

LUCAS DIAS SANTOS

**CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DE UMA CÂMARA
HIPERESPECTRAL COM DETERMINAÇÃO
SIMULTÂNEA DO DESALINHAMENTO ENTRE
SENSORES**



Presidente Prudente
2019

LUCAS DIAS SANTOS

**CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DE UMA CÂMARA
HIPERESPECTRAL COM DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA
DO DESALINHAMENTO ENTRE SENSORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista - Campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli.

Presidente Prudente
2019

S237c

Santos, Lucas Dias

Calibração geométrica de uma câmara hiperspectral com
determinação simultânea do desalinhamento entre sensores / Lucas
Dias Santos. -- Presidente Prudente, 2025

136 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

1. Calibração de câmaras. 2. Imageamento hiperspectral. 3.
Câmara de quadro. 4. Registro de bandas. 5. Desalinhamento entre
sensores. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O aprimoramento da calibração de uma câmara usada em Sensoriamento Remoto permite a extração de informações confiáveis de suas imagens, tarefa essencial à Agricultura de Precisão e Monitoramento Ambiental. Desta forma, contribui para os ODS 2, 9 e 15 ao permitir o manejo de lavouras e recursos, ao fortalecer a tecnologia na indústria nacional e ao promover medidas pela diversidade ambiental.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Enhancing the calibration of a camera used in Remote Sensing enables the extraction of reliable information from its images, an essential task for Precision Agriculture and Environmental Monitoring. In this way, it contributes to SDGs 2, 9, and 15 by enabling crop and resource management, strengthening technology in the national industry, and promoting measures for environmental diversity.

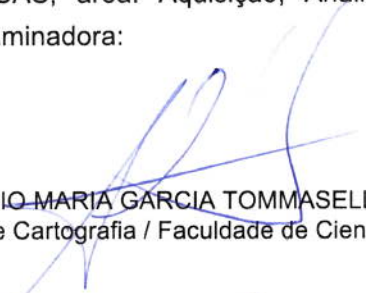
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Calibração geométrica de uma câmara hiperespectral com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores

AUTOR: LUCAS DIAS SANTOS

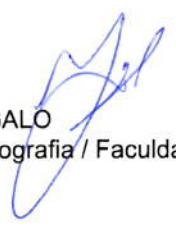
ORIENTADOR: ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

VIDEOCONFERÊNCIA

Prof. Dr. JOSÉ MARCATO JUNIOR
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul


Prof. Dr. MAURICIO GALO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 29 de abril de 2019.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Nadir e Beto.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli por ser exemplo de professor, de pesquisador e ser humano. Trabalhar com pessoas como o senhor torna os nossos objetivos muito mais fáceis de serem alcançados. Foram cinco anos de muita aprendizagem. Muito obrigado!

Aos companheiros do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas pelas discussões, conversas, pelos ensinamentos, pelas brincadeiras e pelos momentos compartilhados. Vocês vão longe! Em especial, gostaria de agradecer imensamente pela ajuda essencial para o desenvolvimento desta pesquisa dos pós-graduandos e amigos, Roraí Neto, Mariana Bardella, Marcela Machado, Guilherme Antonio e ao graduando Guilherme.

A todos os professores do Departamento de Cartografia e do PPGCC, pelo esforço e dedicação. Todos fazem parte de maneira positiva na minha vida acadêmica.

À Celesc Distribuição S.A por apoiar a finalização deste trabalho.

Aos grandes amigos que a academia me proporcionou na permanência em Presidente Prudente, Aristóteles (Ari), João Victor, Luan e Washington. Agradeço pelas dicas e debates na construção deste trabalho. Obrigado pela convivência amistosa e pelos dias felizes, mesmo quando nem tudo andava tão bem. Levo vocês comigo.

À Mi pelo afeto, carinho e perseverança. Por ter suportado todos os momentos de dificuldade comigo, por ter me aconselhado, por aguentar todos os meus momentos de indecisão. Agradeço ainda a ajuda na revisão e traduções presentes no trabalho. Teu apoio foi imensurável. Você é um verdadeiro porto seguro.

Por fim, quero agradecer meus pais e irmão, por todos os seus esforços de me manter firme nesta caminhada, pela educação ímpar, e, na figura da minha mãe Nadir, o amor infinito. Parafraseando o Pe. Zézinho: “(...) faltava tudo, mas a gente nem ligava. O importante não faltava, seu sorriso e seu olhar”.

EPÍGRAFE

*“Meu delírio é experiência
com coisas reais”.*

Belchior

RESUMO

O recente desenvolvimento de sensores hiperespectrais leves e de custo relativamente baixo criou uma nova perspectiva para as aplicações de sensoriamento remoto. Neste trabalho procurou-se investigar alguns aspectos da calibração geométrica de uma câmara hiperespectral de quadro. O principal componente desta câmara, que permite a aquisição de imagens nos diferentes comprimentos de onda, é o Interferômetro de *Fabry –Perot* (FPI). Este interferômetro é composto de duas placas plano-paralelas, com faces internas espelhadas, sendo os comprimentos de onda, por ele transmitidos, função da separação entre as placas (*air-gap*). A radiação que incide neste tipo de câmara passa inicialmente pelo conjunto óptico e depois pelo interferômetro FPI, sendo redirecionada para dois sensores por meio de um prisma de divisão de feixe. Estudos preliminares mostraram que há variações significativas entre os parâmetros de orientação interior das diferentes bandas, tanto entre bandas de um mesmo sensor, quanto entre bandas de sensores diferentes e que estas variações devem-se ao princípio de aquisição da câmara, além de um suposto desalinhamento entre os sensores. Discrepâncias da ordem de duas dezenas de pixels foram obtidas comparando fotocoordenadas medidas em bandas distintas. Nesta pesquisa duas propostas para a calibração desta câmara foram desenvolvidas: a primeira foi baseada em mudanças no modelo matemático de calibração, aplicando a restrição de se obter apenas um conjunto de parâmetros de orientação exterior por hiberno, adicionando parâmetros relacionados ao desalinhamento entre os sensores, bem como parâmetros de uma função linear relacionando a distância focal da câmara e os valores de comprimento de onda; e a segunda foi baseada no registro prévio das bandas a uma banda eleita previamente como referência. A aplicação dos parâmetros estimados com as duas abordagens permitiu reduzir a discrepância entre fotocoordenadas medidas em diferentes bandas a valores menores que um pixel. A utilização destes parâmetros na fototriangulação de imagens aéreas obtidas por um VANT reduziu de 20 a 30% o REQM dos pontos de verificação para a primeira abordagem e, de 30 a 50% para a segunda. Desta forma, foi possível, portanto, obter resultados que permitem tornar o uso desta câmara mais prático, uma vez que apenas um conjunto de POI é necessário para seu uso na reconstrução tridimensional.

Palavras-chave: Calibração de Câmaras, Imageamento Hiperespectral, Câmara de Quadro, Registro de Bandas, Desalinhamento entre Sensores.

ABSTRACT

The recent development of lightweight and low-cost hyperspectral sensors has created a new perspective for remote sensing applications. The purpose of this work is to investigate some aspects of the geometric calibration of a hyperspectral frame camera. The main component, which enables the image acquisition at different wavelengths, is the Fabry-Perot interferometer. This interferometer consists of two plan-parallel plates, with internal reflective surfaces, and the transmitted wavelengths are function of the separation between the plates (air-gap). The radiation incident on this type of camera passes initially through the optical set and after through the FPI interferometer, being redirected to two sensors by means of a beam splitting prism. Preliminary studies have shown that there are significant variations between the interior orientation parameters of the different bands in both cases, either between bands of the same sensor, or between bands of different sensors and that these variations are due to the principle of acquisition of the camera, besides a supposed misalignment between the sensors. Variations around two dozen of pixels were obtained comparing measures of photocoordinates in different bands. In this research two proposals for the calibration for this camera were developed: the first was based on changes in the mathematical model of calibration, applying the restriction of obtaining only one set of exterior orientation parameters by hypercube, adding parameters related to the misalignment between the sensors, as well as parameters of a linear function relating the focal length of the camera and the values of wavelengths; and the second consisted on prior registration of bands to a reference band. The application of the estimated parameters with these two approaches allowed reducing the variations between photocoordinates measured in different bands at values smaller than one pixel. The use of these parameters in phototriangulation of aerial images obtained by a UAV reduced the RMSE of check points by 20 to 30% for the first approach and from 30 to 50% for the second one. In this way, it was possible to obtain results that make the use of this camera more practical, since only a set of IOP are required for its use in three-dimensional reconstruction.

Keywords: Camera Calibration, Hyperspectral Imaging, Frame Camera, Band Registration, Misalignment between Sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resultados obtidos na abordagem geométrica e interpretativa do registro fotográfico	21
Figura 2 – Câmara de orifício.....	28
Figura 3 – Geometria de aquisição de uma câmara de quadro.....	29
Figura 4 – Sensor de varredura pontual (<i>whiskbroom</i>)	30
Figura 5 – Sensor de varredura linear (<i>pushbroom</i>)	31
Figura 6 – Imageamento convencional e imageamento hiperespectral	32
Figura 7 – Formas de imageamento hiperespectral	33
Figura 8 – a) Sistema Prisma-Grade-Prisma (PGP). b) Configuração <i>Offiner</i>	35
Figura 9 – Roda de filtros	35
Figura 10 – Filtro ajustável acústico-óptico	36
Figura 11 – Filtro ajustável de cristal líquido.....	37
Figura 12 – a) Interferômetro de Michelson. b) Interferômetro Sagnac.	38
Figura 13 – Câmara Hiperespectral Rikola FPI 2015	39
Figura 14 – Interferômetro <i>Fabry-Perot</i>	40
Figura 15 – Geometria interna da câmara Rikola modelo 2015.....	41
Figura 16 – Sistema de coordenadas da imagem digital	43
Figura 17 – Sistema de coordenadas com origem no centro da imagem	44
Figura 18 – Sistema de coordenadas fotogramétrico.....	46
Figura 19 – Coordenadas Geodésicas.....	47
Figura 20 – Sistema de referência local.....	48
Figura 21 – Distância Focal Gaussiana Equivalente	50
Figura 22 – Posição do ponto principal	51
Figura 23 – Distorção radial simétrica	51
Figura 24 – Relação vetorial entre espaço imagem e espaço objeto	53
Figura 25 – a) Ensaio realizado. b) Placa com alvo codificados. c) Exemplo de imagem adquirida.....	61
Figura 26 – Linhas de pontos usadas no teste	64
Figura 27 – Fator de escala para distintas bandas (direção vertical)	64
Figura 28 – Fator de escala para distintas bandas (direção horizontal).....	65
Figura 29 – a) Imagem de um alvo. b) Possível efeito do processo de limiarização	66
Figura 30 – Efeito da variação do <i>air-gap</i> nas fotocoordenadas de pontos do Sensor I	69
Figura 31 – Efeito da variação do <i>air-gap</i> nas fotocoordenadas de pontos do Sensor II.....	70
Figura 32 – Diferentes estimativas dos POE de um hipercubo	72
Figura 33 – Resíduos da transformação projetiva (aquisição manual).....	77
Figura 34 – Resíduos da transformação projetiva (aquisição no tripé)	77
Figura 35 – Relação entre Banda e Comprimento de Onda	79
Figura 36 – Relação entre comprimento de onda e distância focal	80
Figura 37 – Relação entre comprimento de onda e o ponto principal (x_0)	81
Figura 38 – Relação entre comprimento de onda e o ponto principal (y_0)	81

Figura 39 – Efeito da distorção radial simétrica com os parâmetros de cada banda	83
Figura 40 – Efeito da distorção radial simétrica com os parâmetros de uma banda de referencia e variação da distância focal.	83
Figura 41 – Diferença entre os efeitos	83
Figura 42 – Efeito da distorção descentrada (canto da imagem).....	84
Figura 43 – Posição relativa entre os sensores CMOS da câmara Rikola.....	85
Figura 44 – Desalinhamento entre os sensores.....	87
Figura 45 – Etapas para calibração considerando o desalinhamento entre os sensores	88
Figura 46 – Abordagem de calibração com registro de bandas.....	89
Figura 47 – Etapas para calibração com base no registro prévio das bandas espectrais	90
Figura 48 – a) Configuração geométrica das aquisições. b) Pontos utilizados para definição do sistema de referência tridimensional para autocalibração.	93
Figura 49 – Resultados da calibração individual por banda usando os cantos e centro dos alvos. a) Distância focal. b) Posição do ponto principal	95
Figura 50– Resultados da calibração individual por banda usando os cantos e centro dos alvos (distorção radial simétrica)	96
Figura 51 – Resultados da calibração individual por banda usando os cantos e centro dos alvos (distorção descentrada).....	97
Figura 52 – Resultados da calibração individual por banda em termos de unidade de peso à posteriori.....	98
Figura 53 – Padrão do arquivo de observações para a calibração proposta	100
Figura 54 – Resultados da calibração considerando um único CP por hipercubo. a) Distância focal. b) Posição do ponto principal	101
Figura 55 – Resultados da calibração considerando um único CP por hipercubo. a) Distorção radial simétrica. b) Distorção descentrada.....	102
Figura 56 – Resultados da para distância focal da calibração com determinação de um conjunto de POI para a câmara.....	105
Figura 57 – Distâncias focais interpoladas como função linear do comprimento de onda	108
Figura 58 – Distância focal como função linear do comprimento de onda.....	110
Figura 59 - Distância focal como função linear do comprimento de onda (abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre os sensores).....	112
Figura 60 – Orientação dos resíduos	113
Figura 61 – Magnitude dos resíduos. a) Observável Coluna. b) Observável Linha.....	113
Figura 62 - VANT octóptero SX8	115
Figura 63 - a) Região do voo teste; b) Imagem aérea adquirida pela câmara FPI/2015 embarcada em um VANT	115
Figura 64- Bloco fotogramétrico	116
Figura 65 - Resumo dos experimentos realizados	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Discrepância entre fotocoordenadas em pixel de diferentes imagens espectrais de um mesmo hipercubo	62
Tabela 2 – Discrepância entre fotocoordenadas em pixel de diferentes imagens espectrais de um mesmo hipercubo (centro dos alvos).....	67
Tabela 3 – Ângulos de orientação relativa entre sensores.....	74
Tabela 4 – REQM dos resíduos da transformação da B1 para B25 para 4 diferentes transformações.....	78
Tabela 5 – Resultados da calibração com determinação de um conjunto de POI para a câmara	104
Tabela 6 – POI estimados na calibração convencional por sensor.....	107
Tabela 7 – POI estimados na calibração com focal variável por sensor	107
Tabela 8 – POI estimados na calibração com focal variável – Sensor II	110
Tabela 9 – POI estimados na calibração com focal variável – Sensor II	110
Tabela 10 – POI estimados para a abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores	112
Tabela 11 – POI estimados para a abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores	118
Tabela 12 – Parâmetro da transformação projetiva estimados.....	122
Tabela 13 – REQM (Discrepâncias) entre fotocoordenadas em pixel (bandas de diferentes sensores)	123
Tabela 14 – REQM (Discrepâncias) entre fotocoordenadas em pixel (bandas do mesmo sensor).....	124
Tabela 15 – Parâmetros de Orientação Interior das bandas de referência.....	125
Tabela 16 – Discrepâncias dos pontos de verificação para fototriangulação com POI da banda 10	126
Tabela 17 – Discrepâncias dos pontos de verificação para fototriangulação com POI da banda 25	127
Tabela 18 – Discrepâncias dos pontos de verificação para fototriangulação com POI da banda 10 e 25	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações da câmara Rikola modelo 2015	41
Quadro 2 – Configuração de aquisição.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2 TRABALHOS RELACIONADOS	23
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	24
1.3.1 Objetivo geral	24
1.3.2 Objetivos específicos.....	25
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 GEOMETRIAS DE IMAGEAMENTO	27
2.1.1 Sensores de quadro ou <i>frame</i>	27
2.1.2 Sensores de varredura pontual ou <i>whiskbroom</i>	29
2.1.3 Sensores de varredura linear ou <i>pushbroom</i>	31
2.2 IMAGEAMENTO HIPERESPECTRAL	32
2.2.1 Dispositivos de dispersão da luz	33
2.2.1.1 Grades de difração	34
2.2.1.2 Rodas de filtros	35
2.2.1.3 Filtros Ajustáveis	36
2.3 CÂMARA HIPERESPECTRAL RIKOLA FPI2015.....	39
2.4 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS EM FOTOGRAMETRIA.....	42
2.4.1 Sistemas de referência em fotogrametria digital	43
2.4.1.1 Sistema de coordenadas imagem	43
2.4.1.2 Sistema de coordenadas com origem no centro da imagem	44
2.4.1.3 Sistema de coordenadas fotogramétrico	45
2.4.1.4 Sistema de coordenadas do espaço objeto	46
2.4.2 Orientação interior.....	49
2.4.2.1 Distância Focal	50
2.4.2.2 Posição do Ponto Principal	50
2.4.2.3 Distorção Radial Simétrica	51
2.4.2.4 Distorção Descentrada	52
2.4.3 Condição de colinearidade	52
2.5 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS	55
2.5.1 Métodos de calibração baseada nas equações de colinearidade.....	57
2.5.1.1 Método dos Campos Mistos	58
2.5.1.2 Método das Câmaras Convergentes	59
3. ENSAIOS PRELIMINARES E DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	60
3.1 ESTUDO PRELIMINAR DA CALIBRAÇÃO BANDA A BANDA DA CÂMARA FPI2015.....	60
3.1.1 Análise das fotocoordenadas	60
3.1.2 Análise do processo de medida automática de fotocoordenadas	63
3.1.3 Influência no centro geométrico (virtual) do alvo.....	66
3.1.4 Análise da influência do interferômetro nas medidas	67
3.1.5 Análise dos Parâmetros de Orientação Exterior.....	71
3.1.6 Análise de um possível desalinhamento entre os sensores.....	73
3.1.7 Influência da aquisição manual dos hipercubos	76
3.1.8 Análise da variação da distância focal	78

3.1.9	Análise da posição do ponto principal	80
3.1.10	Análise da variação dos parâmetros da distorção radial simétrica	82
3.1.11	Análise da variação do efeito da distorção descentrada	85
3.2	CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA COM DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ENTRE OS SENSORES.....	88
3.3	REFINAMENTO DA CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA COM PRELIMINAR CORREGISTRO DE BANDAS.....	89
4.	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	92
4.1	EFEITO DO USO DOS CENTROS GEOMÉTRICOS DOS ALVOS NA CALIBRAÇÃO.....	92
4.2	EXPERIMENTOS PARA A ABORDAGEM DE CALIBRAÇÃO COM DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DO DESALINHAMENTO ENTRE OS SENSORES .	98
4.2.1	Calibração com um único centro perspectivo por hipercubo	99
4.2.2	Calibração com a determinação de um único conjunto de POI para FPI2015	103
4.2.3	Calibração com a determinação da focal como função do comprimento de onda	106
4.2.4	Calibração com determinação indireta do desalinhamento entre os sensores e parâmetros da função linear da distância focal	108
4.2.5	Calibração com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores	111
4.2.6	Validação dos POIs estimados.....	114
4.3	EXPERIMENTOS PARA A ABORDAGEM COM CORREGISTRO DE BANDAS.....	119
4.3.1	Determinação dos parâmetros de transformação.....	119
4.3.2	Determinação dos parâmetros de orientação interior das bandas de referência.....	125
4.3.3	Fototriangulação com dados obtido com VANT aplicando a abordagem com registro de bandas	125
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	130
	REFERÊNCIAS.....	132

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O registro fotográfico é um dos meios mais significativos descobertos pelo homem para gravar informações. Seja na sua versão analógica, a fotografia, ou na sua versão digital, a imagem, o registro fotográfico se tornou uma fonte importante de informação, uma vez que os sistemas sensores ópticos são capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética de regiões do espectro eletromagnético que o próprio olho humano não detectam, permitindo análises técnicas e científicas importantes.

Em se tratando de análise de fotografias para fins técnicos e científicos, podem ser realizadas duas abordagens do registro fotográfico: uma quantitativa (métrica) e outra qualitativa (interpretativa) (WOLF e GUILANI, 2010; MATA, 2016).

No âmbito métrico (objeto de estudo da Fotogrametria) o registro fotográfico é baseado no conceito de feixe perspectivo. Um feixe perspectivo é o conjunto de semirretas (raios perspectivos) que vão desde o centro perspectivo da câmara a cada ponto do espaço objeto no campo de vista do sensor, sendo a fotografia o registro deste feixe. Por meio de duas fotografias de uma mesma área, das quais se conheçam a posição relativa dos raios perspectivos, é possível determinar posições no espaço objeto (MATA, 2016).

A posição relativa dos raios perspectivos de um feixe de raios diz respeito à determinação da forma deste feixe e sua posição, no momento do registro fotográfico. Neste sentido, é essencial o conhecimento de parâmetros internos da câmara que permitam essa reconstrução. Os parâmetros intrínsecos da câmara, ou também chamados parâmetros de orientação interior (POI), são os parâmetros que permitem reconstruir o feixe perspectivo que deu origem a imagem (OLIVAS, 1980; GALO, 1993; ANDRADE, 2003). Esses parâmetros são determinados em um processo chamado *Calibração Geométrica de Câmaras*, sendo eles: a distância focal, a posição do ponto principal, os parâmetros que permitem modelar as distorções das lentes (BROWN, 1971) e coeficientes de afinidade (MONIWA, 1972; TOMMASELLI e TOZZI, 1990; HABIB e MORGAN, 2005).

A precisão dos procedimentos de calibração geométrica de uma câmara é pré-requisito para a extração de informação espacial acurada por meio de medidas realizadas em imagens. Os procedimentos de calibração precisos tornam possíveis aplicações de

fotogrametria com câmaras não métricas (GRUEN e HUANG¹, 2001 *apud* BARAZETTI *et al.* 2011).

No contexto interpretativo (objeto de estudo do Sensoriamento Remoto), a imagem é uma representação amostral ordenada de uma superfície, sendo formada de elementos de imagem (pixels) obtidos pela quantização do fluxo de energia radiante refletido desta superfície (NOVO, 2011). De acordo com Wolf e Guilani (2010), este tipo de análise envolve o reconhecimento de objetos nas imagens e o julgamento da sua significância. Na análise interpretativa de imagens, são considerados fatores chaves para identificação de objetos, como: as cores, as formas, tamanhos, padrões, tons e texturas.

A detecção de objetos em imagens é realizada com base em diferentes domínios (NOVO, 2011). Esses domínios são definidos em termos de resoluções, sendo elas: espacial, espectral, radiométrica e temporal (JENSEN, 2009). A resolução espacial é definida pelo tamanho do elemento de área imageado pelo sensor, determinando o tamanho do menor objeto identificado na imagem. A resolução espectral, além de estar relacionada com quais comprimentos de onda um sensor opera, está relacionada também à largura, em comprimento de onda, das bandas e as suas respectivas posições no espectro eletromagnético. Já a resolução radiométrica é definida pela capacidade do sensor em quantizar diferentes valores das respostas dos alvos da cena imageada. Por fim, a resolução temporal está relacionada à frequência de revisita de um sensor a mesma área (SCHOWENGERDT, 2007; JENSEN, 2009).

A análise interpretativa de imagens digitais teve uma grande evolução com o desenvolvimento da eletrônica e com o surgimento, nos últimos anos, de sensores imageadores que capturam centenas de imagens contíguas por grande parte do espectro eletromagnético. Esses sensores são ditos hiperespectrais (JENSEN, 2009; NOVO, 2011).

Apesar das duas abordagens do registro fotográfico (métrica e interpretativa) serem muito importantes, tradicionalmente os conceitos são aplicados separadamente devido às especificidades das aplicações e as limitações tecnológicas. Os processos fotogramétricos, por exemplo, geralmente usam imagens com baixa resolução espectral, sendo muito comum o uso de apenas uma banda relacionada a cada cor primária (OLIVEIRA *et al.* 2014).

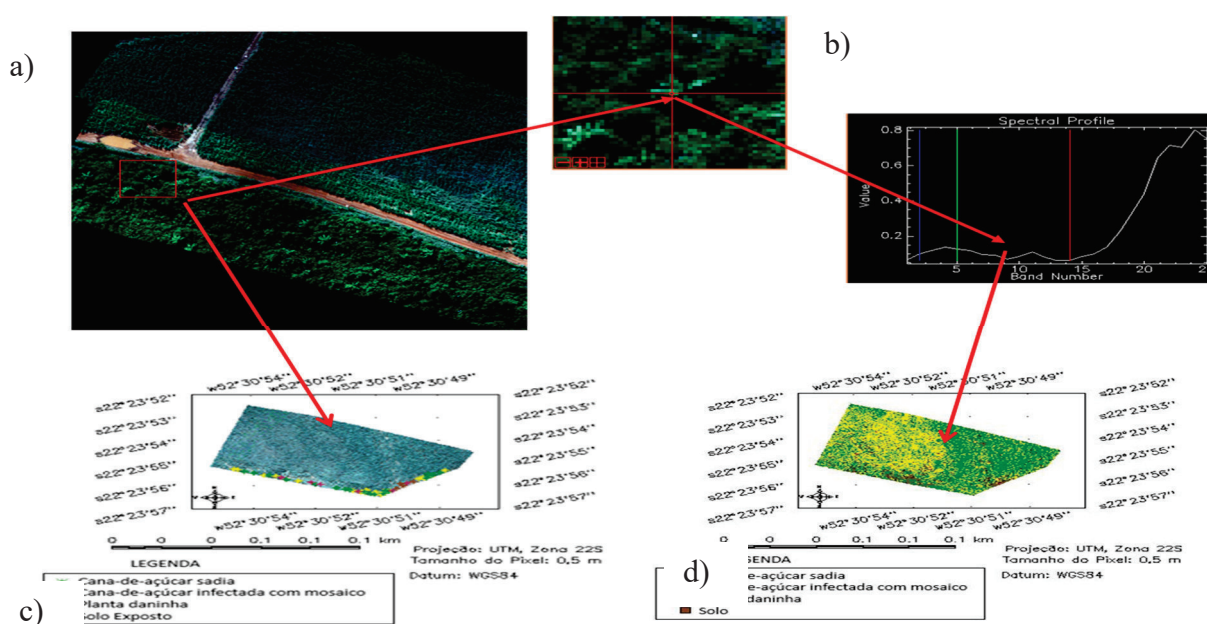
Em contrapartida, as imagens de sensoriamento remoto apresentam muitas vezes resolução espacial baixa, com pixels no terreno correspondentes a dezenas de metros, pois na

¹ GRUEN, A., HUANG, S. T. *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*. Springer Series in Information Sciences, Springer Berlin, Nova Iorque (2001).

maioria das vezes as plataformas que embarcam esses sensores estão a milhares de quilômetros do alvo.

No entanto, é devido ao rápido desenvolvimento de sensores hiperespectrais leves e de custo relativamente baixo, que uma nova perspectiva para o sensoriamento remoto está surgindo. Esta pesquisa vem ao encontro dessa nova perspectiva, em que se pretende investigar a calibração geométrica da câmara hiperespectral de quadro Rikola FPI (modelo 2015), que possui dois sensores CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*). Essa câmara pode ser utilizada em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e as imagens capturadas por ela podem ser usadas para geração de modelos completos da superfície, tanto em termos da caracterização espectral dos objetos, quanto da sua caracterização tridimensional, desde que devidamente calibrada. Um exemplo de aplicação das duas abordagens do registro fotográfico em conjunto é apresentado a seguir, retirado dos resultados obtidos por Moriya *et al.* (2016) em um estudo aplicado a agricultura. Por meio de imagens adquiridas com este tipo de câmara embarcada em um VANT (Fig. 1.a), pode-se obter ortofotomosaicos de alta resolução (Fig. 1.c), cujos valores associados a cada pixel são grandezas radiométricas (Fig. 1.b), possibilitando um processo de classificação (Fig. 1.d).

Figura 1 – Resultados obtidos na abordagem geométrica e interpretativa do registro fotográfico



Da mesma forma, Honkavara *et al.* (2013) desenvolveram uma abordagem para a geração de DSMs com assinatura espectral para cada pixel baseada em correções

radiométricas e geométricas. Foi utilizada uma câmara com o mesmo princípio de aquisição da utilizada nesta pesquisa, mas que possuía apenas um sensor (FPI modelo 2012). A etapa geométrica da proposta foi baseada na escolha de bandas de referência para determinar, via ajustamento em bloco de imagens, as suas orientações, que foram utilizadas nas demais bandas, registradas via transformações geométricas. Apesar dos resultados terem se mostrado bastante consistentes, pouco foi explorado em relação aos parâmetros internos da câmara.

Aasen *et al.* (2015) obtiveram bons resultados na geração de DSMs com informação espectral utilizando uma câmara Cubert UHD 185-Firefly. Esta câmara adquire até 125 bandas espectrais, além de uma imagem pancromática para cada hipercubo capturado. Para obtenção dos resultados os autores fundiram as imagens espectrais de cada banda à imagem pancromática, inserindo uma camada que guardava a posição de cada pixel por banda. Assim, por meio do *Agisoft Photoscan*, pode-se gerar nuvem de pontos, cujo cada pixel pode ser associado a uma assinatura espectral.

A câmara hiperespectral FPI2015 foi utilizada como ferramenta principal para aquisição de dados do projeto “*Sensoriamento remoto 4D baseado em veículo aéreo não tripulado para mapeamento e detecção de alterações na biodiversidade da mata atlântica no Brasil (UAV_4D_BIO - projeto FAPESP processo n. 13/50426-4, chamada FAPESP-AKA)*”. No entanto, algumas características desta câmara ainda precisam ser investigadas, por exemplo, a sua calibração geométrica.

Um estudo detalhado acerca da calibração geométrica da câmara hiperespectral Rikola FPI modelo 2014, com modelo fotogramétrico rigoroso, foi realizado por Oliveira *et al.* (2016). Nele, os autores realizaram a calibração da câmara no modo autocalibração, com imagens oblíquas e estáticas adquiridas de um campo de calibração terrestre 3D com alvos codificados do tipo Aruco. A necessidade de a câmara estar perfeitamente estática deve-se ao método peculiar de aquisição sequencial, visto que em uma plataforma em movimento as imagens não se sobrepõem perfeitamente ao longo do eixo espacial do hipercubo (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Os resultados mostraram que existem variações significativas entre os parâmetros das diferentes bandas, tanto entre bandas de um mesmo sensor, quando entre bandas de sensores diferentes. A principal conclusão dos autores foi que ao menos dois conjuntos de parâmetros de orientação interior são necessários para a aplicação desta câmara na reconstrução tridimensional, um para cada sensor, devido à grande variação entre eles.

A constatação apresentada pelos autores supracitados possibilitou questionar se as variações entre os POI estimados, tanto inter-sensores, quanto entre as bandas de um mesmo sensor são causadas pelo próprio princípio de aquisição da câmara (baseado em um Interferômetro de *Fabry-Pérot* (FPI) que altera a distância entre placas para cada banda (*air-gap*)), ou devido à geometria relativa entre os dois sensores que estão presentes nesta câmara. Outro problema que pode afetar a calibração é a diferença de brilho e contraste nas distintas bandas, que pode tornar as medidas de pontos nas diferentes imagens inconsistentes. Pode-se considerar que as três hipóteses sejam verdadeiras.

Assim, essa pesquisa procurou desenvolver uma abordagem de calibração rigorosa e completa para a câmara hiperespectral FPI2015, envolvendo os seus dois sensores em conjunto, para obtenção de resultados mais precisos na reconstrução tridimensional e de modo a tornar sua aplicação mais conveniente no sentido prático.

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Apesar da calibração geométrica de câmaras ser um tema profundamente estudado, trata-se de uma linha de pesquisa que segue aberta, tendo em vista a busca pela automação do processo, a atualização de algoritmos, o desenvolvimento de novos modelos de câmaras e sensores, entre outros aspectos que podem ser estudados (OLIVAS, 1980; TOMMASELLI e TOZZI, 1990; GALO, 1993; MITISHITA e OLIVAS, 2001; TOMASSELI e ALVES, 2001; GALO *et al.*, 2005; TELLES e TOMMASELLI, 2005; BAZAN, 2008; GALO e TOMMASELLI, 2011; MATA, 2016).

Como explicitam Galo *et al.*(2006), um ponto relevante neste tipo de estudo são as câmaras que possuem mais de um sensor, uma vez que câmaras com esta característica vêm sendo aplicadas na aquisição de imagens em diferentes partes do espectro eletromagnético, o que possibilita importantes aplicações, por exemplo, em agricultura. Os autores supracitados realizaram um estudo do registro e da calibração da câmara multiespectral DuncanTech MS3100. A câmara em questão possui três sensores CCD para aquisição da energia no infravermelho (IR), vermelho (R) e verde (G). Foram identificadas diferenças significativas no registro entre as bandas. Além do mais, foi também analisada a calibração separada para cada banda adquirida e a reconstrução 3D utilizando os parâmetros obtidos. Os resultados mostraram que o uso das imagens IR proporcionaram erros menores.

Já Bazan *et al.* (2008) realizaram um estudo para a calibração de um sistema dual de câmaras digitais aplicando o conceito de calibração multi-câmaras. Neste estudo, uma modificação do modelo estocástico por meio de injunções é aplicada para manter fixa a orientação relativa entre as câmaras, para posterior cálculo destes ângulos. Apesar de ser uma situação que se assemelha ao da câmara em estudo, neste caso dois conjuntos de parâmetros de orientação interior e exterior são estimados, uma vez que existem pupilas de entrada diferentes, bem como sistemas de aquisição diferentes.

Também neste contexto, tecnologias recentes foram desenvolvidas para a aquisição de imagens hiperespectrais de quadro. Essas tecnologias baseiam-se principalmente em dispositivos que funcionam como filtros. Um exemplo deste tipo de câmara é a câmara hiperespectral Rikola, cujo mecanismo principal de aquisição das diferentes bandas é um interferômetro *Fabry-Pérot* (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Alguns estudos foram realizados para a calibração desta câmara com métodos fotogramétricos, como o de Makelainen *et al.* (2013), que avaliou a estabilidade dos parâmetros de calibração da câmara hiperespectral Rikola FPI modelo 2012, que possui um único sensor, por meio da repetição do processo. Nesse estudo os autores puderam apontar similaridade entre os parâmetros estimados e afirmar que a estabilidade dos parâmetros é suficiente para trabalhos fotogramétricos por toda a faixa de captura desta câmara. No entanto os testes foram realizados levando em conta apenas três bandas espectrais e não foram apresentadas as diferenças obtidas entre os parâmetros.

Oliveira *et al.* (2016), realizaram um estudo detalhado e rigoroso da câmara hiperespectral Rikola FPI modelo 2014. Esse modelo possui dois sensores do tipo CMOS, assim como o modelo 2015. Neste artigo, três experimentos de calibração foram realizados. O primeiro experimento avaliou a calibração independente de cada banda adquirida pela câmara. Com os dados apresentados foi possível notar dois conjuntos de POIs predominantes, um para cada um dos sensores. Contudo, variações significativas entre os POI de bandas de um mesmo sensor foram detectadas. O segundo experimento consistiu em realizar a calibração considerando um conjunto de POI para cada um dos sensores. Os resultados obtidos foram similares à média dos POI das bandas de cada um dos sensores obtidos no primeiro experimento. Análises realizadas pelos autores indicaram que os POI estimados para cada sensor foram representativos para cada banda do sensor em questão. Uma análise estatística também indicou que os POI para os distintos sensores foram considerados diferentes. O terceiro experimento consistiu na calibração de um único conjunto de POI para a câmara. Os

POI obtidos foram semelhantes à média das calibrações dos dois testes realizados no segundo experimento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

A prática de calibração de câmaras não métricas é uma atividade clássica da Fotogrametria. No entanto, com o surgimento de novos sensores são necessárias adaptações a esta técnica. Como evidenciam Galo e Tommaselli (2011), a calibração geométrica de câmaras se torna cada vez mais importante a partir do momento que surgem novos modelos de câmaras, com imagens adquiridas para diferentes finalidades e para aplicações de natureza métrica.

Neste sentido, o desenvolvimento desta pesquisa se baseou em algumas perguntas:

- A variação dos POI para bandas de um mesmo sensor da câmara hiperespectral FPI2015 deve-se ao processo de aquisição ou às inconsistências no processo de medida das fotocoordenadas?
- O deslocamento aparentemente sistemático entre os POI para diferentes sensores da câmara FPI2015 pode ser matematicamente modelado?
- As tradicionais equações de colinearidade, usadas rotineiramente em Fotogrametria, podem ser o modelo matemático ideal para este tipo de câmara?

Com o intuito de responder às questões anteriormente apresentadas, o objetivo geral desta pesquisa consiste em determinar, compreender e analisar o comportamento dos parâmetros de orientação interior obtidos pela calibração da câmara hiperespectral Rikola FPI2015, buscando identificar como os seus componentes e a sua estrutura interna interferem na formação da imagem, e, por consequência, na determinação de modelos tridimensionais por métodos fotogramétricos. Neste sentido, torna-se também objetivo deste projeto propor um modelo matemático para a calibração desta câmara que envolva parâmetros adicionais relacionados à posição relativa entre seus sensores, com o intuito de evitar a calibração individual de cada banda, tornando a sua utilização mais conveniente para finalidades práticas.

1.3.2. Objetivos específicos

Tendo em vista o objetivo geral desta pesquisa, algumas metas intermediárias são necessárias para seu alcance. Estes propósitos são listados a seguir, definindo os objetivos específicos desta pesquisa.

