajetória no sistema GNSS+INS, influenciam diretamente na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com exatidão dentro da tolerância preconizada para aplicações de georreferenciamento direto.

Na Tabela 28, nota-se mais uma vez que ambas as metodologias de calibração produziram resultados muito semelhantes, ou seja, inexistência de tendência planialtimétrica significativa (acima de 1xGSD). Entretanto, nota-se um desvio-padrão planialtimétrico de cerca 6 pixels, cujo valor é ligeiramente superior aos resultados obtidos no projeto fotogramétrico 1 que possui as mesmas características de altura de voo. Neste caso, essa característica também está relacionada com a variação relativa na solução das trajetórias GNSS+INS uma vez que o bloco foi obtido em várias missões de voo. Para verificar a qualidade dos resultados de acordo com os valores estabelecidos no PEC-PCD para as escalas de mapeamento cadastral, foram realizadas as mesmas análises de precisão e exatidão e os resultados seguem apresentados nas tabelas 29, 30, 31 e 32 a seguir.

TABELA 29 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=35)**			1,691	1,691	1,691
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	1,837	2,243	2,108
1:2000	A	0,34	0,17	0,918	1,122	2,108
1:5000	A	0,85	0,34	0,367	0,449	1,054

Possui tendências
Livre de tendências

TABELA 30 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição t-Student (90% e n=35)**			1,691	1,691	1,691
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	1,551	2,196	2,169
1:2000	A	0,34	0,17	0,775	1,098	2,169
1:5000	A	0,85	0,34	0,310	0,439	1,084

Possui tendências
Livre de tendências

TABELA 31 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO POR ETAPAS.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=35)**			46,031	46,031	46,031
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	617,801	613,942	292,669
1:2000	A	0,34	0,17	154,450	153,485	292,669
1:5000	A	0,85	0,34	24,712	24,558	73,167

Não possui exatidão
Possui exatidão

TABELA 32 - ANÁLISE DE EXATIDÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO NO PROJETO 3 PELO MÉTODO SIMULTÂNEO.

ANÁLIDE DE EXATIDÃO CONFORME PEC-PCD						
Escala	**Distribuição Qui-Quadrado (90% e n=35)**			46,031	46,031	46,031
	Classe PEC-PCD	**EP Planimetria**	**EP Altimetria**	**X**	**Y**	**Z**
1:1000	A	0,17	0,17	627,605	675,415	321,830
1:2000	A	0,34	0,17	156,901	168,854	321,830
1:5000	A	0,85	0,34	25,104	27,017	80,457

Não possui exatidão
Possui exatidão

Analisando os resultados da análise de precisão e exatidão conforme critérios estabelecidos no PEC-PCD para a classe A das escalas de mapeamento cadastral, nota-se novamente um comportamento similar ao obtido no projeto fotogramétrico 1. Nas tabelas 29 e 30, nota-se uma tendência planialtimétrica na escala 1:1000 e altimétrica na escala 1:2000, ficando novamente a escala 1:5000 livre de tendências tanto em planimetria quanto em altimetria. Nas tabelas 31 e 32, nota-se um aspecto similar ao projeto fotogramétrico 2, ou seja, as escalas 1:1000 e 1:2000 não apresentaram exatidão planialtimétrica compatível para a classe A. Novamente a escala 1:5000 apresentou exatidão planimétrica compatível com a classe A, no entanto, o valor calculado do Qui-quadrado amostral altimétrico ficou significativamente acima do valor tabelado, logo, também não foi possível classificar os resultados obtidos em altimetria.

Com base na análise dos resultados obtidos em todos os projetos fotogramétricos independentes conforme critérios do PEC-PCD, é possível verificar que todos os projetos apresentam uma característica em comum que é a influência dos erros aleatórios na obtenção de resultados com exatidão compatível com as escalas para uso cadastral. Esses erros estão relacionados com diversas causas tais como efeitos de variação de pressão, temperatura e variações na solução da trajetória no sistema GNSS+INS. Por outro lado, deve-se ressaltar que a inexistência de tendência planimétrica na escala 1:2000 e planialtimétrica na escala 1:5000, bem como a exatidão planimétrica na escala 1:5000, são resultados significativamente relevantes em se tratando de um processo com georreferenciamento direto onde a determinação das coordenadas no espaço objeto ocorreu de forma direta e não envolveu nenhuma etapa de ajustamento de observações para minimizar os efeitos dos erros aleatórios presentes em cada projeto fotogramétrico com características distintas das utilizadas na calibração do sistema.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou os aspectos teóricos e práticos envolvidos na calibração do sistema fotogramétrico TACx4 para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Além dos aspectos teóricos e práticos apresentados, foram desenvolvidos programas computacionais para a geração de imagens sintéticas e a calibração do sistema TACx4 com o GNSS+INS Applanix POS-AV510^{TM} utilizando o método por etapas, bem como um programa computacional para obtenção automática de coordenadas tridimensionais no espaço objeto através de interseção fotogramétrica, permitindo avaliar a qualidade do georreferenciamento direto e sua viabilidade em aplicações de mapeamento.

A metodologia apresentada neste trabalhou utilizou imagens aéreas de um campo de calibração para determinar os parâmetros de orientação interior das câmeras que compõem o sistema de imageamento, bem como a posição e orientação de cada câmera em relação a um referencial geodésico tridimensional para geração de imagens sintéticas. Em seguida, utilizando informações provenientes do GNSS+INS, foram aplicadas duas metodologias para a calibração do sistema fotogramétrico nas quais também foram utilizadas imagens aéreas sintéticas do mesmo campo de calibração. A primeira metodologia determinou os parâmetros de orientação interior da imagem sintética através de um ajustamento simultâneo pelo MMQ e os ângulos de desalinhamento entre os referenciais do sistema GNSS+INS e da imagem sintética utilizando o método por etapas. A segunda metodologia determinou os parâmetros de orientação interior da imagem sintética bem como a posição relativa e os ângulos de desalinhamento através de um ajustamento simultâneo pelo MMQ do modelo matemático de equações de colinearidade modificadas, cujo procedimento é conhecido como método simultâneo. É importante destacar que ambas as metodologias apresentadas neste trabalho podem ser utilizadas na calibração de um sistema fotogramétrico composto de uma câmera e um sistema GNSS+INS, desde que haja disponibilidade de um conjunto de informações similar ao que foi utilizado neste trabalho.

Após realizar a calibração do sistema fotogramétrico TACx4, os parâmetros obtidos em ambas as metodologias foram avaliados em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto através de interseção fotogramétrica de modelos,

determinando-se as coordenadas no espaço objeto a partir de coordenadas no espaço imagem de todos os pares fotogramétricos disponíveis. A partir desse procedimento, as coordenadas do espaço objeto obtidas a partir das combinações de pares fotogramétricos foram comparadas com as coordenadas geodésicas obtidas em campo e as discrepâncias planialtimétricas avaliadas estatisticamente conforme valores estabelecidos no Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Digitais (PEC-PCD).

Sob ponto de vista de uma pesquisa aplicada e com base nos resultados obtidos, é possível concluir que aplicando as metodologias de calibração em um sistema fotogramétrico composto de uma câmera integrada a um sistema GNSS+INS, obtém-se resultados satisfatórios para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto em escalas cadastrais, em especial na escala 1:5000. Dessa forma, tais procedimentos são considerados fundamentais e indispensáveis quando há interesse em obter coordenadas tridimensionais no espaço objeto com precisão e exatidão compatíveis com aplicações de mapeamento cadastral. Entretanto, os resultados obtidos nas maiores escalas cadastrais mostram que as imprecisões no cálculo das trajetórias do sistema GNSS+INS, bem como as variações de temperatura e pressão, além da influência da relação B x H (Base fotogramétrica x Altura de voo), interferem diretamente na diminuição da precisão e exatidão na obtenção de coordenadas tridimensionais. Isso se deve ao fato de que em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto, os POE e POI utilizados na interseção fotogramétrica dos modelos não são ajustados, logo, não permitem minimizar a influência dos erros aleatórios, como ocorre em um ajustamento simultâneo da aerotriangulação.

Para integrar sistemas GNSS+INS com câmeras fotogramétricas de um sensor ou vários sensores e obter coordenadas tridimensionais no espaço objeto com georreferenciamento direto com precisão e exatidão compatível para fins fotogramétricos, recomenda-se que os POI e os parâmetros de montagem da câmera (posição relativa e ângulos de desalinhamento) sejam constantemente refinados em áreas de calibração localizadas nas proximidades da área de projeto. Tal procedimento garante que esses parâmetros serão refinados e modelados com as mesmas condições de uso da área de projeto. Entretanto, os custos e o tempo envolvido nessa operação, bem como a necessidade constante de geração de um

bloco de imagens com geometria consistente para a calibração, inviabilizam a adoção desse procedimento. Uma alternativa então, é adotar o procedimento conhecido como “Calibração em Serviço” (*On the Job Calibration*) no qual se utilizam dados do próprio projeto para refinar os POI e parâmetros de montagem da câmera. Entretanto, novamente a questão da geometria do bloco de imagens deve ser observada aqui, pois em geral, um bloco fotogramétrico de projeto não possui a mesma disposição de faixas e geometria suficientemente rígida à de um bloco de calibração para refinar os parâmetros e consequentemente aumentar a exatidão na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto com georreferenciamento direto. Dessa maneira, o uso de dados de um projeto fotogramétrico para refinar os POI e parâmetros de montagem da câmera deve ser analisado criteriosamente de modo a garantir que um novo processo não diminua a precisão dos parâmetros e consequentemente a exatidão na obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto bem como etapas subsequentes.

Como continuidade do trabalho e das pesquisas de calibração de sistemas fotogramétricos para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto em escalas cadastrais maiores que 1:2000, recomenda-se o estudo de alternativas para que uma configuração mínima de um bloco fotogramétrico com rigidez geométrica seja utilizada para refinar os parâmetros de orientação interior e de montagem do sistema. Além disso, sugere-se um estudo detalhado da exatidão da trajetória de um sistema GNSS+INS uma vez que pequenas variações de posição e orientação na solução da trajetória interferem diretamente na qualidade dos resultados de aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto. Em grandes projetos que são formados por diferentes campanhas de aerolevantamento, por exemplo, as variações de precisão na solução das trajetórias do sistema GNSS+INS podem inviabilizar o uso de um único conjunto de parâmetros de orientação interior e de montagem. Por isso, o estudo de alternativas para que essa variação seja minimizada é de grande importância uma vez que em projetos fotogramétricos, a redução ou até mesmo eliminação do controle em campo reflete na redução de custos e tempo de processamento das etapas subsequentes.

Por fim, este trabalho visou reiterar a importância da continuidade dos estudos nos processos de obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto a partir de informações de posição e orientação de um sistema GNSS+INS. Nos dias atuais,

nota-se cada vez mais uma evolução na eficiência dos algoritmos de extração de informações no espaço imagem, bem como na precisão de trajetórias fornecidas por sistemas GNSS+INS, entretanto, a eficiência na qualidade das informações resultantes no espaço objeto ainda merece ser investigada e aprofundada, principalmente sob a visão prática e aplicada da Engenharia. O aumento dessa eficiência e consequentemente a precisão e exatidão dos processos subsequentes, possibilitará reduzir os custos das etapas envolvidas em projeto fotogramétrico aumentando a demanda do uso de mapeamentos derivados da Fotogrametria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, Q. Evaluation of GPS-inertial navigation system for airborne photogrammetry. ACSM/ASPRS Annual Convention and Exposition, April. **Anais...** . p.7–10, 1997.

ABDULLAH, Q. Camera Orientation without Aerotriangulation : System Performance and Productivity. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, n. B2, p. 4–11, 2000.

ALAMÚS, R.; KORNUS, W. DMC Geometry Analysis and Virtual Image Characteristation. **The Photogrammetric Record**, v. 23, n. December, p. 353–371, 2008.

ALAMÚS, R.; KORNUS, W.; TALAYA, J. Studies on DMC geometry. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 6, p. 375–386, 2006.

APPLANIX POSTrack Specifications. Disponível em: <http://www.applanix.com/pdf/specs/postrack_specs.pdf>. Acesso em: 12/08/2015.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE, 2003.

ARIZA, F. J. L. **Calidad En La Producción Cartográfica**. RA-MA Editorial, 2002.

ASPRS. ASPRS accuracy standards for large-scale maps. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, n. 7, p. 1068–1070, 1990.

BAZ, I.; BÜYÜKSALIH, G.; JACOBSEN, K. Bundle Block Adjustment with High Resolution UltracamD Images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p. 6, 2007.

BNSS: BeiDou Navigation Satellite System. Disponível em: <http://en.beidou.gov.cn/> Acesso em: 21/09/2016.

BLAZQUEZ, M.; COLOMINA, I. On the Role of Self Calibration Functions in Integrated Sensor Orientation. Proceedings of EuroCOW. **Anais...** . p.7, 2010.

BROWN, C. Advanced methods for the calibration of metric cameras. **DBA Systems Inc. Melbourne Fl.**, p. 125, 1968.

BROWN, C. Close-Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering**, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.

BRUTON, A. M.; MOSTAFA, M. M. R.; SCHERZINGER, B. Airborne DGPS without dedicated base stations for mapping applications. Ion-Gps 2001. **Anais...** . p.8, 2001.

CANNON, M. E.; SCHWARZ, K. P. A discussion of GPS/INS integration for airborne photogrammetric applications. Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing. Springer New York. **Anais...** . p.443–452, 1991.

CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The Development of Camera Calibration Methods and

Models. **The Photogrammetric Record**, v. 16, n. 91, p. 51–66, 1998.

CRAMER, M. Direct Geocoding - is Aerial Triangulation Obsolete ? Photogrammetric Week 1999. **Anais...** . p.59–70, 1999.

CRAMER, M. Performance of GPS/Inertial Solutions in Photogrammetry. Photogrammetric Week 01. **Anais...** . v. 71, p.49–62, 2001.

CRAMER, M. Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation - recent test results. Photogrammetric Week 03. **Anais...** . p.161–172, 2003.

CRAMER, M. Performance of Medium Format Digital Aerial Sensor Systems. Proceedings of XXth International Symposium Photogrammetry and Remote Sensing Congress. **Anais...** . p.769–775, 2004.

CRAMER, M.; STALLMANN, D. On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. Proceedings of the ISPRS Workshop-High Resolution Mapping from Space 2001. **Anais...** . p.32–44, 2001.

CRAMER, M.; STALLMANN, D. System Calibration for Direct Georeferencing. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.79–84, 2002.

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

DEBIASI, P. **Desenvolvimento de Metodologias de Calibração de uma Câmara Digital de Baixo Custo Integrada com um Sistema LIDAR.** 2012. 194 f. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

DÖRSTEL, C. DMC - Practical Experiences and Photogrammetric System Performance. Photogrammetric Week 03. **Anais...** . p.59–65, 2002.

DÖRSTEL, C. DMC – (R) evolution on geometric accuracy. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.81–88, 2007.

DÖRSTEL, C.; JACOBSEN, K.; STALLMANN, D. DMC—photogrammetric accuracy–calibration aspects and generation of synthetic DMC images. Optical. **Anais...** . p.74–82, 2003.

DRAPER, C. S. Origins of Inertial Navigation. **Journal of Guidance and Control**, v. 4, n. 5, p. 1, 1981.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. 2011. URL: http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_ADGV_Vs_2_1_3.pdf. Acesso em 20/10/2016.

EISENHART, C. Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument

calibration systems. **J. Res. Natl. Bur. Stand. (US)**, v. 67C, n. 2, p. 161–187, 1963.

EL-SHEIMY, N. **The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS ApplicationsUniversity of Calgary**, 1996.

FISCHLER, A. M.; BOLLES, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applicatlons to Image Analysis and Automated Cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381–395, 1981.

FONSECA, L.; NAMIKAWA, L.; CASTEJON, E.; et al. Image Fusion for Remote Sensing Applications. Image Fusion and Its Applications. **Anais...** . p.154–178, 2011.

FRASER, C. S. Digital camera self-calibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 4, p. 149–159, 1997.

FRICKER, P. ADS40 – Progress in digital aerial data collection. Photogrammetric Week 01. **Anais...** . p.105–116, 2001.

GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**, 1993. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

GIC: GALILEO Information Centre. Disponível em: <www.galileoic.org/node/150>. Acesso em: 21/09/2016.

GIAC: GLONASS Information and Analysis Center. Disponível em: <www.glonass-iac.ru/en/guide/>. Acesso em: 21/09/2016.

GPS: The Global Positioning System. Disponível em: <www.gps.gov/systems/gps/space/>. Acesso em: 21/09/2016.

GREJNER-BRZEZINSKA, D. Direct Sensor Orientation in Airborne and Land-based Mapping Applications. **Direct sensor orientation in airborne and land-based mapping applications**, n. 461, p. 461, 2001.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation, and integration**. John Wiley & Sons, 2007

GRUBER, M.; LADSTÄDTER, R. Geometric Issues of the Digital Large Format Aerial Camera UltracamD. Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW. **Anais...** . p.7, 2006.

GRUBER, M.; LADSTÄDTER, R. Calibrating the Digital Large Format Aerial Camera UltracamX. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.8, 2008.

GRUBER, M.; WALCHER, W. Calibrating the new UltraCam Osprey oblique aerial sensor. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. **Anais...** . v. 40, p.47–52, 2014.

HAALA, N.; STALLMANN, D.; CRAMER, M. Calibration of Directly Measured Position and Attitude by Aerotriangulation of Three-Line Airborne Imagery. International

Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.23–30, 1998.

HABIB, A. F.; KERSTING, A. P. B.; BANG, K.; RAU, J. A Novel Single-Step Procedure for the Calibration of the Mounting Parameters of a Multi-Camera Terrestrial Mobile Mapping System. **Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing**, v. 22, n. 1, p. 173–185, 2011.

HABIB, A. F.; MORGAN, M. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 6, p. 733–741, 2005.

HABIB, A. F.; MORGAN, M.; LEE, Y. R. Bundle Adjustment with Self-Calibration Using Straight Lines. **The Photogrammetric Record**, v. 17, n. 100, p. 635–650, 2002.

HABIB, A. F.; SCHENK, T. Accuracy analysis of reconstructed points in object space from direct and indirect exterior orientation methods. OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation. **Anais...** , 2001.

HARRIS, C.; STEPHENS, M. A Combined Corner and Edge Detector. Procedings of the Alvey Vision Conference 1988. **Anais...** . p.147–151, 1988.

HEFELE, J. Calibration Experience with the DMC. EuroCow. **Anais...** . p.6, 2006.

HEIER, H.; KIEFNER, M.; ZEITLER, W. Calibration of the Digital Modular Camera. FIG XXII International Congress, Washington, DC USA. **Anais...** . p.1–11, 2002.

HEIPKE, C. Integrated Sensor Orientation - An OEEPE Test. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, n. 1999, p. 373–380, 2000.

HEIPKE, C.; JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. **Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings**. 2002.

HINZ, A.; DÖRSTEL, C.; HEIER, H. DMC – The digital Sensor Technology of Z/I-Imaging. Photogrammetric Week 01. **Anais...** . p.93–103, 2001.

HONKAVAARA, E. Calibration Block Structures for GPS/IMU/CAMERA-System Calibration. **The Photogrammetric Journal of Finland**, v. 18, n. 0, p. 2, 2003.

HONKAVAARA, E. Calibration in Direct Georeferencing: Theoretical Considerations and Practical Results. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70:1207-1208**, v. 0, n. November, p. 1207–1208, 2004.

HONKAVAARA, E.; AHOKAS, E.; HYYPPÄ, J.; et al. Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 6, p. 387–399, 2006.

HONKAVAARA, E.; AHOKAS, E.; JAAKKOLA, J.; et al. Investigations on System Calibration of GPS/IMU and Camera for Direct Georeferencing. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. **Anais...** . p.85–89, 2002.

HONKAVAARA, E.; ILVES, R.; JAAKKOLA, J. Practical results of GPS/IMU/camera

system calibration. **ISPRS International Workgroup: Group I/5 Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation**, v. 54, n. 2, p. 22–23, 2003.

HONKAVAARA, E.; PELTONIEMI, J.; AHOKAS, E.; et al. A Permanent Test Field for Digital Photogrammetric Systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 74, n. January, p. 95–106, 2008.

HUTTON, J.; MOSTAFA, M. M. R. 10 Years of Direct Georeferencing For Airborne Photogrammetry. Photogrammetric Week 05. **Anais...** . p.1–16, 2005.

IMAGE MAPS. Disponível em: <http://www.imagemaps.com/>. Acesso em: 19/09/2016.

IP, A. W. L.; EL-SHEIMY, N.; HUTTON, J. Performance Analysis of Integrated Sensor Orientation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 1, p. 89–97, 2004.

JACOBSEN, K. Combined Bundle Block Adjustment Versus Direct Sensor Orientation. ASPRS Annual Convention. **Anais...** . p.7, 2000.

JACOBSEN, K. Aspects of Handling Image Orientation by Direct Sensor Orientation. Proceedings of ASPRS Annual Congress. **Anais...** . p.8, 2001.

JACOBSEN, K. Calibration aspects in direct georeferencing of frame imagery. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. **Anais...** . v. 34, p.82–88, 2002.

JACOBSEN, K. Direct / Integrated Sensor Orientation - Pros and Cons. ISPRS Archives. XXth ISPRS Congress, Commission III. Vol. XXXV-B3. **Anais...** . p.829–835, 2004a.

JACOBSEN, K. Issues and method for in-flight and on-orbit calibration. Post-Launch Calibration of Satellite Sensors. **Anais...** . v. 2, p.83–92, 2004b.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Journal of basic Engineering**, v. 82, n. Series D, p. 35–45, 1960.

KERSTING, A. P. B. **Quality Assurance of Multi-Sensor Systems.** University of Calgary, 2011.

KERSTING, A. P. B.; HABIB, A. F.; RAU, J. New Method for the Calibration of Multi-Camera Mobile Mapping Systems. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B1. **Anais...** . v. XXXIX-B1, p.121–126, 2012.

KHOSHELHAM, K.; SAADATSERESHT, M.; GORTE, B. G. Influence of tie point distribution on integrated sensor orientation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX. **Anais...** . p.6, 2007.

KING, A. D. Inertial Navigation – Forty Years of Evolution. **Inertial Navigation - Forty Years of Evolution**, v. 13, n. 3, p. 140–149, 1998.

KOCAMAN, S. **GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery**. Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2003.

KREMER, E.; KRUCK, J. Integrated Sensor Orientation - Two Examples to show the Potential of simultaneous GPS/IMU and Image Data Processing. Proceedings of the ISPRS Workshop Working Group I/5 “Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation”. **Anais...** . p.7, 2003.

KRÖPFL, M.; KRUCK, E.; GRUBER, M. Geometric calibration of the digital large format aerial camera UltraCamD. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.42–44, 2004.

LADSTÄDTER, R.; TSCHEMMERNEGG, H.; GRUBER, M. Calibrating the Ultracam Aerial Camera Systems, an Update. Proceedings of International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW. **Anais...** . p.8, 2010.

LEBERL, F.; GRUBER, M. Flying the new large format digital aerial camera Ultracam. Photogrammetric Week 03. **Anais...** . p.67–76, 2003.