- Desenvolver uma abordagem de calibração geométrica com base nos parâmetros inerentes à posição relativa dos sensores internos da câmara em estudo.
- Desenvolver uma abordagem alternativa para a calibração da câmara com base no registro prévio de suas bandas.
- Analisar a medição de pontos no espaço imagem e identificar qual abordagem de medida é mais conveniente para este tipo de câmara.
- Validar os resultados obtidos por meio do uso dos parâmetros na fototriangulação de imagens adquiridas por VANT.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1- Introdução - faz uma contextualização da pesquisa, bem como apresenta o problema que originou o presente trabalho; o Capítulo 2 - Fundamentação teórica- apresenta os aspectos teóricos necessários para compreender o problema estudado. Neste capítulo apresentam-se os principais métodos para aquisição de imagens hiperespectrais, o modelo matemático fundamental para Fotogrametria e as principais técnicas fotogramétricas de calibração de câmaras.

O Capítulo 3 – Ensaaios preliminares e definição da metodologia - apresenta inicialmente um estudo preliminar da câmara estudada para posteriormente apresentar os dois métodos propostos nesta pesquisa, bem como os materiais necessários para sua realização; no Capítulo 4 – Experimentos e análises dos resultados - comparecem os resultados obtidos em uma série de experimentos realizados, bem como onde são discutidos os resultados alcançados.

Por fim, o Capítulo 5 – Considerações Finais - há uma discussão acerca do que foi alcançado com a pesquisa, além de apresentar alguns aspectos a serem considerados em trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo visa apresentar uma breve revisão bibliográfica do assunto tratado nesta pesquisa, destacando os principais pontos teóricos necessários para o entendimento das abordagens propostas.

2.1 GEOMETRIAS DE IMAGEAMENTO

Uma câmara fotográfica, na sua maneira mais simples, é basicamente formada por um conjunto de lentes, uma caixa ou embalagem vedada e um material fotossensível. Por isso o nome “câmara”, pelo seu significado estrito, “local vedado”.

O avanço de ciências como a Física e a Química, que permitiu que as modernas câmaras fotográficas surgissem, também fez que a Fotogrametria e outras ciências que usam imagens se desenvolvessem (GALO e TOMMASELLI, 2011). Desde a pré-história da fotogrametria com a invenção da câmara escura, até as modernas câmaras utilizadas em satélites de alta precisão para sensoriamento remoto, surgiram diferentes tipos de câmaras e sensores.

Há três formas convencionais de se gerar uma imagem fotográfica: pela varredura por área, pela varredura por ponto e pela varredura por linha. Estas três formas geram três modelos de sensores, conhecidos em fotogrametria por: 1) Sensores de quadro ou *frame*; 2) Sensores de varredura pontual ou *whiskbroom* e; 3) Sensores de varredura linear ou *pushbroom* (MIKHAIL *et al.*, 2001; ELMASRY e SUN, 2010).

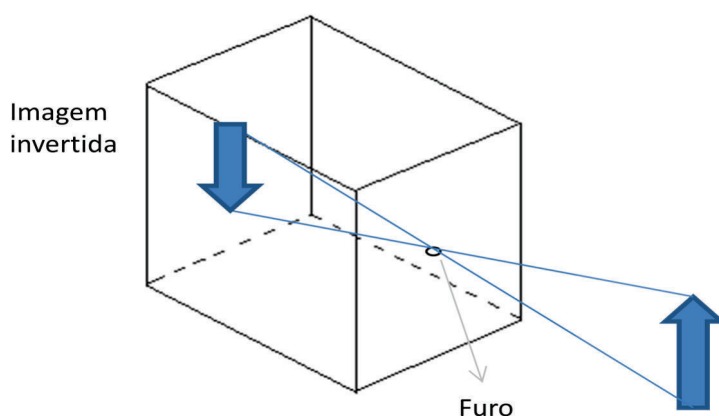
2.1.1 Sensores de quadro ou *frame*

A câmara de quadro ou *frame* é o tipo mais tradicional no mercado, e a sua geometria de aquisição é de uma perspectiva central, cujo ponto de vista situa-se no seu ponto nodal posterior (ou na pupila de entrada). A geometria de quadro permite o imageamento simultâneo de uma grande área, e, por isso, torna-se de principal interesse para mapeamento (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Segundo Andrade (2003), a câmara fotográfica de quadro tem a finalidade de prover imagens com estabilidade geométrica e, por isso, torna-se possível a sua calibração. De

acordo com Galo e Tommaselli (2011), a câmara mais simples e que possui esse tipo de modelo é a câmara de furo (*pinhole*). Ela consiste em um paralelepípedo vazio em que os seus lados internos são totalmente negros, exceto o lado onde é fixado o material fotossensível. No lado oposto a esse, bem ao centro, situa-se um pequeno orifício em que a luz passa e forma a imagem invertida dos objetos do campo de visão da câmara (ANDRADE, 2003). A Figura 2 ilustra a câmara escura ou de orifício.

Figura 2 – Câmara de orifício



Atualmente, as câmaras de quadro usam como material sensível à luz uma matriz de dispositivos de carga acoplada – *Charge-Couple Device* – (CCD) ou – *Complementary metal-oxide-semiconductor* – (CMOS), que permitem a geração de imagens digitais. A vantagem deste tipo de modelo é a sua rigidez geométrica, o que possibilita no processo de orientação um único conjunto de parâmetros para todo o quadro capturado.

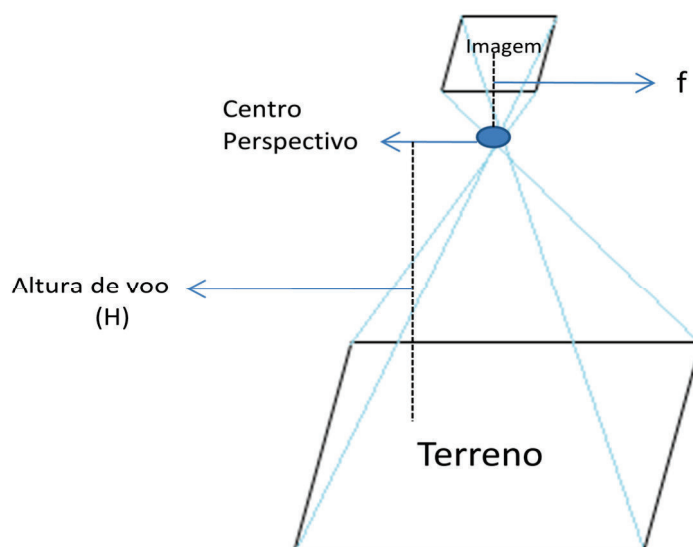
A grande maioria das câmaras popularmente conhecidas possui geometria de quadro. Na Figura 3 é possível observar a geometria da captura deste tipo de câmara para o caso tradicional da fotogrametria: fotogrametria aérea. Por meio dos elementos geométricos da Figura 3 é possível apresentar o conceito de escala de uma imagem fotográfica. A escala de uma imagem fotográfica é dada pela relação da Equação 2.1.

$$E = \frac{f}{H} \quad (2.1)$$

Por meio da escala de uma imagem fotográfica é possível determinar duas importantes informações geométricas para a produção fotogramétrica: a área coberta pela imagem no

terreno e o tamanho do pixel no terreno, ou *Ground Sample Distance* (GSD). Basta, para isso, dividir a dimensão física destes elementos pela escala calculada, por meio da relação da Equação 2.1.

Figura 3 – Geometria de aquisição de uma câmara de quadro



2.1.2 Sensores de varredura pontual ou *whiskbroom*

Apesar da varredura por área ser a forma mais prática de captura de uma imagem, para o imageamento multi ou hiperespectral orbital, este tipo de tecnologia não é a mais adequada. Tanto pela geometria de aquisição, quanto pela qualidade da informação espectral, o uso de espectrômetros de prismas projeta imagens com maior eficiência (ELMASRY e SUN, 2010).

Neste sentido, com o desenvolvimento e construção dos satélites para aquisição multi e hiperespectral, surgiram novas câmaras/sensores para a aquisição das imagens orbitais, entre eles o sensor de varredura pontual *whiskbroom*. Esta tecnologia foi uma das principais na aquisição de bandas não visíveis (MIKHAIL *et al.*, 2001).

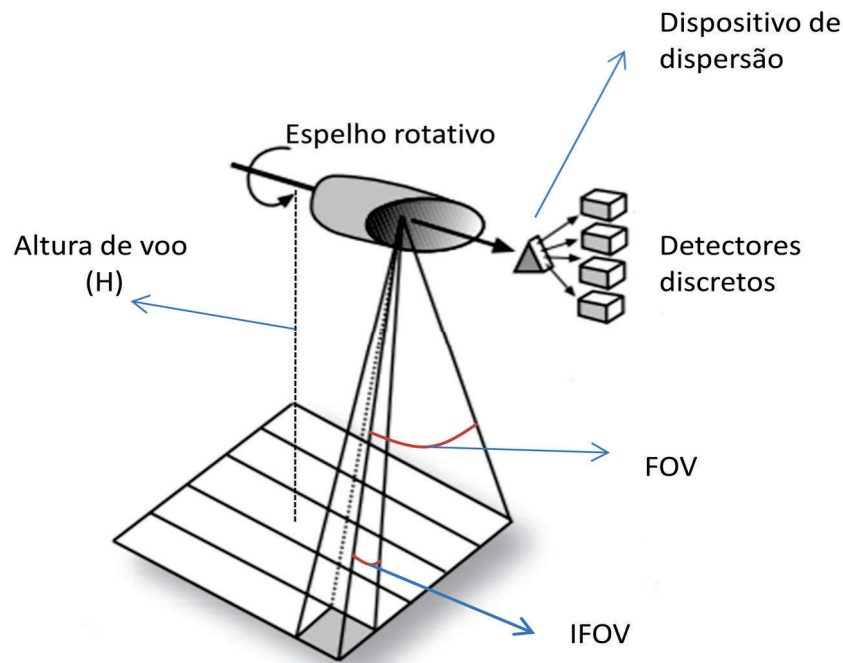
A principal característica que lhe confere o nome de sensor de varredura pontual é a aquisição feita pixel a pixel ao longo de uma linha transversal ao trajeto da plataforma. Para a aquisição pixel a pixel, esse sensor utiliza de um espelho rotativo que oscila perpendicularmente ao deslocamento da plataforma de forma sincronizada, e, por isso, também tem o nome de sensor de varredura mecânica (MIKHAIL, 2001; JENSEN, 2009).

Enquanto faz a varredura, este tipo de sensor focaliza a energia refletida pelo objeto em detectores discretos que convertem o fluxo radiante medido dentro do campo de visada

instantânea - *Instantaneous Field of View* – (IFOV) em um sinal elétrico. As dimensões da imagem são definidas pelo deslocamento angular em relação ao nadir, definindo o campo de visada – *Field of View* – (FOV) (JENSEN, 2009).

Na Figura 4 tem-se uma imagem esquemática da varredura realizada com um sensor do tipo *whiskbroom*, no qual é possível observar alguns elementos geométricos deste tipo de aquisição, como o IFOV e o FOV.

Figura 4 – Sensor de varredura pontual (*whiskbroom*)



Fonte: Adaptado de Jensen (2009)

Assim como para o sensor de quadro, é possível definir a dimensão do pixel no terreno por meio da relação apresentada na Equação 2.2. Já a dimensão da imagem no sentido transversal ao deslocamento da plataforma (L) é obtida por meio da Equação 2.3.

$$GSD = H \times IFOV_{rad} \quad (2.2)$$

$$L = H \times FOV_{rad} \quad (2.3)$$

Os sensores MSS, TM e ETM presentes em alguns satélites da missão Landsat, são os mais conhecidos sensores que utilizam a varredura pontual para aquisição de imagens (JENSEN, 2009).

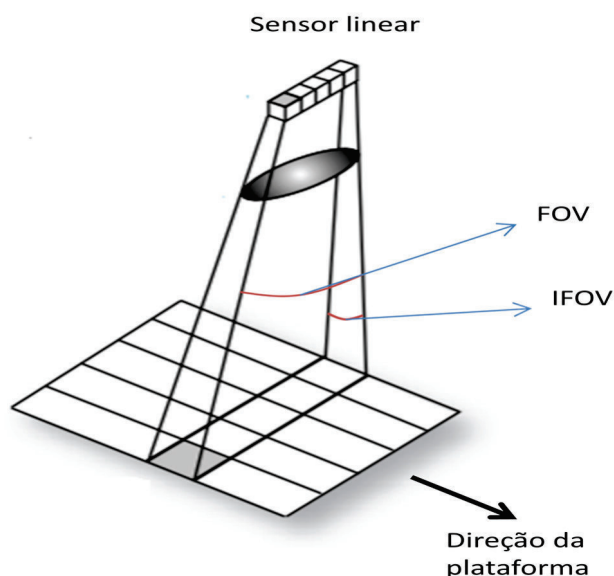
2.1.3 Sensores de varredura linear ou *pushbroom*

As câmaras com sistema de varredura linear (*pushbroom*) apresentam geometria de captura semelhante à dos sensores de varredura pontual, em que cada linha do terreno é imageada ortogonalmente ao deslocamento da plataforma. Neste caso, os elementos de cada linha são imageados simultaneamente, uma por vez (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Para isso, este tipo de sensor possui um arranjo linear de detectores que o diferencia do de varredura pontual, pois neste a óptica utilizada é um caso particular da perspectiva central usada nas câmaras de quadro, a perspectiva central para um linha (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Na Figura 5 é apresentada a configuração deste tipo de sensor e seus aspectos geométricos.

Figura 5 – Sensor de varredura linear (*pushbroom*)



Fonte: Adaptado de Jensen (2009)

Apesar de serem tipicamente utilizadas em plataformas orbitais, pois permitem obter altas resoluções espaciais e espectrais, as câmaras de varredura linear também são utilizadas em plataformas aéreas. Um exemplo é a câmara HRSC da empresa Leica. Sua característica particular é o conceito de três linhas. No caso pancromático, o levantamento é feito por três sensores lineares: um sensor nadiral e dois sensores inclinados para a estereoscopia. Além do mais, a câmara em capacidade de carregar vários sensores multiespectrais.

Os sistemas que utilizam câmaras com imageamento *pushbroom* exigem a inclusão de unidades de navegação inerciais muito precisas para a orientação direta do sensor, pois a

orientação muda a cada linha registrada. Além de que, a geometria do sensor é menos rígida que a de câmara de quadro (MIKHAIL *et al.*, 2001).

De acordo com Jensen (2009), os principais sensores orbitais que usam este tipo de tecnologia para imageamento são os presentes nas missões SPOT, QuickBird, IKONOS, entre outros.

2.2 IMAGEAMENTO HIPERESPECTRAL

Se a componente espacial de uma imagem permite responder “onde” está um pixel, a componente espectral permite dizer “do que” se trata aquele pixel. Neste sentido, uma imagem hiperespectral é capaz de responder onde está e o que é o objeto imageado (QIN, 2010). Ainda segundo o autor supracitado, o que difere um sistema de imageamento convencional de um sistema de imageamento hiperespectral é um dispositivo de dispersão de comprimentos de onda. A Figura 6 ilustra esta diferença.

No imageamento convencional, a fonte de luz ilumina o objeto, que por sua vez, reflete a luz para o detector, que registra o conteúdo espectral misto. Já no imageamento hiperespectral, a luz ilumina o objeto, que a reflete na direção do dispositivo de dispersão de comprimento de onda, indo em direção ao detector, que recebe a luz dispersa para obter informação espectral (QIN, 2010).

Figura 6 – Imageamento convencional e imageamento hiperespectral

Imageamento Convencional



Imageamento Hiperespectral

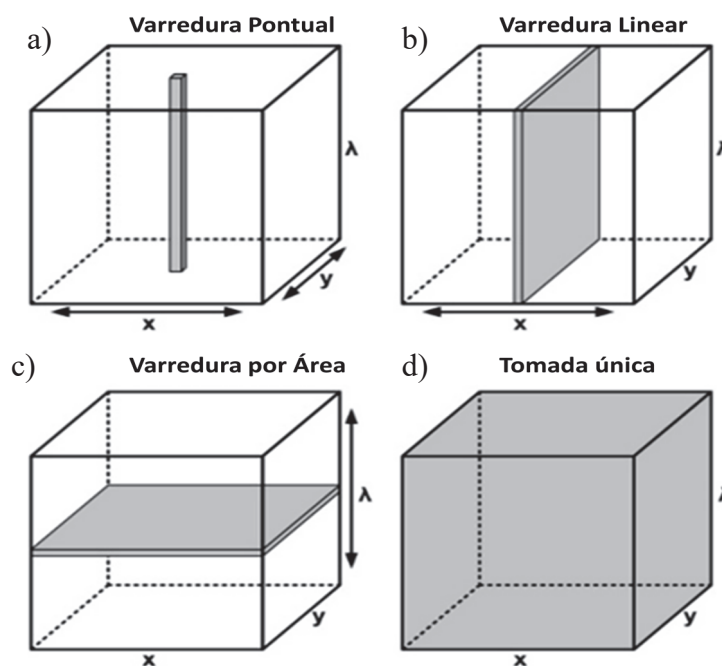


Fonte: Adaptado de Qin (2010)

Imagens hiperespectrais possuem naturalmente três dimensões (x , y , λ) e a aquisição delas segue o mesmo princípio da aquisição de imagens monocromáticas. Portanto, a

aquisição pode ser por varredura pontual (Fig. 7.a), linear (Fig. 7.b) e por área (Fig. 7.c), variando apenas a tecnologia usada para dispersão da luz e aquisição dos diferentes comprimentos de onda. Há ainda uma quarta forma de aquisição de dados hiperespectrais no qual a aquisição é feita em uma única tomada (Fig. 7.d). No entanto, esta tecnologia ainda não está totalmente desenvolvida (QIN, 2010). Na Figura 7 é possível obter as diferentes formas de aquisição de hipercubos.

Figura 7 – Formas de imageamento hiperespectral



Fonte: Adaptado de Qin (2010)

Uma vez que a fonte de luz para o Sensoriamento Remoto e Fotogrametria é na grande maioria das vezes a luz solar, a seguir são apresentados alguns detalhes do principal componente do imageamento hiperespectral, os dispositivos de dispersão da luz.

2.2.1 Dispositivos de dispersão da luz

O dispositivo de dispersão da luz é o coração de um sistema de imageamento hiperespectral (QIN, 2010). Assim sendo, são apresentados os principais mecanismos utilizados para dispersão de comprimentos de ondas e aquisição de imagens hiperespectrais.

2.2.1.1 Grades de difração

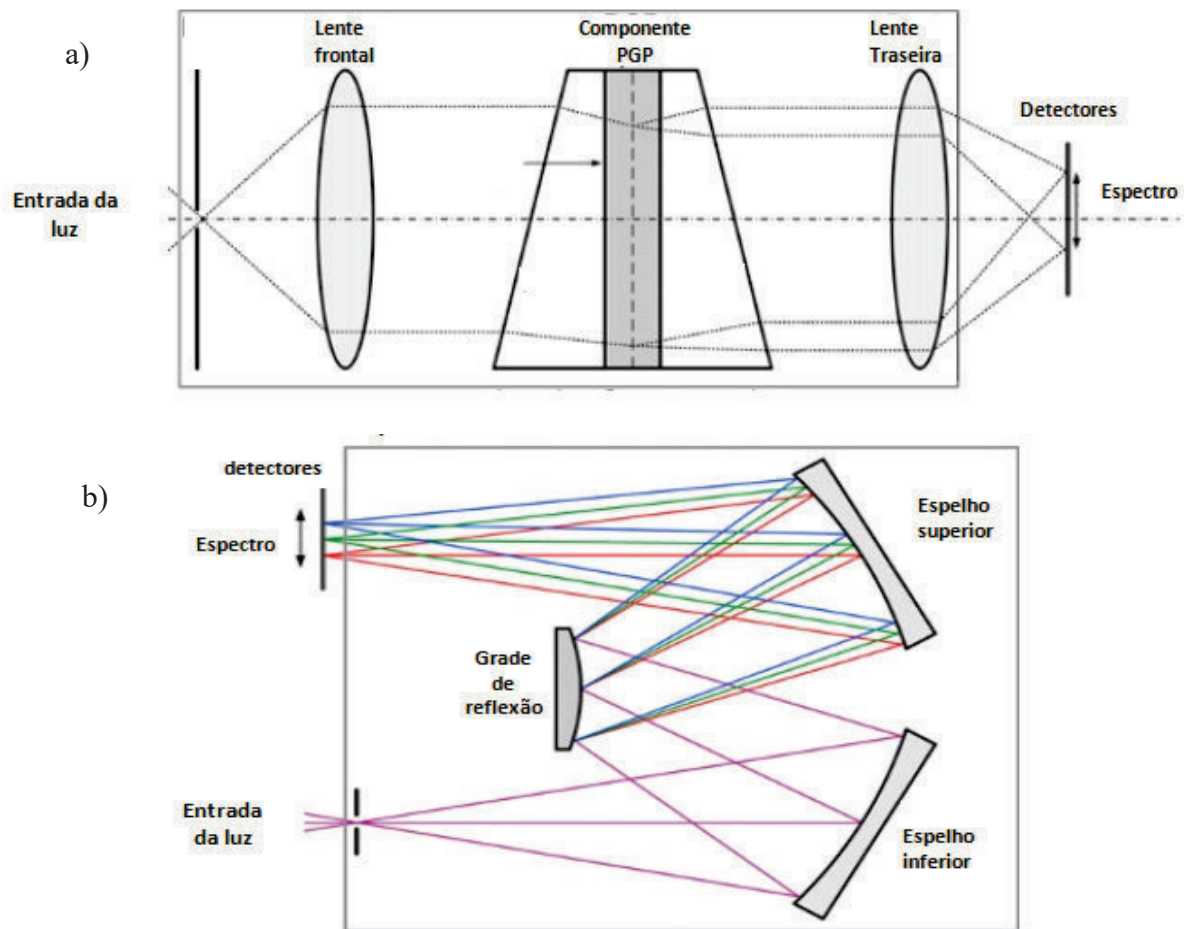
Segundo Palmer (2005), uma grade de difração é um conjunto de elementos de difração separados por uma distância compatível ao comprimento de onda estudado. Este dispositivo pode ser pensado como um padrão de fendas em uma placa, ou um conjunto de ranhuras, sendo sua principal característica a modulação espacial do índice de refração. Neste sentido, uma onda eletromagnética ao passar em uma grade de difração terá modificada a amplitude, fase ou ambas.

De acordo com Qin (2010) os principais mecanismos de imageamento hiperespectral usam grades de difração. Duas abordagens podem ser usadas com este tipo de dispositivo para o imageamento hiperespectral. A primeira usando uma grade e um material transparente, definindo o que se chama grade de transmissão, e a segunda, usando uma grade e um material reflexivo, definindo uma grade de reflexão.

Exemplos de mecanismos usando estes dois tipos de grades são apresentados na Figura 8. A Figura 8.a apresenta um sistema de imageamento baseado em um prisma-grade-prisma (PGP). Neste tipo de sistema de imageamento a luz entra no sistema e é colimada pela primeira lente. O feixe é disperso pelo PGP de modo que a direção depende do comprimento de onda. O comprimento de onda central passa simetricamente pelos prismas, fixando-se no eixo óptico, enquanto os demais são dispersos em relação ao comprimento de onda central (QIN, 2010).

Já na Figura 8.b tem-se a configuração *Offiner*, princípio de aquisição de imagens com grades reflexivas. Neste sistema o espelho inferior é utilizado para refletir o feixe de luz para a grade, lugar no qual o feixe é disperso. O feixe disperso é direcionado ao espelho superior que reflete para os detectores que registram o espectro.

Figura 8 – a) Sistema Prisma-Grade-Prisma (PGP). b) Configuração *Offiner*

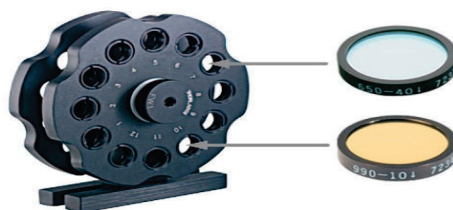


Fonte: Adaptado de Qin (2010)

2.2.1.2 Rodas de filtros

O uso de filtros para aquisição de determinados comprimentos de onda é uma tecnologia bastante utilizada, inclusive para sensores aerotransportados. Na Figura 9 tem um exemplo de roda de filtros apresentada por Qin (2010).

Figura 9 – Roda de filtros



Fonte: Qin (2010)

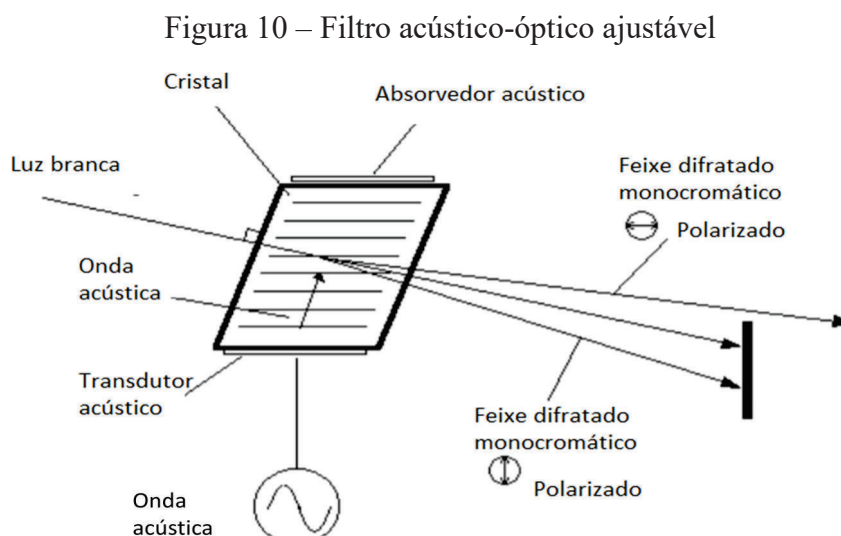
No caso da roda de filtros, trata-se de um disco onde estão inseridos uma série de filtros de passagem de bandas. Para a aquisição das diferentes bandas, uma rotação mecânica é aplicada ao disco, enquanto a luz passa por uma fenda, e, em seguida, por cada filtro diferente. Existem vários filtros disponíveis no mercado, tornando a roda de filtros uma tecnologia relativamente barata, no entanto, várias desvantagens são apresentadas, como faixa espectral estreita e baixa resolução, vibração mecânica presente na aquisição e bandas não registradas devido ao movimento do disco (QIN, 2010).

2.2.1.3 Filtros ajustáveis

Como anteriormente mencionado, filtros podem ser usados para a geração de imagens espectrais. No entanto, a tecnologia de roda de filtros tem limitações, como as citadas. Uma forma mais avançada e elegante de se obter imagens espectrais é por meio de filtros ajustáveis (GAT, 2000). Os principais filtros ajustáveis usados no mapeamento hiperespectral são apresentados a seguir.

- *Filtros ajustáveis acústico-ópticos*

Um filtro ajustável acústico-óptico é um filtro baseado nas interações da luz com o som. Ele consiste basicamente em um cristal pelo qual passam ondas de rádio que permitem separar um único comprimento de onda de uma fonte de luz de banda larga. A Figura 10 ilustra o filtro acústico óptico ajustável.



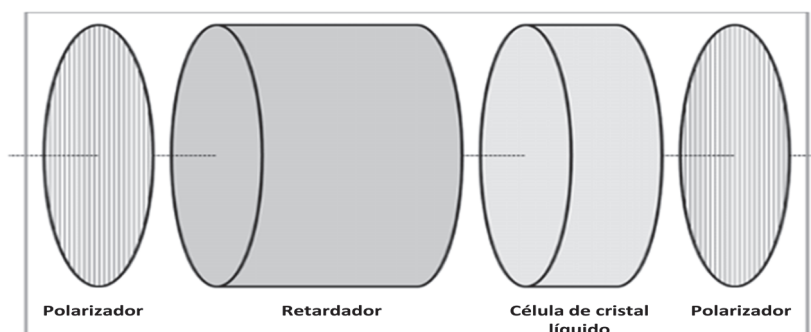
Fonte: Adaptado de Gat (2000)

As ondas acústicas mudam o índice de refração do cristal, relaxando e comprimindo a estrutura cristalina. Assim, estes filtros passam a funcionar como uma grade de difração. Os comprimentos de onda passantes são função da frequência da onda empregada. Detalhes deste mecanismo podem ser consultados em Gat (2000).

- *Filtros ajustáveis de cristal líquido*

Um filtro ajustável de cristal líquido é baseado em pilhas ópticas formadas cada uma por um material retardador, uma camada de cristal líquido, sendo este conjunto inserido entre dois polarizadores paralelos (QIN, 2010). A Figura 11 ilustra uma dessas pilhas ópticas.

Figura 11 – Pilha óptica de um filtro ajustável de cristal líquido



Fonte: Adaptado de Qin (2010)

A luz que incide neste sistema é polarizada linearmente pelo primeiro polarizador. Depois o feixe é dividido em dois feixes pelo retardador fixo, com caminhos ópticos distintos, apresentando diferença de fase que depende do comprimento de onda da luz. O segundo polarizador só transmite a luz com comprimento de onda em fase com a próxima pilha. Para cada estágio que a luz passa, são transmitidos comprimentos de onda específicos, de acordo com a espessura do retardador. As células de cristal líquido são usadas em cada pilha para o ajuste eletrônico do retardador (QIN, 2010).

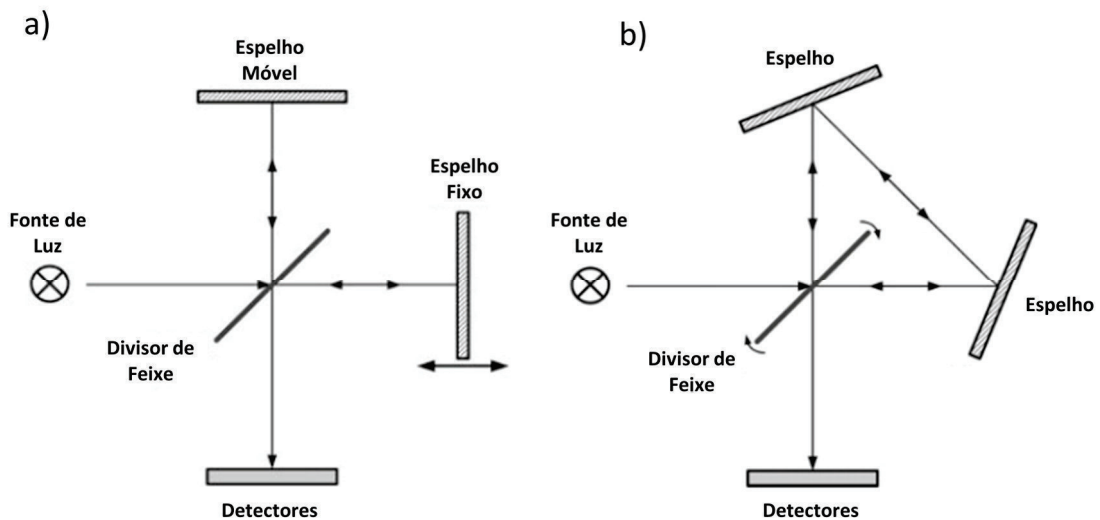
- *Interferômetros e imageamento espectral por transformada de Fourier*

Um sistema de imageamento hiperespectral pode ser baseado na geração de um interferograma de luz branca, e, pela transformada inversa de Fourier, revelar a constituição das frequências (comprimentos de onda) que a compõem (QIN, 2010). Para a geração dos

interferogramas de luz, dois tipos principais de interferômetros são utilizados: 1) Interferômetro de Michelson; 2) Interferômetro Sagnac.

Na Figura 12 têm-se os esquemas dos interferômetros apresentados.

Figura 12 – a) Interferômetro de Michelson. b) Interferômetro Sagnac.



Fonte: Adaptado de Qin (2009)

O interferômetro de Michelson é o mais básico e amplamente utilizado, sendo formado por dois espelhos planos e um divisor de feixe. A luz que entra neste interferômetro é dividida por um divisor de feixe, sendo que parte da luz é refletida por um espelho fixo, enquanto a outra é refletida por um espelho móvel. A junção dos dois feixes refletidos é feita pelo próprio divisor de feixes. O espelho móvel é que introduz a diferença no caminho óptico dos feixes, produzindo uma imagem de interferências (QIN, 2010).

O interferômetro de Sagnac também é composto por dois espelhos e um dispositivo divisor de feixe. No entanto, neste interferômetro os dois feixes percorrem o mesmo caminho óptico. Os dois feixes separados pelo divisor de feixes percorrem o mesmo caminho óptico, mas em direções diferentes. A diferença de fase entre os feixes é imposto por meio de giros graduais no dispositivo de divisão de feixes, formando as imagens de interferência.

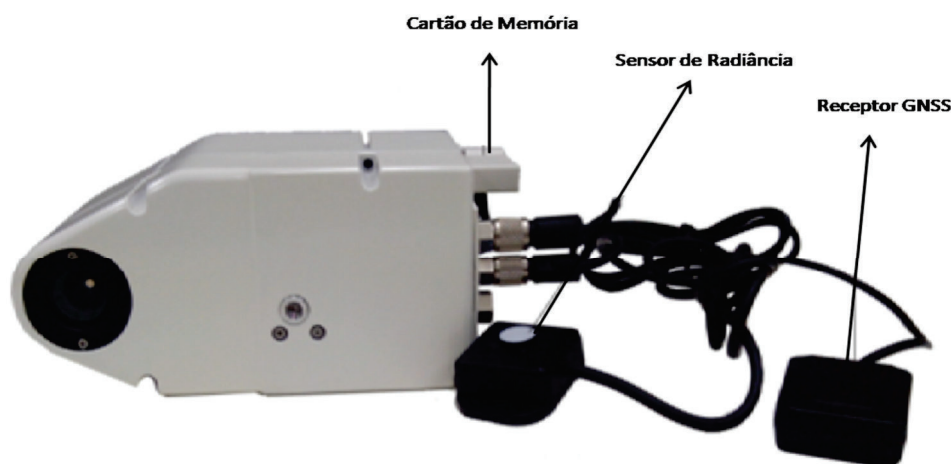
Um outro tipo de interferômetro que permite a geração de informação hiperspectral é o interferômetro *Fabry-Perot* (SAARI *et al.*, 2009). Este tipo de tecnologia é utilizada na câmara em estudo nesta pesquisa, sendo os principais aspectos deste interferômetro apresentadas na próxima sub-seção.

2.3 CÂMARA HIPERESPECTRAL RIKOLA FPI2015

Tradicionalmente, os sensores hiperespectrais usados em Sensoriamento Remoto são baseados no imageamento *pushbroom*. Uma vez que neste tipo de imageamento a captura é feita linha a linha, há a necessidade de uso de Unidades de Medição Inercial (IMU) precisas, pois a orientação da plataforma muda a cada linha imageada. O advento dos VANTs trouxe uma nova perspectiva para a Fotogrametria e para o Sensoriamento Remoto, principalmente quando se deseja trabalhar com pequenas regiões de estudo e com alta resolução temporal.

A câmara hiperespectral Rikola foi desenvolvida pelo Centro técnico de Pesquisas da Finlândia VTT e sua principal diferença em relação aos sensores utilizados em sensoriamento remoto é a sua geometria de quadro. O seu formato de quadro retangular permite uma geometria mais rígida, o que é importante em plataformas não estáveis como os VANTs, possibilitando o uso de IMUs menos precisas. Além do mais, a câmara permite capturar imagens na faixa espectral de 500 a 900 nm. Na Figura 13 têm-se uma imagem da câmara Rikola modelo 2015.

Figura 13 – Câmara Hiperespectral Rikola FPI 2015

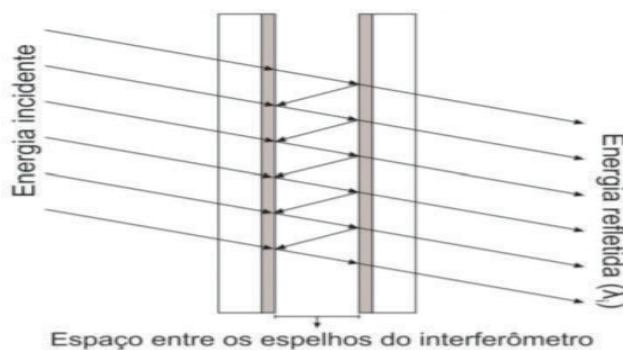


Fonte: Miyoshi, 2016

Os principais componentes da câmara que permitem a aquisição de imagens nos diferentes comprimentos de onda são: Interferômetro de *Fabry –Perot* e Atuadores piezoelétricos (SAARI *et al.*, 2009). O interferômetro *Fabry-Perot* é composto de duas placas plano-paralelas, cada uma com uma das faces espelhadas voltada uma para a outra. A radiação eletromagnética que incide entre as placas sofre diversas reflexões e as interferências

construtivas, possibilitando que certos comprimentos de onda sejam transmitidos e outros refletidos. Na Figura 14 tem-se uma representação esquemática do funcionamento do interferômetro FPI.