LEBERL, F.; GRUBER, M.; PONTICELLI, M.; BERNOEGGER, S.; PERKO, R. The ultracam large format aerial digital camera system. Proceedings of the American Society For Photogrammetry & Remote Sensing. **Anais...** . p.5–9, 2003.

LEE, Y. J.; YILMAZ, A. Boresight calibration of the aerial multi-head camera system. **Evolutionary and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications V**, v. 8059, n. 1, p. 805906–805908, 2011.

LEE, Y. J.; YILMAZ, A.; MENDOZA-SCHROCK, O. In-flight camera platform geometric calibration of the aerial multi-head camera system. Proceedings of the IEEE 2010 National Aerospace and Electronics Conference, NAECON 2010. **Anais...** . p.136–139, 2010.

LI, J.; LIU, X.; LIU, F.; LIU, Z. SWDC-4 Large Format Digital Aerial Camera System. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.139–146, 2008.

LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**, 2005. 136 f. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MADANI, M.; HEIPKE, C.; JACOBSEN, K. DMC Practical Experience and Accuracy Assessment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.6, 2004.

MADANI, M.; SHKOLNIKOV, I. Further Investigation into Geometric Accuracy of DMC. International Calibration and Orientation Workshop. **Anais...** . p.13, 2008.

MCGARVEY, J. The DCS History - 17 years of Kodak Professional digital camera systems, 2004. Disponível em: <http://www.nikonweb.com/files/DCS_Story.pdf>. Acesso em: 14/08/2016.

MANSHOLT, U.; LADSTÄDTER, R. Geometric Analysis of Vexcel Imaging Ultracam X Test Flights. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.647–652, 2008.

MARQUES FILHO, E. A. **Sistema de navegação inercial GPS/INS de baixo custo com compensação de erros por redes neurais artificiais.** 2011. 124 f. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

MERCHANT, D. C. An Investigation into Dynamic Aerial Photographic System Calibration. **Ohio State Univ Research Foundation Columbus**, p. 65, 1971.

MERCHANT, D. C. Metric Calibration of the Aerial Photographic System by the Method of Mixed Ranges. **Ohio State Univ Columbus Dept Of Geodetic Science**, p. 85, 1972.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. Technical papers of the American Congress on Surveying and Mapping. **Anais...** . p.222–231, 1982.

MERCHANT, D. C. Aerial Camera Metric Calibration – History and Status. ASPRS Annual Conference. **Anais...** . p.10, 2012.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. 2001.

MITISHITA, E. A.; CÔRTES, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. L.; MARTINS, M. Study of Stability Analysis of the Interior Orientation Parameters From the Small-Format Digital Camera Using on-the-Job Calibration. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.7, 2010.

MITISHITA, E. A.; MACHADO, A. M. L.; SOUZA, G. V. Uso de dados LIDAR na calibração de câmeras de baixo custo. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** . p.1881–1887, 2009.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. Editora UNESP, 2007.

MOSTAFA, M. M. R. Airborne Image Georeferencing by GPS-AIDED Inertial Systems: Concepts and Performance Analysis. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. **Anais...** . p.4, 2001a.

MOSTAFA, M. M. R. Digital Multi-Sensor Systems – Calibration and Performance Analysis. OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation. **Anais...** . p.8, 2001b.

MOSTAFA, M. M. R. Camera/IMU Boresight Calibration : New Advances and Performance Analysis. Proceedings of ASPRS Annual Meeting. **Anais...** . p.12, 2002.

MOSTAFA, M. M. R. Design and Performance of the DSS. Photogrammetric Week 03. **Anais...** . p.77–87, 2003.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems: How do they work? What is the attainable accuracy?. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting. **Anais...** . p.11, 2001.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J.; REID, B.; HILL, R. GPS / IMU products – the Applanix approach. Photogrammetric Week 01. **Anais...** . p.63–83, 2001.

MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P. A Multi-Sensor System for Airborne Image Capture and Georeferencing. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 66, n. 12, p. 1417–1423, 2000.

MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P.; GONG, P. A Fully Digital System For Airborne Mapping. Proceedings of The International Symposium on Geodesy, Geomatics, and Navigation. **Anais...** . p.9, 1997.

NIU, X.; HASSAN, T.; EL-SHEIMY, N. Directly Georeferencing Terrestrial Imagery using MEMS-based INS / GNSS Integrated Systems. Proceedings of XXIII FIG Congress. **Anais...** . p.1–16, 2006.

PERKO, R.; KLAUS, A.; GRUBER, M. Quality comparison of digital and film-based images for photogrammetric purposes. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.5, 2004.

PETRIE, G. Airborne Digital Frame Cameras. **GeoInformatics**, v. 7, n. 6, p. 18-27, 2003.

PETRIE, G.; WALKER, A. S. Airborne Digital Imaging Thechnology: A New Overview. **The Photogrammetric Record**, v. 22, n. September, p. 203–225, 2007.

PINTO, L.; FORLANI, G. A Single Step Calibration Procedure for IMU/GPS in Aerial Photogrammetry. International. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 34. **Anais...** . p.210–213, 2002.

PINTO, L.; FORLANI, G.; PASSONI, D. Experimental Tests on the Benefits of a More Rigorous Model in IMU/GPS System Calibration. **National Research Program COFIN, Ministry of the University and Scientific Research of Italy**, p. 6, 2002.

QTAISHAT, K. S.; SMITH, M. J.; PARK, D. W. G. Direct georeferencing and ultracam D misalignment calibration. ASPRS Annual Conference. **Anais...** . v. 2, p.576–582, 2008a.

QTAISHAT, K. S.; SMITH, M. J.; PARK, D. W. G. The Interior and Exterior Calibration for Ultracam D. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.695–702, 2008b.

REMONDINO, F.; FRASER, C. S. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5, p. 266–272, 2006.

SANTANA, D. D. S.; CAMPOS, V. A.; FURUKAWA, C. M.; MARUYAMA, N. Estimação de trajetórias utilizando sistema de navegação inercial strapdown. XV Congresso Brasileiro de Automática. **Anais...** . p.6, 2004.

SCHWARZ, K. P. Aircraft Position and Atittude Determination by GPS and INS. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXI, n. B6, p. 67–73, 1996.

SCHWARZ, K. P.; CHAPMAN, M. A.; CANNON, M. W.; GONG, P. An Integrated INS-GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 11, p. 1667–1674, 1993.

SCHWARZ, K. P.; FRASER, C. S.; GUSTAFSON, P. C. Aerotriangulation Without Ground Control. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.237–250, 1984.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Walter de Gruyter, 2003.

SKALOUD, J. **Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS,** The University of Calgary, 1999.

SKALOUD, J. Towards a more rigorous boresight calibration. ISPRS International Workshop on Theory, Technology and Realities of Inertial / GPS Sensor Orientation. **Anais...** . p.9, 2003.

SKALOUD, J.; CRAMER, M.; SCHWARZ, K. P. Exterior Orientation By Direct Measurement of Camera Position and Attitude. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXI, n. B3, p. 125–130, 1996.

SKALOUD, J.; SCHWARZ, K. P. Accurate orientation for airborne mapping systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n. 4, p. 393–401, 2000.

SMITH, M. J.; KOKKAS, N.; QTAISHAT, K. S. Investigation Into Self-Calibration Methods for the Vexcel UltraCAM-D Digital Aerial Camera. ISPRS Hannover Workshop. **Anais...** . p.5, 2007.

SMITH, M. J.; KOKKAS, N.; QTAISHAT, K. S. Investigation into self-calibration methods for the Vexcel UltaCam D digital aerial camera. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1–5, 2010.

SMITH, M. J.; QTAISHAT, K. S.; PARK, D. W. G.; JAMIESON, A. Initial Results from the Vexcel UltraCam D Digital Aerial Camera. XXXVII Beijing Congress. **Anais...** . p.6, 2005.

SMITH, M. J.; QTAISHAT, K. S.; PARK, D. W. G.; JAMIESON, A. IMU and Digital Aerial Camera Misalignment Calibration. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . p.5, 2006.

SMITHSONIAN National Air and Space Museum. Disponível em: <https://airandspace.si.edu>. Acesso em: 11/12/2016.

TACHIBANA, K.; SASAGAWA, T.; YOTSUMATA, T. Experimental Study of Direct Georeferencing System (DGS) for Large-Scale Mapping. The XXth ISPRS congress, Istanbul. **Anais...** . p.12–23, 2004.

TANG, L.; DÖRSTEL, C.; JACOBSEN, K.; HEIPKE, C.; HINZ, A. Geometric accuracy potential of the digital modular camera. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, n. B4, p. 1051–1057, 2000.

TETRACAM. Disponível em: <http://www.tetracam.com/>. Acesso em: 14/08/2016.

TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; BAZAN, W. S.; RUY, R. S.; JUNIOR, J. M. Simultaneous calibration of multiple camera heads with fixed base constraint. 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology. **Anais...** . p.6, 2009.

TOTH, C. K.; GREJNER-BRZEZINSKA, D. Performance Analysis of the Airborne Integrated Mapping System (Aims^{TM}). International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. **Anais...** . v. 1, p.7, 1997.

WEGMANN, H. Image Orientation by Combined (A)AT with GPS and IMU. **Proceedings of ISPRS Commission I Mid-term Symposium**, v. 11, n. 1, p. 278–283, 2002.

YASTIKLI, N. The effect of system calibration on direct sensor orientation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 5, p. 629–633, 2004.

YASTIKLI, N.; JACOBSEN, K. Direct Sensor Orientation for Large Scale Mapping-Potential, Problems, Solutions. **The Photogrammetric Record**, v. 20, n. 111, p. 274–284, 2005.

YUAN, X. A novel method of systematic error compensation for a position and orientation system. **Progress in Natural Science**, v. 18, n. 8, p. 953–963, 2008.

ZEITLER, W.; DÖRSTEL, C. Geometric calibration of DMC: method and results. Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings. **Anais...** . p.6, 2002.

Apêndice 1 – CÓDIGO DO PROGRAMA SIGP (MATLAB)

```
%=========================================================================
% UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
% CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS
% SIGP - SYNTHETIC IMAGE GENERATION PROGRAM
% DESENVOLVIDO POR: LEONARDO ERCOLIN FILHO
% VERSÃO: 1_1_6 – CURITIBA, AGOSTO DE 2015
%=========================================================================

format shortG
clear
clc

diary on
diary('c:\temp\Processing.log')

disp('SynthImageGenerator_1_1_6')
disp(' ')

%% Synthetic Image Information:
Cx = 12000/2.0;
Cy = 16200/2.0;
res_pixel = 5.6/1000.0;

%% Camera's Image Information:
Cx2 = 8984/2.0;
Cy2 = 6732/2.0;
res_pixel2 = 6.0/1000.0;

%% Camera's Calibration Parameters:
%% CAM#01:
s1(1,1) =  74.000000000000000;          %focal in mm
s1(2,1) =   0.048000000000000001;       %xp in mm
s1(3,1) =  -0.082000000000000003;       %yp in mm
s1(4,1) =   0.00000000000000000;        %k0
s1(5,1) =   2.2680900000000001e-006;    %k1
s1(6,1) =  -6.6608471000000003e-010;    %k2
s1(7,1) =   4.2951144999999998e-014;    %k3
s1(8,1) =   3.3875135000000000e-006;    %p1
s1(9,1) =  -7.1632256000000000e-006;    %p2
s1(10,1) = -0.050000000000000003;       %cpX in mm
s1(11,1) = -0.080000000000000002;       %cpY in mm
s1(12,1) = 74.000000000000000;          %cpZ in mm
s1(13,1) = -0.25846633252661588;        %cpO in rad
s1(14,1) =  0.22356568160618603;        %cpP in rad
s1(15,1) =  1.6227231881673065;         %cpK in rad
s1(16,1) =  0.079054079127304777;       %deltaX
s1(17,1) =  0.029152180290134274;       %deltaY

%% CAM#02:
s2(1,1) =  74.000000000000000;          %focal in mm
s2(2,1) =   0.068000000000000005;       %xp in mm
s2(3,1) =   0.068000000000000005;       %yp in mm
s2(4,1) =   0.00000000000000000;        %k0
s2(5,1) =   2.0562887000000002e-006;    %k1
s2(6,1) =  -4.6494164000000002e-010;    %k2
s2(7,1) =  -6.8780223000000002e-014;    %k3
s2(8,1) =  -1.1465430000000001e-006;    %p1
```

```
s2(9,1) =  -2.7807194000000000e-006;    %p2
s2(10,1) =  0.042999999999999997;       %cpX in mm
s2(11,1) =  0.052999999999999999;       %cpY in mm
s2(12,1) = 74.272999999999996;          %cpZ in mm
s2(13,1) =  0.25800574013701455;        %cpO in rad
s2(14,1) =  0.21230097754796426;        %cpP in rad
s2(15,1) = -1.6302867470137494;         %cpK in rad
s2(16,1) = -0.016356838831637965;       %deltaX
s2(17,1) =  0.0087245957024297965;      %deltaY

%% CAM#03:
s3(1,1) =  74.000000000000000;          %focal in mm
s3(2,1) =   0.26179999999999998;        %xp in mm
s3(3,1) =  -0.051900000000000002;       %yp in mm
s3(4,1) =   0.00000000000000000;        %k0
s3(5,1) =   1.9526743999999998e-006;    %k1
s3(6,1) =  -1.2241173999999999e-010;    %k2
s3(7,1) =  -3.2321352000000002e-013;    %k3
s3(8,1) =  -7.3153904000000002e-006;    %p1
s3(9,1) =   5.2972701000000003e-007;    %p2
s3(10,1) = -0.0020000000000000000;      %cpX in mm
s3(11,1) =  0.065000000000000002;       %cpY in mm
s3(12,1) = 74.152000000000001;          %cpZ in mm
s3(13,1) =  0.25637752247782902;        %cpO in rad
s3(14,1) = -0.17240065645227148;        %cpP in rad
s3(15,1) = -1.5295130067999236;         %cpK in rad
s3(16,1) = -0.037013602672307133;       %deltaX
s3(17,1) = -0.0042784084386673395;      %deltaY

%% CAM#04:
s4(1,1) =  74.001000000000005;          %focal in mm
s4(2,1) =  -0.17780000000000001;        %xp in mm
s4(3,1) =   0.0088999999999999999;      %yp in mm
s4(4,1) =   0.00000000000000000;        %k0
s4(5,1) =   2.1502024999999999e-006;    %k1
s4(6,1) =  -8.1122353000000003e-010;    %k2
s4(7,1) =   1.0974578000000000e-013;    %k3
s4(8,1) =   1.4714373999999999e-006;    %p1
s4(9,1) =   2.4000033000000000e-006;    %p2
s4(10,1) = -0.0020000000000000000;      %cpX in mm
s4(11,1) = -0.058000000000000003;       %cpY in mm
s4(12,1) = 74.072999999999993;          %cpZ in mm
s4(13,1) = -0.26041883236082192;        %cpO in rad
s4(14,1) = -0.16748982353593506;        %cpP in rad
s4(15,1) =  1.5260216501642341;         %cpK in rad
s4(16,1) = -0.025683637623359651;       %deltaX
s4(17,1) = -0.033598367553896724;       %deltaY

%% Rotation Matrix (Camera's to the Synthetic Image):
%% CAM#01:
omega = s1(13,1);                       %cpO in rad
fi = s1(14,1);                          %cpP in rad
kappa = s1(15,1);                       %cpK in rad
ms1(1,1) =  cos(fi)*cos(kappa);
ms1(1,2) =  cos(omega)*sin(kappa)+sin(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms1(1,3) =  sin(omega)*sin(kappa)-cos(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms1(2,1) = -cos(fi)*sin(kappa);
ms1(2,2) =  cos(omega)*cos(kappa)-sin(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms1(2,3) =  sin(omega)*cos(kappa)+cos(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms1(3,1) =  sin(fi);
ms1(3,2) = -sin(omega)*cos(fi);
```

```
ms1(3,3) =  cos(omega)*cos(fi);

%% CAM#02:
omega = s2(13,1);                          %cpO in rad
fi = s2(14,1);                             %cpP in rad
kappa = s2(15,1);                          %cpK in rad
ms2(1,1) =  cos(fi)*cos(kappa);
ms2(1,2) =  cos(omega)*sin(kappa)+sin(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms2(1,3) =  sin(omega)*sin(kappa)-cos(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms2(2,1) = -cos(fi)*sin(kappa);
ms2(2,2) =  cos(omega)*cos(kappa)-sin(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms2(2,3) =  sin(omega)*cos(kappa)+cos(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms2(3,1) =  sin(fi);
ms2(3,2) = -sin(omega)*cos(fi);
ms2(3,3) =  cos(omega)*cos(fi);

%% CAM#03:
omega = s3(13,1);                          %cpO in rad
fi = s3(14,1);                             %cpP in rad
kappa = s3(15,1);                          %cpK in rad
ms3(1,1) =  cos(fi)*cos(kappa);
ms3(1,2) =  cos(omega)*sin(kappa)+sin(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms3(1,3) =  sin(omega)*sin(kappa)-cos(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms3(2,1) = -cos(fi)*sin(kappa);
ms3(2,2) =  cos(omega)*cos(kappa)-sin(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms3(2,3) =  sin(omega)*cos(kappa)+cos(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms3(3,1) =  sin(fi);
ms3(3,2) = -sin(omega)*cos(fi);
ms3(3,3) =  cos(omega)*cos(fi);

%% CAM#04:
omega = s4(13,1);                          %cpO in rad
fi = s4(14,1);                             %cpP in rad
kappa = s4(15,1);                          %cpK in rad
ms4(1,1) =  cos(fi)*cos(kappa);
ms4(1,2) =  cos(omega)*sin(kappa)+sin(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms4(1,3) =  sin(omega)*sin(kappa)-cos(omega)*sin(fi)*cos(kappa);
ms4(2,1) = -cos(fi)*sin(kappa);
ms4(2,2) =  cos(omega)*cos(kappa)-sin(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms4(2,3) =  sin(omega)*cos(kappa)+cos(omega)*sin(fi)*sin(kappa);
ms4(3,1) =  sin(fi);
ms4(3,2) = -sin(omega)*cos(fi);
ms4(3,3) =  cos(omega)*cos(fi);

%% Loading Images:
tic
disp('Loading image 1 of 4...')
CAM01 = imread('C:\temp\TACx4_0001_CAM01.tif');
disp('Done.')
toc
disp(' ')

tic
disp('Loading image 2 of 4...')
CAM02 = imread('C:\temp\TACx4_0001_CAM02.tif');
disp('Done.')
toc
disp(' ')

tic
disp('Loading image 3 of 4...')
```

```
CAM03 = imread('C:\temp\TACx4_0001_CAM03.tif');
disp('Done.')
toc
disp(' ')

tic
disp('Loading image 4 of 4...')
CAM04 = imread('C:\temp\TACx4_0001_CAM04.tif');
disp('Done.')
toc
disp(' ')

%% Generating Synthetic Image - Main Processing:
%Xp = SYNTHETIC IMAGE X COORDINATES IN MILIMITERS
%Yp = SYNTHETIC IMAGE y COORDINATES IN MILIMITERS
Zp = 0.0; %SYNTHETIC IMAGE (Z=0.0) COORDINATES IN MILIMITERS

disp('Creating Background Image...')
tic
S = zeros(16200,12000,3,'uint8');
toc
disp('Done.')
disp(' ')

disp('Creating Parallel Processing...')
tic
parpool('local',2);
toc
disp('Done.')
disp(' ')

%% CAM01:
clear DX DY DZ x y r drad_x drad_y ddesc_x ddesc_y x_dist y_dist c l;
clear a1 a2 a3 a4 RGB;

disp('Generating Synthetic Image...')
tic

parfor j=8101:16200
    for i=1:6000

%% Colinearity Equations: DX/DZ e DY/DZ:
DX = ms1(1,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s1(16,1)*res_pixel))-s1(10,1))  +
   + ms1(1,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s1(17,1)*res_pixel))-s1(11,1)) +
   + ms1(1,3)*(Zp-s1(12,1));

DY = ms1(2,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s1(16,1)*res_pixel))-s1(10,1))  +
   + ms1(2,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s1(17,1)*res_pixel))-s1(11,1)) +
   + ms1(2,3)*(Zp-s1(12,1));

DZ = ms1(3,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s1(16,1)*res_pixel))-s1(10,1))  +
   + ms1(3,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s1(17,1)*res_pixel))-s1(11,1)) +
   + ms1(3,3)*(Zp-s1(12,1));

%% Image Coordinates without distortions:
x = -s1(1,1)*(DX/DZ);
y = -s1(1,1)*(DY/DZ);

x0 = x;
y0 = y;
```

```
x_dist = 10.0;
y_dist = 10.0;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s1(4,1)+(s1(5,1)*r^2)+(s1(6,1)*r^4)+(s1(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s1(4,1)+(s1(5,1)*r^2)+(s1(6,1)*r^4)+(s1(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s1(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s1(9,1)*x*y;
ddesc_y = s1(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s1(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions - stage 0:
x_dist0 = x0 + s1(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist0 = y0 + s1(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

%% Iterative process up to limiar
while(dif_x > res_pixel2/2.0 || dif_y > res_pixel2/2.0)

x = x_dist;
y = y_dist;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s1(4,1)+(s1(5,1)*r^2)+(s1(6,1)*r^4)+(s1(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s1(4,1)+(s1(5,1)*r^2)+(s1(6,1)*r^4)+(s1(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s1(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s1(9,1)*x*y;
ddesc_y = s1(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s1(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions:
x_dist = x0 + s1(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist = y0 + s1(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