Figura 14 – Interferômetro *Fabry-Perot*

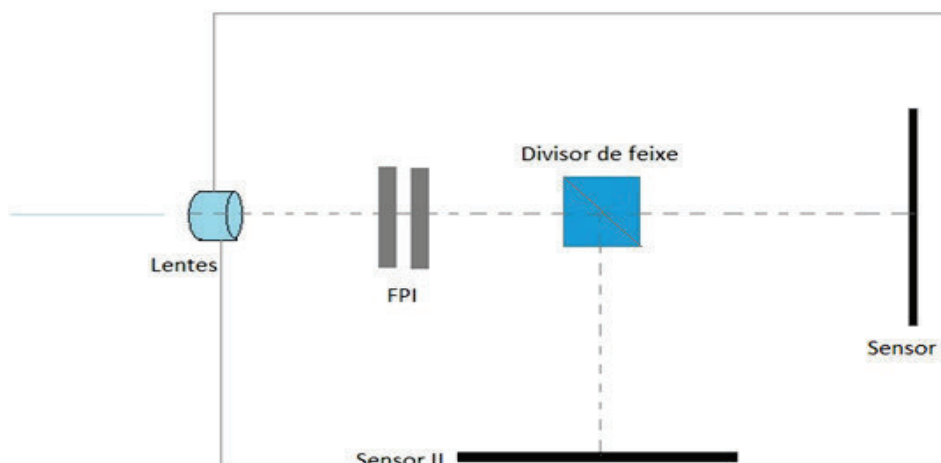


Fonte: Miyoshi, 201

Na Figura 14 observa-se a separação entre as placas do interferômetro. Essa distância determina o comprimento de onda que é transmitido pelo interferômetro. Os atuadores piezoelétricos são compostos por materiais que convertem carga elétrica em deslocamentos físicos, que proporcionam movimentos de alta precisão. Nesta câmara, a abertura entre as placas (*air-gap*) é determinada por eletrodos capacitivos e atuadores piezoelétricos (MÄKYNEN, 2009). Portanto, a radiação eletromagnética que é transmitida pelo interferômetro é função da separação entre as placas. Sendo assim, aumentando ou diminuindo a abertura, pode-se sensibilizar o sensor da câmara com diferentes comprimentos de onda separadamente.

A câmara FPI2015 possui um sensor de irradiância e um receptor GNSS, cujos dados adquiridos fazem parte dos metadados dos hipercubos capturados. A câmara possui dois sensores CMOS que são responsáveis pela aquisição em duas bandas diferentes da faixa espectral de captura. Na Figura 15 há uma imagem que ilustra a geometria interna da câmara FPI2015.

Figura 15 – Geometria interna da câmara Rikola modelo 2015



A seguir, no Quadro 1, são apresentadas as principais características da câmara Rikola FPI2015. No Quadro 2, é apresentada a configuração de aquisição para cada um dos sensores nos experimentos usados nesta pesquisa, no qual contém o número da banda, o valor do *air-gap*, comprimento de onda e a largura da banda (*Full Width at Half Maximum* – FWHM).

Quadro 1 – Especificações da câmara Rikola modelo 2015

Parâmetro	Especificação
FOV Horizontal	37°
FOV Vertical	37°
Domínio Espectral	500 nm a 900 nm
F-Stop	~2,8
Sensores	CMOS
Dimensões da Imagem	1017 x 648 pixels
Tamanho do pixel no sensor	5,5µm
Distância focal aproximada	~ 8,7 mm
Peso	700 g
Dimensões da câmara	75 mm x 89,5 mm x 172,5 mm

Quadro 2 – Configuração de aquisição

Sensor I				Sensor II			
Banda	Gap (nm)	λ (nm)	FWHM	Banda	Gap (nm)	λ (nm)	FWHM
11	814	650,963	14,444	1	337	506,218	12,436
12	498	659,720	16,834	2	603	519,940	17,383
13	509	669,747	19,801	3	628	535,085	16,843
14	519	679,840	20,446	4	653	550,385	16,535
15	530	690,280	18,870	5	678	565,104	17,256
16	541	700,285	18,945	6	703	580,157	15,955
17	551	710,060	19,701	7	722	591,897	16,614
18	561	720,168	19,311	8	750	608,996	15,076
19	571	729,567	19,006	9	768	620,221	16,265
20	583	740,423	17,975	10	782	628,734	15,296
21	593	750,160	17,969				
22	613	769,890	18,724				
23	625	780,490	17,358				
24	635	790,303	17,388				
25	666	819,655	17,845				

O usuário desta câmara tem a possibilidade de configurar a aquisição dos hipercubos de acordo com a faixa espectral desejada. Devido ao método de aquisição da câmara modelo 2015, as imagens de um mesmo hipercubo adquiridas por essa câmara apresentam diferenças de posição e atitude, principalmente quando a plataforma está em movimento.

2.4 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS EM FOTOGRAMETRIA

Como anteriormente salientado, o mais básico e conhecido modelo que descreve a geometria de uma fotografia convencional é o da câmara de orifício. Neste modelo é possível observar a condição fundamental da fotogrametria, a condição de colinearidade (MIKHAIL *et al.*, 2001, GALO e TOMMASELLI, 2011).

A condição de colinearidade estabelece que o centro perspectivo da imagem, um ponto imagem e o respectivo ponto no espaço objeto pertencem a uma mesma linha reta, ou seja, são colineares. Portanto, um ponto tridimensional do espaço objeto é transformado, via projeção perspectiva central, em um ponto bidimensional na imagem. Neste sentido, a

projeção perspectiva se trata da base do imageamento considerando um modelo de quadro e, por extensão, pode modelar outros tipos de sensores (MIKHAIL *et al.*, 2001).

2.4.1 Sistemas de referência em fotogrametria digital

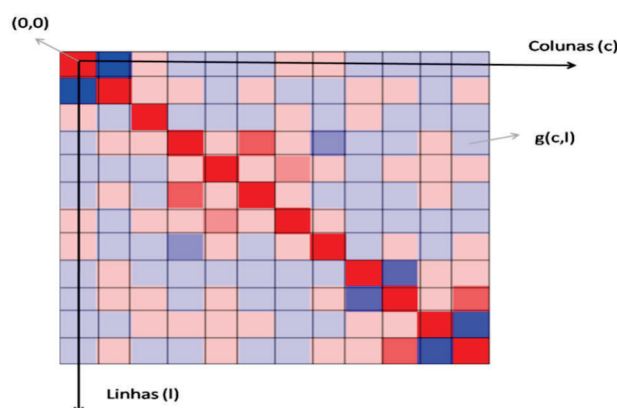
No âmbito da Fotogrametria Digital, o processo analítico de orientação das imagens e obtenção de coordenadas no espaço objeto envolve no mínimo quatro sistemas de coordenadas distintos. A reconstrução do espaço objeto é realizada por sucessivas transformações entre esses sistemas, por meio de *transformações geométricas*.

2.4.1.1 Sistema de coordenadas imagem

De acordo com Kraus (2007), uma imagem digital para uso em fotogrametria deve ter ao menos dois pré-requisitos: 1) ser formada por uma projeção perspectiva central; 2) e que o centro perspectivo permaneça fixo em relação ao plano da imagem. Obedecendo estes requisitos, a transformação entre referenciais e a determinação de coordenadas do espaço objeto pode ser feita com maior acurácia.

Ainda de acordo com o autor supracitado, uma imagem fotográfica consiste em uma matriz 2D (G) com elementos de imagem (pixel) ordenadamente espaçados ($g_{i,j}$). Cada pixel pode ser localizado por um par ordenado (coluna, linha) e a ele é atribuído um nível digital (ND). O sistema de coordenadas associado a uma imagem digital tem origem, geralmente, no centro do pixel superior esquerdo (0,0). As colunas são contadas da esquerda para a direita e as linhas de cima para baixo.. Na Figura 16 tem-se uma ilustração do sistema de coordenadas imagem.

Figura 16 – Sistema de coordenadas da imagem digital



Deste modo, para transformar as coordenadas de um ponto medido no sistema imagem em coordenadas no sistema central, se deve transladar a origem e realizar a reflexão do eixo y_c (Equação 2.5).

$$\begin{aligned}x_c &= c - c_x \\y_c &= -(l - c_y)\end{aligned}\tag{2.5}$$

Para transformar as coordenadas que estão em unidades pixel, deve-se aplicar um fator de escala nas respectivas coordenadas, fator que corresponde o tamanho do pixel em unidade métrica nas distintas direções. Assim, a Equação 2.6 apresenta as relações que transformam as coordenadas do sistema imagem para o sistema central. Na Equação 2.7 têm-se as relações na forma matricial (GALO e TOMMASELLI, 2011).

$$\begin{aligned}x_c &= p_x \left(c - \frac{W-1}{2} \right) \\y_c &= -p_y \cdot \left(l - \frac{H-1}{2} \right)\end{aligned}\tag{2.6}$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & -p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c - \frac{W-1}{2} \\ l - \frac{H-1}{2} \end{bmatrix}\tag{2.7}$$

Em alguns casos é importante aplicar a transformação inversa. Assim sendo, a transformação do sistema com origem no centro da imagem para o sistema de coordenadas imagem pode ser observada na Equação 2.8.

$$\begin{bmatrix} c \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p_x} & 0 \\ 0 & \frac{1}{-p_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{W-1}{2} \\ \frac{H-1}{2} \end{bmatrix}\tag{2.8}$$

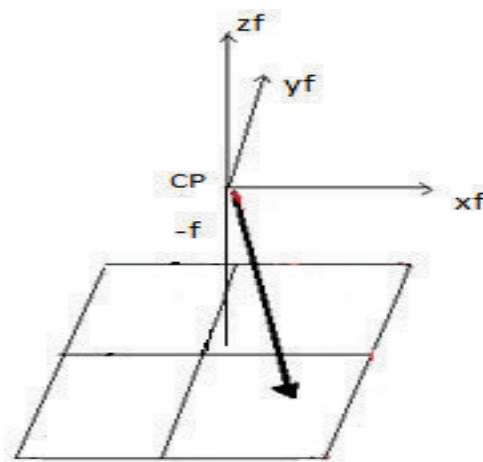
2.4.1.3 Sistema de coordenadas fotogramétrico

O terceiro sistema de coordenadas é o sistema baseado na geometria do feixe perspectivo, denominado *sistema fotogramétrico*. A transformação ao sistema fotogramétrico é importante, pois envolve a correção dos erros sistemáticos existentes no processo de aquisição da imagem. A calibração geométrica da câmara fornece os parâmetros que permitem corrigir os erros sistemáticos e reduzir as medidas ao sistema

fotogramétrico. Todo o processo de redução ao sistema fotogramétrico é denominado *Orientação interior* da imagem.

O sistema fotogramétrico é um sistema tridimensional dextrogiro, com origem no ponto nodal posterior, eixos x_f e y_f paralelos aos do sistema central ou fiducial. O eixo z_f é positivo no sentido contrário ao positivo ou negativo fotográfico. Mais detalhes a respeito dos parâmetros de orientação interior e do processo de calibração geométrica de câmaras será apresentado na próxima subseção. A Figura 18 ilustra o sistema de coordenadas fotogramétrico.

Figura 18 – Sistema de coordenadas fotogramétrico



2.4.1.4 Sistema de coordenadas do espaço objeto

Um sistema de coordenadas do espaço objeto é essencial para a modelagem correta da relação entre os dois espaços envolvidos nos problemas fotogramétricos. No contexto fotogramétrico, entende-se como espaço objeto toda a região que envolve o ponto nodal anterior e o espaço fotografado (GALO e TOMMASELLI, 2011).

De acordo com Andrade (2003), a escolha de um referencial é definida pela conveniência, pois um referencial adequado ao problema tratado simplifica as observações, os cálculos e a exatidão dos resultados.

- *Sistema de referência geodésico*

Um sistema de coordenadas geodésico é definido por meio de uma superfície de referência, uma origem e pela orientação de seus eixos. A superfície matemática que mais se

aproxima a forma da Terra e é adotada nos cálculos geodésicos é o elipsóide de resolução biaxial (MONICO, 2008).

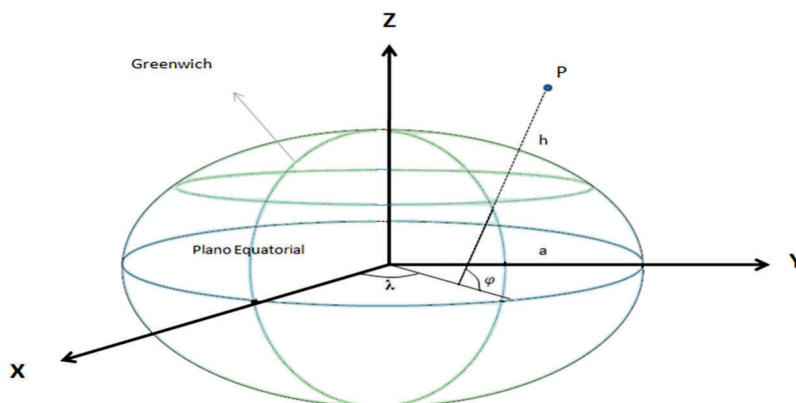
Em termos de definição, os sistemas de referência geodésicos atuais são geocêntricos, ou seja, a origem situa-se no centro de massa da Terra. Os eixos são orientados de forma que, o eixo X pertence ao plano do equador terrestre e aponta na direção do meridiano de origem, meridiano de *Greenwich*. O eixo Z tem seu sentido positivo na direção do pólo norte terrestre, definido pelo *Conventional International Origin* (CIO). O eixo Y torna o sistema dextrogiro.

As coordenadas de ponto na superfície terrestre ficam definidas por meio de duas coordenadas curvilíneas e uma componente altimétrica, sendo estas coordenadas definidas por:

- **Latitude Geodésica:** É ângulo entre a normal de um ponto P e sua projeção equatorial, sendo positiva ao norte e negativa para pontos localizados na região sul.
- **Longitude Geodésica:** É o ângulo formado entre o meridiano passante pelo ponto P e o meridiano de origem, sendo positiva a leste de Greenwich e negativa a oeste.
- **Altura Geométrica:** É distância de um ponto P ao elipsóide contado sobre a normal.

A Figura 19 ilustra o elipsóide de revolução usado na definição de um sistema geodésico, bem como as coordenadas anteriormente apresentadas.

Figura 19 – Coordenadas Geodésicas



Fonte: Adaptado de Andrade (2003)

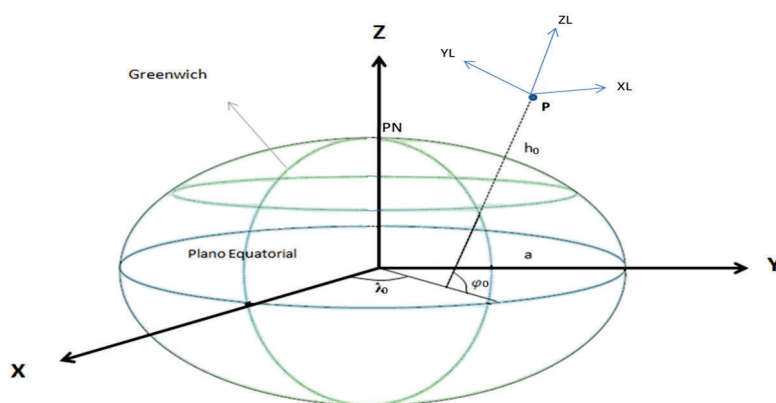
As coordenadas geodésicas também podem ser apresentadas no sistema cartesiano. A dedução das equações para a transformação das coordenadas geodésicas em coordenadas cartesianas pode ser consultada em Monico, 2008.

- *Sistema de referência local*

Os resultados fotogramétricos são em geral obtidos em termos de coordenadas geodésicas, no entanto o uso de sistema de referência não é o mais adequado, haja vista a necessidade de estimação de parâmetros aproximados para a posição e orientação da câmara no momento de cada tomada.

Tendo em vista este problema, é muito comum usar como solução, um sistema de coordenadas híbrido. Um sistema de coordenadas híbrido usa coordenadas associadas a uma projeção cartográfica (componentes planimétrica) e para componente altimétrica, usa-se um sistema vertical, com alturas geométricas ou altitudes ortométricas. Contudo, sistemas deste tipo não são totalmente indicados, pois podem provocar efeitos sistemáticos nas coordenadas estimadas, principalmente em fototriangulações de grandes blocos. Uma alternativa é usar um sistema de coordenadas local. Um sistema de coordenadas local pode ser definido por meio das coordenadas geodésicas cartesianas de um ponto eleito como origem, e da orientação desejada dos três eixos do sistema (ANDRADE, 2003). Nas aplicações geodésicas em geral, o eixo Z deste sistema coincide com a direção da normal passante pelo ponto origem, o eixo Y com o norte geodésico e X de forma a se obter um sistema dextrogiro. A Figura 20 ilustra a geometria de transformação de um sistema de coordenadas geodésico para um sistema de coordenadas local com origem em um ponto P.

Figura 20 – Sistema de referência local



Fonte: Adaptado de Andrade (2003)

Este é um problema básico de transformação entre referenciais, que envolve translações e rotações. As translações a serem aplicadas são as próprias coordenadas do ponto origem, enquanto as rotações, como podem ser observadas na Figura 20, são:

- Rotação positiva de $90+\lambda_0$ em torno do eixo Z.
- Rotação positiva de $90-\varphi_0$ em torno do eixo X.

Assim, a seguinte matriz de rotação (Equação 2.9) deve ser aplicada para esta transformação.

$$R(\varphi_0, \lambda_0) = R(90 - \varphi_0)R(90 + \lambda_0) = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Neste sentido, as coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas local podem ser calculadas pela Equação 2.10.

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

A transformação inversa também é válida para o problema apresentado. Ou seja, as coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas cartesianas geodésicas pode ser obtida, dado suas coordenadas no sistema local, por meio da Equação 2.11.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.4.2 Orientação interior

Para as câmaras métricas, ou seja, aquelas que foram construídas para levantamentos fotogramétricos, os POI são disponibilizados em certificado de calibração fornecido pelo fabricante. Já para as câmaras não métricas, esses parâmetros não são conhecidos, no entanto, não significa que elas não possam ser usadas para fins fotogramétricos. Seus parâmetros

podem ser determinados pelo processo de calibração geométrica de câmaras (GALO e TOMMASELLI, 2011) e usados posteriormente, desde que sejam estáveis.

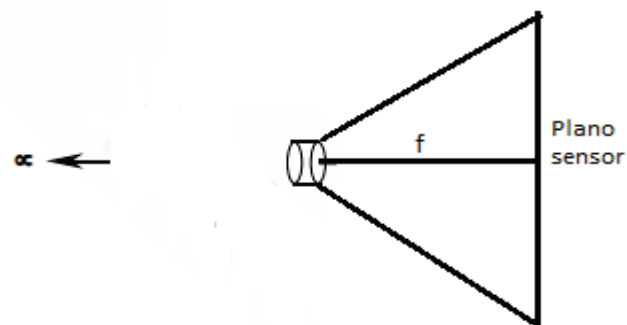
A seguir são apresentados alguns detalhes de cada um destes parâmetros.

2.4.2.1 Distância Focal

Tendo em vista uma câmara de quadro, para uma imagem não focalizada no infinito a distância focal é definida pela equação das lentes de Gauss (MIKHAIL *et al.*, 2001). No entanto, a distância focal quando a imagem está focalizada no infinito é aquela obtida pelo processo de calibração, e corresponde à distância focal gaussiana equivalente, segundo critério de calibração adotado. Portanto, a distância focal gaussiana equivalente é aquela obtida pela formação da imagem de um objeto no infinito (MIKHAIL *et al.*, 2001; ANDRADE, 2003).

Na Figura 21 tem-se uma representação da distância focal gaussiana equivalente (f).

Figura 21 – Distância Focal Gaussiana Equivalente



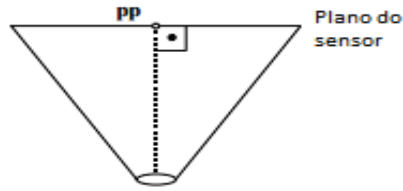
Fonte: Andrade (2003)

2.4.2.2 Posição do ponto principal

A posição do ponto principal é dada pelas coordenadas x_0, y_0 em relação ao centro geométrico do sensor. Teoricamente, o ponto principal pode ser definido como o pé da perpendicular ao plano do sensor, passante pelo centro perspectivo (ANDRADE, 2003).

Na Figura 22 tem-se uma representação da posição do ponto principal.

Figura 22– Posição do ponto principal

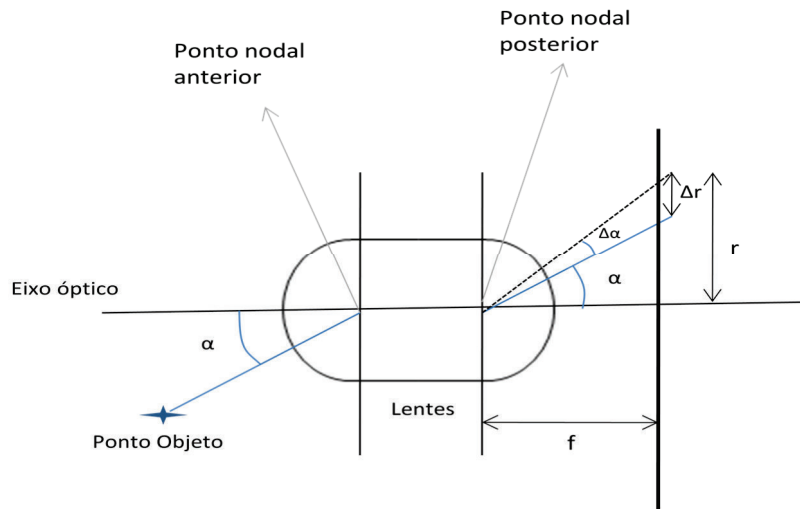


Fonte: Andrade (2003)

2.4.2.3 Distorção radial simétrica

A inserção de um conjunto de lentes em uma câmara introduz algumas distorções que podem ser modeladas matematicamente. A Figura 23 ilustra o efeito de uma dessas distorções: distorção radial simétrica.

Figura 23 – Distorção radial simétrica

Fonte: Adaptado de Mikhail *et al.*, (2001)

Segundo Andrade (2003) a distorção radial simétrica pode ser entendida como a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar o sistema de lentes de uma câmara. Essa distorção pode ser modelada matematicamente por meio de um polinômio de coeficientes k_1 , k_2 e k_3 (BROWN, 1971). O modelo matemático da distorção radial simétrica para as componentes (x, y) é dado pela Equação 2.12.

$$\begin{aligned}\delta r_x &= (x_c - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \delta r_y &= (y_c - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\end{aligned}\tag{2.12}$$

onde r é calculado pela Equação 2.13.

$$r = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2} \quad (2.13)$$

2.4.2.4 Distorção descentrada

De acordo com Andrade (2003) devido à impossibilidade de alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem o sistema óptico, têm-se a distorção descentrada. Seus coeficientes são: P_1 e P_2 . O modelo matemático da distorção descentrada é dado pelas relações da Equação 2.14.

$$\begin{aligned} \delta r_x &= P_1(r^2 + 2(x_{ij} - x_0)^2) + 2P_2(x_c - x_0)(y_c - y_0) \\ \delta r_y &= P_2(r^2 + 2(y_c - y_0)^2) + 2P_1(x_c - x_0)(y_c - y_0) \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.4.3 Condição de colinearidade

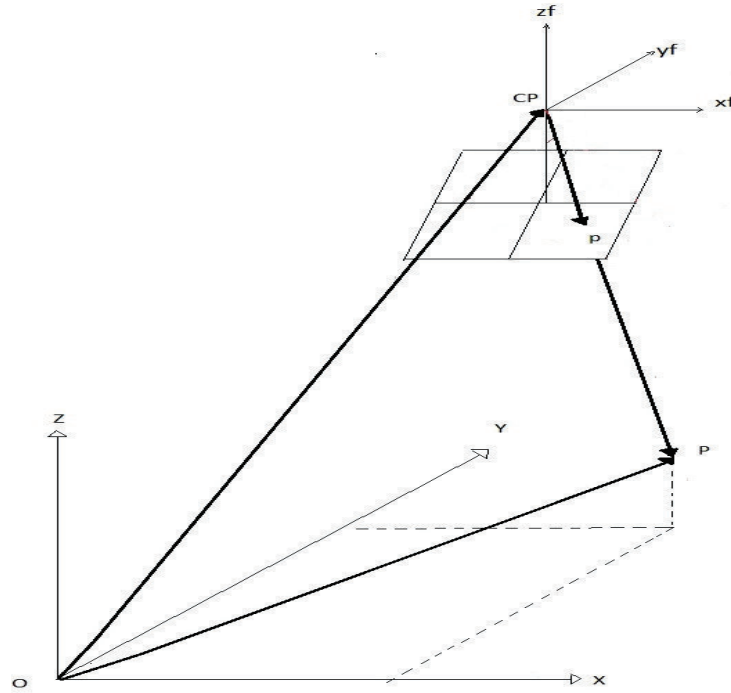
As sucessivas transformações entre os sistemas de referência usados em fotogrametria são realizadas com o objetivo de obter coordenadas tridimensionais no espaço objeto, por meio de coordenadas bidimensionais em imagens.

Assim sendo, o modelo matemático fundamental que envolve as coordenadas no espaço imagem e as coordenadas no espaço objeto, parte da condição de que os três pontos, centro perspectivo, ponto na imagem e o ponto no espaço objeto, estão presentes em uma mesma reta suporte, ou seja, são colineares (GALO e TOMMASELLI, 2011; MATA, 2016).

A seguir é apresentada a dedução das equações de colinearidade por meio de uma análise vetorial do problema, metodologia abordada por Galo e Tommaselli (2011). Para isso considera-se: CP – Centro perspectivo – (X_0, Y_0, Z_0) , P – Ponto no espaço objeto – (X, Y, Z) , p – ponto no espaço imagem – $(x, y, -f)$.

Na Figura 24 é possível verificar a condição de colinearidade como anunciada.

Figura 24 – Relação vetorial entre espaço imagem e espaço objeto



Por meio da Figura 24 é possível relacionar igualdade vetorial da Equação 2.15:

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OCP} + \overrightarrow{CPP} \quad (2.15)$$

O vetor $\overrightarrow{CPP}$ pode ser reescrito como a multiplicação de um escalar k pelo vetor $\overrightarrow{CPp}$, seu homologado no espaço imagem. Então, têm-se as Equações 2.16 e 2.17.

$$\overrightarrow{CPP} = k\overrightarrow{CPp} \quad (2.16)$$

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OCP} + k\overrightarrow{CPp} \quad (2.17)$$

Da Equação 2.17, os vetores $\overrightarrow{OP}$ e $\overrightarrow{OCP}$ são em geral relacionados e obtidos no sistema de referência do espaço objeto, enquanto o vetor $\overrightarrow{CPp}$ está relacionado ao espaço imagem. Neste sentido, pode-se isolar o vetor $\overrightarrow{CPp}$, obtendo-se a relação da Equação 2.18.

$$k\overrightarrow{CPp} = \overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OCP} \quad (2.18)$$

A Equação 2.18 é verdadeira, se e somente se, os sistemas de referência forem paralelos. Como isto não é a realidade na maioria dos problemas fotogramétricos, é preciso rotacionar o sistema do espaço objeto para que ele se torne paralelo ao sistema imagem, aplicando a matriz de rotação passiva dos ângulos de Euler dado pela Equação 2.19:

$$M = R(\kappa)R(\varphi)R(\omega) \quad (2.19)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Aplicando, portanto, a matriz M ao lado direito da relação da Equação 2.18, obtêm-se a Equação 2.20.

$$k \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_{cp} \\ Y - Y_{cp} \\ Z - Z_{cp} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Realizando o produto matricial, obtêm-se as seguintes relações (Equação 2.21).

$$\begin{aligned} x &= k^{-1}[m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)] \\ y &= k^{-1}[m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)] \\ z &= k^{-1}[m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)] \end{aligned} \quad (2.21)$$

Considerando $z=-f$, dividindo as duas primeiras equações pela terceira equação e realizando alguns simplificações, obtêm-se as equações de colinearidade, modelo matemático fundamental para fotogrametria (Equação 2.22).

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.22)$$

As equações de colinearidade é um caso particular de uma projeção perspectiva, no qual um espaço tridimensional é projetado no espaço bidimensional. As equações de colinearidade é um modelo matemático não linear, por isso para a solução dos problemas fotogramétricos é necessário recorrer à linearização das equações de colinearidade por meio

de aproximações por série de Taylor (MATA, 2016). A linearização permite que se resolva o sistema por meio das aproximações necessárias e de critério de convergência compatível.

2.5 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

De acordo com Fiete (2013), deve-se levar em conta que um conjunto de lentes não produz uma imagem perfeita de um ponto no plano focal. Na verdade, a imagem produzida por esse conjunto de lentes forma um borrão, pois está afetada por aberrações. Levando em conta que o principal objetivo da Fotogrametria é obter informação métrica fiel dos objetos da superfície terrestre a partir de medidas realizadas em imagens, no contexto fotogramétrico, a principal aberração é a distorção, pois nela os pontos são deslocados das suas posições verdadeiras.

Assim sendo, para realizar a obtenção de coordenadas no espaço objeto, deve-se estabelecer uma relação matemática entre este espaço e o espaço imagem. Essa relação (equação 2.22) envolve o conhecimento dos Parâmetros de Orientação Interior, bem como a sua posição e a sua orientação em relação ao espaço objeto, ou, os seus Parâmetros de Orientação Exterior. As equações de colinearidade estabelecem este vínculo geométrico entre o espaço objeto e o espaço imagem (OLIVAS, 1980).

Quanto aos parâmetros intrínsecos da câmara, nas câmaras métricas esses dados são disponibilizados pelos fabricantes em um certificado de calibração. Contudo, para as câmaras não métricas, essas informações também podem ser estimadas por meio de um ajustamento de observações com modelo matemático e método adequado.

Os métodos de calibração existentes podem ser agrupados em métodos de laboratório e métodos de campo (OLIVAS, 1980; ANDRADE, 2003). Os métodos de laboratório usam de equipamentos especiais, e, por isso, são usados pelos fabricantes de lentes e os que montam objetivas, uma vez que as operações podem ser repetidas. Os principais métodos de laboratório são: o método do multicolimador e o método do goniômetro.

No método do multicolimador são usados dois bancos de colimadores. Um colimador é um instrumento que possibilita simular uma imagem situada no infinito, ou seja, os raios de luz projetados pelo instrumento são paralelos. Os bancos de colimadores são montados de forma que as imagens formadas se situem exatamente no plano focal da câmara. Como se conhece a priori a separação angular entre os diferentes colimadores do banco, é possível determinar a distância focal, a posição do ponto principal e os valores discretos (para cada

ponto medido) para as distorções da lente. O método do goniômetro é semelhante ao método do multicolimador, no entanto, nesse, os ângulos são medidos por um goniômetro e as marcas são de uma placa reticulada situada no plano focal da câmara (OLIVAS, 1980; ANDRADE, 2003; BAZAN, 2008; MATA, 2016).

Os métodos de campo se baseiam no ajuste dos feixes de raios das imagens, por isso são métodos indiretos de determinação dos parâmetros intrínsecos da câmara. Esses métodos foram desenvolvidos devido principalmente à verificação de que os métodos de laboratório não proporcionavam parâmetros suficientes para a modelagem das distorções das lentes e a aplicação é feita em condições ideais. Além do mais, Clarke e Fryer (1998) evidenciaram que os POI de uma câmara variavam de acordo com a temperatura, não planura dos filmes, etc.

Os métodos de campo por ajuste do feixe de raios permitem a determinação simultânea dos parâmetros de orientação exterior da câmara, os parâmetros de orientação interior e as coordenadas dos pontos no espaço objeto. O modelo matemático utilizado para a calibração pelos métodos de campo é o das equações de colinearidade com parâmetros adicionais e a solução é obtida aplicando o método dos mínimos quadrados (MMQ). Tendo em vista o contexto deste trabalho, os dois principais métodos de calibração de câmara usando as equações de colinearidade são apresentados a seguir.

Contudo, vale ressaltar que existem outros métodos de calibração que, a depender dos objetivos, podem ser aplicados. Por exemplo, o método da Transformação Linear Direta, mais conhecida pelo seu acrônimo em inglês DLT, e que possui a característica de fornecer uma solução direta, por ser um método linear. No entanto, os parâmetros estimados na DLT são implícitos (ABDEL-AZIZ e KARARA, 1971). Ainda se pode aplicar os métodos baseados em dois passos, no qual em um primeiro passo se obtém uma solução linear para a maioria dos parâmetros e, posteriormente, se obtém os demais de forma iterativa como é o caso do Método de Tsai (TSAI, 1987) e do Método de Zhang (ZHANG, 2000). O método de dois passos mais reconhecido é o Método de Tsai (TSAI, 1987), mais detalhes deste método, na literatura em português, podem ser consultados em Galo (1993) e Galo e Tommaselli (2011). Uma série de outras técnicas, baseadas principalmente nas anteriormente citadas, podem ser aplicadas, principalmente em visão de máquina.

2.5.1 Métodos de calibração baseada nas equações de colinearidade

Como anteriormente salientado, as equações de colinearidade com parâmetros adicionais é o modelo matemático fundamental na calibração de câmaras para fotogrametria. Na Equação 2.23 têm-se as relações deste modelo matemático aplicando os parâmetros das distorções das lentes (distorção radial simétrica e distorção descentrada).

$$\begin{aligned} x_{ij} - x_0 - \Delta_{ij} &= -f \frac{Nx_{ij}}{D_{ij}} \\ y_{ij} - y_0 - \Delta_{ij} &= -f \frac{Ny_{ij}}{D_{ij}} \end{aligned} \quad (2.23)$$

em que:

$$\begin{aligned} Nx_{ij} &= m_{11}(X_i - X_j^0) + m_{12}(Y_i - Y_j^0) + m_{13}(Z_i - Z_j^0) \\ Ny_{ij} &= m_{21}(X_i - X_j^0) + m_{22}(Y_i - Y_j^0) + m_{23}(Z_i - Z_j^0) \\ D_{ij} &= m_{31}(X_i - X_j^0) + m_{32}(Y_i - Y_j^0) + m_{33}(Z_i - Z_j^0) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{ij} &= (x_{ij} - x_0)(k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6) + P_1(r_{ij}^2 + 2(x_{ij} - x_0)^2) \\ &\quad + 2P_2(x_{ij} - x_0)(y_{ij} - y_0) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{ij} &= (y_{ij} - y_0)(k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6) + P_2(r_{ij}^2 + 2(y_{ij} - y_0)^2) \\ &\quad + 2P_1(x_{ij} - x_0)(y_{ij} - y_0) \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$r_{ij}^2 = (x_{ij} - x_0)^2 + (y_{ij} - y_0)^2 \quad (2.27)$$

Estas equações podem ser utilizadas em um ajustamento pelo critério dos mínimos quadrados para a obtenção dos parâmetros incógnitos. No entanto, como evidencia Olivas (1980), há uma forte correlação entre a posição do centro perspectivo de cada imagem (X_j^0, Y_j^0, Z_j^0) e os parâmetros f, x_0, y_0 , principalmente em uma situação típica da aerofotogrametria: fotos verticais e terreno relativamente plano.

Segundo Olivas (1980), a dependência linear entre os parâmetros supracitados pode ser verificada quando se determina a matriz de derivadas parciais dos parâmetros no

ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, por meio da razão constante entre os seguintes parâmetros: (X_j^0, x_0) , (Y_j^0, y_0) e (Z_j^0, f) .

As relações da Equação 2.28 evidenciam o exposto anteriormente.

$$\begin{aligned}\frac{\frac{\partial F(x)}{\partial x_0}}{\frac{\partial F(x)}{\partial x_0}} &= -\frac{f}{Z - Z_0} \\ \frac{\frac{\partial F(x)}{\partial y_0}}{\frac{\partial F(x)}{\partial y_0}} &= -\frac{f}{Z - Z_0} \\ \frac{\frac{\partial F(x)}{\partial Z_0}}{\frac{\partial F(x)}{\partial f}} &= \frac{f}{Z - Z_0}\end{aligned}\tag{2.28}$$

Uma solução única para um sistema com essas características só é obtida se a quebra da dependência linear for realizada. Duas possibilidades podem ser consideradas para solucionar este problema: 1) Usar um campo tridimensional; 2) Usar imagens convergentes e ao menos uma rotacionada em 90° (OLIVAS, 1980).

Neste sentido, os dois métodos apresentados a seguir se diferenciam pela forma de aplicar da quebra da correlação entre os parâmetros.

2.5.1.1 Método dos Campos Mistos

O método dos campos mistos é baseado na captura de imagens em campos de calibração que haja uma grande variação de altura dos pontos no espaço objeto.

Conforme evidencia Andrade (2003), esse método foi desenvolvido devido à análise da correlação existente entre os parâmetros do ajustamento de uma aerotriangulação em bloco realizada pelo Prof. Dean Merchant, da universidade de Ohio, nos Estados Unidos da América.

Nessa análise, foi possível verificar que para fotos aproximadamente verticais e terrenos relativamente planos, existe uma alta correlação entre alguns pares de parâmetros do ajustamento, o que causa uma instabilidade no sistema de equações. A solução para esse problema deveria ser o uso de um campo de calibração com um grande desnível entre os pontos no espaço objeto (ANDRADE, 2003).

Portanto, no método dos campos mistos devem-se usar campos tridimensionais para quebrar a dependência linear entre os parâmetros e diminuir a instabilidade do sistema de equações. Além do mais, para separar os parâmetros de distorção das lentes (distorção simétrica e descentrada), devem-se adquirir imagens com um ângulo de rotação em *Kappa* em torno de 90° .

2.5.1.2 Método das câmaras convergentes

O método das câmaras convergentes foi proposto por Duane Brown (BROWN, 1971) e é um método muito adequado para fotos terrestres (ANDRADE, 2003). Nesse método, a condição mínima para a calibração de uma câmara consiste na obtenção de ao menos três imagens: duas convergentes entre si e uma com um giro em *Kappa* da ordem de 90° .