end

%% Image coordinates - double:
c1 = ((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1;
l1 = ((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1;

%% Image coordinates - int:
c2 = fix(((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1);
l2 = fix(((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1);

%% Bilinear interpolation:
dx1 = double(c1 - c2);
dy1 = double(l1 - l2);

a1 = double(CAM01(l2,c2,:));
a2 = double(CAM01(l2,c2+1,:));
a3 = double(CAM01(l2+1,c2,:));
a4 = double(CAM01(l2+1,c2+1,:));

RGB = uint8(a1 + (dx1*(a2 - a1)) +
```

```
               + (dy1*(a3 - a1)) +
               + (dx1*dy1*(a1 - a2 - a3 + a4)));

%% Final RGB Pixel Color Composition in the Synthetic Image:
S(j,i,:) = RGB;

    end
end

toc
disp('Done.')
disp(' ')

%% CAM02:
clear DX DY DZ x y r drad_x drad_y ddesc_x ddesc_y x_dist y_dist c l;
clear a1 a2 a3 a4 RGB;

tic

parfor j=1:8100
    for i=1:6000

%% Colinearity Equations: DX/DZ e DY/DZ:
DX = ms2(1,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s2(16,1)*res_pixel))-s2(10,1))  +
   + ms2(1,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s2(17,1)*res_pixel))-s2(11,1)) +
   + ms2(1,3)*(Zp-s2(12,1));

DY = ms2(2,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s2(16,1)*res_pixel))-s2(10,1))  +
   + ms2(2,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s2(17,1)*res_pixel))-s2(11,1)) +
   + ms2(2,3)*(Zp-s2(12,1));

DZ = ms2(3,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s2(16,1)*res_pixel))-s2(10,1))  +
   + ms2(3,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s2(17,1)*res_pixel))-s2(11,1)) +
   + ms2(3,3)*(Zp-s2(12,1));

%% Image Coordinates without distortions:
x = -s2(1,1)*(DX/DZ);
y = -s2(1,1)*(DY/DZ);

x0 = x;
y0 = y;

x_dist = 10.0;
y_dist = 10.0;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s2(4,1)+(s2(5,1)*r^2)+(s2(6,1)*r^4)+(s2(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s2(4,1)+(s2(5,1)*r^2)+(s2(6,1)*r^4)+(s2(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s2(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s2(9,1)*x*y;
ddesc_y = s2(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s2(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions - stage 0:
x_dist0 = x0 + s2(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist0 = y0 + s2(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);
```

```
%% Iterative process up to limiar
while(dif_x > res_pixel2/2.0 || dif_y > res_pixel2/2.0)

x = x_dist;
y = y_dist;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s2(4,1)+(s2(5,1)*r^2)+(s2(6,1)*r^4)+(s2(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s2(4,1)+(s2(5,1)*r^2)+(s2(6,1)*r^4)+(s2(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s2(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s2(9,1)*x*y;
ddesc_y = s2(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s2(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions:
x_dist = x0 + s2(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist = y0 + s2(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

end

%% Image coordinates - double:
c1 = ((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1;
l1 = ((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1;

%% Image coordinates - int:
c2 = fix(((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1);
l2 = fix(((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1);

%% Bilinear interpolation:
dx1 = double(c1 - c2);
dy1 = double(l1 - l2);

a1 = double(CAM02(l2,c2,:));
a2 = double(CAM02(l2,c2+1,:));
a3 = double(CAM02(l2+1,c2,:));
a4 = double(CAM02(l2+1,c2+1,:));

RGB = uint8(a1 + (dx1*(a2 - a1)) +
               + (dy1*(a3 - a1)) +
               + (dx1*dy1*(a1 - a2 - a3 + a4)));

%% Final RGB Pixel Color Composition in the Synthetic Image:
S(j,i,:) = RGB;

    end
end

toc
disp('Done.')
disp(' ')

%% CAM03:
clear DX DY DZ x y r drad_x drad_y ddesc_x ddesc_y x_dist y_dist c l;
clear a1 a2 a3 a4 RGB;

tic
```

```
parfor j=1:8100
    for i=6001:12000

%% Colinearity Equations: DX/DZ e DY/DZ:
DX = ms3(1,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s3(16,1)*res_pixel))-s3(10,1))  +
   + ms3(1,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s3(17,1)*res_pixel))-s3(11,1)) +
   + ms3(1,3)*(Zp-s3(12,1));

DY = ms3(2,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s3(16,1)*res_pixel))-s3(10,1))  +
   + ms3(2,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s3(17,1)*res_pixel))-s3(11,1)) +
   + ms3(2,3)*(Zp-s3(12,1));

DZ = ms3(3,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s3(16,1)*res_pixel))-s3(10,1))  +
   + ms3(3,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s3(17,1)*res_pixel))-s3(11,1)) +
   + ms3(3,3)*(Zp-s3(12,1));

%% Image Coordinates without distortions:
x = -s3(1,1)*(DX/DZ);
y = -s3(1,1)*(DY/DZ);

x0 = x;
y0 = y;

x_dist = 10.0;
y_dist = 10.0;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s3(4,1)+(s3(5,1)*r^2)+(s3(6,1)*r^4)+(s3(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s3(4,1)+(s3(5,1)*r^2)+(s3(6,1)*r^4)+(s3(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s3(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s3(9,1)*x*y;
ddesc_y = s3(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s3(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions - stage 0:
x_dist0 = x0 + s3(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist0 = y0 + s3(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

%% Iterative process up to limiar
while(dif_x > res_pixel2/2.0 || dif_y > res_pixel2/2.0)

x = x_dist;
y = y_dist;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s3(4,1)+(s3(5,1)*r^2)+(s3(6,1)*r^4)+(s3(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s3(4,1)+(s3(5,1)*r^2)+(s3(6,1)*r^4)+(s3(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s3(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s3(9,1)*x*y;
ddesc_y = s3(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s3(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions:
x_dist = x0 + s3(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist = y0 + s3(3,1) + drad_y + ddesc_y;
```

```
dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

end

%% Image coordinates - double:
c1 = ((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1;
l1 = ((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1;

%% Image coordinates - int:
c2 = fix(((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1);
l2 = fix(((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1);

%% Bilinear interpolation:
dx1 = double(c1 - c2);
dy1 = double(l1 - l2);

a1 = double(CAM03(l2,c2,:));
a2 = double(CAM03(l2,c2+1,:));
a3 = double(CAM03(l2+1,c2,:));
a4 = double(CAM03(l2+1,c2+1,:));

RGB = uint8(a1 + (dx1*(a2 - a1)) + (dy1*(a3 - a1)) + (dx1*dy1*(a1 - a2 - a3
+ a4)));

%% Final RGB Pixel Color Composition in the Synthetic Image:
S(j,i,:) = RGB;

    end
end

toc
disp('Done.')
disp(' ')

%% CAM04:
clear DX DY DZ x y r drad_x drad_y ddesc_x ddesc_y x_dist y_dist c l;
clear a1 a2 a3 a4 RGB;

tic

parfor j=8101:16200
    for i=6001:12000

%% Colinearity Equations: DX/DZ e DY/DZ:
DX = ms4(1,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s4(16,1)*res_pixel))-s4(10,1))  +
   + ms4(1,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s4(17,1)*res_pixel))-s4(11,1)) +
   + ms4(1,3)*(Zp-s4(12,1));

DY = ms4(2,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s4(16,1)*res_pixel))-s4(10,1))  +
   + ms4(2,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s4(17,1)*res_pixel))-s4(11,1)) +
   + ms4(2,3)*(Zp-s4(12,1));

DZ = ms4(3,1)*((res_pixel*((i-1)-Cx)+(s4(16,1)*res_pixel))-s4(10,1))  +
   + ms4(3,2)*((-res_pixel*((j-1)-Cy)+(s4(17,1)*res_pixel))-s4(11,1)) +
   + ms4(3,3)*(Zp-s4(12,1));

%% Image Coordinates without distortions:
x = -s4(1,1)*(DX/DZ);
y = -s4(1,1)*(DY/DZ);
```

```
x0 = x;
y0 = y;

x_dist = 10.0;
y_dist = 10.0;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s4(4,1)+(s4(5,1)*r^2)+(s4(6,1)*r^4)+(s4(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s4(4,1)+(s4(5,1)*r^2)+(s4(6,1)*r^4)+(s4(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s4(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s4(9,1)*x*y;
ddesc_y = s4(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s4(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions - stage 0:
x_dist0 = x0 + s4(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist0 = y0 + s4(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

%% Iterative process up to limiar
while(dif_x > res_pixel2/2.0 || dif_y > res_pixel2/2.0)

x = x_dist;
y = y_dist;

%% Radial simmetric distortion: k0,k1,k2,k3:
r = sqrt((x^2)+(y^2));
drad_x = (s4(4,1)+(s4(5,1)*r^2)+(s4(6,1)*r^4)+(s4(7,1)*r^6))*x;
drad_y = (s4(4,1)+(s4(5,1)*r^2)+(s4(6,1)*r^4)+(s4(7,1)*r^6))*y;

%% Decentering distortion: p1,p2:
ddesc_x = s4(8,1)*(r^2+(2*x^2))+2*s4(9,1)*x*y;
ddesc_y = s4(9,1)*(r^2+(2*y^2))+2*s4(8,1)*x*y;

%% Image coordinates with distortions:
x_dist = x0 + s4(2,1) + drad_x + ddesc_x;
y_dist = y0 + s4(3,1) + drad_y + ddesc_y;

dif_x = abs(x_dist - x_dist0);
dif_y = abs(y_dist - y_dist0);

end

%% Image coordinates - double:
c1 = ((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1;
l1 = ((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1;

%% Image coordinates - int:
c2 = fix(((x_dist/res_pixel2)+Cx2)+1);
l2 = fix(((-1*(y_dist/res_pixel2))+Cy2)+1);

%% Bilinear interpolation:
dx1 = double(c1 - c2);
dy1 = double(l1 - l2);

a1 = double(CAM04(l2,c2,:));
a2 = double(CAM04(l2,c2+1,:));
a3 = double(CAM04(l2+1,c2,:));
```

```
a4 = double(CAM04(l2+1,c2+1,:));

RGB = uint8(a1 + (dx1*(a2 - a1)) +
               + (dy1*(a3 - a1)) +
               + (dx1*dy1*(a1 - a2 - a3 + a4)));

%% Final RGB Pixel Color Composition in the Synthetic Image:
S(j,i,:) = RGB;

    end
end

toc
disp('Done.')
disp(' ')

delete(gcp);

%% Saving Final Results:

imwrite(S,'c:\temp\TACx4_0001_SYNTH.tif');

diary('c:\temp\Processing.log')

diary off

msgbox('Process Finished!!!');

%% End of Program
```

Apêndice 2 – CÓDIGO DO PROGRAMA TSICP (MATLAB)

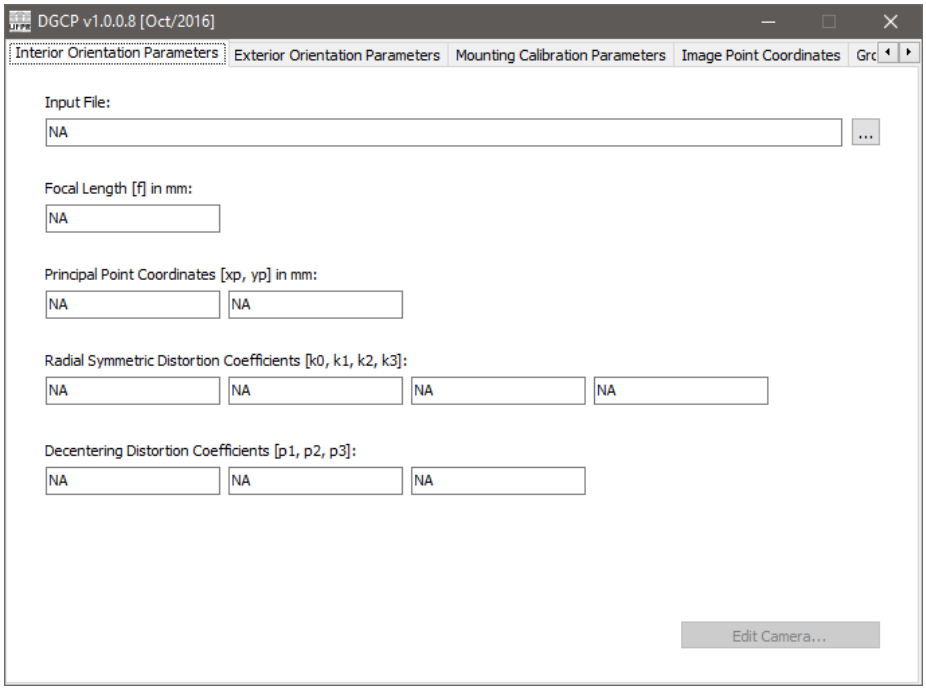
```
%=========================================================================
% UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
% CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS
% TSICP - TWO-STEP INERTIAL CALIBRATION PROGRAM
% DESENVOLVIDO POR: LEONARDO ERCOLIN FILHO
% VERSÃO: 1_1_3 - CURITIBA, OUTUBRO DE 2015
%=========================================================================

format shortG
clear
clc

%% Import the data:
[filename, pathname] = uigetfile({'*.xlsx','xls'},'Select Calibration
Data');
file = strcat(pathname,filename);
[~, ~, raw] = xlsread(file);

%% Create output variable:
data = reshape([raw{:}],size(raw));

%% Allocate imported array to column variable names:
INS(:,1) = data(:,1); INS(:,2) = data(:,2); INS(:,3) = data(:,3);
INS(:,4) = data(:,4); INS(:,5) = data(:,5); INS(:,6) = data(:,6);

TRI(:,1) = data(:,7);  TRI(:,2) = data(:,8);  TRI(:,3) = data(:,9);
TRI(:,4) = data(:,10); TRI(:,5) = data(:,11); TRI(:,6) = data(:,12);

%% Calculating lever arms and boresight angles:
diary on

[filename, pathname] = uiputfile({'*.txt'},'Save Calibration Report as');
diaryfile = strcat(pathname,filename);
diary(diaryfile);

clc

disp('CalibraINS_1_0_3 [29/10/2015]')
disp(' ');
disp('MOUNTING PARAMETERS CALIBRATION PROCESSING:')
disp(' ');

h = waitbar(0,'Processing, Wait...');

total_size = size(raw);
num_rows = total_size(1);

rcb_all = zeros(num_rows,3);
Rcb_all = zeros(num_rows,3);

for i=1:num_rows

omega = deg2rad(INS(i,4));
phi =   deg2rad(INS(i,5));
kappa = deg2rad(INS(i,6));

m11 =  cos(phi)*cos(kappa);
```

```
m12 = -cos(phi)*sin(kappa);
m13 =  sin(phi);

m21 =  cos(omega)*sin(kappa) + sin(omega)*sin(phi)*cos(kappa);
m22 =  cos(omega)*cos(kappa) - sin(omega)*sin(phi)*sin(kappa);
m23 = -sin(omega)*cos(phi);

m31 =  sin(omega)*sin(kappa) - cos(omega)*sin(phi)*cos(kappa);
m32 =  sin(omega)*cos(kappa) + cos(omega)*sin(phi)*sin(kappa);
m33 =  cos(omega)*cos(phi);

%% Rbm - Body(IMU) rotation matrix to the Mapping:
Rbm(1,1) = m11; Rbm(1,2) = m12; Rbm(1,3) = m13;
Rbm(2,1) = m21; Rbm(2,2) = m22; Rbm(2,3) = m23;
Rbm(3,1) = m31; Rbm(3,2) = m32; Rbm(3,3) = m33;

clear m11 m12 m13 m21 m22 m23 m31 m32 m33;

omega = deg2rad(TRI(i,4));
phi =   deg2rad(TRI(i,5));
kappa = deg2rad(TRI(i,6));

m11 =  cos(phi)*cos(kappa);
m12 = -cos(phi)*sin(kappa);
m13 =  sin(phi);

m21 =  cos(omega)*sin(kappa) + sin(omega)*sin(phi)*cos(kappa);
m22 =  cos(omega)*cos(kappa) - sin(omega)*sin(phi)*sin(kappa);
m23 = -sin(omega)*cos(phi);

m31 =  sin(omega)*sin(kappa) - cos(omega)*sin(phi)*cos(kappa);
m32 =  sin(omega)*cos(kappa) + cos(omega)*sin(phi)*sin(kappa);
m33 =  cos(omega)*cos(phi);

%% Rcm – Camera rotation matrix to the Mapping:
Rcm(1,1) = m11; Rcm(1,2) = m12; Rcm(1,3) = m13;
Rcm(2,1) = m21; Rcm(2,2) = m22; Rcm(2,3) = m23;
Rcm(3,1) = m31; Rcm(3,2) = m32; Rcm(3,3) = m33;

clear m11 m12 m13 m21 m22 m23 m31 m32 m33;

%% rbm - Body(IMU) position to the Mapping:
rbm(1,1) = INS(i,1);
rbm(2,1) = INS(i,2);
rbm(3,1) = INS(i,3);

%% rcm – Camera position to the Mapping:
rcm(1,1) = TRI(i,1);
rcm(2,1) = TRI(i,2);
rcm(3,1) = TRI(i,3);

X = ['Photo: ', num2str(i)];
disp(X)
disp('')
rcb = Rbm\(rcm - rbm);
disp(rcb)
disp(' ')
Rcb = Rbm\Rcm;
disp(' ')
disp(Rcb)
```

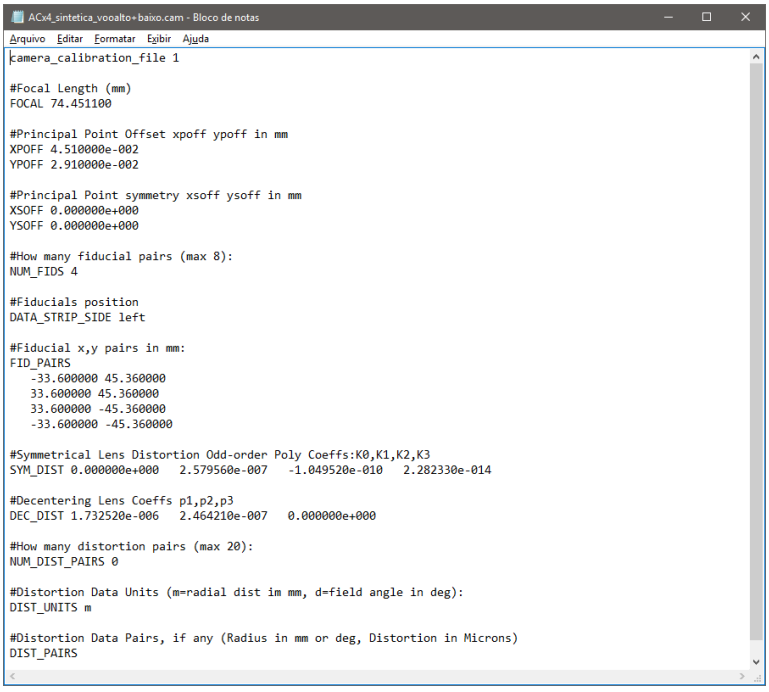
```
%% rcb - Camera position to the Body(IMU)
rcb_all(i,1) = rcb(1,1);
rcb_all(i,2) = rcb(2,1);
rcb_all(i,3) = rcb(3,1);

phi2 =   asin(Rcb(1,3));
omega2 = atan2((-Rcb(2,3)/cos(phi2)),(Rcb(3,3)/cos(phi2)));
kappa2 = atan2((-Rcb(1,2)/cos(phi2)),(Rcb(1,1)/cos(phi2)));

%% Rcb - Camera rotation to the Body(IMU)
Rcb_all(i,1) = omega2;
Rcb_all(i,2) = phi2;
Rcb_all(i,3) = kappa2;

waitbar(i/num_rows,h);

end

close(h);

disp(' ');
disp('LEVER ARMS (rcb) AND BORESIGHT ANGLES (Rcb) CALIBRATION RESULTS: ')
disp(' ');
disp('Lever Arms (m +/- mm):');
rcb_average = mean(rcb_all);
rcb_stdev = std(rcb_all)*1000;
disp(rcb_average)
disp(rcb_stdev)

disp(' ');
disp('Boresight Angles (deg +/- sec):');

Rcb_average = radtodeg(mean(Rcb_all));
Rcb_stdev = rad2deg(std(Rcb_all))*3600;
disp(Rcb_average)
disp(Rcb_stdev)

disp(' ');
disp('END OF CALIBRATION')

diary off

h = msgbox('Calibration Finished!!!');

%% End Of Program
```

Apêndice 3 – DESCRITIVO DO PROGRAMA DGCP (RAD STUDIO C++)

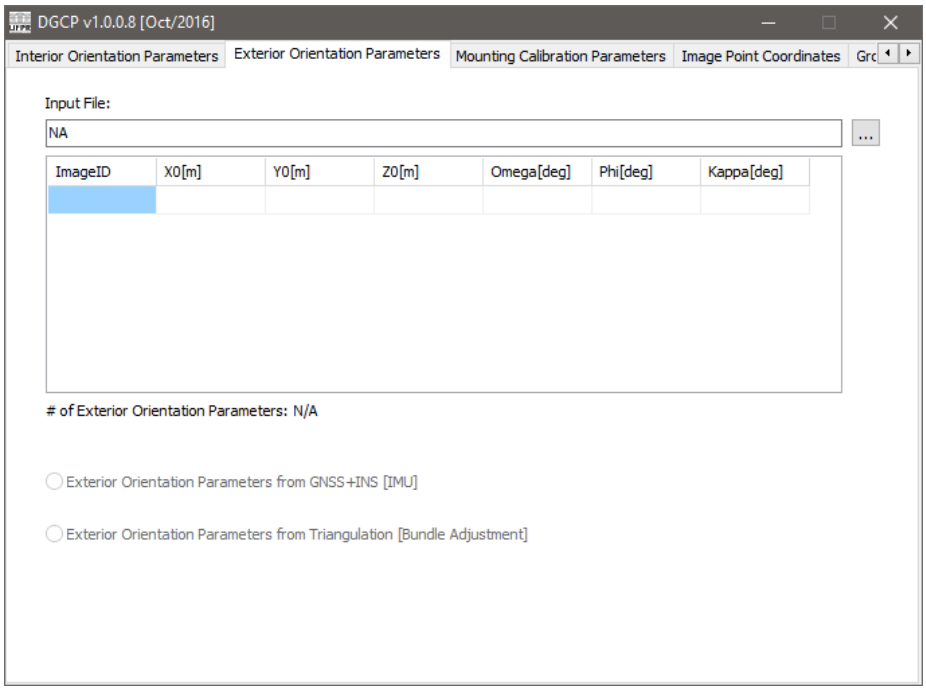
Aba 01 – Interior Orientation Parameters: Possibilita inserir os parâmetros de orientação interior de uma câmera contendo: distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada.



Formato de entrada do arquivo:



Aba 02 – Exterior Orientation Parameters: Possibilita inserir os parâmetros de orientação exterior de uma câmera contendo: Identificador da Imagem, coordenadas de posição (X_0, Y_0, Z_0) e ângulos de orientação (ω, φ, κ) provenientes de um sistema GNSS+INS (*GNSS+INS[IMU]*) ou de uma aerotriangulação (*Bundle Adjustment*).