Ainda de acordo com o autor supracitado, se as imagens convergentes forem adquiridas com convergência da ordem de 90° , o número de graus de liberdade do sistema de equações será sete, deixando de existir a necessidade de um grande desnível entre os pontos do espaço objeto, e nesse caso, o método exige apenas a fixação de um sistema de referência.

A imagem girada 90° em *Kappa* em relação às demais é necessária para ser possível a separação dos coeficientes de distorção radial simétrica e distorção descentrada.

Uma das grandes vantagens deste método é a possibilidade da autocalibração, método praticamente livre de informações externas (não são necessários pontos de apoio em um sistema geodésico). O sistema de referência pode ser definido fixando-se os 6 parâmetros de orientação de uma imagem e uma distância no espaço objeto. Outra possibilidade é fixar as coordenadas de 2 pontos (6 injunções) e uma profundidade, totalizando 7 injunções.

3. ENSAIOS PRELIMINARES E DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

As soluções propostas nesta pesquisa para a calibração da câmara hiperspectral FPI2015 passam por duas linhas metodológicas diferentes. A primeira abordagem foi baseada no princípio físico peculiar de formação do registro fotográfico neste tipo de câmara, enquanto a segunda baseia-se puramente na geometria entre as imagens.

Para se chegar a essas duas abordagens, vários ensaios e análises foram feitas preliminarmente, e, assim, foi possível definir algumas condições básicas para a calibração desta câmara. Neste sentido, a seguir são apresentadas algumas constatações, por meio de um estudo preliminar, que possibilitaram fundamentar as soluções apresentadas. Apesar de alguns resultados serem antecipadamente mostrados neste capítulo, eles apenas servem como base para as propostas de solução. Após este estudo preliminar são apresentadas as abordagens propriamente ditas.

3.1 ESTUDO PRELIMINAR DA CALIBRAÇÃO BANDA A BANDA DA CÂMARA FPI2015

Esta seção tem como objetivo principal analisar os diferentes parâmetros estimados no processo de calibração individual por banda da câmara FPI2015, bem como os dados de entrada do processo, tendo em vista a fundamentação das soluções apresentadas nesta pesquisa. Os procedimentos para obtenção destes parâmetros foram os mesmos usados por Oliveira *et al.*, (2016): fotocoordenadas extraídas automaticamente, uso dos mesmos parâmetros aproximados para as distintas bandas e estimativa dos parâmetros ajustados por meio de autocalibração.

3.1.1 Análise das fotocoordenadas

O processo de calibração de câmaras necessita, obrigatoriamente, da realização de observações, ou seja, de medida de fotocoordenadas de pontos passíveis de identificação. Em uma câmara convencional, uma única imagem é adquirida por tomada, e, um ponto possui apenas um conjunto de fotocoordenadas (coluna, linha). No caso da câmara FPI2015, um ponto possuirá tanto conjuntos de fotocoordenadas, quanto forem as bandas configuradas para

a aquisição. Por exemplo, para aquisições do projeto UAV_4D_BIO, cada ponto extraído possuía 25 conjuntos de fotocoordenadas.

Considerando uma câmara estática, as fotocoordenadas de um mesmo ponto, extraídas em diferentes bandas espectrais, deveriam possuir valores iguais, ou, compatíveis com a precisão do processo de medida, devido à expectativa de uma geometria interna rígida da câmara. Neste sentido, a primeira análise realizada em relação aos dados obtidos foi no tocante à variação das fotocoordenadas de um mesmo ponto em diferentes imagens espectrais. Para isso, foram adquiridos hipercubos estáticos e verticais de uma placa com alvos codificados do tipo Aruco, usada para calibração de câmaras. As aquisições foram realizadas em ambiente iluminado por luz solar que atingia totalmente a placa, e a fixação da câmara foi feita por meio de um tripé. Na Figura 25 é possível observar imagens do ensaio realizado.

Os cantos dos alvos da placa foram extraídos automaticamente por meio do aplicativo de detecção de alvos codificados Aruco, desenvolvido por Silva *et al.*, (2014). A análise consistiu em comparar as fotocoordenadas de cinco pontos característicos das imagens: o centro e cada um de seus cantos.

Figura 25 – a) Ensaio realizado. b) Placa com alvo codificados. c) Exemplo de imagem adquirida.



Na Tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos. Nela, algumas siglas são utilizadas para identificar os pontos. A sigla “CID” corresponde ao ponto no canto inferior direito, “CSD” ao ponto no canto superior direito, “CIE” ao ponto no canto inferior esquerdo, “CSE” ao ponto no canto superior esquerdo e, “C” ao ponto situado no centro da imagem. Os valores de fotocoordenadas apresentadas na tabela são as médias aritméticas das fotocoordenadas dos pontos nas 25 bandas. O símbolo “ σ_{coluna} ” representa o desvio-padrão para a observável coluna e “ σ_{linha} ” para a observável linha. Já “ Δ_{max} ” é a discrepância máxima entre as observações. Para esta análise foi utilizado um hipercubo com 25 imagens espectrais. Os testes foram realizados para cada sensor de forma independente, bem como em uma análise conjunta.

Tabela 1 – Discrepância entre fotocoordenadas em pixel de diferentes imagens espectrais de um mesmo hipercubo

SENSOR I						
Ponto	coluna	linha	σ_{coluna}	σ_{linha}	$\Delta_{max(coluna)}$	$\Delta_{max(linha)}$
CID	921,28	626,83	0,43	0,24	1,78	0,99
CSD	261,92	634,17	0,34	0,14	1,33	0,48
CIE	929,33	82,92	0,21	0,15	0,83	0,60
CSE	151,01	65,84	0,30	0,15	0,95	0,46
C	490,08	295,00	0,28	0,08	1,01	0,32

SENSOR II						
Ponto	coluna	linha	σ_{coluna}	σ_{linha}	$\Delta_{max(coluna)}$	$\Delta_{max(linha)}$
CID	938,41	618,87	0,21	0,22	0,66	0,64
CSD	281,29	625,96	0,51	0,14	1,59	0,47
CIE	946,16	76,35	0,33	0,17	1,04	0,51
CSE	169,93	59,71	0,26	0,16	0,84	0,39
C	508,62	288,36	0,25	0,28	0,72	0,97

SENSOR I E II						
Ponto	coluna	linha	σ_{coluna}	σ_{linha}	$\Delta_{max(coluna)}$	$\Delta_{max(linha)}$
CID	928,13	623,65	8,57	3,99	18,63	8,77
CSD	269,67	630,89	9,70	4,10	21,03	8,70
CIE	936,06	80,29	8,42	3,29	17,63	7,19
CSE	158,56	63,39	9,48	3,07	19,77	6,53
C	497,49	292,35	9,27	3,33	19,53	7,09

Com as informações da Tabela 1, foi possível constatar que as observações por sensor se mostraram bastantes consistentes quando comparadas entre si, considerando os desvios-

padrão obtidos. No entanto, ao analisar a amplitude máxima das discrepâncias, nota-se que os valores ficaram maiores ou próximos de 1 pixel, algo não esperado, tendo em vista o processo de medida utilizado. Já considerando as observações em conjunto para os dois sensores, vê-se que, para a observável coluna, a discrepância máxima entre as fotocoordenadasse aproxima a duas dezenas de pixels. Da mesma forma, a observável linha também apresentou alta discrepância, chegando próximo a uma dezena de pixels.

3.1.2 Análise do processo de medida automática de fotocoordenadas

Uma vez verificado que existem discrepâncias entre as fotocoordenadas nas diferentes bandas espectrais de um mesmo sensor, e, quando foram considerados os sensores em conjunto, pôde-se questionar se um dos motivos dessa essa variação era o processo de medida das fotocoordenadas ou variações de iluminação.

Assim, um teste foi feito para avaliar o processo de medição das fotocoordenadas, que é realizado por meio do aplicativo de detecção automática de alvos do tipo Aruco (SILVA *et al.*, 2014), com o objetivo de verificar se a variação das fotocoordenadas estimadas para as distintas bandas pode ser causada por inconsistências no processo. O teste consistiu em determinar distâncias no espaço objeto entre pontos de um mesmo alvo (cantos), a partir de suas coordenadas estimadas no processo de calibração individual (por banda) no modo autocalibração, e, também, de pontos vizinhos entre alvos diferentes. O objetivo era determinar fatores de escala para várias posições da placa utilizada para a calibração para diferentes bandas. Uma vez que as distâncias entre os alvos na placa utilizada como campo de calibração são conhecidas (da fabricação), foi possível, portanto, calcular a razão (fator de escala) entre a distância estimada e a distância conhecida. Foram calculados fatores de escala tanto na direção horizontal da placa, quanto vertical para três bandas, duas do Sensor II e uma para o Sensor I.

Nesta análise foram usadas três linhas de pontos horizontais e três verticais, uma em cada extremidade da placa e uma ao centro, como pode ser visto na Figura 26. Na Figura 27 é possível ver os gráficos dos resultados obtidos para a análise do fator de escala na direção vertical. Na Figura 28 têm-se os resultados para a direção horizontal. Vale ressaltar que os gráficos ao lado esquerdo das figuras são referentes às distâncias determinadas entre pontos pertencentes ao mesmo alvo, enquanto os gráficos ao lado direito, dizem respeito às distâncias

obtidas entre pontos vizinhos (de alvos diferentes) e que os eixo das ordenadas dos gráficos representam pontos sequenciais da placa.

Figura 26 –Linhas de pontos usadas no teste

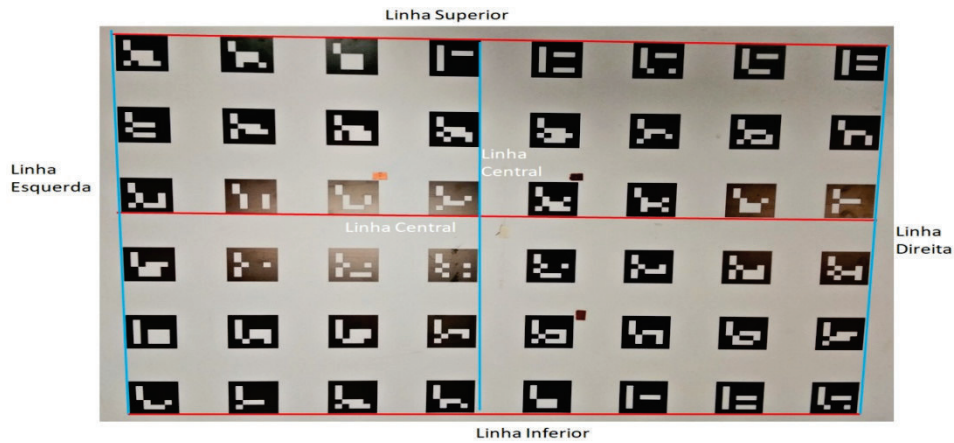


Figura 27 – Fator de escala para distintas bandas (direção vertical). No lado esquerdo estão os gráficos para distância estimadas entre pontos de um mesmo alvo e ao lado direito entre alvos distintos.

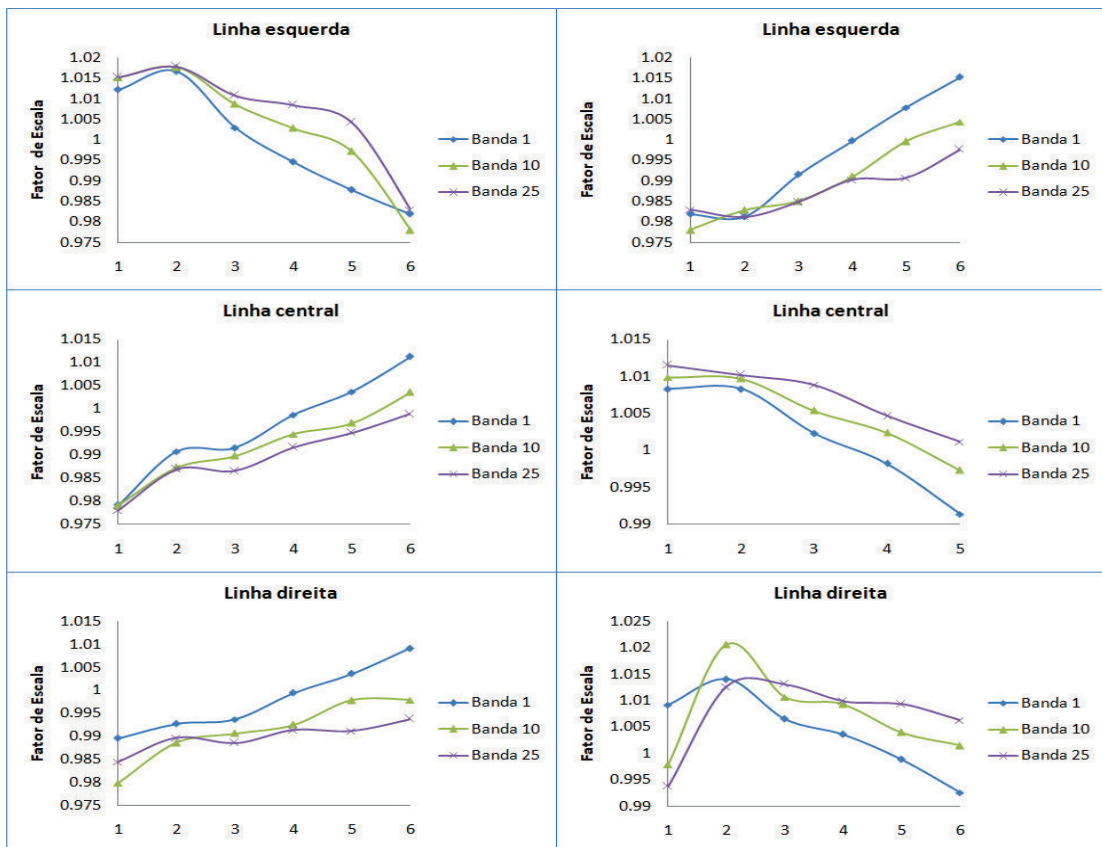
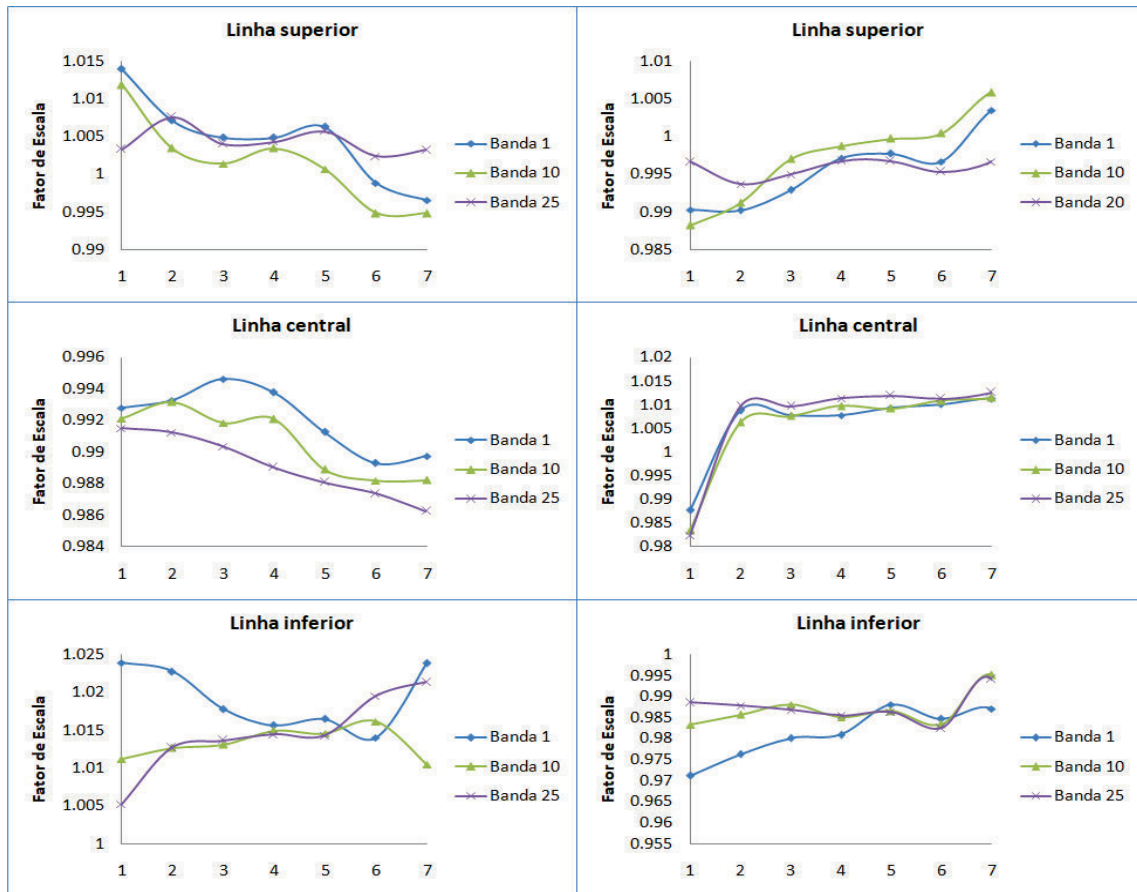


Figura 28 – Fator de escala para distintas bandas (direção horizontal). No lado esquerdo estão os gráficos para distância estimadas entre pontos de um mesmo alvo e ao lado direito entre alvos distintos.



Sabe-se a priori que os fatores de escala seriam iguais para as diferentes bandas, caso os pontos estivessem sendo estimados na mesma posição no espaço objeto. Evidentemente esse fato não ocorreu, tendo em vista que há um comportamento sistemático entre as linhas, mais evidente no teste considerando a direção vertical.

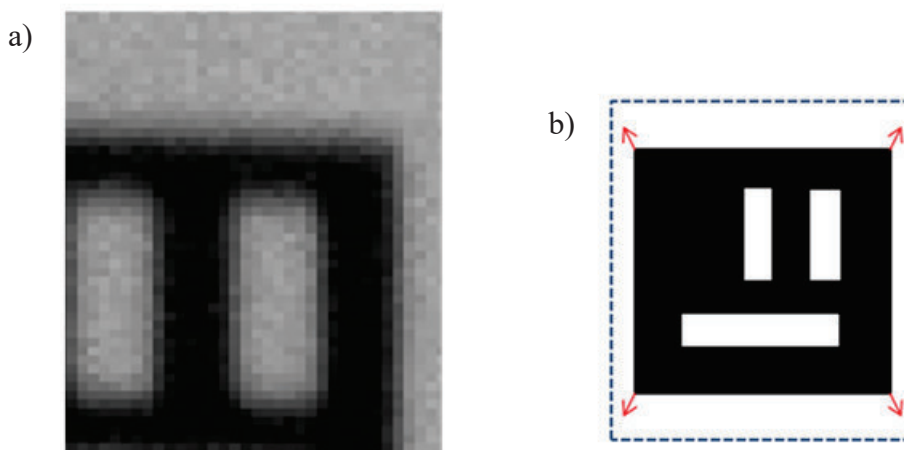
Neste sentido, uma hipótese que pode ser expressa a partir do experimento é que as diferenças de brilho e contraste das distintas bandas podem influenciar a medida das fotocoordenadas realizadas em alvos codificados do tipo Aruco. Uma explicação para essa diferença é a possibilidade de que a saturação dos alvos nos diferentes comprimentos de onda, influencie a medida da posição dos pontos nas imagens pelo aplicativo de detecção automática de alvos. Isso pode ser explicado pela limiarização entre os níveis digitais (ND) das bordas, usada pelo aplicativo num dos passos para a determinação das coordenadas de cada canto dos alvos. Uma vez encontrado o melhor limiar, é determinada uma reta para cada lado do alvo. A interseção das retas determina os pontos situados nos cantos dos alvos.

3.1.3 Influência no centro geométrico (virtual) do alvo

A hipótese apresentada anteriormente é que as bordas dos alvos em diferentes bandas espectrais são deslocadas devido às diferenças de brilho e contraste das imagens espectrais.

Considerando que a limiarização dos alvos desloca a posição da borda de maneira igual para todos os alvos, um experimento foi realizado para testar uma solução para este problema, bem como sua validação. Ao invés de utilizar o canto dos alvos, foi calculado o centro geométrico do alvo por meio dos cantos extraídos pelo aplicativo. Esta metodologia foi aplicada, considerando que o efeito causado pela limiarização pode deslocar os pontos dos cantos dos alvos simetricamente em relação ao seu centro, efeito que pode ser visto na Figura 29.b, e o uso do centro do alvo (centro geométrico) pode compensar este efeito. Na Figura 29.a tem-se uma imagem de alvo com intuito de evidenciar a sua borda bastante ambígua.

Figura 29 – a) Imagem de um alvo. b) Possível efeito do processo de limiarização



Apesar do uso do centro geométrico no processo de calibração reduzir o número de pontos disponíveis, o resultado com este método produziu fotocoordenadas com desvios-padrão e discrepâncias menores para os diferentes sensores, como pode ser visto na Tabela 2, quando comparados com os testes em que foram utilizados os cantos dos alvos (Tabela 1).

Tabela 2 – Discrepância entre fotocoordenadas em pixel de diferentes imagens espectrais de um mesmo hipercubo (centro dos alvos)

SENSOR I						
Ponto	coluna	linha	σ_{coluna}	σ_{linha}	$\Delta_{max(coluna)}$	$\Delta_{max(linha)}$
CID	897,30	601,35	0,13	0,09	0,45	0,37
CSD	233,94	606,40	0,13	0,06	0,48	0,21
CIE	903,29	55,24	0,08	0,07	0,26	0,19
CSE	124,52	39,04	0,16	0,09	0,62	0,39
C	461,94	266,51	0,17	0,02	0,61	0,08

SENSOR II						
Ponto	coluna	linha	σ_{coluna}	σ_{linha}	$\Delta_{max(coluna)}$	$\Delta_{max(linha)}$
CID	914,33	593,34	0,21	0,07	0,62	0,22
CSD	253,19	598,44	0,19	0,07	0,60	0,26
CIE	920,19	48,66	0,19	0,18	0,56	0,45
CSE	143,30	32,62	0,27	0,15	0,79	0,41
C	480,35	260,06	0,13	0,15	0,35	0,57

SENSOR I E II						
Ponto	coluna	linha	σ_{coluna}	σ_{linha}	$\Delta_{max(coluna)}$	$\Delta_{max(linha)}$
CID	904,11	598,14	8,52	4,01	17,58	8,33
CSD	241,64	603,22	9,62	3,98	19,86	8,14
CIE	910,05	52,61	8,45	3,29	17,26	6,87
CSE	132,02	36,46	9,41	3,21	19,61	6,81
C	469,31	263,93	9,20	3,23	19,04	6,72

Nota-se que, para os dois sensores analisados em separado, a amplitude máxima das fotocoordenadas ficou próxima a 0,5 pixel, indicando que possivelmente o uso do centro geométrico produza parâmetros melhor estimados na calibração. No entanto, quando os dados são comparados em conjunto, a discrepância continua muito maior que o erro de medida, resultado que indica um possível desalinhamento entre os dois sensores da câmara.

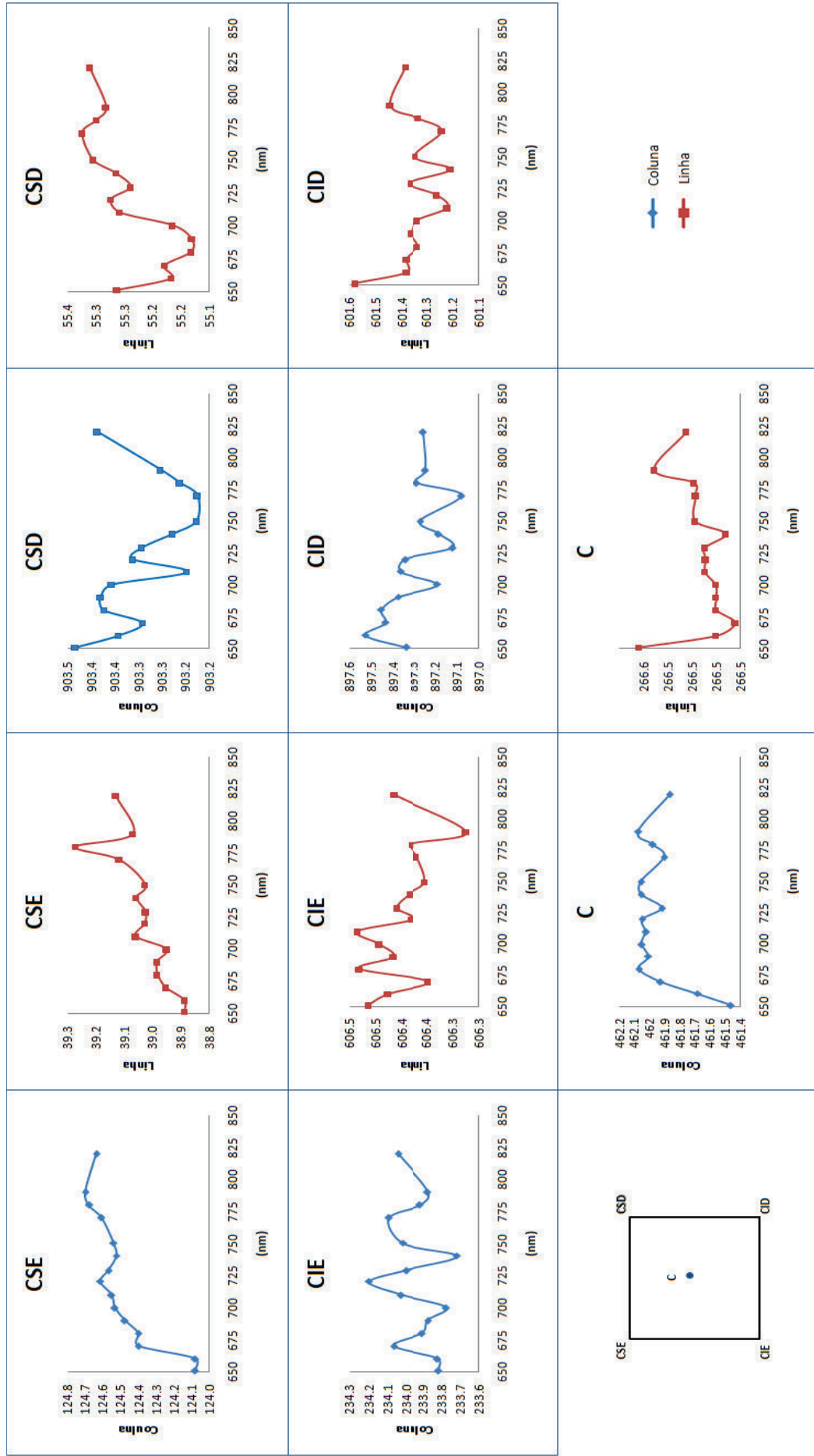
3.1.4 Análise da influência do interferômetro nas medidas

Apesar das medidas das fotocoordenadas se mostrarem aparentemente coerentes, quando comparados com dados de um mesmo sensor, uma análise foi realizada para avaliar se há influência da variação do *air-gap* na aquisição das diferentes bandas, e, por consequência, na posição dos pontos nas imagens. O teste consistiu em relacionar as fotocoordenadas de alguns pontos nas diferentes bandas de um mesmo sensor, com seu respectivo valor de

comprimento de onda, uma vez que este é obtido pela variação do *air-gap*. Foram usadas as fotocoordenadas dos 5 pontos característicos apresentados anteriormente, calculados usando o centro geométrico dos alvos.

Os testes foram realizados para os dois sensores em separado. Na Figura 30 têm-se os gráficos para os pontos do Sensor I, relacionando o comprimento de onda (nm) e as suas fotocoordenadas. Já na Figura 31, têm-se os resultados para o Sensor II.

Figura 30 – Efeito da variação do *air-gap* nas fotocoordenadas de pontos do Sensor I



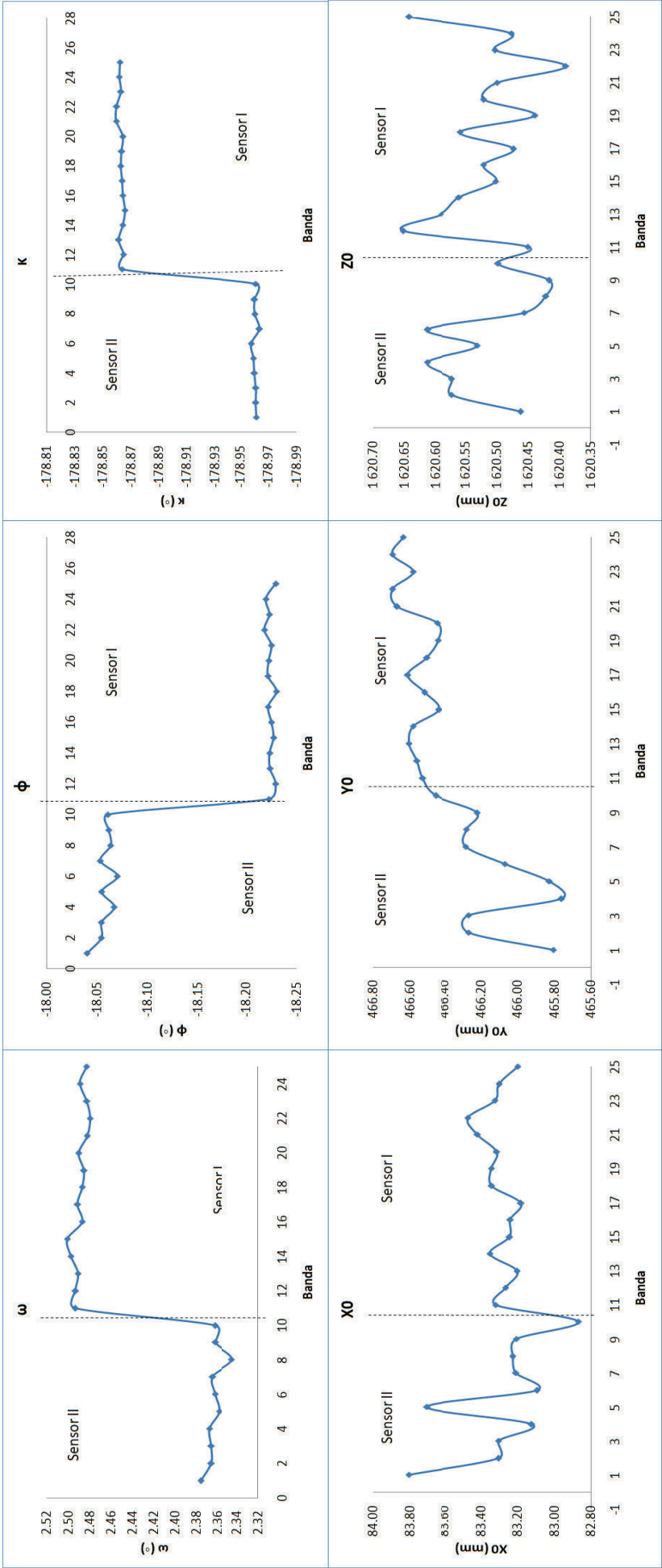
Por meio dos gráficos gerados foi possível perceber que há uma influência aparentemente sistemática na posição de alguns dos pontos analisados que, apesar de pequena (sempre menor que um pixel), possibilita constatar que este efeito é causado pelo princípio de aquisição das bandas.

3.1.5 Análise dos Parâmetros de Orientação Exterior

Os Parâmetros de Orientação Exterior de uma imagem expressam sua posição e orientação em relação ao sistema de referência tridimensional. Mesmo adquirindo dezenas de imagem em cada tomada, um hipercubo capturado com a câmara FPI2015 estática, também deveria possuir um único conjunto de POEs.

Nesta subseção foi feita uma análise para comparar os POEs estimados para as imagens de um mesmo hipercubo capturado com a câmara FPI2015, determinados por meio da autocalibração banda a banda, usando as fotocoordenadas dos pontos imagens determinadas nos centros virtuais dos alvos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 32, onde se relaciona cada banda ao parâmetro estimado na autocalibração. Vale ressaltar que a autocalibração foi realizada com a mesma metodologia aplicada por Oliveira *et al.*, 2016, ou seja, fixando-se as coordenadas tridimensionais de dois pontos da placa usada como calibração e a coordenada Z de um terceiro ponto.

Figura 32 – Diferentes estimativas dos POE de um hiper cubo



Por meio dos gráficos é possível identificar que os parâmetros X_0 , Y_0 e Z_0 , apresentam um comportamento aparentemente aleatório, apesar de uma variação aparentemente linear poder ser percebida quando comparados os dados separados por sensor. Essas variações podem estar relacionadas à influência do *air-gap* na medida das fotocoordenadas. No entanto, para os parâmetros ω , ϕ e κ , os efeitos não foram contínuos, havendo um deslocamento na passagem do Sensor II para o Sensor I. O deslocamento dos parâmetros estimados ω , ϕ e κ para os diferentes sensores indica novamente uma possível diferença geométrica na posição dos sensores, que muito provavelmente pode estar relacionada a um desalinhamento entre eles.

3.1.6 Análise de um possível desalinhamento entre os sensores

Com base nos resultados anteriores, outro teste foi realizado para avaliar um possível desalinhamento entre os sensores da FPI2015. É importante ressaltar que o termo “desalinhamento”, usado neste trabalho, vem da tradução do termo em língua inglesa *misalignment*, cujo significado é “um desarranjo de algo em relação à outra coisa”. Outro termo que será usado como sinônimo será “ângulos de orientação relativa”.

Este teste consistiu no cálculo de uma matriz de orientação relativa entre duas imagens de bandas diferentes (diferentes sensores, mas pertencentes ao mesmo hipercubo). Foram usadas 10 bandas distintas de cada sensor para a análise descrita. Na Equação 3.1 tem-se a relação usada para o cálculo da matriz de orientação relativa.

$$R = R_{S1}R_{S2}^{-1} \quad (3.1)$$

em que:

R é a matriz de orientação relativa.

R_{S1} é a matriz de rotação para o Sensor I.

R_{S2} é a matriz de rotação para o Sensor II.

Tendo em vista a grande quantidade de valores estimados (220 valores) e a variação deles, na Tabela 3 têm-se os valores obtidos dos ângulos de orientação relativa considerando o valor médio, o maior e menor valor em termos absolutos. Nestes testes,

para o Sensor I, foram usados os POE estimados para as bandas 11,12,..., 20, enquanto que para o Sensor II, foram usados os da banda 1, 2, ..., 10. Apesar do cálculo de valores médios, maiores e menores não serem coerentes quando se trabalha em ângulos de orientação, pois são rotações sequenciais, esses valores foram usados apenas para avaliar valores para esse possível desalinhamento entre os sensores, porque realizar testes com todos os conjuntos de valores é inviável no sentido prático da análise.

Caso as estimativas dos POEs fossem iguais para as duas imagens, a matriz de orientação relativa calculada seria uma matriz identidade. Vê-se por meio dos valores da Tabela 3 que a matriz de orientação relativa obtida não tem essa característica, evidenciando um possível desalinhamento entre os sensores.

Tabela 3 – Ângulos de orientação relativa entre sensores.

	$\Delta\omega (^{\circ})$	$\Delta\varphi (^{\circ})$	$\Delta\kappa (^{\circ})$
Média	-0,17559	0,139553	-0,03339
Menor	-0,10527	-0,00155	0,004716
Maior	-0,38984	0,329996	-0,15243

Para avaliar os valores obtidos e analisar a coerência da hipótese, foi aplicada a matriz de orientação relativa para transformar as fotocoordenadas de uma imagem do Sensor I (banda 11) para o Sensor II (banda 10) usando os dados da Tabela 3.

A relação matemática entre os dois sensores é baseada na condição de colinearidade. Considerando que as imagens possuem o mesmo centro perspectivo, que são relacionadas por uma matriz de rotação relativa de ângulos de desalinhamento, e uma mudança de escala dependente das distâncias focais e da matriz de rotação, tem-se a Equação 3.2:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f_2 \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f_1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

em que: $(x_1$ e $y_1)$ são as coordenadas no sistema fotogramétrico do ponto do Sensor I, $(x_2$ e $y_2)$ são as coordenadas no sistema fotogramétrico projetadas no Sensor II, f_1 e f_2 são as distâncias focais calibradas de cada sensor (banda do sensor), λ é um fator de escala e R é a matriz rotação passiva que é função dos ângulos de desalinhamento.

Multiplicando a matriz de rotação R por $[x_1, y_1, f_1]$ gera-se o vetor $[u, v, w]$ na Equação 3.3.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Assim, o fator de escala pode ser obtido pela Equação 3.4.

$$\lambda = \frac{-f_2}{w} \quad (3.4)$$

Portanto, as equações para projeção das coordenadas ao Sensor II são dadas pela Equação 3.5:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{-f_2}{w} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

As fotocoordenadas apresentavam antes da transformação, Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) de 18,16 pixels para a coluna, e, 6,98 pixels para linhas. Foram feitas três transformações: a primeira usando o valor médio das rotações, a segunda usando os menores valores e a terceira usando os maiores valores. Para o primeiro teste, o resultado da transformação apresentou REQM de 13,74 pixels em colunas e 3,47 pixels, em linhas. Para o segundo teste, a REQM foi de 15,73 pixels para colunas, e, 7,0 para linhas. Já o terceiro teste resultou nos melhores resultados, alcançando a REQM em colunas de 7,65 pixels e de 2,18 pixels em linhas, representando uma redução de aproximadamente 60% e 70%, para cada componente, respectivamente.