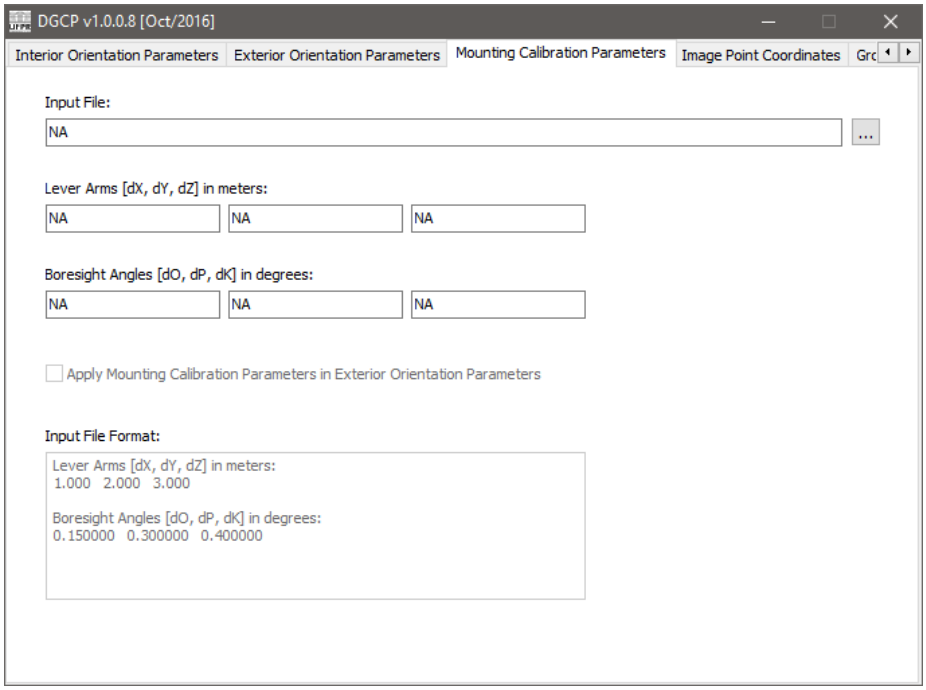
Formato de entrada do arquivo:

parametros_OE_RefIMU.txt - Bloco de notas

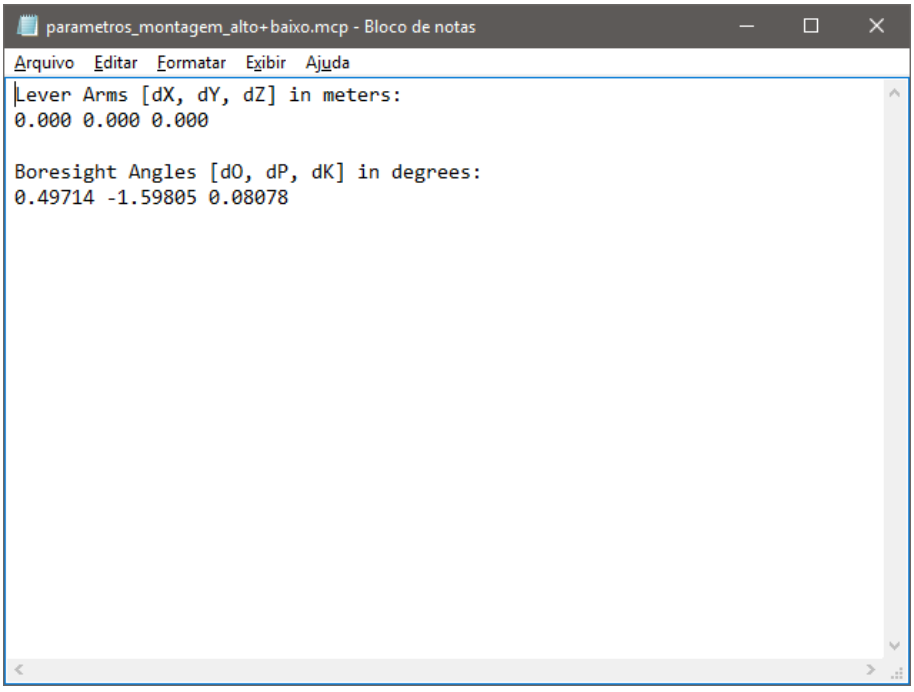
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

```
01_00005    451621.302    7191055.656    2052.951    3.04232000    0.25975000    55.78296000
01_00006    451797.200    7191232.329    2055.464    3.54562000    -0.40389000   55.60147000
01_00007    451971.662    7191406.792    2060.077    3.74670000    -0.37145000   55.81719000
01_00008    452140.066    7191574.501    2063.900    3.35431000    -0.09166000   55.72578000
01_00009    452312.627    7191746.168    2064.964    2.40760000    -0.33720000   55.84206000
01_00010    452489.264    7191923.871    2064.409    2.39142000    0.36797000    56.31141000
01_00011    452661.487    7192098.515    2064.101    2.09344000    -0.50447000   56.41228000
01_00012    452832.397    7192274.839    2065.832    2.74342000    -0.69311000   56.90389000
01_00013    453006.470    7192456.136    2068.661    3.25808000    -0.35187000   57.35140000
01_00014    453174.923    7192631.931    2070.564    2.85444000    -0.95048000   57.37084000
02_00024    451993.079    7190607.976    2110.571    -1.36116000   0.23989000    -145.19182000
02_00023    452169.223    7190782.594    2111.236    -0.86445000   -0.43381000   -145.48380000
02_00022    452337.196    7190949.856    2115.206    -1.01235000   -0.63128000   -145.22890000
02_00021    452519.767    7191133.031    2117.232    -1.99531000   0.06618000    -145.25566000
02_00020    452685.682    7191301.239    2111.088    -3.06978000   1.47600000    -145.00415000
02_00019    452865.470    7191484.715    2102.996    -2.74701000   1.56825000    -145.24877000
02_00018    453032.096    7191654.896    2098.069    -2.03273000   1.50957000    -145.34103000
02_00017    453203.714    7191829.264    2096.686    -1.02034000   1.80632000    -145.75392000
02_00016    453384.953    7192010.263    2097.099    -2.48123000   1.00423000    -145.12411000
02_00015    453551.523    7192176.185    2097.356    -2.01090000   1.75724000    -145.70042000
03_00025    452546.917    7190166.412    2085.866    0.05668000    1.07841000    54.57161000
03_00026    452715.158    7190340.961    2080.838    -0.03176000   0.24194000    54.81900000
03_00027    452877.479    7190511.404    2077.497    0.38060000    -0.24578000   55.25220000
03_00028    453043.264    7190687.246    2076.065    1.55198000    -0.19894000   55.49692000
03_00029    453217.158    7190871.595    2077.144    1.99057000    -0.69812000   55.55200000
03_00030    453388.550    7191053.073    2078.596    2.11813000    -0.27212000   55.74843000
03_00031    453558.300    7191232.059    2078.447    1.62762000    0.13480000    55.91614000
03_00032    453727.652    7191409.748    2075.037    0.95993000    0.25372000    55.76401000
03_00033    453892.536    7191582.737    2068.715    0.50896000    0.62007000    55.40250000
03_00034    454062.455    7191761.697    2063.629    1.60838000    -0.48788000   55.83205000
```

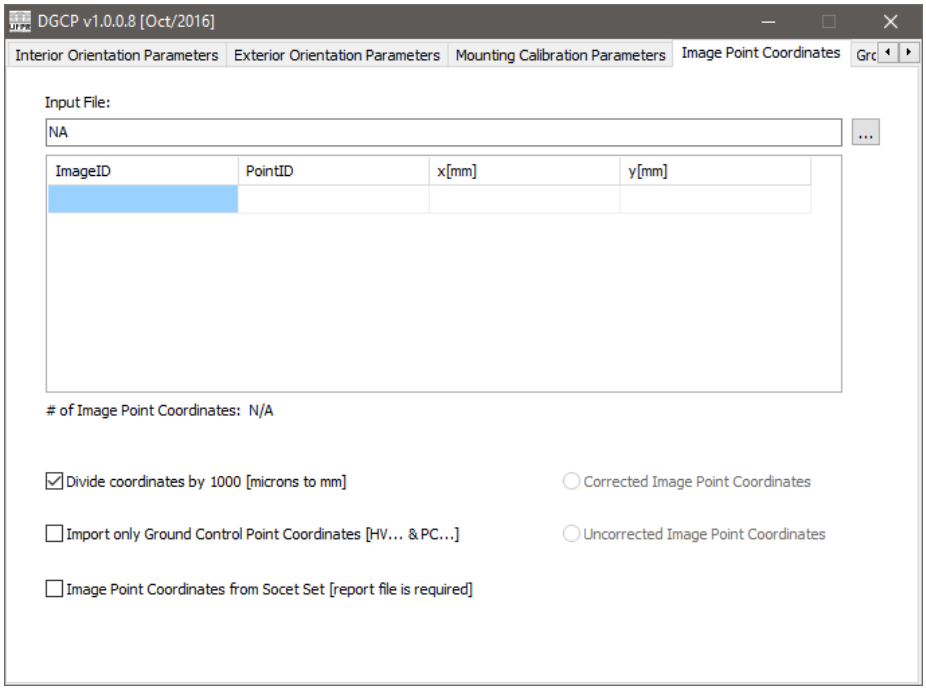
Aba 03 – Mounting Calibration Parameters: Possibilita inserir os parâmetros de montagem os elementos de posição relativa entre a IMU e o centro de perspectiva da câmera (*Lever Arms [dX, dY, dZ]*) e ângulos de desalinhamento (*Boresight Angles [dO, dP, dK]*). Essa opção é ativada apenas quando os parâmetros de orientação exterior são provenientes de um sistema GNSS+INS.



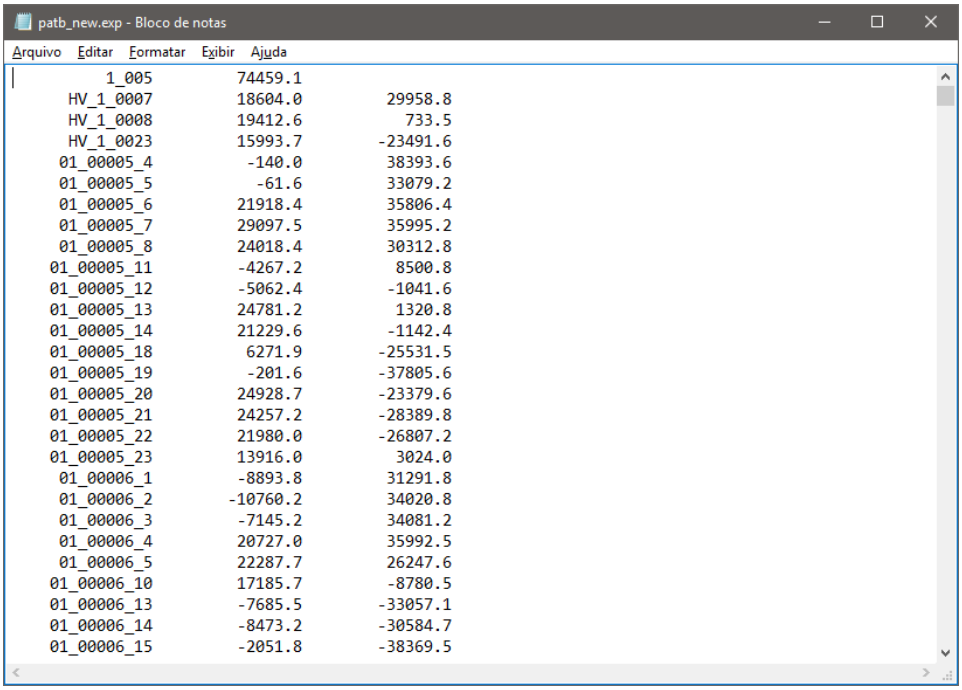
Formato de entrada do arquivo:



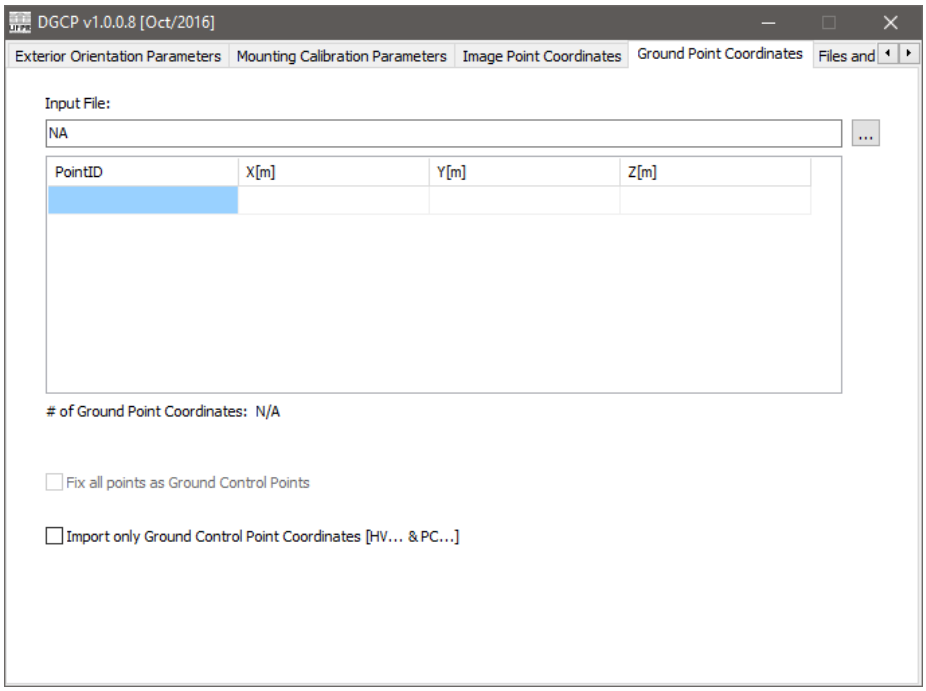
Aba 04 – Image Point Coordinates: Possibilita inserir as coordenadas do espaço imagem (fotocoordenadas) contendo: Identificador da imagem, identificador do ponto, coordenada X e Y em milímetros ou microns. É possível carregar coordenadas com (*Corrected Image Point Coordinates*) ou sem (*Uncorrected Image Point Coordinates*) a correção dos POI da câmera.



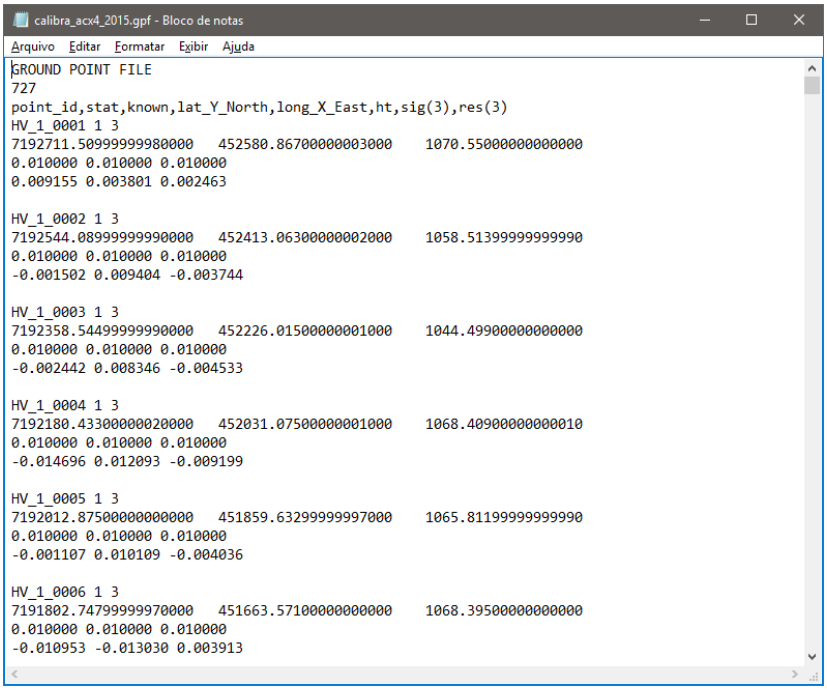
Formato de entrada do arquivo:



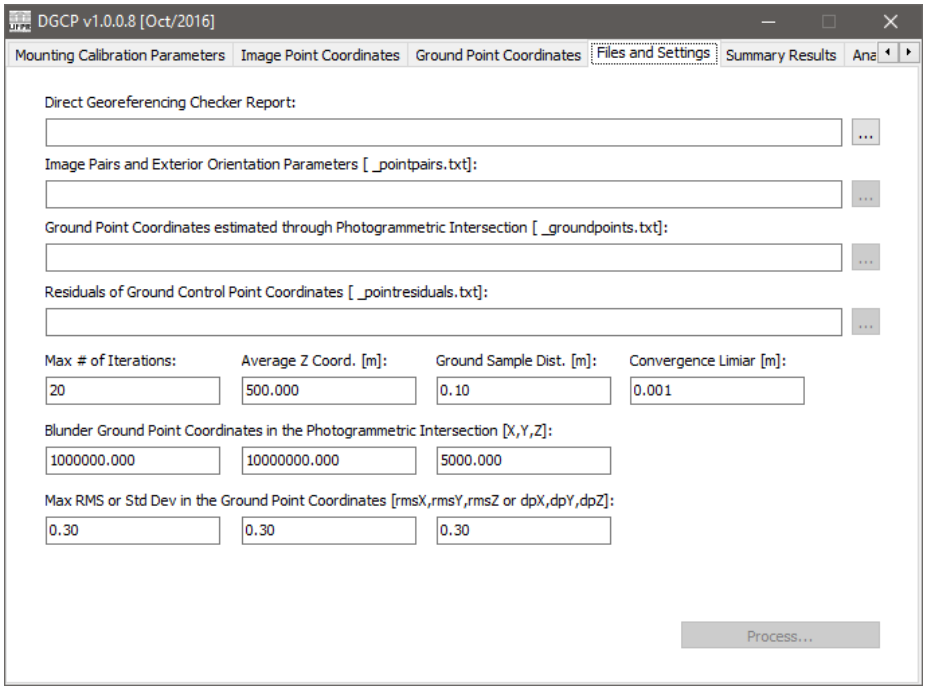
Aba 05 – Ground Point Coordinates: Possibilita inserir as coordenadas do espaço objeto (terreno) contendo: Identificador do ponto, coordenada X, Y e Z em metros. Os pontos de controle e de check devem possui identificador do ponto com prefixo “HV” ou “PC”.



Formato de entrada do arquivo:



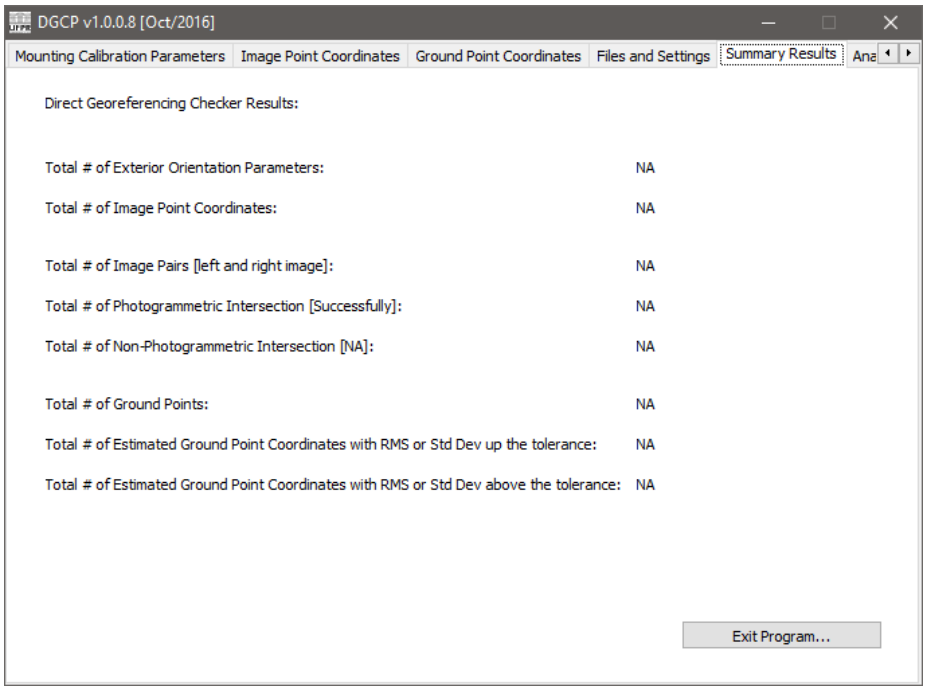
Aba 06 – Files and Settings: Possibilita inserir as configurações do processamento bem como arquivos intermediários e relatório completo. Dentre as configurações é possível inserir a resolução do pixel (Ground Sample Dist. [m]), Altitude média no Terreno (Average Z Coord. [m]), além de valores de limiar para análise da qualidade do georreferenciamento direto (em geral é de, no máximo, 3xGSD).



O relatório completo de processamento (*Direct Georeferencing Checker Report*) contém todas as informações de entrada bem como processamento, resultados e análises de qualidade do georreferenciamento direto. Além disso, arquivos intermediários como de combinação de pares fotogramétricos (*_pointpairs*), coordenadas no espaço objeto calculadas por interseção fotogramétrica (*_groundpoints*) e discrepâncias das coordenadas calculadas com as coordenadas de referência (*_pointresiduals*) são armazenados para facilitar análises dos resultados.

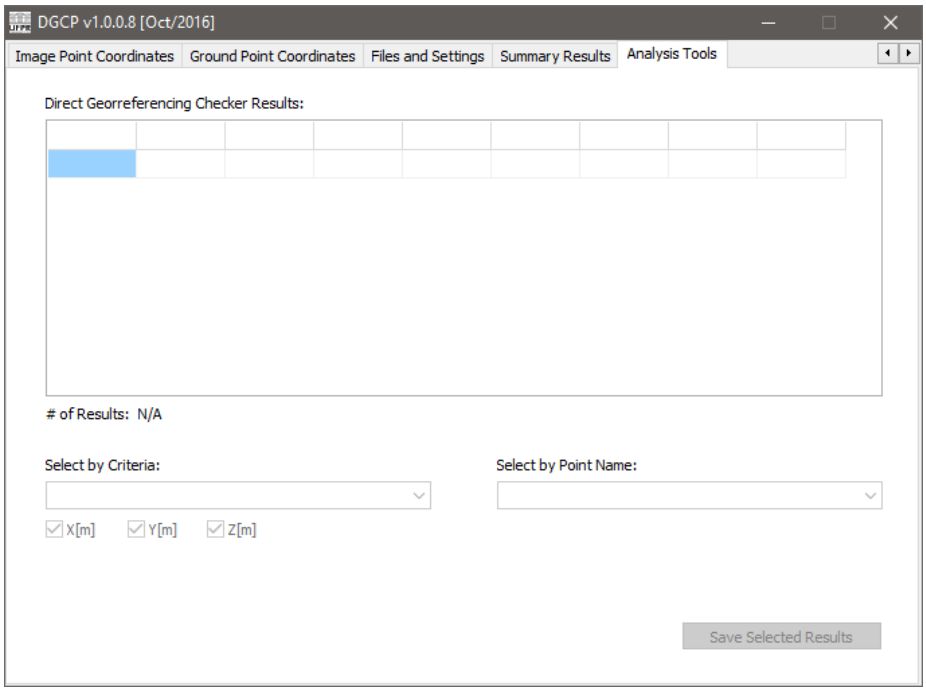
Aba 07 – Summary Results: Apresenta um resumo dos resultados obtidos contendo as seguintes informações:

- Número total de imagens (*Exterior Orientation Parameters*);
- Número total de fotocoordenadas (*Image Point Coordinates*);
- Número total de pares fotogramétricos (*Image Pairs*);
- Número total de interseções com sucesso (*Successfully*);
- Número total de interseções com falha (*NA*);
- Número total de pontos coordenadas no espaço objeto (*Ground Points*);
- Porcentagem de pontos com erro médio quadrático (*RMS*) ou desvio-padrão (*Std Dev*) menor ou igual ao limiar estabelecido; e
- Porcentagem de pontos com erro médio quadrático (*RMS*) ou desvio-padrão (*Std Dev*) maior que o limiar estabelecido.



Aba 08 – Analysis Tools: Contém ferramentas que possibilitam analisar os resultados utilizando diferentes critérios de seleção, tais como:

- *Select by Criteria*: seleciona todos os pontos com resíduos acima da tolerância por componente X, Y e Z de forma independente; e
- *Select by Point Name*: seleciona um ponto em específico a partir do seu identificador.



Utilizando a opção "*Save Selected Results*" é possível salvar o resultado da filtragem em um arquivo para que sejam realizadas análises específicas.