Outra análise realizada foi em relação à possibilidade de uso de uma matriz de orientação relativa diferencial (equação 3.6), por se tratarem de ângulos relativamente pequenos. Para isso, foi calculada uma matriz de rotação relativa completa R , com um conjunto de rotações obtidas, e, com os mesmos dados, a matriz diferencial D .

$$D = R_{S1} R_{S2}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta k & \Delta \varphi \\ \Delta \kappa & 1 & -\Delta \omega \\ -\Delta \varphi & \Delta \omega & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Os resultados podem ser vistos na Equação 3.7. A primeira relação da Equação 3.7 tem-se a matriz de rotação de ângulos diferenciais. Na segunda, tem-se a matriz de rotação completa, e, a terceira relação, a diferença entre as duas D_d .

$$\begin{aligned}
 R &= \begin{bmatrix} 0,9999799 & -0,0026995 & -0,005741 \\ 0,0026604 & 0,9999732 & -0,006819 \\ 0,0057595 & 0,0068038 & 0,9999603 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 1 & -0,00266 & -0,00576 \\ 0,00266 & 1 & -0,0068 \\ 0,00576 & 0,0068 & 1 \end{bmatrix} \\
 D_d &= \begin{bmatrix} -0,0000201 & -0,0000395 & 0,0000190 \\ 0,0000004 & -0,0000268 & 0,0000207 \\ -0,0000005 & 0,0000038 & -0,0000397 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

As diferenças entre as matrizes se mostraram pequenas, como pode ser visto na terceira relação da Equação 3.6, que indica a possibilidade do uso da matriz diferencial, neste caso.

3.1.7 Influência da aquisição manual dos hipercubos

A aquisição de imagens no processo de calibração de câmaras exige tomadas com geometrias específicas. No entanto, para a calibração terrestre com as câmaras convencionais, muitas vezes essas aquisições são realizadas de maneira manual por um operador. Isso é possível porque o tempo de integração das imagens é muito pequeno, principalmente em ambientes bem iluminados. No entanto, para uma câmara com as características da câmara FPI2015, esse procedimento pode influenciar os resultados obtidos. O tempo para a aquisição de todas as bandas espectrais pela FPI2015 é próximo a 1 segundo. Com um tempo dessa magnitude, possíveis movimentações do operador durante a aquisição, e consequentemente da câmara, podem refletir nas fotocoordenadas medidas.

Um teste foi realizado para analisar este problema. Uma aquisição manual com a FPI2015 foi realizada, bem como outra com a câmara totalmente estática por meio da sua fixação em um tripé. Os parâmetros de uma transformação projetiva plana foram calculados para transformar as fotocoordenadas de pontos da banda 2 (Sensor II) para a banda 12 (Sensor I) por meio do MMQ. Os resultados deste procedimento podem ser visto nas Figuras 33 e 34, em que são apresentados gráficos de agulhas dos resíduos para as duas aquisições.

Figura 33 – Resíduos da transformação projetiva (aquisição manual)

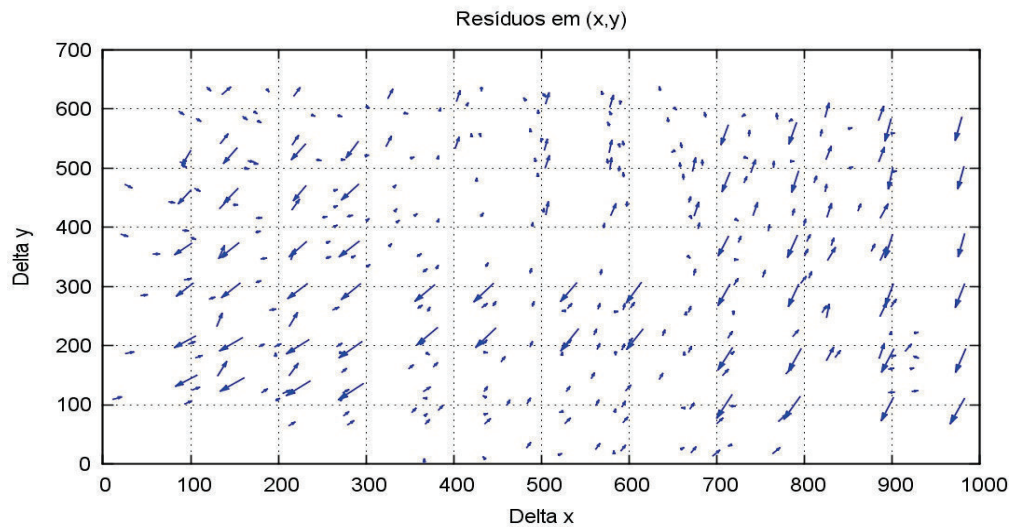
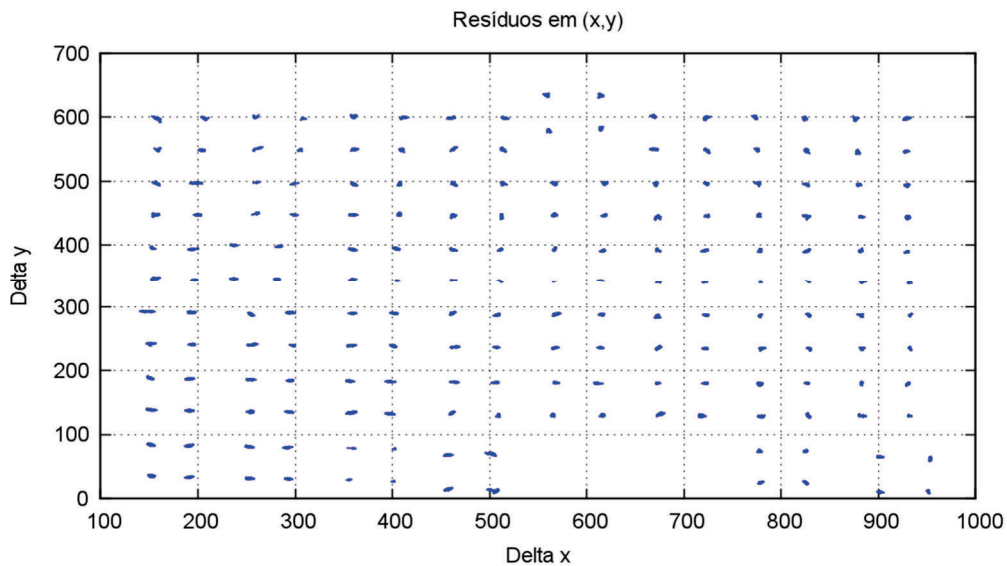


Figura 34 – Resíduos da transformação projetiva (aquisição no tripé)



Os resultados do teste mostraram que, para a aquisição manual a transformação projetiva não modelou a mudança de geometria entre as imagens, refletindo em um efeito sistemático nos resíduos, algo oposto ao que aconteceu na aquisição com a câmara no tripé. Isso permitiu verificar que movimentos involuntários ocorreram na aquisição manual, o que influenciou no cálculo da transformação. Além disso, o teste mostrou que, para a aquisição estática, uma transformação projetiva modela possíveis diferenças geométricas entre as imagens dos diferentes sensores.

A escolha da transformação projetiva plana se deu devido à característica do problema: transformação entre os dois planos dos sensores. No entanto, para validar o

uso de uma transformação projetiva para essa finalidade, um segundo teste foi realizado. Neste teste foram avaliadas 4 diferentes transformações geométricas por meio da estimativa dos seus parâmetros pelo MMQ e análise dos resíduos. As bandas espectrais escolhidas foram a banda 1 (Sensor II) e banda 25 (Sensor I), por serem as bandas com a maior diferença em termos de comprimento de onda, e por isso, esperam-se as maiores variações. O REQM dos resíduos e o fator de variância a posteriori estimados da transformação da banda 1 para a banda 25 para quatro distintas transformações estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – REQM dos resíduos da transformação da B1 para B25 para 4 diferentes transformações

	2 translações	Isogonal	Afim	Projetiva
REQM Colunas (pixels)	1,16	0,27	0,26	0,24
REQM Linhas (pixels)	0,82	0,25	0,24	0,23
Fator de Variância a posteiori (pixels)	1,02	0,27	0,26	0,25

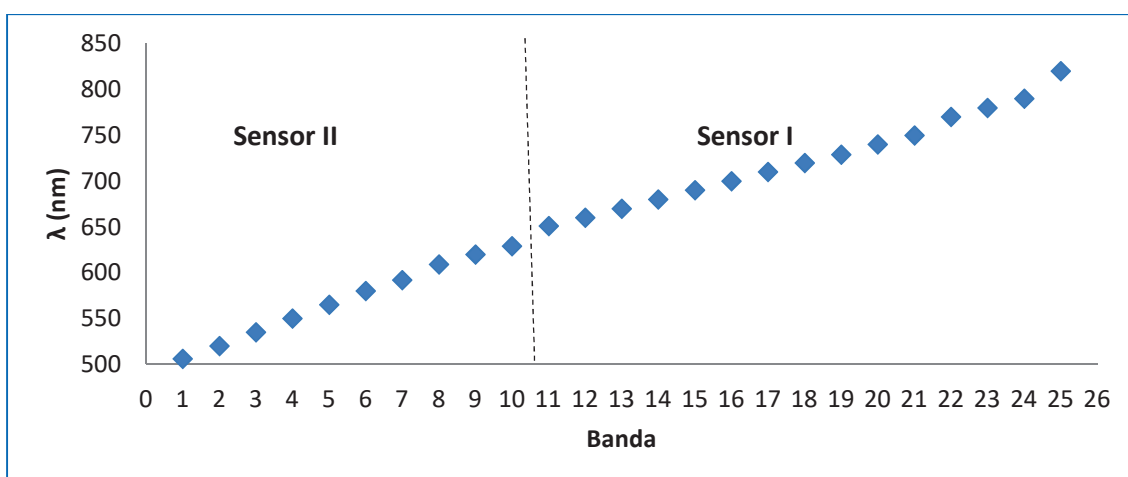
Por meio da Tabela 4, pôde-se constatar que a transformação projetiva apresentou os melhores resultados.

3.1.8 Análise da variação da distância focal

Os resultados obtidos por Oliveira *et al.*, (2016) mostraram que existem variações significativas dos parâmetros de orientação interior para as diferentes bandas capturadas pela FPI2014, modelo similar à FPI2015, inclusive dentro de um mesmo sensor, o que é causado, provavelmente, pelo próprio princípio de aquisição da câmara, ou seja, pela variação do *air-gap*.

Foram realizadas análises nesta etapa para avaliar se um modelo matemático pode ser representativo para a variação da distância focal em relação ao comprimento de onda, uma vez que este último é função do *air-gap*. Neste sentido, primeiramente um gráfico que relaciona o número da banda ao comprimento de onda foi produzido para analisar um possível modelo matemático nesta relação. A Figura 35 apresenta a relação.

Figura 35 – Relação entre banda e comprimento de onda



A Figura 35 evidencia uma relação praticamente linear entre o número da banda adquirida e o comprimento de onda. Essa constatação possibilitou, naturalmente, questionar se a distância focal não poderia ser também afetada linearmente pela variação do comprimento de onda.

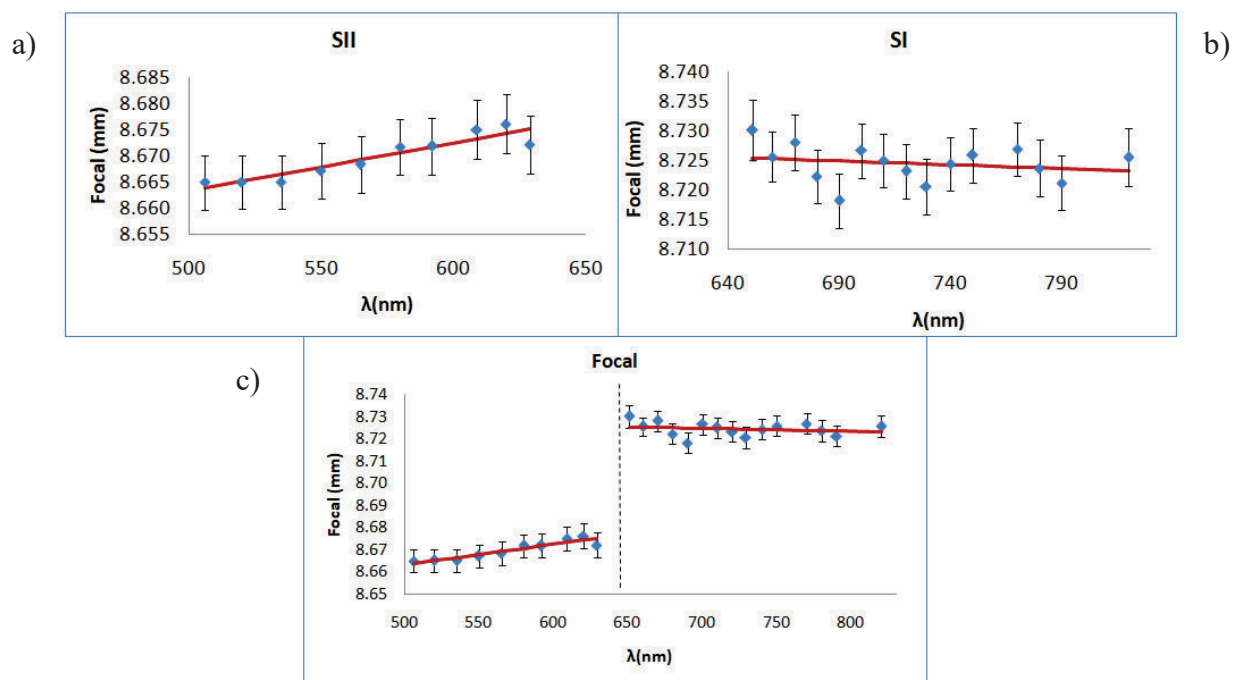
Apesar de saber a priori da existência de um possível desalinhamento entre os sensores, caso existisse algum comportamento linear na relação citada anteriormente, ele deveria permanecer ao menos para dados de um mesmo sensor.

Neste sentido, foi testado um modelo matemático linear (equação da reta) para relacionar o comprimento de onda e a distância focal estimada para cada banda na calibração individual (Equação 3.8).

$$f = a\lambda + b \quad (3.8)$$

A seguir (Fig. 36) têm-se um gráfico que explicita a relação supracitada para cada um dos sensores da FPI2015, bem como as retas ajustadas por meio do MMQ que caracterizam cada relação.

Figura 36 – Relação entre comprimento de onda e distância focal. a) Para o sensor II; b) Para o sensor I; e c) Para os dois sensores.



Apesar das variações presentes nos gráficos, é notório o comportamento linear da distância focal em relação à variação do comprimento de onda, principalmente para o Sensor II. No entanto, para validar essa suposição, foram calculados os valores de R^2 para cada conjunto (sensor), obtendo-se o valor de 0.04 para o Sensor I e 0.86 para o Sensor II, validando o que foi anteriormente observado.

3.1.9 Análise da posição do ponto principal

Conforme os resultados apresentados nos estudos de Oliveira *et al.*, (2016), a posição do ponto principal também apresentou flutuações para as distintas bandas espectrais. Neste sentido, o mesmo procedimento realizado para a distância focal foi realizado para a posição do ponto principal para analisar seu comportamento.

A seguir (Fig. 37 e 38) têm-se os gráficos que relacionam comprimento de onda e as componentes da posição do ponto principal.

Figura 37 – Relação entre comprimento de onda e o ponto principal (x_0). a) Para o sensor II; b) Para o sensor I; e c) Para os dois sensores.

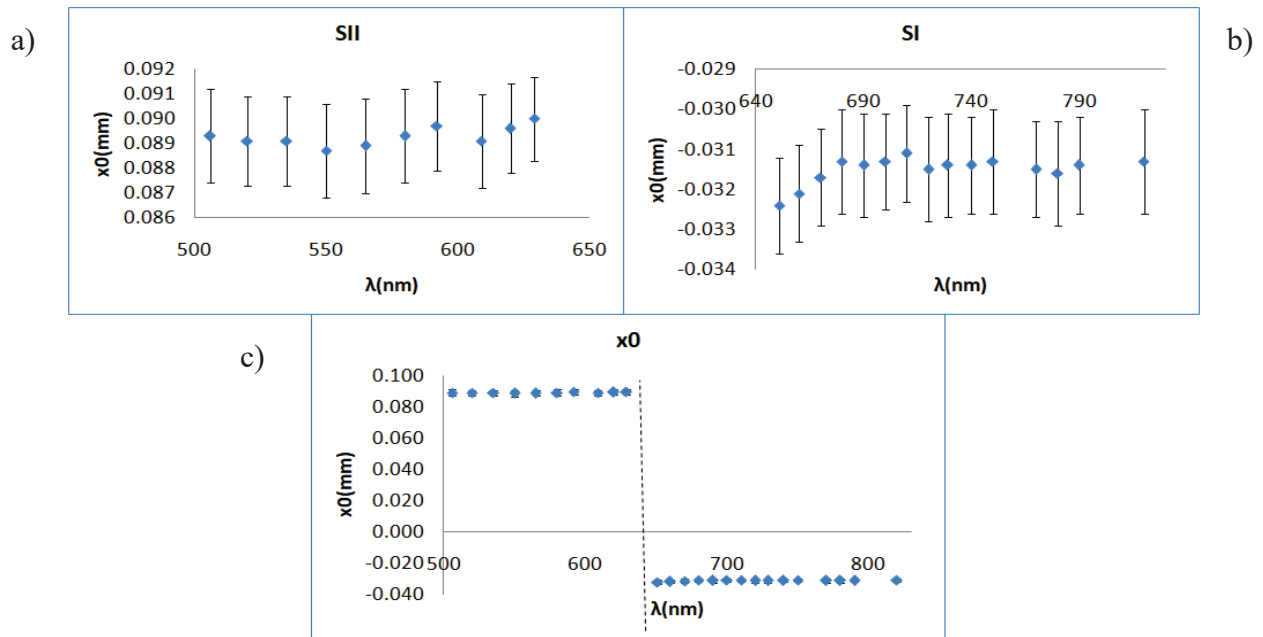
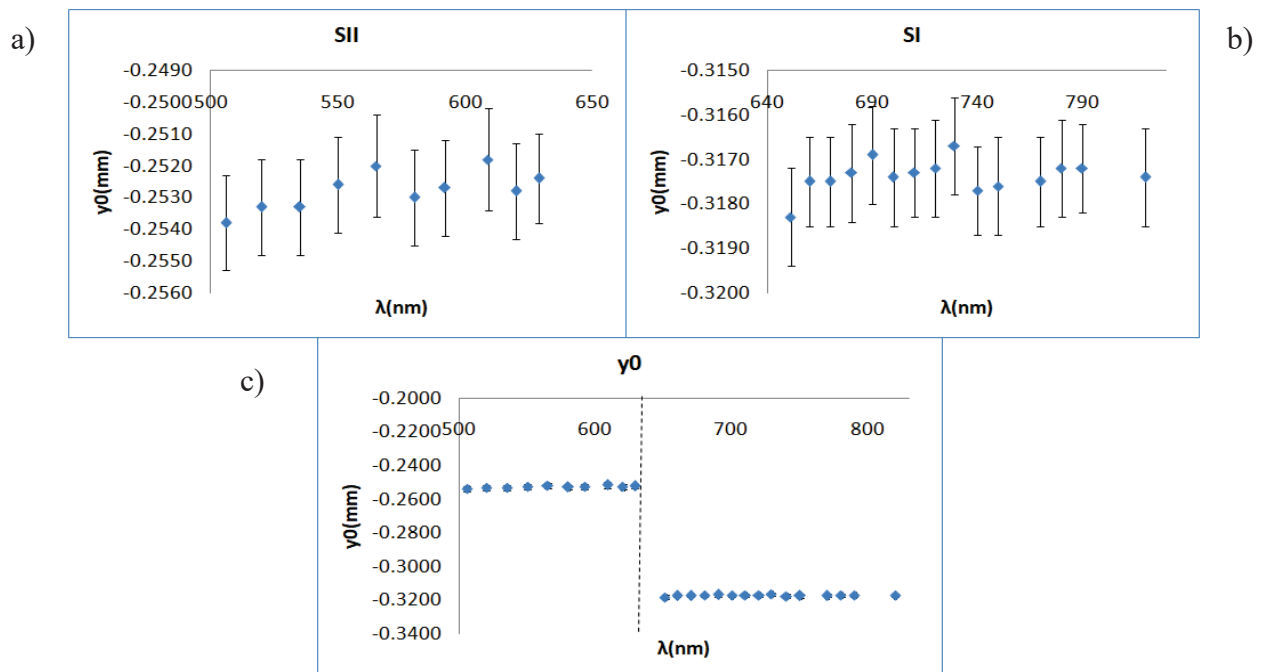


Figura 38 – Relação entre comprimento de onda e o ponto principal (y_0). a) Para o sensor II; b) Para o sensor I; e c) Para os dois sensores.



Apesar de apresentar flutuações dos valores para um mesmo sensor, os gráficos das Figuras 37 e 38 não apresentam inclinação. Além do mais, a variação dos valores é

sempre menor que o desvio-padrão dos demais valores do conjunto de dados, indicando que o valor médio é suficiente para representá-los nas distintas bandas.

3.1.10 Análise da variação dos parâmetros da distorção radial simétrica

Variações nos parâmetros da distorção radial simétrica, principalmente entre os dois sensores da câmara FPI2014 foram verificadas por Oliveira *et al.*, (2016). No entanto, é sabido que o efeito da distorção radial simétrica é proporcional à distância focal da câmara.

Neste sentido, a análise realizada nesta seção consistiu em comparar os efeitos da distorção radial simétrica, determinados usando os parâmetros estimados para cada banda, e, estes mesmos efeitos usando apenas uma banda (banda de referência), determinando o efeito nas demais bandas por meio da variação da distância focal. Para isso, portanto, foi usada uma banda de referência (banda 10) e um ponto no canto de uma imagem (canto inferior direito).

De acordo com Andrade (2003), se uma imagem for capturada com uma distância focal f , a distorção radial simétrica para um ponto P será δr . No entanto, se a distância focal variar para f' , a distorção radial simétrica em P assumirá $\delta r'$. A relação entre esses valores de distorção é dada pela relação da Equação 3.9.

$$\delta r' = \frac{f - f'}{f} r + \frac{f'}{f} \delta r \quad (3.9)$$

A seguir (Fig. 39) têm-se o gráfico que relaciona o efeito em um ponto no canto inferior direito da imagem, considerando os parâmetros individuais de cada banda. Posteriormente (Fig. 40), o gráfico dos efeitos obtidos com a variação da distância focal com a com banda 10 como referência, e, por fim a diferença entre os valores obtidos (Fig. 41).

Figura 39 – Efeito da distorção radial simétrica com os parâmetros de cada banda

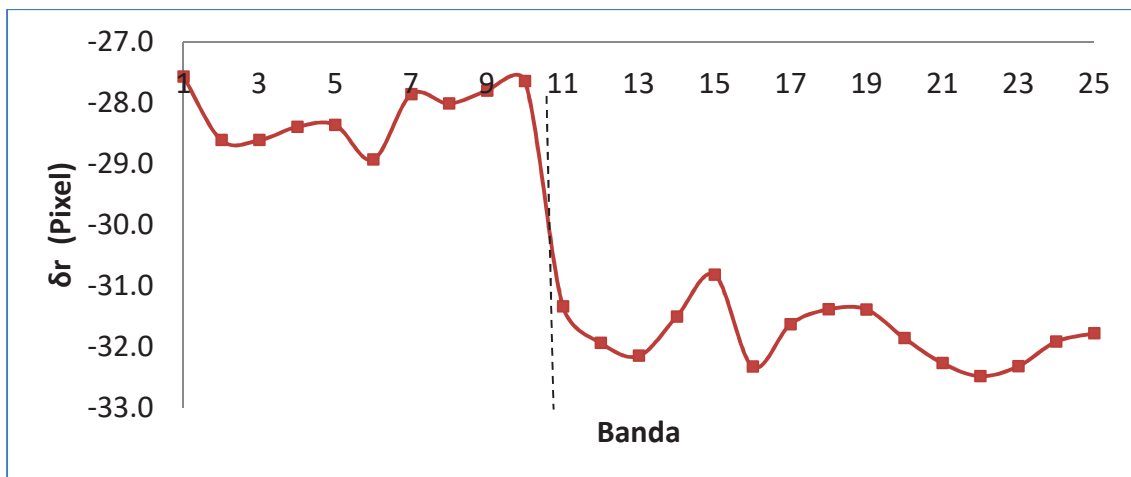


Figura 40 – Efeito da distorção radial simétrica com os parâmetros de uma banda de referência e variação da distância focal

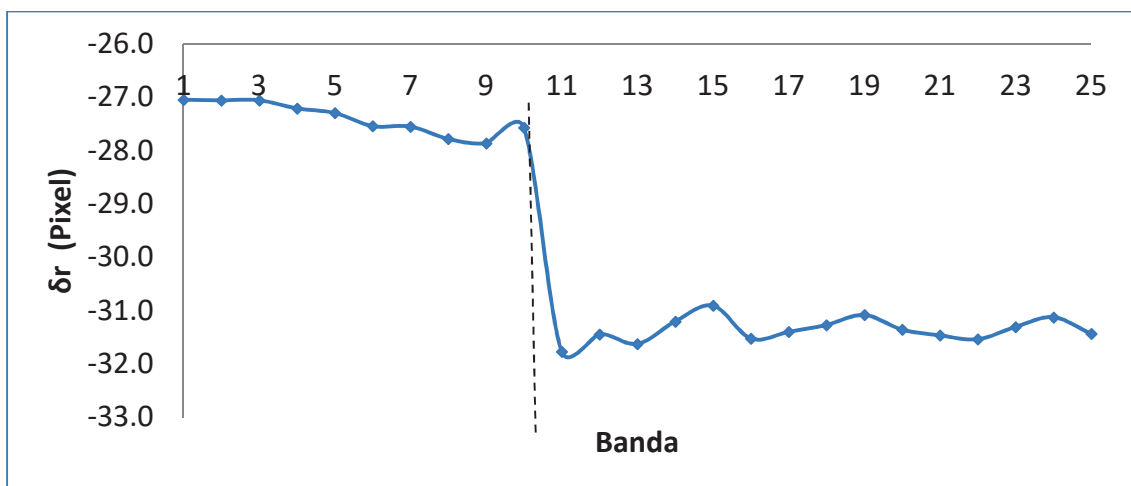
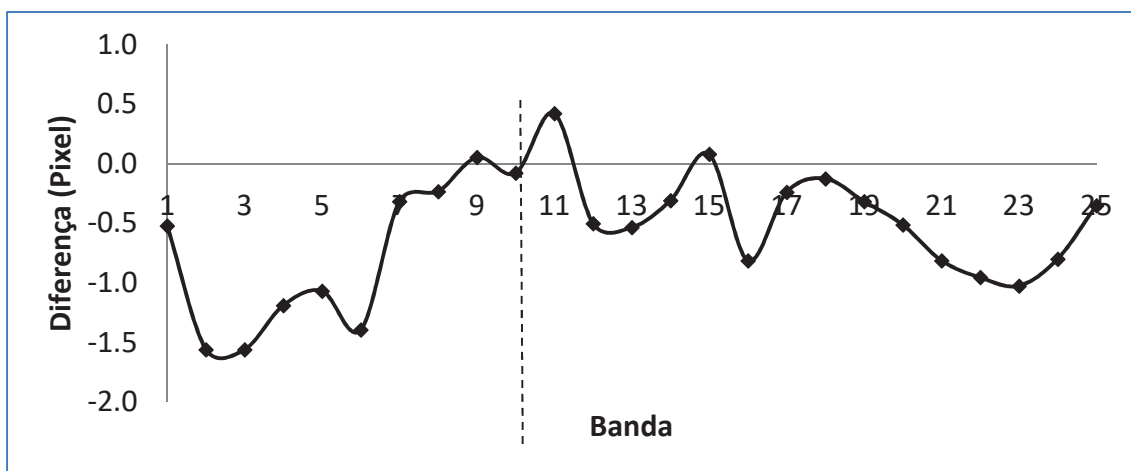


Figura 41 – Diferença entre os efeitos δr e $\delta r'$



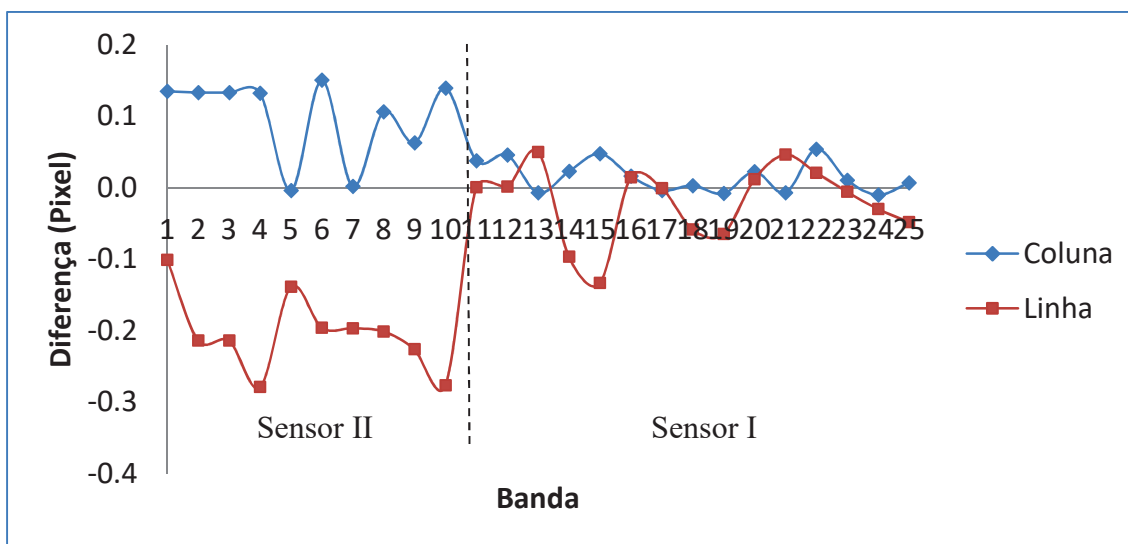
Por meio da Figura 41, é possível identificar que as diferenças obtidas entre δr e $\delta r'$ foram para a maioria das bandas menores que 1 pixel. Esse resultado é importante, pois indica que um único conjunto de parâmetros de distorção pode ser suficiente para a modelagem da distorção radial simétrica para a câmara, algo esperado, uma vez que existe apenas um conjunto de lentes para a aquisição, independente do sensor considerado.

3.1.11 Análise da variação do efeito da distorção descentrada

Assim como para os parâmetros da distorção radial simétrica, os parâmetros da distorção descentrada também apresentaram variações significativas para as distintas bandas nos resultados apresentados por Oliveira *et al.* (2016).

O objetivo neste item foi avaliar o efeito da distorção descentrada nas diferentes bandas espectrais capturadas pela câmara FPI2015. Para isso foi calculado o efeito desta distorção para um ponto no canto da imagem (canto inferior direito). A seguir (Fig. 42) têm-se os resultados obtidos para cada uma das bandas.

Figura 42 – Efeito da distorção descentrada (canto da imagem)



Vê-se, por meio da Figura 42, que o efeito desta distorção foi sempre menor que 1/5 do pixel para as duas componentes considerando o Sensor I. Já para o Sensor II os valores são maiores, contudo sempre menores que 1/3 do pixel. Os resultados obtidos,

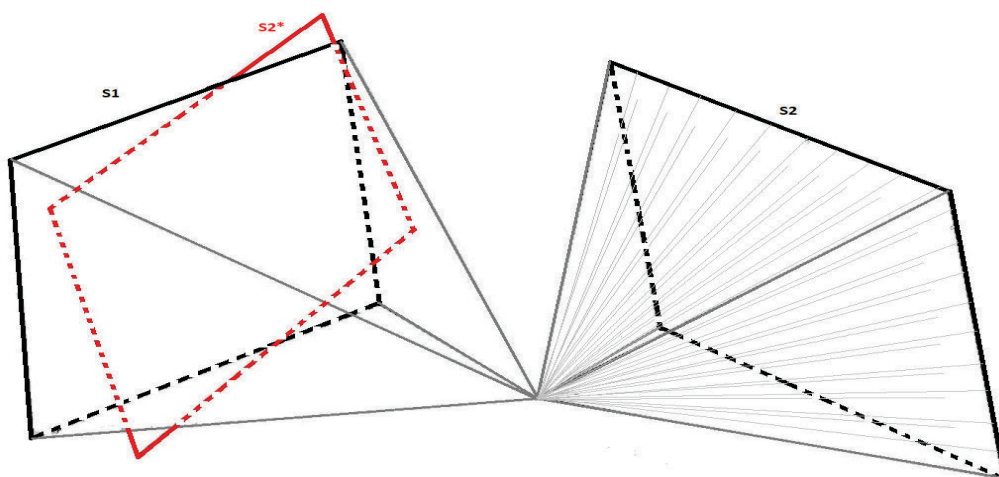
vê-se que em termos de efeito, os valores obtidos são compatíveis com a precisão do processo de medida.

3.2 CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA COM DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ENTRE OS SENSORES

Como apresentado anteriormente, o propósito desta pesquisa é estudar a geometria interna da câmara hiperspectral FPI2015, determinar com acurácia os parâmetros de orientação interior desta câmara, bem como tornar mais prático o seu uso na geração de modelos tridimensionais.

Sabe-se que a radiação que incide neste tipo de câmara passa inicialmente pelo conjunto óptico e depois pelo interferômetro FPI, sendo redirecionada para dois sensores por meio de um prisma de divisão de feixe. Partindo-se da hipótese de uma geometria interna rígida dos componentes internos desta câmara, caso os sensores desta câmara estivessem mutuamente ortogonais, as imagens geradas nos dois sensores seriam idênticas. No entanto, tendo em vista os resultados apresentados, essa hipótese não se verifica. Neste sentido, a principal proposta desta pesquisa é a calibração da câmara, inserindo no modelo matemático parâmetros adicionais referentes ao desalinhamento entre os sensores, bem como um modelo de distância focal variável, dependente do comprimento de onda. De acordo com os resultados apresentados por Oliveira *et al.* (2016) e os resultados preliminarmente apresentados, observou-se que os dois sensores CMOS que compõem esta câmara não são perfeitamente alinhados. A situação descrita pode ser observada na Figura 43.

Figura 43 – Posição relativa entre os sensores CMOS da câmara Rikola



Na Figura 43 tem-se uma possível sobreposição dos dois sensores, o que não ocorre perfeitamente devido ao desalinhamento entre eles. Apesar do exagero apresentado na ilustração, o desalinhamento entre os sensores gera diferenças nas fotocoordenadas da ordem de dezenas de pixels, como apresentado nas Tabelas 1 e 2.

A relação entre um ponto no espaço imagem e o mesmo ponto no espaço objeto, considerando o contexto fotogramétrico, é expressa pela Equação 3.10.

$$k_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

em que:

k_i – é um fator de escala variável para cada ponto i ;

$x_i, y_i, -f$ – são coordenadas no sistema fotogramétrico de um ponto i ;

M – é a matriz de rotação passiva;

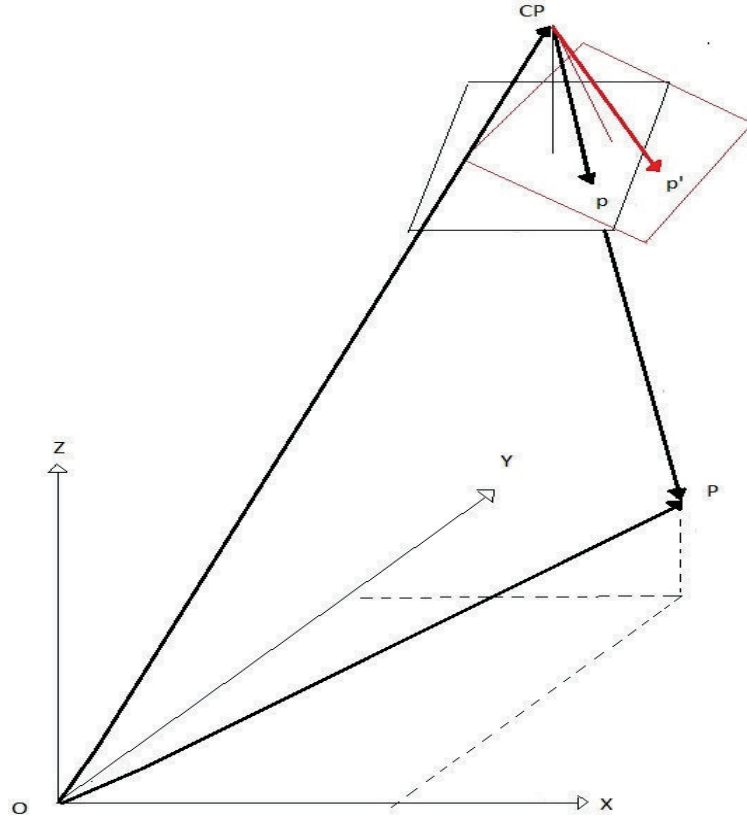
X_i, Y_i, Z_i – são as coordenadas 3D de um ponto i no terreno;

X_0, Y_0, Z_0 – São as coordenadas do centro perspectivo da câmara.

Testes realizados com os valores obtidos de desalinhamento mostraram que uma matriz de rotação diferencial pode ser usada no contexto da câmara FPI2015, simplificando consideravelmente o modelo matemático. Então a relação apresentada na Equação 3.11 pode ser obtida considerando a pré-multiplicação da matriz de rotação (M) pela matriz de rotação diferencial (D). A situação geométrica desta solução é mostrada na Figura 44.

$$k \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = D \cdot M \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Figura 44 – Desalinhamento entre os sensores



Considerando a matriz $R = D.M$ (Equação 3.11), realizando as devidas operações matemáticas, e lembrando que a distância focal desta câmara pode ser considerada como uma função linear do comprimento de onda, as equações de colinearidade, considerando observações do segundo sensor da câmara hiperespectral FPI2015, dadas pelas relações da Equação 3.12.

$$R = \begin{bmatrix} m_{11} - \Delta\kappa.m_{21} + \Delta\varphi.m_{31} & m_{12} - \Delta\kappa.m_{22} + \Delta\varphi.m_{32} & m_{13} - \Delta\kappa.m_{23} + \Delta\varphi.m_{33} \\ \Delta\kappa.m_{11} + m_{21} - \Delta\omega.m_{31} & \Delta\kappa.m_{12} + m_{22} - \Delta\omega.m_{32} & \Delta\kappa.m_{13} + m_{23} - \Delta\omega.m_{33} \\ -\Delta\varphi.m_{11} + \Delta\omega.m_{21} + m_{31} & -\Delta\varphi.m_{12} + \Delta\omega.m_{22} + m_{32} & -\Delta\varphi.m_{13} + \Delta\omega.m_{23} + m_{33} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$x = -(a.\lambda + b) \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (3.12)$$

$$y = -(a.\lambda + b) \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

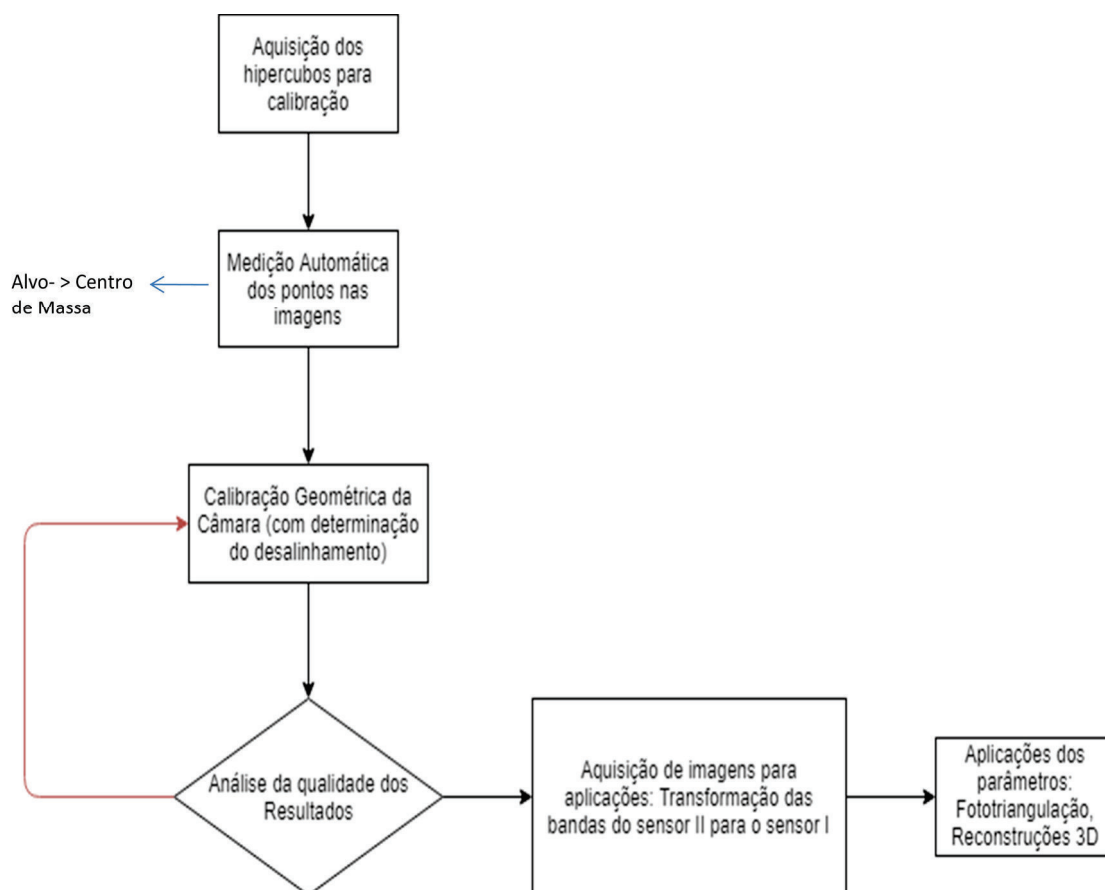
Vale ressaltar que essas equações são válidas apenas para o segundo sensor da câmara. Para o primeiro sensor, as equações de colinearidade convencionais são

suficientes para a modelagem do problema, a não ser o que diz respeito à distância focal, que é também uma função linear do comprimento de onda, com parâmetros diferentes daqueles presentes na Equação 3.12.

É válido ainda explicitar que nesta abordagem apenas um centro perspectivo é considerado por hipercubo. Em relação aos demais POIs, um único ponto principal é considerado para o sensor no qual será feita a retificação do outro. Também um único conjunto de parâmetros de distorção das lentes é estimado, tendo em vista a existência de uma única objetiva.

Uma vez determinado o modelo matemático para a câmara Rikola FPI2015, realiza-se a calibração resolvendo um sistema redundante de equações pelo Método dos Mínimos Quadrados. O diagrama de blocos para aplicação deste método pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 – Etapas para calibração considerando o desalinhamento entre os sensores



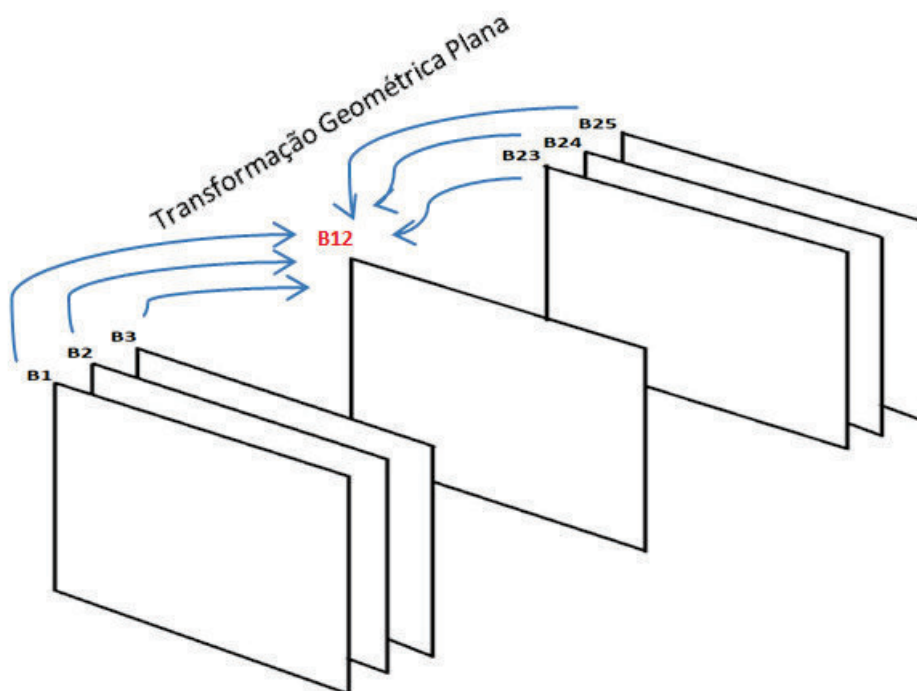
3.3 REFINAMENTO DA CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA COM PRELIMINAR CORREGISTRO DE BANDAS

Os resultados apresentados por Oliveira *et al.* (2016) mostraram que os elementos internos da câmara em estudo produzem geometrias ligeiramente diferentes para cada banda capturada, e que esse efeito é agravado quando se comparam bandas de diferentes sensores. Além do mais, os testes preliminares apresentados mostraram que o princípio de aquisição das distintas bandas pelo FPI interferem nas posições dos pontos na imagem.

Assim sendo, a segunda abordagem desta pesquisa é um refinamento das coordenadas medidas, por meio de um registro prévio das suas bandas espectrais, possibilitando a estimação de um único conjunto de POI.

Para isso, deve ser eleita uma banda de referência (representada pela banda 12 na Fig. 46) e utilizada uma transformação 2D para registrar as demais bandas com base nesta. Espera-se que essa transformação reduza as diferenças geométricas entre as bandas espectrais. A Figura 46 ilustra o procedimento a ser realizado.

Figura 46 – Abordagem de calibração com registro de bandas

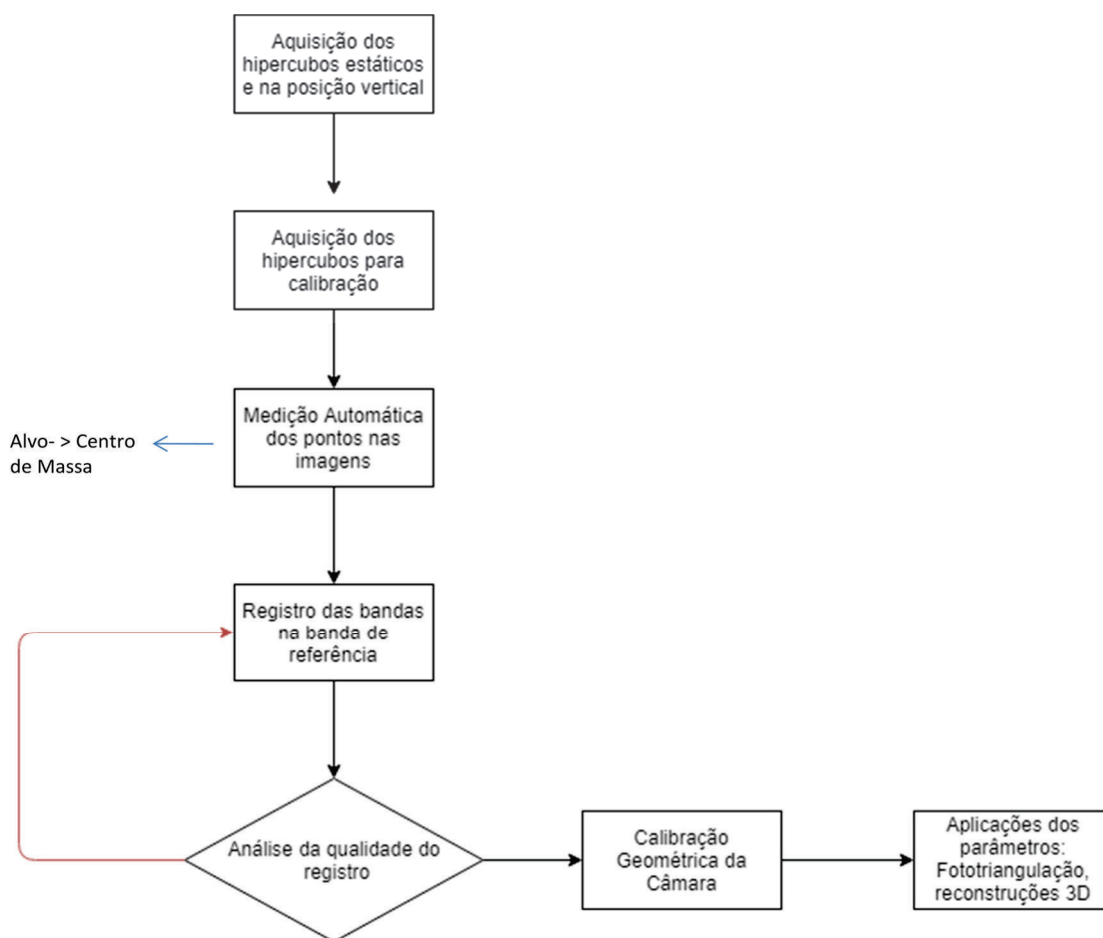


Os parâmetros da transformação devem ser calculados antes da calibração propriamente dita, por meio de hipercubos adquiridos de forma rigorosamente estática.

O interessante desta metodologia é a redução de vários conjuntos de POI para um único conjunto de parâmetros, pois é mais conveniente e prático ter apenas um único conjunto destes parâmetros. Os passos principais desta abordagem serão: 1) Aquisição das imagens; 2) Medição automática das fotocoordenadas; 3) Corregistro entre bandas e 4) Calibração da câmara.

O diagrama de blocos da Figura 47 apresenta as etapas para a realização da abordagem de refinamento por meio do registro prévio das bandas espectrais.

Figura 47 – Etapas para calibração com base no registro prévio das bandas espectrais



Vale destacar que na abordagem proposta o corregistro das bandas é feito por meio de hipercubos estáticos, verticais e capturados antes daqueles adquiridos para o processo de calibração. Desta forma, o processo caracteriza realmente um refinamento da calibração a ser realizada.

O passo principal nesta abordagem foi a escolha da transformação geométrica. Quatro modelos foram analisados: translação (translações nas direções x e y, com dois parâmetros de transformação), isogonal (translação e rotação, 3 parâmetros), afim (6

parâmetros) e projetiva (8 parâmetros). Esses modelos de transformação 2D foram avaliados e comparados para selecionar o modelo mais adequado para o objetivo proposto. Os resultados dessas comparações foram apresentados na subseção 3.1.7. Esta avaliação mostrou que a transformação geométrica projetiva 2D foi o modelo mais adequado para o método.

Uma representação mais conveniente de forma linear da transformação projetiva é dada pela Equação 3.13(MIKHAIL *et al.*, 2001).

$$\begin{aligned}x &= a_1x' + a_2y' + a_3 - a_7xx' - a_8xy' \\y &= a_4x' + a_5y' + a_6 - a_7yx' - a_8yy'\end{aligned}\tag{3.13}$$

A forma linear é mais adequada para estimação com o método dos mínimos quadrados. Neste caso, assume-se que as coordenadas são isentas de erros.

4. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os experimentos realizados e as análises feitas a partir dos resultados obtidos com as abordagens propostas nesta pesquisa. Neste sentido, tendo em vista as duas soluções apresentadas, dois conjuntos de experimentos são mostrados. Apesar das duas abordagens serem metodologicamente diferentes, algumas constatações quanto aos dados de entrada são válidas para as duas técnicas, e, portanto, algumas análises com diferentes observações são apresentadas antes daqueles obtidos diretamente com elas.

4.1 EFEITO DO USO DOS CENTROS GEOMÉTRICOS DOS ALVOS NA CALIBRAÇÃO

Como anteriormente apresentado e discutido, o uso do centro geométrico dos alvos Aruco diminui a discrepância entre as fotocoordenadas de um ponto medido em diferentes bandas espectrais. Essa constatação permite inferir que o uso de alvos, cuja determinação sub-pixel seja no seu centro de massa, é preferível para este tipo de câmara, pois as bordas sofrem deslocamentos dependendo da saturação em cada banda.

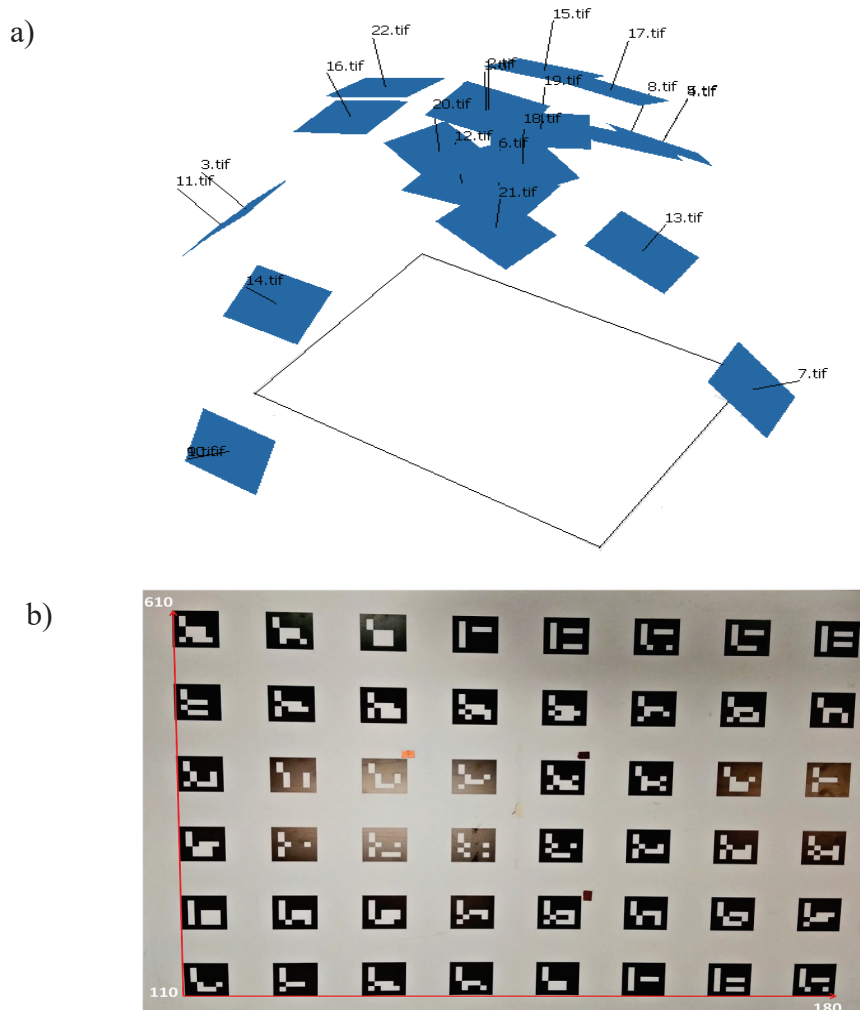
Assim sendo, para analisar este efeito, a calibração geométrica por banda da câmara FPI2015 foi realizada de duas maneiras: 1) usando os cantos dos alvos como observações, assim como realizado por Oliveira *et al.* (2016); 2) usando o centro dos alvos, determinados por meio das fotocoordenadas dos seus cantos (centro geométrico).

As calibrações realizadas neste experimento foram feitas com imagens adquiridas da placa de alvos codificados Aruco usada como campo de calibração, a mesma apresentada na Figura 25.c. A determinação dos parâmetros foi feita no modo autocalibração, por meio da aquisição de 22 hipercubos aplicando o método das câmaras convergentes e da restrição dos sete parâmetros mínimos para a definição do sistema de referência tridimensional, usando o aplicativo CMC. Para cada banda foi determinada a distância focal (f), a posição do ponto principal (x_0, y_0), os parâmetros da distorção das lentes: 1) distorção radial simétrica (k_1, k_2 e k_3); 2) distorção descentrada (P_1 e P_2). Os parâmetros de afinidade não foram determinados nas soluções, porque foram considerados não significantes para esta câmara, como pode ser verificado em Oliveira *et al.* (2016).

Na Figura 48.a é possível observar a configuração geométrica das aquisições realizadas.

A fixação das coordenadas tridimensionais de 2 pontos da placa e a coordenada Z de um terceiro ponto, permitiram definir os sete parâmetros para a definição do sistema de referência tridimensional. Os pontos utilizados para materializar o sistema de referência, no caso das calibrações com os cantos dos alvos foram: 110 e 180, e, a coordenada Z do ponto 610, como pode ser visto na Figura 48.b. O eixo Z foi considerado positivo no sentido da placa para a câmara. Vale ressaltar que para as calibrações com os centros dos alvos foram aplicadas as mesmas restrições, considerando, no entanto, o centro do respectivo alvo. As coordenadas dos demais pontos foram inseridas com desvio-padrão igual a 100 unidades, o que correspondente a deixar os pontos “livres”.

Figura 48 – a) Configuração geométrica das aquisições. b) Pontos utilizados para definição do sistema de referência tridimensional para autocalibração



Cada experimento de calibração utilizando os cantos dos alvos levou em conta 22 imagens espectrais e 192 pontos no espaço objeto, estimando-se um total de 716 parâmetros. Em média foram medidos 2.856 pontos nas imagens, ou seja, um total médio de 5.712 observações. Já na calibração com os centros geométricos dos alvos, o número de pontos no espaço objeto e medido das imagens foi $\frac{1}{4}$ do número apresentado anteriormente. Neste caso foram estimados 282 parâmetros.

Os resultados obtidos na calibração por banda da câmara FPI2015 usando os cantos e os centros dos alvos são apresentados a seguir. Vale ressaltar que os resultados são apresentados na forma gráfica, uma vez que o objetivo é analisar o comportamento dos parâmetros nas distintas bandas.

Na Figura 49.a, têm-se os resultados obtidos para a distância focal, e, na Figura 49.b, os resultados para a posição do ponto principal. Na Figura 50, têm-se os resultados referentes aos parâmetros da distorção radial simétrica. Já na Figura 51, são apresentados os gráficos relacionados à distorção descentrada. Os resultados estão separados por sensor, sendo que os gráficos dispostos ao lado esquerdo de cada conjunto de gráficos são aqueles que contêm os resultados determinados usando os cantos dos alvos. Já os que estão do lado direito, são os resultados da calibração com os centros dos alvos. A barra vertical em cada ponto do gráfico representa o desvio-padrão do parâmetro.

Em relação aos resultados obtidos com as fotocoordenadas dos cantos dos alvos, percebe-se que eles se assemelharam aos resultados obtidos por Oliveira *et al.*, (2016). Houve variações significativas entre os parâmetros estimados para bandas de um mesmo sensor, bem como um deslocamento nos gráficos quando comparados os resultados obtidos para diferentes sensores, algo que praticamente inviabiliza a estimação de um único conjunto de parâmetros para a calibração da câmara, se feita com o modelo matemático tradicional.

No que diz respeito aos resultados obtidos usando o centro geométrico dos alvos, o que se percebe é uma ligeira suavização das diferenças entre POIs de bandas de um mesmo sensor, principalmente quando analisados os resultados do Sensor II, para os parâmetros distância focal e posição do ponto principal. Quando comparados os resultados dos dois sensores, as diferenças se apresentaram como sendo muito significativas, evidenciando o desalinhamento já percebido.

Figura 49 – Resultados da calibração individual por banda usando os cantos e centro de ponto principal

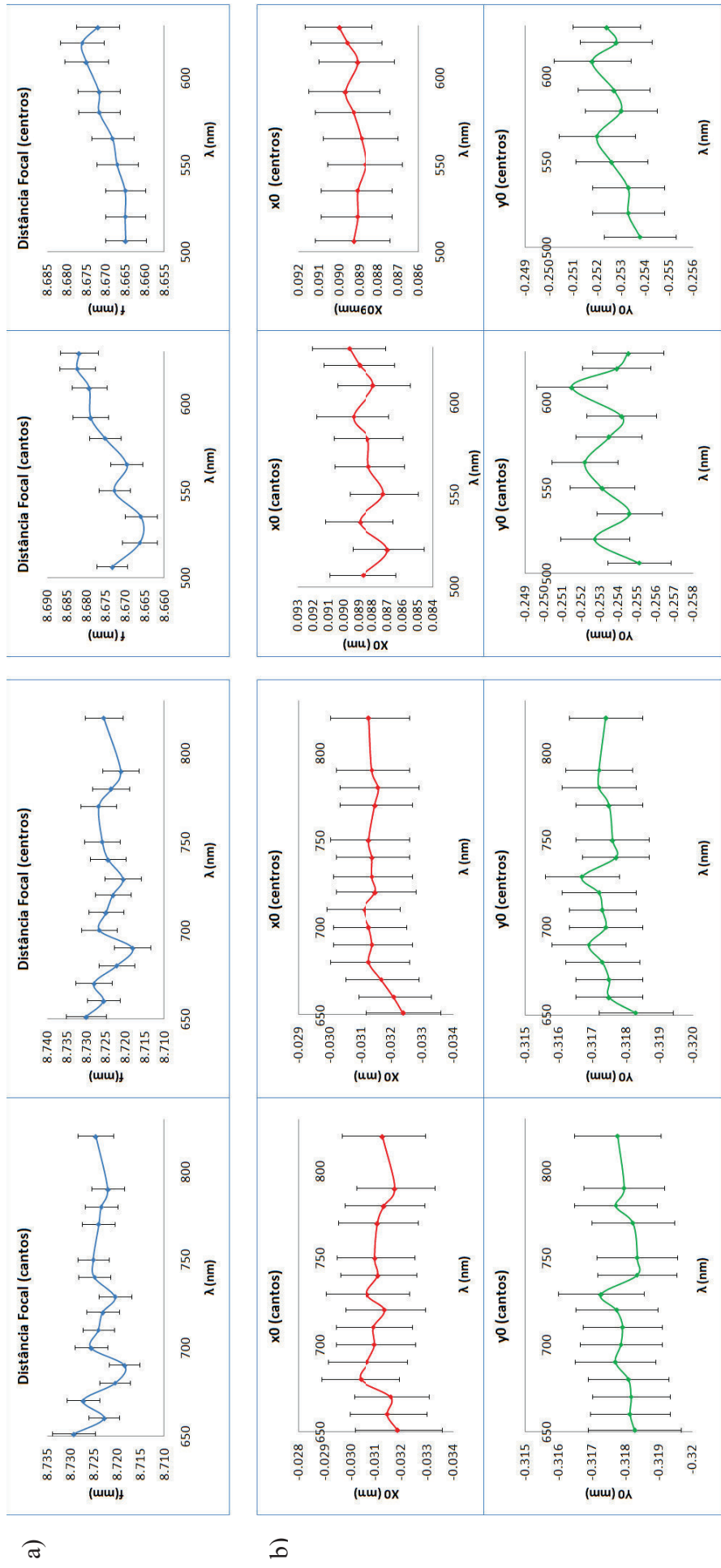


Figura 50 – Resultados da calibração individual por banda usando os cantos e centro dos alvos (distorção radial simétrica)

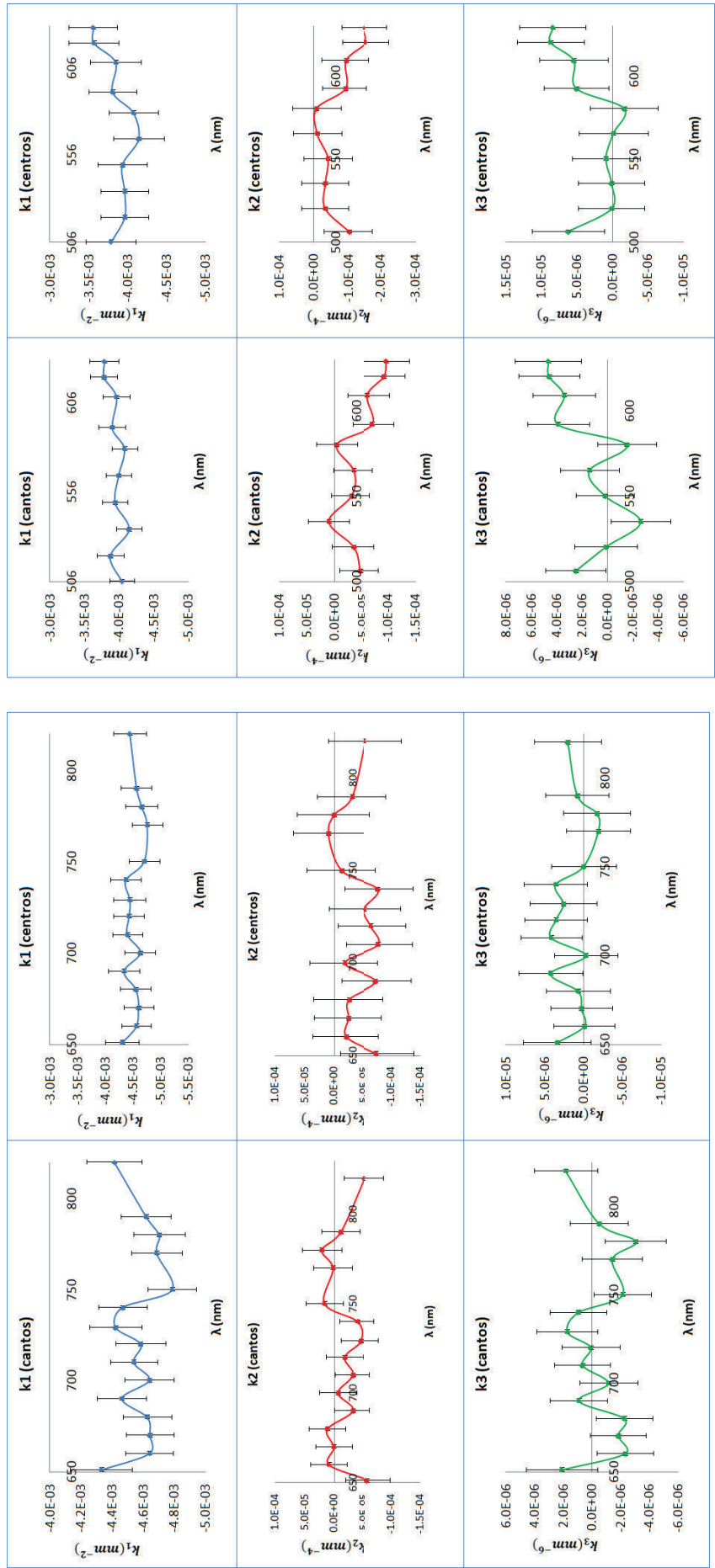
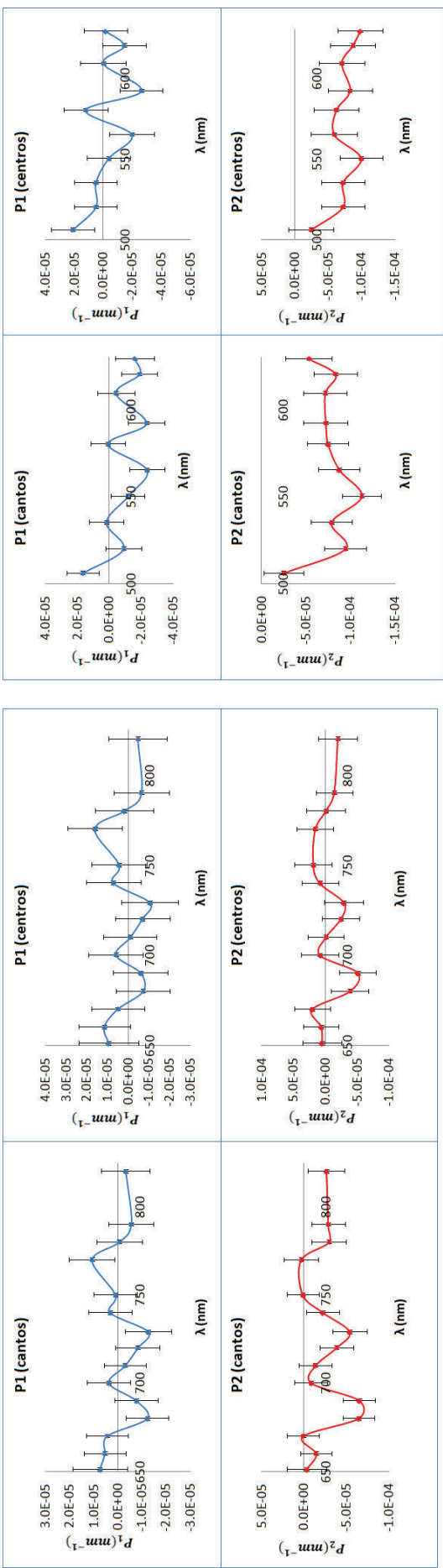


Figura 51 – Resultados da calibração individual por banda usando os cantos e centro dos alvos (distorção descentrada)



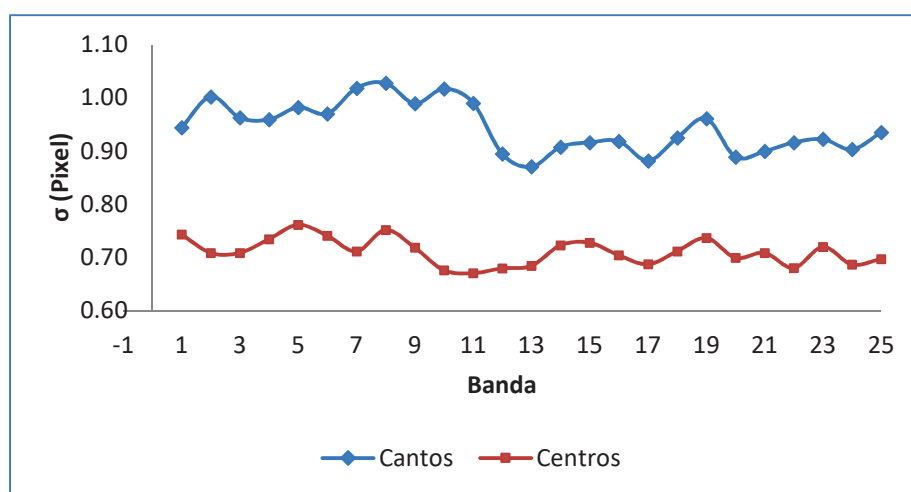
Sensor I

Sensor II

Para demonstrar a suavização das diferenças percebidas visualmente, foram analisados os resultados em termos de unidade de peso à posteriori obtidos em cada calibração, pois ele indica, de maneira geral, a adequação do modelo matemático às observações.

Na Figura 52 têm-se os resultados obtidos em termos de unidade de peso à posteriori. Destaca-se que o fator de variância à priori foi considerado unitário em todas as calibrações.

Figura 52 – Resultados da calibração individual por banda em termos de unidade de peso à posteriori



A Figura 52 evidencia o que foi anteriormente discutido, pois os pesos à posteriori obtidos com a calibração com os centros dos alvos foram significativamente menores que àqueles estimados no processo com os cantos dos alvos. A redução variou de 20,3 a 33,5%.

4.2 EXPERIMENTOS PARA A ABORDAGEM DE CALIBRAÇÃO COM DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DO DESALINHAMENTO ENTRE OS SENSORES

Os experimentos e resultados apresentados nesta seção referem-se a uma solução com base no princípio físico do registro fotográfico capturado pela câmara FPI2015: a calibração com determinação simultânea do desalinhamento entre os sensores.

Como já mencionado, a calibração de câmaras tradicional é um problema mal-condicionado, e a inserção de mais parâmetros no sistema torna ainda mais difícil uma

solução adequada. Por isso, os experimentos nesta seção foram realizados separadamente, de acordo com cada modificação no modelo matemático, até a obtenção dos resultados com a abordagem completa. É importante ressaltar que todas as calibrações foram feitas no modo autocalibração, com as observações sendo o centro virtual dos alvos, estimados a partir dos cantos.

4.2.1 Calibração com um único centro perspectivo por hipercubo

É sabido do processo de calibração de câmaras que existem correlações entre os parâmetros de orientação interior e exterior, e que as soluções devem ser obtidas de forma que estas correlações sejam minimizadas.

No caso da calibração da câmara hiperespectral FPI2015, o problema se agrava, pois além das correlações anteriormente citadas, há correlações entre os parâmetros das distintas bandas, pois fisicamente eles são ou deveriam ser de imagens com a mesma geometria. Essa situação é mais evidente para a posição do centro perspectivo, uma vez que se a câmara no momento da aquisição de um hipercubo estiver absolutamente estática, a posição do seu centro perspectivo deveria ser a mesma para todas as bandas.

Assim sendo, o experimento desenvolvido neste item foi realizar uma mudança na modelagem matemática do problema, de forma que uma posição única do centro perspectivo para as bandas pertencentes ao mesmo hipercubo fosse estimada na calibração.

Desta forma, a solução dos POIs para as diferentes bandas deveria ser obtida em um único processamento. Além do mais, em relação aos ângulos de orientação, considerando a hipótese do desalinhamento entre os sensores, a consideração na modelagem foi de que dois conjuntos de ângulos de orientação deveriam ser estimados por hipercubo, um por sensor, caracterizando assim 9 POEs por hipercubo $(\omega_{s1}, \varphi_{s1}, \kappa_{s1}, \omega_{s2}, \varphi_{s2}, \kappa_{s2}, X_0, Y_0, Z_0)$.

A solução descrita acima foi programada no ambiente *GNU Octave*, sendo o método utilizado para solução do sistema de equações o da minimização dos resíduos pelo método paramétrico por mínimos quadrados. A principal mudança estrutural dos dados em relação ao método tradicional para obtenção dos parâmetros de calibração está nos dados de entrada, pois neste caso ao menos dois novos identificadores são necessários para a solução: identificador do hipercubo e ID da banda.

Na Figura 53 têm-se o padrão do arquivo de observações escolhido para a obtenção das soluções.

Figura 53 – Padrão do arquivo de observações para a calibração proposta

1	1	904.271896	68.55643	0.5	0.5	1	2
2	1	918.480453	65.925048	0.5	0.5	1	2
6	1	103.902622	75.679713	0.5	0.5	1	2
2	2	827.199845	58.156465	0.5	0.5	1	2
4	2	907.909515	146.010733	0.5	0.5	1	2
6	2	104.186655	230.826573	0.5	0.5	1	2
14	2	933.469559	52.57847	0.5	0.5	1	2
1	3	696.028366	60.744921	0.5	0.5	1	2
2	3	730.999924	50.625702	0.5	0.5	1	2
4	3	843.060791	99.811757	0.5	0.5	1	2

O vetor dos parâmetros ajustados é dado pela Equação 4.1, em que i corresponde ao número de bandas, j ao número de hipercubos e k ao número de pontos no espaço objeto.

$$X_a^T = \begin{bmatrix} \omega_1^{s1} \varphi_1^{s1} \kappa_1^{s1} \omega_1^{s2} \varphi_1^{s2} \kappa_1^{s2} X_{01} Y_{01} Z_{01} & \dots & \omega_j^{s1} \varphi_j^{s1} \kappa_j^{s1} \omega_j^{s2} \varphi_j^{s2} \kappa_j^{s2} X_{0j} Y_{0j} Z_{0j} \\ X_1 Y_1 Z_1 & \dots & X_k Y_k Z_k \\ f_1 x_{01} y_{01} k_{11} k_{21} k_{31} P_{11} P_{21} & \dots & f_i x_{0i} y_{0i} k_{1i} k_{2i} k_{3i} P_{1i} P_{2i} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Em síntese, os parâmetros obtidos nesta calibração foram: 22 conjuntos de POEs (9 parâmetros por conjunto (hipercubo)), 25 conjuntos de POIs (8 parâmetros por conjunto (banda)) e 42 pontos do espaço objeto. Essa situação levou à utilização de 17.872 pontos medidos em imagem, resultando em 35.744 observações. O total de parâmetros estimados foi de 524. Vale ressaltar que as mesmas imagens, e, portanto, as mesmas observações das calibrações anteriores foram usadas nesta calibração.

A seguir, nas Figuras 54 e 55, têm-se os resultados obtidos em sobreposição aos resultados obtidos nos processamentos banda a banda. As Figuras 54 e 55 correspondem respectivamente aos resultados obtidos para distância focal (Fig. 54.a) e posição do ponto principal (Fig. 54.b), e, distorção radial simétrica (Fig. 55.a) e distorção descentrada (Fig. 55.b). A unidade de peso a posteriori obtida na calibração foi de 0,61 pixels.

Figura 54 – Resultados da calibração considerando um único CP por hipercubo. a) Distância focal. b) Posição do ponto principal.

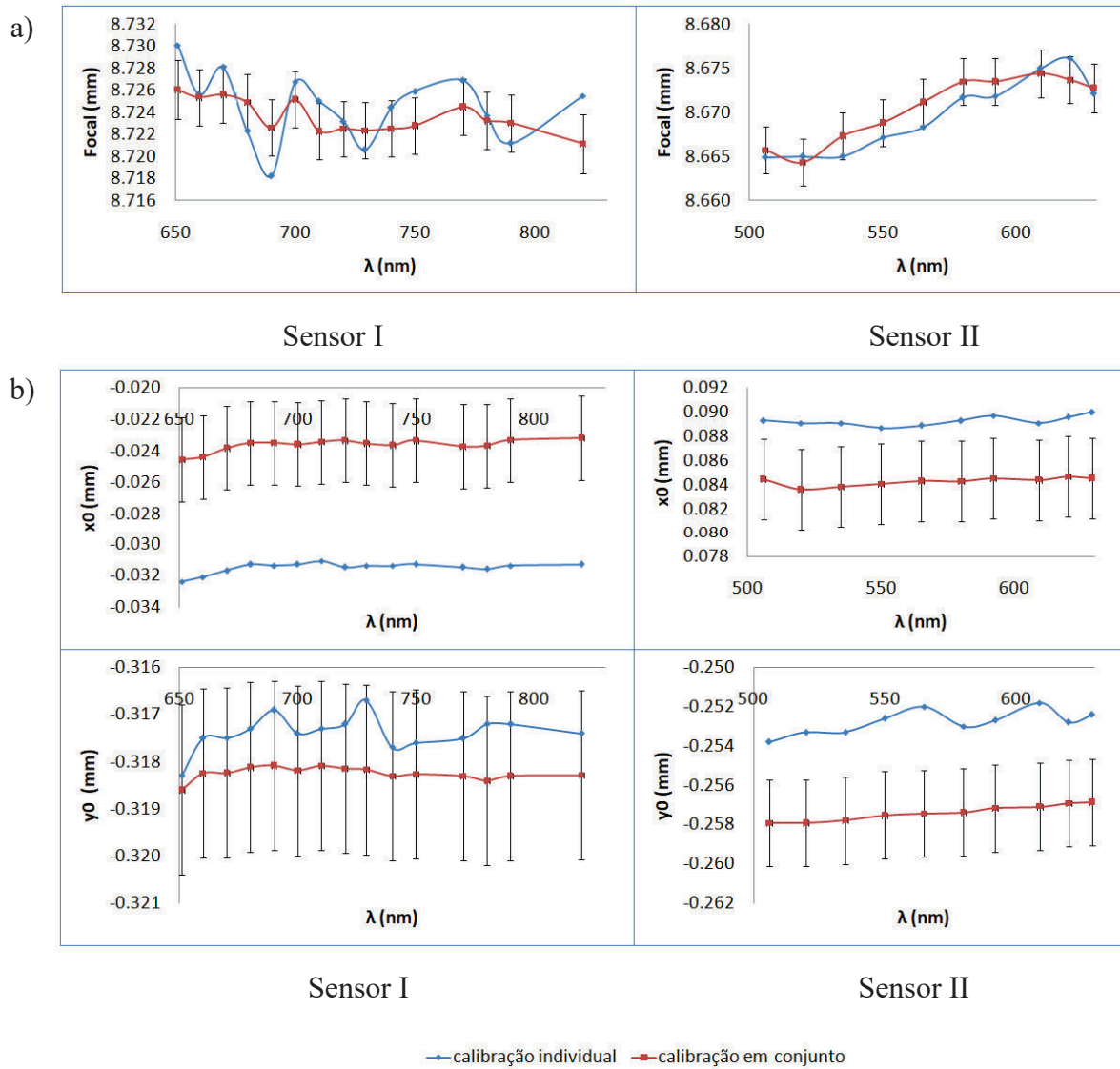
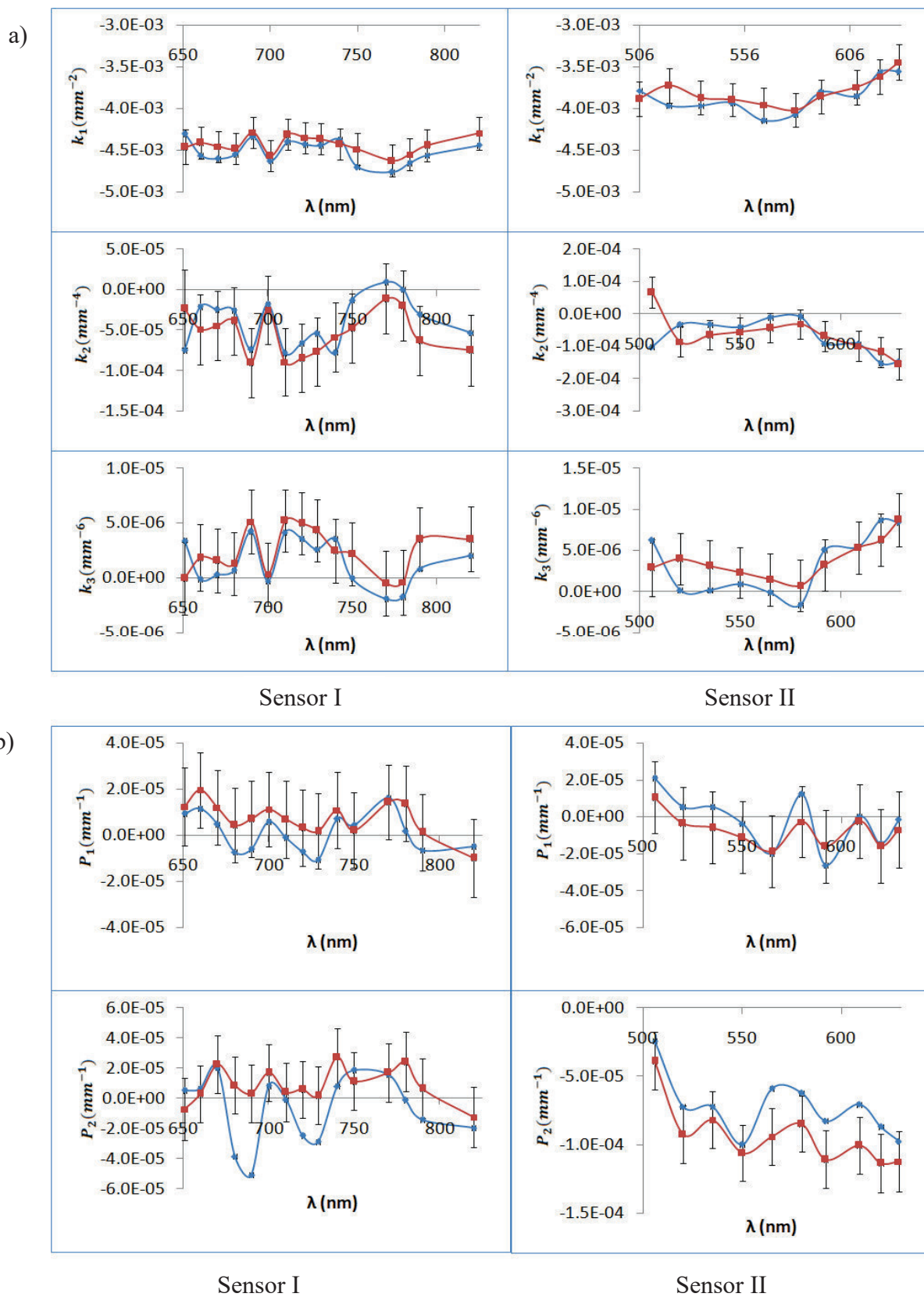


Figura 55 – Resultados da calibração considerando um único CP por hipercubo. a) Distorção radial simétrica. b) Distorção descentrada



Os resultados obtidos mostraram uma maior regularidade nos valores dos parâmetros quando comparados com a calibração individual. Essa constatação é observada de maneira clara nos gráficos referentes às componentes do ponto principal, no qual é possível identificar um comportamento bastante similar dos parâmetros nas diferentes bandas, o que indica que um valor médio seria suficiente para sua representação.

Em relação à distância focal, observou-se uma redução clara das diferenças dos valores entre os parâmetros quando analisados dados de um mesmo sensor, além de ter evidenciado o comportamento de variação linear deste parâmetro em função do comprimento de onda. Contudo, os parâmetros continuaram com valores totalmente distintos quando a comparação levou em consideração os diferentes sensores. Isso novamente evidencia o desalinhamento entre eles, causa primária destas diferenças.

Uma vez que nesta calibração foram estimados dois ângulos de orientação por hipercubo, um para cada sensor, o desalinhamento entre os sensores pôde ser determinado de maneira indireta, como realizado no capítulo anterior, obtendo-se os seguintes valores médios: $\Delta\omega = 0,2274^\circ \pm 0,018^\circ$, $\Delta\varphi = -0,07917^\circ \pm 0,014^\circ$ e $\Delta\kappa = 0,021229^\circ \pm 0,019^\circ$. Os valores obtidos foram usados para realizar a mesma transformação aplicada anteriormente, resultando na redução do REQm das discrepâncias originais para 16,5 pixels para coluna e 1,0 pixels para linhas.

Os resultados acima mostraram uma redução significativa do desalinhamento, pois minimizou as discrepâncias das coordenadas em nível do pixel para a componente Linha. Contudo, para a componente Coluna, basicamente não houve redução com os valores utilizados. Esse resultado levou novamente à consideração de que existam alta correlações entre os parâmetros estimados, pois a solução não permitiu determinar valores de desalinhamento precisos.

4.2.2 Calibração com a determinação de um único conjunto de POI para FPI2015

Como salientado, além das correlações existentes entre POEs e POIs na calibração tradicional, no caso da calibração da câmara FPI2015, determinando-se um conjunto de POI por banda, é esperado que haja também correlação entre os POIs estimados para as diferentes bandas.

Tendo em vista esta constatação, outra mudança na modelagem matemática do problema foi proposta, mas desta vez para avaliar o uso de um único conjunto de POI para câmara, exceto a distância focal, que como visto, é aparentemente influenciada pela variação do *air-gap*.

Assim sendo, nesta calibração a consideração inicial foi a mesma da seção anterior, ou seja, um conjunto de 9 POEs por hipercubo. No entanto, desta vez, um único conjunto de POIs foi considerado para a câmara, a não ser para a distância focal que foi estimada por banda. Na equação 4.2 têm-se o vetor dos parâmetros ajustados obtidos nesta calibração.

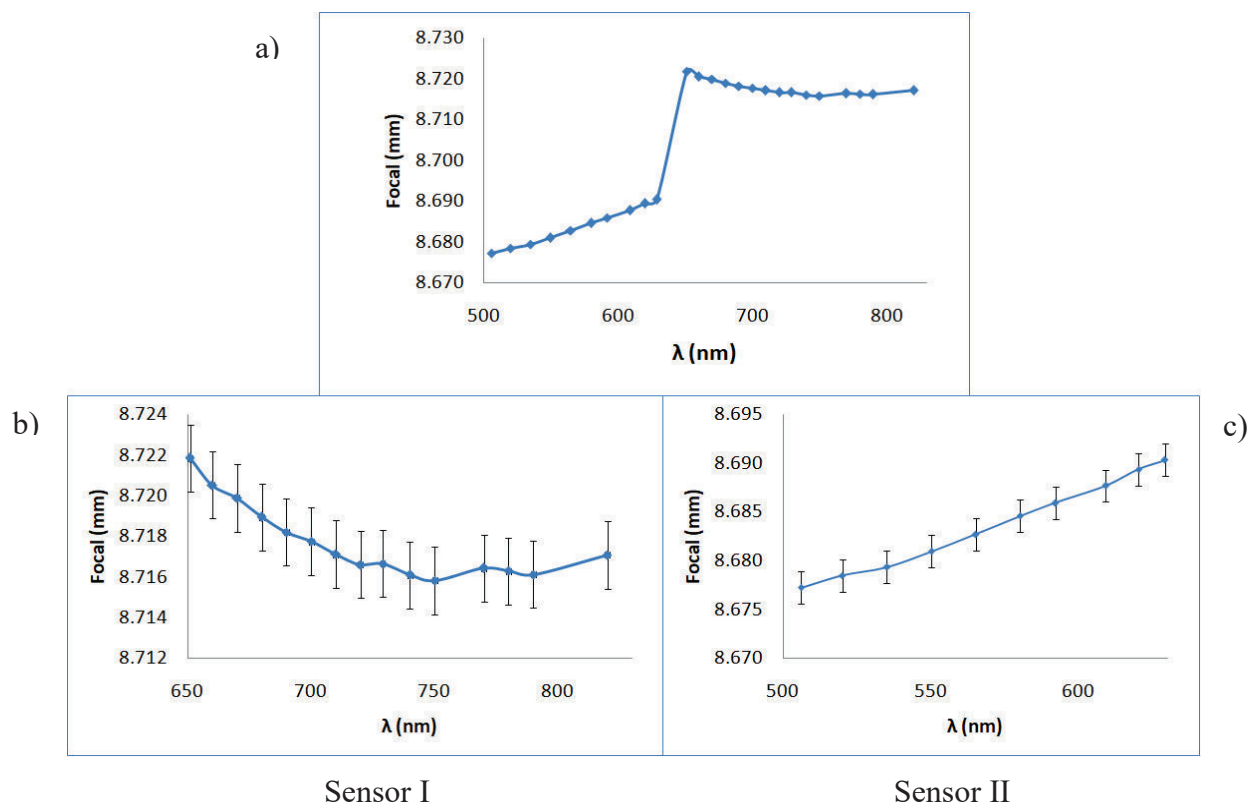
$$X_a^T = \begin{bmatrix} \omega_1^{s1} \varphi_1^{s1} \kappa_1^{s1} \omega_1^{s2} \varphi_1^{s2} \kappa_1^{s2} X_{01} Y_{01} Z_{01} \dots \omega_j^{s1} \varphi_j^{s1} \kappa_j^{s1} \omega_j^{s2} \varphi_j^{s2} \kappa_j^{s2} X_{0j} Y_{0j} Z_{0j} \\ X_1 Y_1 Z_1 \dots X_k Y_k Z_k \\ f_1 f_2 f_3 \dots f_i x_0 y_0 k_1 k_2 k_3 P_1 P_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A seguir, na Tabela 5 e na Figura 56, têm-se os resultados obtidos com a calibração descrita.

Tabela 5 – Resultados da calibração com determinação de um conjunto de POI para a câmara

Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
$x_0 (mm)$	0,0226	0,0026
$y_0 (mm)$	-0,2850	0,0007
$k_1 (mm^{-2})$	-4,0984E-03	5,4108E-05
$k_2 (mm^{-4})$	-9,6869E-05	1,1526E-05
$k_3 (mm^{-6})$	5,4669E-06	7,7920E-07
$P_1 (mm^{-1})$	-1,5422E-06	5,2026E-06
$P_2 (mm^{-1})$	-3,2843E-05	8,0328E-06

Figura 56 – Resultados para distância focal da calibração com determinação de um conjunto de POI para a câmara. a) Para os dois sensores; b) Para o sensor I; e c) Para o sensor II.



Os resultados da calibração apresentada se mostraram consistentes, pois os desvios-padrão de cada parâmetro foram suficientemente pequenos em relação a seu próprio valor. Além disso, o peso à posteriori foi de 0,65 pixels, compatível também com a precisão das observações. No que se refere às distâncias focais estimadas, foi possível, desta vez com maior clareza, perceber a relação quase que linear delas em relação ao comprimento de onda, que foi comprovada pelos valores obtidos de R^2 , valores estes de 0,64 e 0,99 para o Sensor I e II, respectivamente.

Da mesma forma apresentada na calibração anterior, os ângulos de desalinhamento foram determinados indiretamente, obtendo-se os seguintes valores: $\Delta\omega = 0,62574^\circ \pm 0,019^\circ$, $\Delta\varphi = -0,2868^\circ \pm 0,015^\circ$ e $\Delta\kappa = 0,0077^\circ \pm 0,018^\circ$. A transformação aplicada neste caso reduziu o REQm das discrepâncias para coluna em 0.80 pixels e para linha em 0.89 pixels. Esse resultado reforça a tese da correlação entre os POIs das distintas bandas, bem como valida, de certa forma, a hipótese do desalinhamento entre os sensores.

4.2.3 Calibração com a determinação da focal como função do comprimento de onda

Como foi visto na calibração anterior, a variação da distância focal da câmara nas distintas bandas para um mesmo sensor apresenta um comportamento bem próximo ao linear em relação ao comprimento de onda. Neste sentido, uma das etapas da proposta desta pesquisa é a inserção dos parâmetros de uma função linear (equação da reta) nas equações de colinearidade com parâmetros adicionais, e, realizar a sua determinação com os demais parâmetros.

Apesar dos resultados anteriores indicarem a relação linear descrita acima, viu-se que esta relação não é única para todas as bandas, e sim, diferente para as bandas dos dois sensores.

Neste sentido, para validar esta “etapa” da proposta, foi realizada a calibração em separado para cada um dos sensores, determinando primeiramente os parâmetros convencionais. Posteriormente, foi feita a calibração usando os mesmo dados de entrada, estimando os parâmetros da função linear da distância focal em relação ao comprimento de onda.

A solução adotada para a estimação dos parâmetros foi o método paramétrico por mínimos quadrados, sendo o vetor de parâmetros estimados, para o caso em que se estimam os parâmetros da função da distância focal, representado pela Equação 4.3.

$$X_a^T = \begin{bmatrix} \omega_1 & \varphi_1 & \kappa_1 & X_{01}Y_{01}Z_{01} & \dots & \omega_j & \varphi_j & \kappa_j & X_{0j}Y_{0j}Z_{0j} \\ & & & X_1Y_1Z_1 & \dots & & & & X_kY_kZ_k \\ & & & a & b & x_0 & y_0 & k_1 & k_2 & k_3 & P_1 & P_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A seguir, têm-se os resultados para a calibração convencional por sensor (determinação de f , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , P_1 e P_2) e a calibração proposta (a , b , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , P_1 e P_2). Para as calibrações do Sensor II foram usados pontos medidos em 220 imagens, 22 para cada banda, num total de 10.964 pontos, ou seja, 21.928 observações. Para o Sensor I foram usados os pontos medidos em 330 imagens, totalizando 6.551 pontos, 13.102 observações. Vale salientar que foi considerado apenas um conjunto de POE por hipercubo, ou seja, 22 conjuntos de POEs. O fator de variância a priori para todos os processos de calibração foi considerado igual a 1.

Os POI estimados com a calibração convencional para o Sensor I e II são apresentados na Tabela 6. Os resultados da calibração com determinação dos parâmetros da distância focal para o Sensor I e II são apresentados na Tabela 7. Na Figura 57, têm-se os resultados da aplicação dos parâmetros da função linear nos correspondentes comprimentos de onda de cada banda espectral.

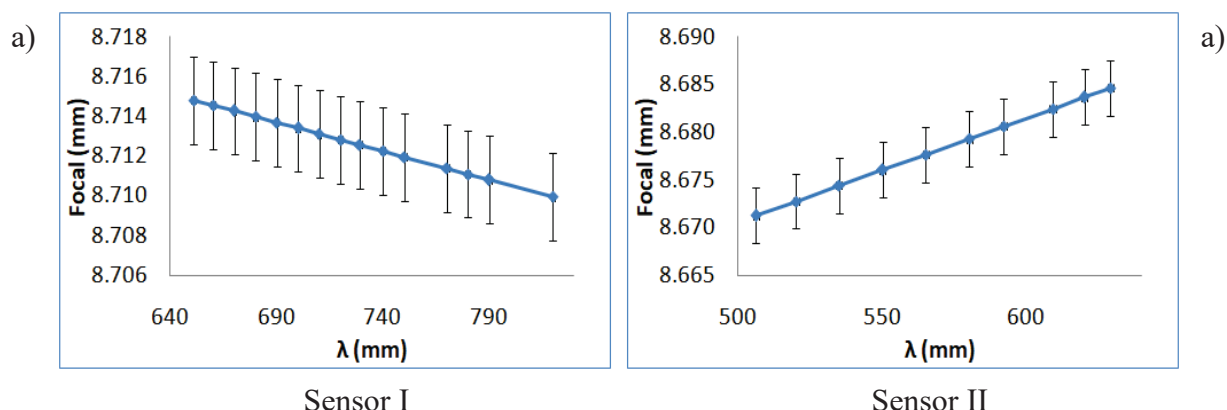
Tabela 6 – POI estimados na calibração convencional por sensor

Sensor II			Sensor I		
Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão	Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
$f(mm)$	8,6699	0,0028	$f(mm)$	8,7232	0,0019
$x_0(mm)$	0,0905	0,0044	$x_0(mm)$	-0,0318	0,003
$y_0(mm)$	-0,2578	0,003	$y_0(mm)$	-0,3171	0,002
$k_1(mm^{-2})$	-3,69E-03	8,84E-05	$k_1(mm^{-2})$	-4,45E-03	6,17E-05
$k_2(mm^{-4})$	-8,28E-05	1,91E-05	$k_2(mm^{-4})$	-5,40E-05	1,32E-05
$k_3(mm^{-6})$	3,25E-06	1,31E-06	$k_3(mm^{-6})$	2,60E-06	9,01E-07
$P_1(mm^{-1})$	3,22E-06	2,26E-05	$P_1(mm^{-1})$	1,80E-06	1,52E-05
$P_2(mm^{-1})$	-1,06E-04	1,71E-05	$P_2(mm^{-1})$	9,53E-06	1,15E-05
Sigma Posteriori (pixels)		0,655	Sigma Posteriori (pixels)		0,603

Tabela 7 – POI estimados na calibração com focal variável por sensor

Sensor II			Sensor I		
Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão	Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
a	1.09E-04	2,51E-06	a	-2,87E-05	1,61E-06
$b(mm)$	8.609	0,0029	$b(mm)$	8,7438	0,0022
$x_0(mm)$	0.0874	0,0041	$x_0(mm)$	-0,0306	0,003
$y_0(mm)$	-0.2601	0,0028	$y_0(mm)$	-0,3173	0,002
$k_1(mm^{-2})$	-3.73E-03	8,25E-05	$k_1(mm^{-2})$	-4,45E-03	6,12E-05
$k_2(mm^{-4})$	-7.66E-05	1,78E-05	$k_2(mm^{-4})$	-5,54E-05	1,31E-05
$k_3(mm^{-6})$	2.87E-06	1,22E-06	$k_3(mm^{-6})$	2,72E-06	8,94E-07
$P_1(mm^{-1})$	-4.99E-07	2,08E-05	$P_1(mm^{-1})$	1,52E-06	1,51E-05
$P_2(mm^{-1})$	-1.01E-04	1,59E-05	$P_2(mm^{-1})$	9,95E-06	1,15E-05
Sigma Posteriori (pixels)		0,603	Sigma Posteriori (pixels)		0,603

Figura 57 – Distâncias focais interpoladas como função linear do comprimento de onda.



O que se pôde constatar dos resultados, comparando as duas calibrações por sensor, foi que houve uma pequena diferença na estimação dos parâmetros, justificada pela inserção de mais parâmetros no modelo matemático para o caso da função linear da distância focal (em relação a calibração por sensor). Em relação aos parâmetros da distância focal, observa-se que eles foram estimados com desvio-padrão compatíveis com os seus valores estimados, além dos gráficos apresentarem inclinação, que caracteriza a relação linear.

Vale salientar que se comparados os valores estimados nesta seção, com aqueles estimados na seção anterior, percebe-se uma diferença significativa em termos de valor dos parâmetros estimados. Todavia, essa diferença é justificável, pois o caso anterior se trata de uma calibração completa, envolvendo uma relação geométrica entre os dois sensores, enquanto os resultados desta seção são de uma abordagem separada por sensor. Neste caso, o desalinhamento dos sensores é refletido nos parâmetros estimados para os diferentes sensores.

4.2.4 Calibração com determinação indireta do desalinhamento entre os sensores e parâmetros da função linear da distância focal

Os resultados obtidos nas subseções 4.2.2 e 4.2.3 são de certa forma, aqueles esperados na calibração da câmara FPI2015, no entanto obtidos em processos separados.

Desta maneira, a calibração proposta nesta subseção é a junção das calibrações anteriormente citadas, ou seja, a calibração que permite a determinação indireta do

desalinhamento entre os sensores, bem como a determinação de maneira simultânea dos parâmetros da função linear da distância focal em relação ao comprimento de onda.

Para avaliar como as três principais considerações das abordagens anteriores se comportariam em um único processo, propôs-se a modelagem do problema fazendo as seguintes proposições: 1) existe uma única posição do CP por hipercubo, ou um único ponto principal; 2) é necessário um conjunto de ângulos de orientação por sensor, ou seja, dois por hipercubo; e 3) a distância focal da câmara é função linear do comprimento de onda, com parâmetros diferentes para cada sensor. Assim como nas calibrações anteriores, a solução do sistema de equações foi obtida pelo método paramétrico, sendo desenvolvido um programa para esta solução em ambiente *GNU Octave*. A seguir, na Equação 4.4 têm-se o vetor dos parâmetros ajustados para o experimento em questão.

$$X_a^T = \begin{bmatrix} \omega_1^{s1} \varphi_1^{s1} \kappa_1^{s1} \omega_1^{s2} \varphi_1^{s2} \kappa_1^{s2} X_{01} Y_{01} Z_{01} \dots \omega_j^{s1} \varphi_j^{s1} \kappa_j^{s1} \omega_j^{s2} \varphi_j^{s2} \kappa_j^{s2} X_{0j} Y_{0j} Z_{0j} \\ X_1 Y_1 Z_1 \dots X_k Y_k Z_k \\ a_{s1} b_{s1} a_{s2} b_{s2} x_0 y_0 k_1 k_2 k_3 P_1 P_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Esta modelagem pode ser considerada uma versão compatível com a da proposta desta pesquisa, no entanto, realizando a determinação não simultânea do desalinhamento entre os sensores. Na Tabela 8 têm-se os resultados obtidos com a modelagem descrita. Na Tabela 9, têm-se os ângulos de desalinhamento estimados indiretamente por meio dos POEs de cada hipercubo. Na Figura 58, têm-se o resultado gráfico da aplicação dos parâmetros da função linear da distância focal para a sua determinação.

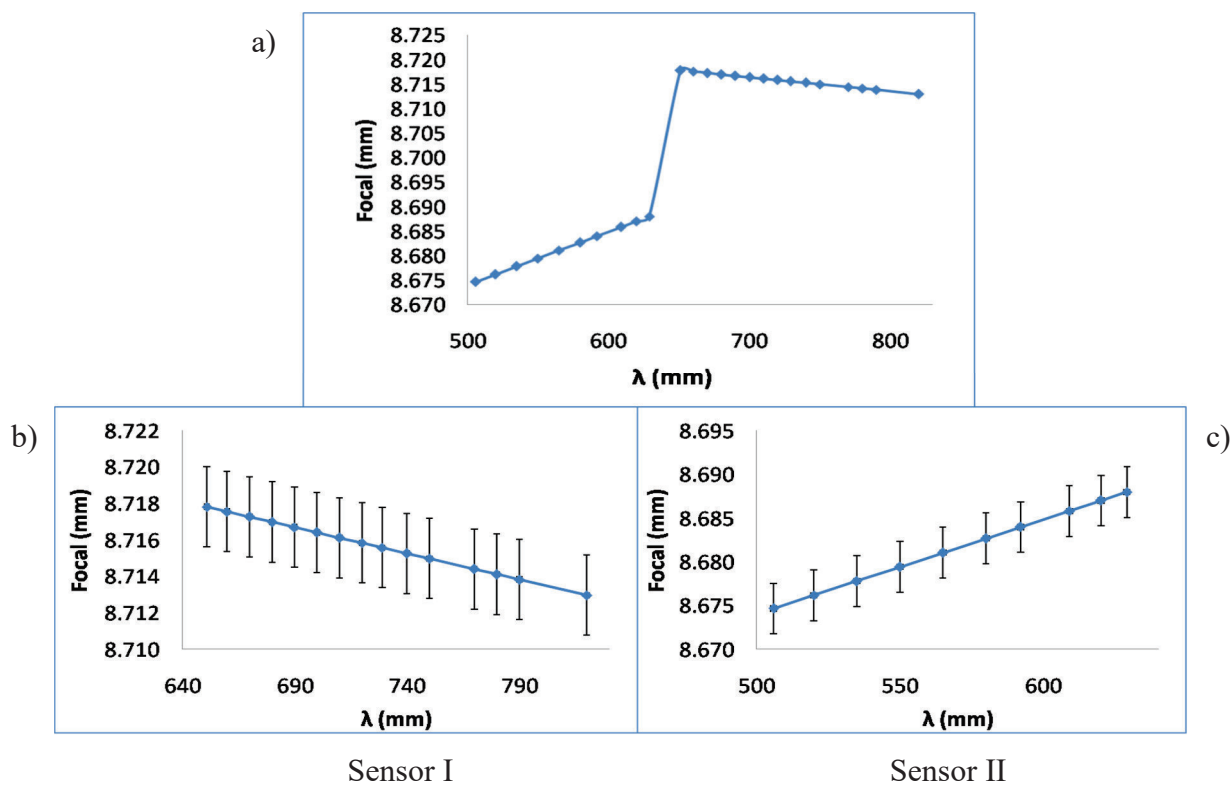
Tabela 8 – POI estimados na calibração com focal variável – Sensor II

Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
a_2	1,08E-04	2,70E-06
$b_2 (mm)$	8,6199	0,0022
$x_0 (mm)$	0,0139	0,0027
$y_0 (mm)$	-0,2956	0,0019
$k_1 (mm^{-2})$	-4,14E-03	5,24E-05
$k_2 (mm^{-4})$	-8,71E-05	1,11E-05
$k_3 (mm^{-6})$	4,77E-06	7,55E-07
$P_1 (mm^{-1})$	-1,57E-06	1,39E-05
$P_2 (mm^{-1})$	-2,15E-05	1,03E-05
a_1	-2,87E-05	1,76E-06
$b_1 (mm)$	8,7365	0,0021
Sigma Posteriori		0,656

Tabela 9 – POI estimados na calibração com focal variável – Sensor II

Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
$\Delta\omega (^\circ)$	0,626128	0,018846
$\Delta\phi (^\circ)$	-0,2871	0,01456
$\Delta\kappa (^\circ)$	0,007783	0,018211

Figura 58 – Distância focal como função linear do comprimento de onda. a) Para os dois sensores; b) Para o sensor I; e c) Para o sensor II.



O uso dos valores estimados de desalinhamento na transformação entre coordenadas de diferentes sensores, como anteriormente realizado, reduziu o REQM das discrepâncias a 0,79 pixels em Coluna e 0,89 em Linhas. Isso mostra, novamente, que esta solução é viável na calibração da câmara FPI2015 usando dados de todas as bandas, principalmente tendo em vista o valor obtido para a unidade de peso à posteriori e a compatibilidade dos POIs e seus respectivos desvios-padrão.

4.2.5 Calibração com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores

As calibrações realizadas do item 4.2.1 a 4.2.4 foram realizadas para justificar a proposta principal desta pesquisa: a determinação simultânea do desalinhamento entre os sensores.

Desta forma, nesta subseção foi aplicada a modelagem descrita na metodologia deste trabalho, no qual em um mesmo modelo matemático são estimados: 1) únicos POEs por hipercubo; 2) único conjunto de POI para a câmara que incluem os ângulos de desalinhamento entre os sensores; e 3) os parâmetros da função linear entre a distância focal e o comprimento de onda por sensor.

Na Equação 4.5 têm-se o vetor dos parâmetros ajustados para abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre os sensores.

$$X_a^T = \begin{bmatrix} \omega_1 & \varphi_1 & \kappa_1 & X_{01} & Y_{01} & Z_{01} & \dots & \omega_j & \varphi_j & \kappa_j & X_{0j} & Y_{0j} & Z_{0j} \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & \dots & X_k & Y_k & Z_k \\ a_{s1} & b_{s1} & a_{s2} & b_{s2} & x_0 & y_0 & k_1 & k_2 & k_3 & P_1 & P_2 & \Delta\omega & \Delta\varphi & \Delta\kappa \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Resumidamente, os POI determinados nesta abordagem foram $a_1, b_1, a_2, b_2, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, \Delta\omega, \Delta\varphi$ e $\Delta\kappa$. A seguir (Tabela 10) têm-se os valores dos POIs estimados na calibração em questão.

Na Figura 59 têm-se o resultado gráfico da aplicação dos parâmetros da função linear da distância focal para os comprimentos de onda de cada banda usada na calibração. Na Figura 60 têm-se uma visualização gráfica da orientação dos resíduos considerando um fator de escala de 30 vezes. Na Figura 61 a e b, têm-se,

respectivamente, um gráfico de barras que mostra os resíduos, em coluna e linha, respectivamente.

Tabela 10 – POI estimados para a abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores

Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
a_2	1,09E-04	3,29E-06
b_2 (mm)	8,6161	0,0027
x_0 (mm)	0,012	0,0033
y_0 (mm)	-0,2955	0,0023
k_1 (mm ⁻²)	-4,04E-03	6,38E-05
k_2 (mm ⁻⁴)	-1,01E-04	1,36E-05
k_3 (mm ⁻⁶)	5,47E-06	9,20E-07
P_1 (mm ⁻¹)	-5,42E-06	1,72E-05
P_2 (mm ⁻¹)	-3,65E-05	1,28E-05
a_1	-2,89E-05	2,15E-06
b_1 (mm)	8,7336	0,0025
$\Delta\omega$ (°)	0,629165	0,00023
$\Delta\phi$ (°)	-0,2851	0,00023
$\Delta\kappa$ (°)	-0,01301	0,00115
Sigma Posteriori (pixel)		0,804

Figura 59 – Distância focal como função linear do comprimento de onda (abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre os sensores). a) Para os dois sensores; b) Para o sensor I; e c) Para o sensor II.

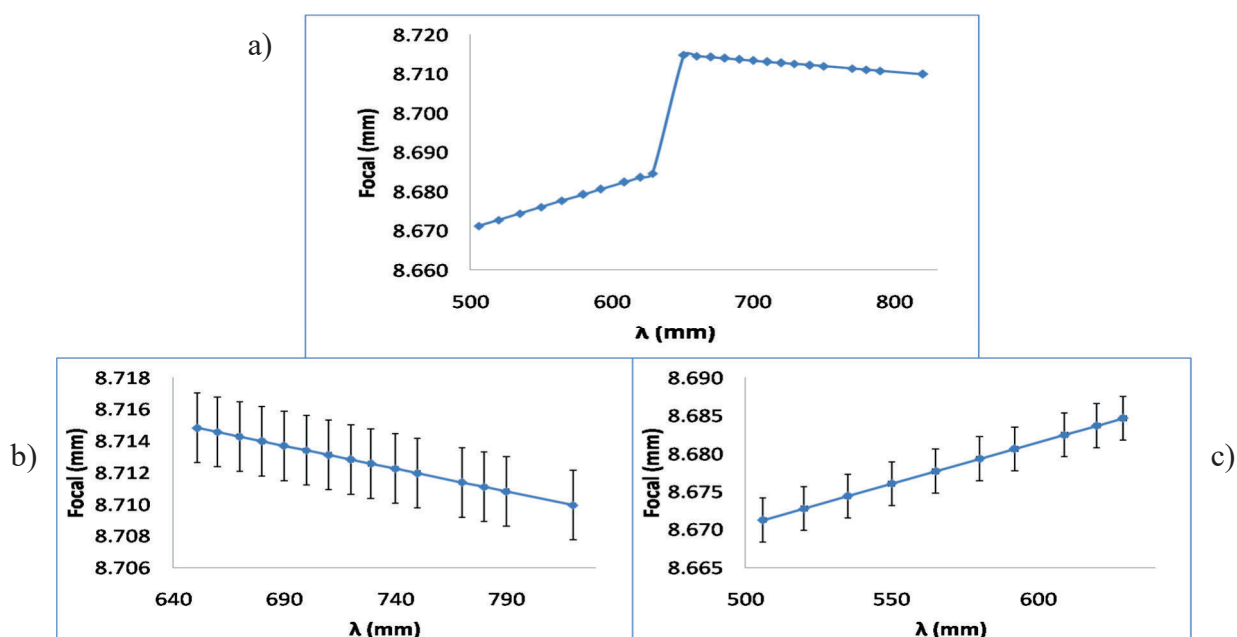


Figura 60 – Orientação dos resíduos

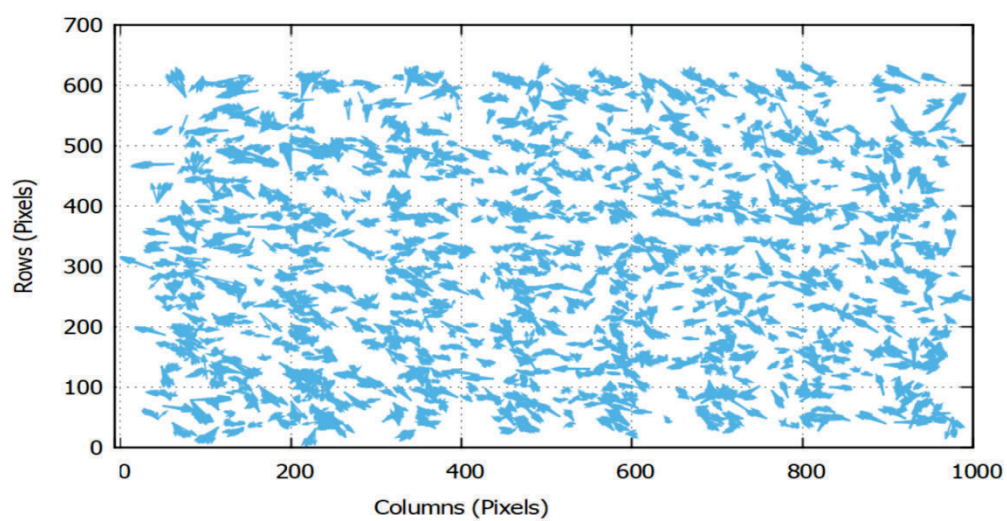
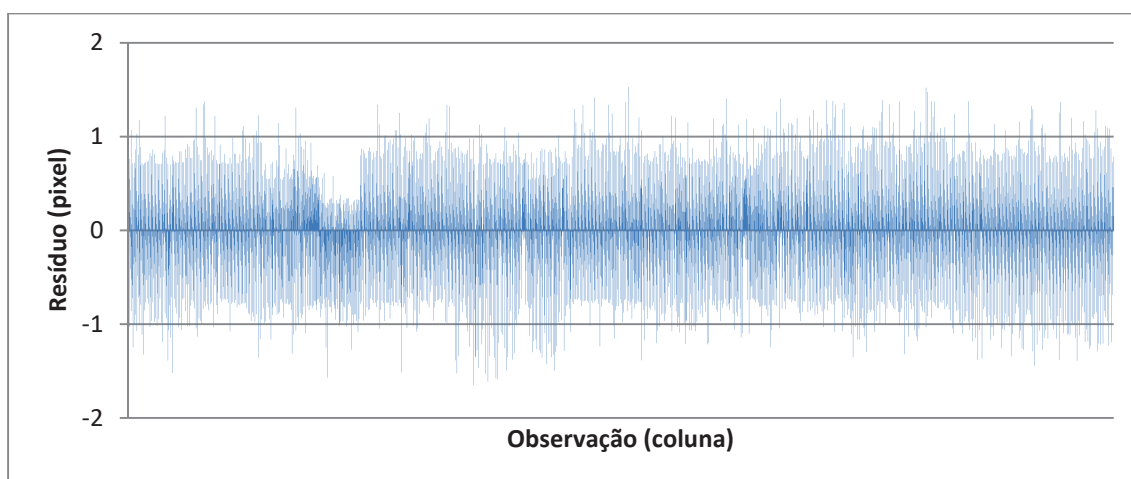
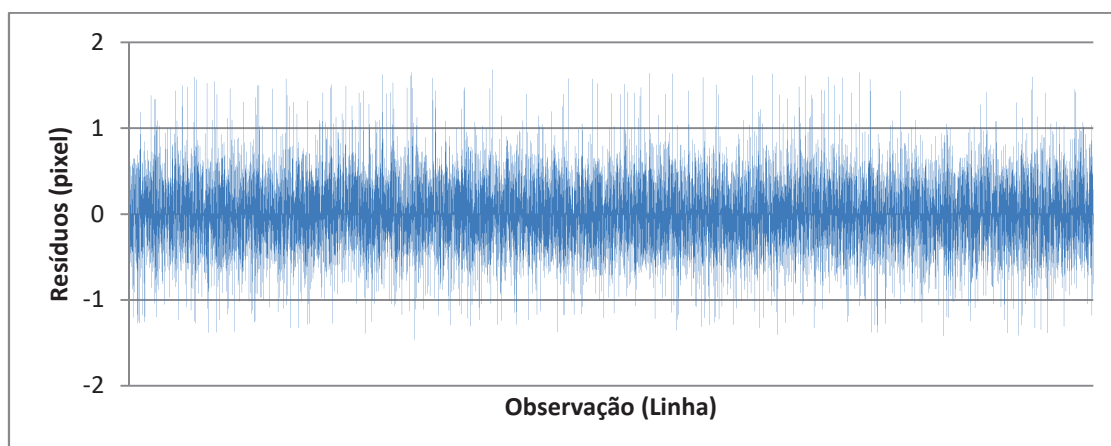


Figura 61 – Magnitude dos resíduos. a) Observável coluna. b) Observável linha

a)



b)



A aplicação dos valores de desalinhamento na transformação entre observações de diferentes sensores reduziu o valor do REQM das discrepâncias a 0,71 pixels em coluna e 0,83 pixels em linha. O resultado mostrou uma melhora em relação à aplicação dos parâmetros determinados de maneira indireta, justificada pela própria determinação dos valores e da precisão obtida na determinação simultânea. Em relação aos resíduos, observa-se o comportamento aleatório deles por meio da Figura 61, o que indica a inexistência de grandes erros sistemáticos. É importante também verificar que a unidade de peso à posteriori apresentou um aumento, em relação aos testes anteriores, mas que pode ser justificada pela própria modelagem do problema, uma vez que o desalinhamento nesta abordagem é inserido no problema na forma de incógnita.

4.2.6 Validação dos POIs estimados

Para a validação da abordagem proposta, foi realizado um experimento com um sobrevoo em uma das áreas de estudo do projeto UAV_4D_BIO com o VANT octóptero SX8.

Este VANT foi desenvolvido por uma empresa parceira com alumínio e fibra de carbono, garantindo uma estrutura leve. Testes realizados garantiram que o VANT pode voar por 30 minutos com uma carga útil de 5 kg. O VANT octóptero (Fig. 62) foi equipado com a câmara FPI2015 e um receptor GNSS de dupla frequência (Novatel SPAN-IGM) para adquirir um conjunto de imagens aéreas na forma de um bloco fotogramétrico.

A área de voo se localiza na fazenda Ponte Branca, na cidade de Euclides da Cunha Paulista/SP. Refere-se a uma área remanescente da mata atlântica Brasileira, situada na região do Pontal do Paranapanema, no estado de São Paulo. A seguir têm-se uma imagem da região do sobrevoo (Fig. 63.a) e uma imagem capturada pela câmara FPI/2015, onde podem ser visualizados os pontos de apoio e verificação usados na fototriangulação (Fig. 63.b).

Figura 62 – VANT octóptero SX8

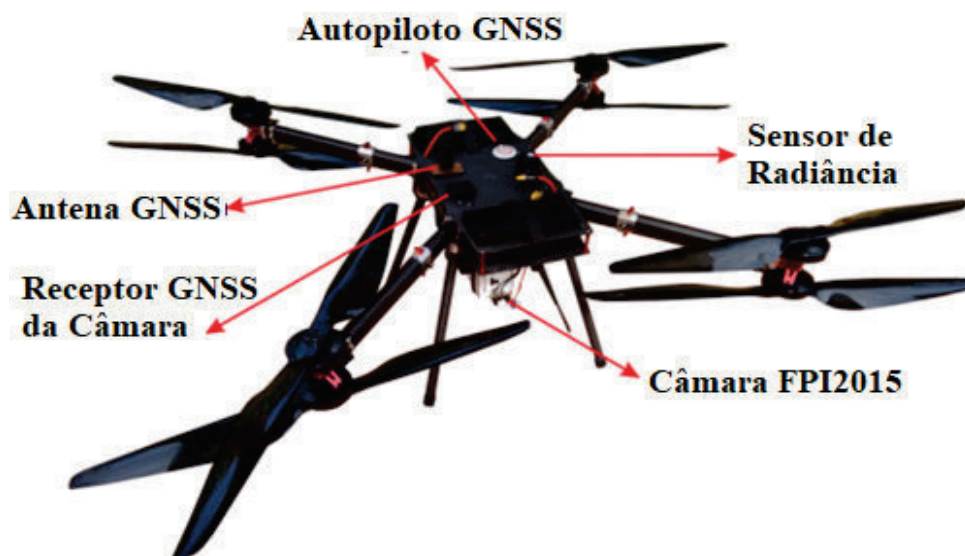
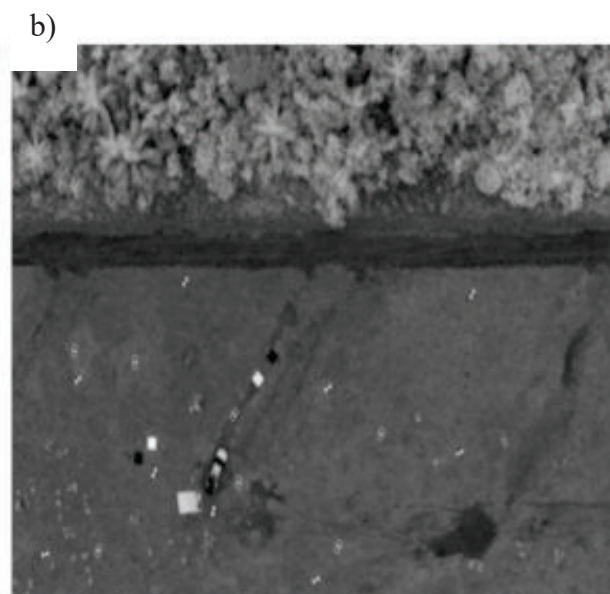


Figura 63–a) Região do voo teste; b) Imagem aérea adquirida pela câmara FPI/2015 embarcada em um VANT



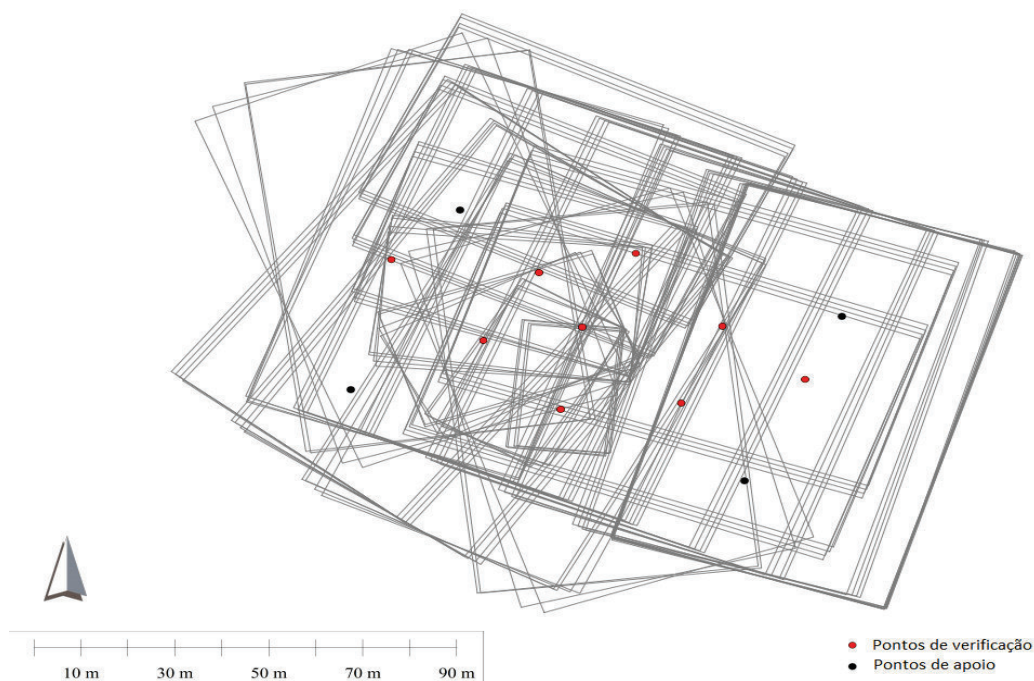
Do grupo de 25 bandas adquiridas, foram selecionadas 4 bandas de cada hipercubo para serem utilizadas no ajuste do bloco: banda 1 e 10 do Sensor II e banda 11 e 25 do Sensor I. Neste sentido, um bloco com 22 hipercubos (com 4 imagens espectrais para cada hipercubo), 317 pontos de ligação, 4 pontos de apoio e 9 pontos de verificação foi ajustado. O valor da variância a priori foi definido como 1.

A altura do voo foi de 150 metros e a velocidade média da aeronave era de 4 m/s, alcançando assim um GSD de 10 cm. A sobreposição longitudinal foi de 80% e a

lateral de 60%. O tempo de integração para a aquisição das diferentes bandas foi ajustado para 10 ms, e com essa configuração, a diferença no tempo de aquisição da primeira para a última faixa espectral do mesmo hipercubo foi de 0,899 s. Os pontos de controle e verificação foram sinalizados por meio de alvos artificiais distribuídos pela área de sobrevoo. As coordenadas dos pontos de apoio e dos pontos de verificação foram medidas diretamente por receptores GNSS de dupla frequência. Um receptor GNSS de dupla frequência também foi utilizado como estação base na área e foi utilizado tanto para o levantamento dos pontos de apoio, quanto para a determinação da trajetória de voo com posicionamento cinemático.

O ajuste do bloco foi realizado com o software desenvolvido internamente CMC. Os pontos de ligação foram primeiramente extraídos com *Agisoft Photoscan* e importados no formato CMC. As fotocoordenadas dos pontos de apoio e de verificação foram medidas nas imagens de forma interativa. As coordenadas dos pontos de apoio foram inseridas como restrições ponderadas com um desvio padrão de 2 cm. As coordenadas do centro de perspectiva de cada imagem também foram inseridas como restrições ponderadas com um desvio padrão de 30 cm, uma vez que foram medidas com um receptor GNSS no modo cinemático. Na Figura 64 tem-se o bloco fotogramétrico utilizado nos processamentos desenvolvidos. Nela podem ser observados os 4 pontos de apoio e os 9 pontos de verificação usados para validar os resultados.

Figura 64 - Bloco fotogramétrico



Os POIs estimados em cada uma das calibrações do item 4.2.1 a 4.2.4 foram usados para realizar a fototriangulação do bloco. Para identificação dos testes, a seguinte nomenclatura foi utilizada:

- Calib_1 – POIs estimados na calibração por banda com CMC;
- Calib_2 – POIs estimados na calibração de todas as bandas em um único processamento e determinação indireta do desalinhamento;
- Calib_3 – POIs único para câmara com determinação indireta do desalinhamento, mas com uma distância focal por banda;
- Calib_4 – POIs estimados para o sensor com focal única;
- Calib_5 – POIs estimados para o sensor com a distância focal variável;
- Calib_6 – POIs estimados com a determinação indireta do desalinhamento e focal variável;
- Calib_7 – POIs estimados com a determinação direta dos parâmetros de desalinhamento e focal variável.

Tendo em vista que o bloco inclui observações de diferentes bandas, as fototriangulações foram repetidas considerando cada banda presente, com intuito de analisar as diferenças obtidas. Neste sentido, na Tabela 11 têm-se os resultados obtidos em termos de REQM, considerando os POIs das bandas 1, 10, 11 e 25, seguidamente.

Tabela 11 – POI estimados para a abordagem com determinação simultânea do desalinhamento entre sensores

		REQM_x (m)	REQM_y (m)	REQM_z (m)		REQM Planimetrico (m)	REQM Altimétrico (m)
Banda 1	Calib_1	0,110	0,041	0,206		0,117	0,206
	Calib_2	0,109	0,042	0,195		0,116	0,195
	Calib_3	0,111	0,040	0,185		0,118	0,185
	Calib_4	0,111	0,040	0,205		0,118	0,205
	Calib_5	0,104	0,045	0,139		0,114	0,139
	Calib_6	0,105	0,046	0,149		0,114	0,149
	Calib_7	0,105	0,045	0,159		0,114	0,159
		REQM_x (m)	REQM_y (m)	REQM_z (m)		REQM Planimetrico (m)	REQM Altimétrico (m)
Banda 10	Calib_1	0,109	0,041	0,166		0,117	0,166
	Calib_2	0,111	0,040	0,165		0,118	0,165
	Calib_3	0,110	0,041	0,183		0,117	0,183
	Calib_4	0,111	0,041	0,158		0,118	0,158
	Calib_5	0,105	0,046	0,104		0,114	0,104
	Calib_6	0,105	0,046	0,109		0,115	0,109
	Calib_7	0,106	0,045	0,115		0,115	0,115
		REQM_x (m)	REQM_y (m)	REQM_z (m)		REQM Planimetrico (m)	REQM Altimétrico (m)
Banda 11	Calib_1	0,105	0,049	0,188		0,116	0,188
	Calib_2	0,105	0,048	0,163		0,116	0,163
	Calib_3	0,104	0,049	0,153		0,115	0,153
	Calib_4	0,104	0,049	0,160		0,115	0,160
	Calib_5	0,106	0,046	0,153		0,116	0,153
	Calib_6	0,106	0,047	0,138		0,116	0,138
	Calib_7	0,107	0,046	0,132		0,116	0,132
		REQM_x (m)	REQM_y (m)	REQM_z (m)		REQM Planimetrico (m)	REQM Altimétrico (m)
Banda 25	Calib_1	0,104	0,049	0,161		0,115	0,161
	Calib_2	0,105	0,048	0,148		0,115	0,148
	Calib_3	0,104	0,049	0,153		0,115	0,153
	Calib_4	0,104	0,049	0,142		0,115	0,142
	Calib_5	0,106	0,046	0,136		0,115	0,136
	Calib_6	0,106	0,046	0,122		0,116	0,122
	Calib_7	0,106	0,046	0,117		0,116	0,117

De maneira geral, a primeira análise que se pôde fazer foi em relação a componente planimétrica, pois para qualquer que seja a banda, a variação foi praticamente nula, tendo em vista a magnitude do GSD.

Contudo, quando a análise leva em conta a componente altimétrica, vê-se que conforme foram aplicadas as considerações apresentadas nas sub-seções 4.2.1 a 4.2.4, o REQM foi sendo reduzido. Vale destacar ainda os resultados obtidos com as bandas 10 e 25, no qual esse erro se reduziu a aproximadamente 1,1 GSD.

4.3 EXPERIMENTOS PARA A ABORDAGEM COM CORREGISTRO DE BANDAS

A aplicação de uma correção geométrica com base em uma transformação de coordenadas não é uma novidade em Fotogrametria. Na transição entre a Fotogrametria analógica e digital, uma transformação geométrica afim era aplicada para transformar as coordenadas do sistema de referência de máquina (no qual eram realizadas as medidas) para o sistema das marcas fiduciais, e, para o sistema de coordenadas fotogramétrico.

Assim sendo, a seguir são apresentados os experimentos e as análises dos resultados obtidos na aplicação de uma abordagem de calibração com base em uma correção geométrica usando uma transformação entre sistemas de coordenadas: abordagem de refinamento da orientação interior da câmara hiperespectral FPI2015 por meio do corregristo entre as bandas espectrais.

4.3.1 Determinação dos parâmetros de transformação

A proposta desta abordagem é a aplicação de uma transformação projetiva nas distintas bandas capturadas pela câmara FPI2015 em uma banda eleita como referência, para realizar um corregristo entre elas. A transformação projetiva foi escolhida devido as característica do problema: a modelagem da transformação entre dois planos; além de ter sido aquela que apresentou os melhores resultados nos testes apresentados na Seção 3.1.

Como enunciado na metodologia desta proposta, antes das capturas dos hipercubos para calibração (resultados apresentados na Seção 4.1 deste documento) 10 hipercubos com a câmara vertical e estática foram capturados para a determinação dos

parâmetros de transformação entre bandas. O uso dos próprios cubos adquiridos para a calibração pode não apresentar bons resultados na determinação dos parâmetros, uma vez que há uma redução dos números de pontos disponíveis devido à inclinação das imagens.

As coordenadas dos cantos dos alvos foram extraídas para cada imagem espectral e, por meio delas, foram calculadas as fotocoordenadas dos centros geométricos dos alvos. Os parâmetros da transformação projetiva foram estimados por meio da resolução de um sistema de equações redundante pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) aplicando o método paramétrico, realizado por meio de um aplicativo desenvolvido no ambiente GNU *Octave*. A análise da qualidade do ajustamento foi feita verificando se os resíduos obtidos foram compatíveis com a precisão das fotocoordenadas extraídas.

Neste sentido, o conjunto de 10 hipercubos estáticos foi utilizado para determinar os parâmetros da transformação projetiva entre as bandas 1 e 11 e uma banda de referência de cada hipercubo, utilizando todos os centróides de alvos como pontos de controle. A banda 10 e a banda 25 foram usadas como referência para os respectivos sensores (II e I), por serem as últimas bandas da captura sequencial para cada sensor, e por isso, esperam-se as maiores diferenças. Os parâmetros estimados da transformação projetiva são apresentados na Tabela 12, com seus desvios-padrão estimados e a unidade de peso à posteriori. Para a estimação de cada parâmetro de transformação foram utilizadas mais de 800 observações, alcançando unidade de peso a posteriori de aproximadamente 1/7 pixel para bandas do mesmo sensor e 1/4 pixel para bandas de diferentes sensores. Os parâmetros a_3 e a_6 da Tabela 12 são translações, como pode ser visto nas relações da Equação 3.13. Os valores estimados para estes parâmetros são maiores quando as bandas de referência e de medição são de diferentes sensores. Além disso, os valores estimados têm precisão sub-pixel, como pode ser visto a partir dos desvios padrão estimados.

Para analisar os resultados obtidos com a transformação, foram realizados inicialmente testes com as bandas 1 (Sensor II) e banda 25 (Sensor I) por serem de diferentes sensores e com comprimentos de onda muito distintos e, portanto, espera-se que apresentem maiores variações. No entanto, testes também foram realizados com as bandas 11 e 25 (ambas do Sensor I), para analisar os resultados da transformação entre bandas de um mesmo sensor.

As coordenadas de imagem medidas foram então transformadas para as bandas de referência usando os parâmetros estimados. A REQM das discrepâncias é apresentada na Tabela 13 (colunas 4 e 5) para bandas de diferentes sensores (1 e 25) e na Tabela 14 (colunas 4 e 5) para bandas do mesmo sensor (11 e 25). A Tabela 13 (colunas 2 e 3) apresenta a REQM das discrepâncias nas coordenadas de imagem dos pontos correspondentes nas bandas de banda 1 e 25 para os 10 hiperbucos coletados com câmara estática. Pode-se observar que os valores de REQM são muitas vezes maiores que 18 pixels, o que pode ser explicado tanto pelos desalinhamentos entre os dois sensores, quanto pelas mudanças internas dos caminhos dos raios causados pelo FPI.

Tabela 12 – Parâmetro da transformação projetiva estimados

Banda	Referência	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	σ (pixels)
1	10	1,00176	-0,0003	-0,9337	9,1E-05	1,00079	-0,5522	3,2E-07	-7E-07	0,16
	σ	0,00014	0,00011	0,03959	4,4E-05	0,00012	0,02824	1,2E-07	1,6E-07	---
11	10	0,99585	0,00059	20,0928	-0,0004	0,99608	-5,6394	-4E-07	3,5E-07	0,22
	σ	0,00022	0,00016	0,06805	7,6E-05	0,00019	0,05024	1,8E-07	2,5E-07	---
25	10	0,99715	0,00209	19,1014	-0,0004	0,998	-6,0267	-4E-07	2,5E-06	0,24
	σ	0,00021	0,00015	0,05921	6,9E-05	0,00018	0,04386	1,8E-07	2,4E-07	---
1	25	1,00463	-0,0023	-20,107	0,00049	1,00279	5,47513	7,2E-07	-3E-06	0,24
	σ	0,00021	0,00015	0,062	7E-05	0,00018	0,0449	1,8E-07	2,4E-07	---
10	25	1,00284	-0,0021	-19,159	0,00038	1,00198	6,03627	3,6E-07	-3E-06	0,24
	σ	0,00021	0,00015	0,06215	7E-05	0,00018	0,04435	1,8E-07	2,4E-07	---
11	25	0,9995	-0,0006	0,6596	0,00013	0,99942	0,08372	3,1E-07	-6E-07	0,13
	σ	0,00012	7,9E-05	0,03987	4,5E-05	0,00011	0,0301	1E-07	1,4E-07	---

A Tabela 14 (colunas 2 e 3) apresenta a REQM das discrepâncias nas coordenadas de imagem das bandas 11 e 25 (ambas do Sensor I) podendo-se observar que os valores possuem magnitude da ordem sub-pixel, pois são coletados pelo mesmo sensor, e, assim, eles não são afetados pelo desalinhamento dos sensores. No entanto, há deslocamentos sistemáticos, mesmo a REQM sendo sub-pixel (como apresentado na Seção 3.1).

Tabela 13 – REQM (Discrepâncias) entre fotocoordenadas em pixel (bandas de diferentes sensores)

ANTES			DEPOIS		
do corregristo			do corregristo		
Hipercubo	REQM COLUNAS (Pixels)	REQM LINHAS (Pixels)	REQM COLUNAS (Pixels)	REQM LINHAS (Pixels)	
1	18,452	6,489	0,287	0,268	
2	18,14	6,728	0,359	0,228	
3	18,045	6,708	0,238	0,217	
4	18,134	6,865	0,205	0,215	
5	18,018	6,914	0,236	0,226	
6	17,856	6,727	0,253	0,236	
7	18,098	6,934	0,266	0,216	
8	17,895	6,885	0,282	0,245	
9	18,092	6,852	0,272	0,219	
10	17,91	6,895	0,272	0,22	
Média	18,062	6,799	0,267	0,229	

Tabela 14 – REQM (Discrepâncias) entre fotocoordenadas em pixel (bandas do mesmo sensor)

ANTES do corregristo			DEPOIS do corregristo	
Hipercubo	REQM COLUNAS (Pixels)	REQM LINHAS (Pixels)	REQM COLUNAS (Pixels)	REQM LINHAS (Pixels)
1	0,354	0,108	0,234	0,106
2	0,339	0,142	0,2	0,12
3	0,3	0,132	0,14	0,112
4	0,285	0,146	0,161	0,126
5	0,325	0,11	0,168	0,103
6	0,259	0,127	0,137	0,112
7	0,301	0,124	0,13	0,105
8	0,321	0,108	0,14	0,078
9	0,284	0,115	0,138	0,093
10	0,286	0,125	0,116	0,103
Média	0,305	0,124	0,156	0,106

A partir da análise da Tabela 13, ficou claro que o desalinhamento do sensor foi corrigido e a magnitude dos resíduos (0,3 pixel) é compatível com os erros de medição das fotocoordenadas e as variações de iluminação. A análise da Tabela 14 mostra que a magnitude dos resíduos, que antes eram de 0,11-0,35 pixels, foi reduzida após o corregristo para 0,08-0,23 pixels. As discrepâncias existentes neste caso eram provavelmente devidas às mudanças no caminho óptico causadas pelo FPI.

Deste modo, como pôde ser visto na Tabela 13 e 14, há diferenças notáveis nos pontos correspondentes medidos em diferentes bandas, o que afeta a determinação dos POIs. A aplicação de um processo de corregristo com uma transformação projetiva reduz essas diferenças, como mostrado nas colunas 4 e 5 das tabelas supracitadas, possibilitando que os parâmetros dessas transformações possam ser aplicados posteriormente para reduzir as diferenças em fotocoordenadas de imagens adquiridas para fototriangulação em bloco por ajuste de feixe de raios.

4.3.2 Determinação dos parâmetros de orientação interior das bandas de referência

Para a determinação dos parâmetros de orientação interior das bandas de referência, 22 hipercubos da placa de alvos codificados Aruco foram capturados de acordo com o método das câmeras convergentes. O ajuste de feixe de raios em bloco foi utilizado para estimar os POEs das imagens das bandas de referência (10 e 25), as coordenadas no espaço objeto dos pontos medidos e os POIs (distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes das distorções radial simétrica e descentrada).

Os parâmetros estimados para as bandas 10 e 25 são apresentados na Tabela 15. Pode ser visto que eles foram estimados com alta precisão (nível sub-pixel) e que pequenas diferenças existem, principalmente nas distâncias focais e coordenadas do ponto principal.

Tabela 15 – Parâmetros de Orientação Interior das bandas de referência

Banda 10			Banda 25		
Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão	Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
$f(mm)$	8,6721	0,0055	$f(mm)$	8,7255	0,0049
$x_0(mm)$	0,0900	0,0017	$x_0(mm)$	-0,0313	0,0013
$y_0(mm)$	-0,2524	0,0014	$y_0(mm)$	-0,3174	0,0011
$k_1(mm^{-2})$	-3,5544E-03	3,0904E-04	$k_1(mm^{-2})$	-4,4377E-03	2,9586E-04
$k_2(mm^{-4})$	-1,4728E-04	6,7816E-05	$k_2(mm^{-4})$	-5,3229E-05	6,3835E-05
$k_3(mm^{-6})$	8,4181E-06	4,6568E-06	$k_3(mm^{-6})$	2,0373E-06	4,3150E-06
$P_1(mm^{-1})$	-1,5673E-06	1,5119E-05	$P_1(mm^{-1})$	-4,6988E-06	1,4117E-05
$P_2(mm^{-1})$	-9,7723E-05	3,3560E-05	$P_2(mm^{-1})$	-1,9685E-05	3,0794E-05
Sigma a Posteriori		0,46	Sigma a Posteriori		0,49

4.3.3 Fototriangulação com dados obtido com VANT aplicando a abordagem com registro de bandas

Para a validação da abordagem proposta, foi realizado um experimento com o mesmo bloco fotogramétrico apresentado nos testes da abordagem anterior. Mas neste caso, duas bandas utilizadas no bloco foram selecionadas como bandas de referência: banda 25 para Sensor I e banda 10 para Sensor II. Dependendo do experimento, as fotocoordenadas medidas em cada imagem espectral foram transformadas para a banda de referência com os parâmetros previamente determinados e apresentados na Tabela

12. Uma série de testes com os dados apresentados foram realizados e os resultados são apresentados a seguir por meio de tópicos.

– Fototriangulação com POI da banda 10

O primeiro teste foi realizado utilizando os POIs da banda 10 e, por consequência, usando-a como banda de referência. Foram realizados os registros dos dados das diferentes bandas para a banda de referência, e, realizada a fototriangulação em bloco por ajuste de feixe de raios. Para fim de comparação, a fototriangulação foi realizada tanto com a aplicação da transformação projetiva entre as bandas, quanto sem a aplicação do registro.

Na Tabela 16, têm-se os resultados para as discrepâncias dos pontos de verificação para as diferentes fototriangulações realizadas.

Em termos de planimetria, os resultados nos diferentes testes de fototriangulações se mostraram praticamente iguais, com um REQM residual de 1,1 GSD. No entanto, em relação à altimetria, os resultados apresentaram diferenças importantes, pois o resultado foi aproximadamente 55% melhor quando a transformação projetiva foi aplicada, reduzindo o erro altimétrico residual a aproximadamente 1,3 GSD.

Tabela 16 – Discrepâncias dos pontos de verificação para fototriangulação com POI da banda 10

Sem Aplicação do Registro - SAG				Com Aplicação do Registro - CAG			
Ponto	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	Ponto	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
P1	0,217	0,044	0,04	P1	0,209	0,05	0,127
P2	0,092	-0,038	-0,087	P2	0,101	-0,039	0,075
P3	0,03	-0,019	-0,172	P3	0,043	-0,024	-0,075
P4	0,064	-0,051	-0,345	P4	0,072	-0,041	-0,14
P5	-0,128	-0,071	-0,194	P5	-0,115	-0,068	-0,037
P6	0,085	-0,036	-0,397	P6	0,091	-0,034	-0,159
P7	0,108	-0,054	-0,306	P7	0,112	-0,063	-0,05
P8	0,04	-0,007	-0,429	P8	0,048	-0,003	-0,251
P9	0,088	-0,016	-0,315	P9	0,097	-0,012	-0,153
REQM(m)	0,108	0,042	0,285	REQM(m)	0,109	0,042	0,134

– Fototriangulação com POI da banda 25

Os testes anteriormente apresentados foram repetidos usando a banda 25 como referência, bem como os seus POIs. Como salientado, o comportamento dos POI das bandas do Sensor I não é idêntico ao comportamento dos POI das bandas do Sensor II. Por isso, esse teste se torna importante, para avaliar se a escolha da banda de referência de um sensor ou de outro, tem influência na determinação de coordenadas tridimensionais.

Neste sentido, na Tabela 17, têm-se os resultados para as discrepâncias dos pontos de verificação na fototriangulação com a banda 25.

De maneira idêntica ao teste anterior, nos resultados aplicando a transformação projetiva, houve uma redução de 30% no valor do REQM em relação ao teste sem sua aplicação, obtendo-se um valor residual de 1,1 GSD para altimetria. Isso demonstra novamente que a aplicação da metodologia proposta apresenta resultados mais precisos.

No entanto, observou-se que o resultado obtido utilizando uma banda de referência do Sensor I apresentou melhores resultados, compatível inclusive com a precisão em planimetria.

Tabela 17 – Discrepâncias dos pontos de verificação para fototriangulação com POI da banda 25

Sem Aplicação do Registro - SAG				Com Aplicação do Registro - CAG			
Ponto	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	Ponto	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
P1	0,189	0,044	0,186	P1	0,185	0,043	0,005
P2	0,101	-0,046	0,322	P2	0,097	-0,049	0,140
P3	0,047	-0,039	0,150	P3	0,035	-0,034	0,054
P4	0,063	-0,048	0,056	P4	0,061	-0,056	-0,138
P5	-0,114	-0,074	0,169	P5	-0,120	-0,080	-0,004
P6	0,078	-0,044	0,078	P6	0,078	-0,046	-0,110
P7	0,103	-0,068	0,189	P7	0,101	-0,067	-0,019
P8	0,044	-0,012	-0,072	P8	0,037	-0,017	-0,249
P9	0,102	-0,019	0,099	P9	0,095	-0,023	-0,066
REQM(m)	0,102	0,048	0,166	REQM(m)	0,100	0,050	0,116

- Fototriangulação com POI das bandas 10 e 25

Uma das principais constatações apresentadas por Oliveira *et al.* (2016) foi que ao menos um conjunto de POI por sensor seja necessário para a câmara FPI2014. Neste sentido, um terceiro teste foi realizado para avaliar a compatibilidade dos resultados obtidos anteriormente, bem como identificar possíveis melhoras neles.

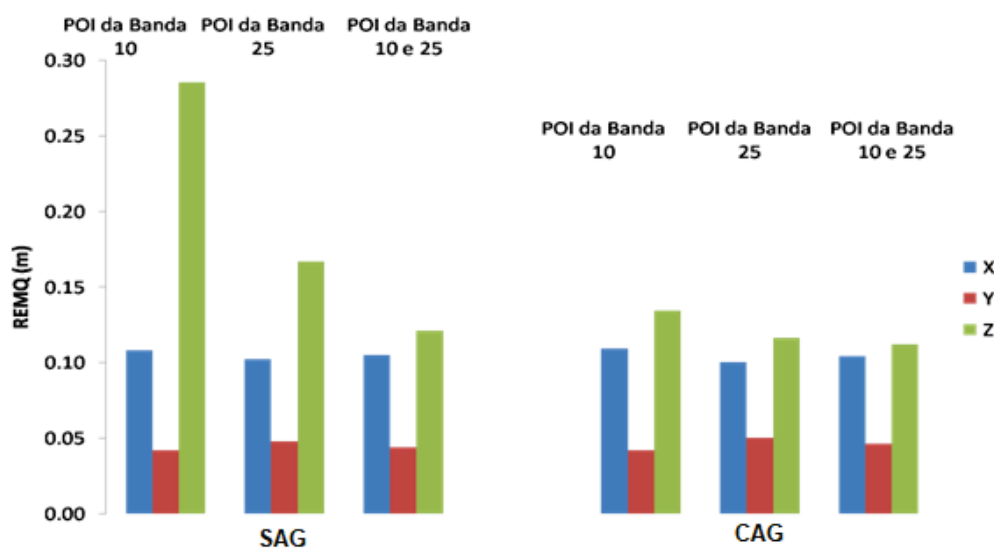
O teste consistiu em repetir os testes anteriormente apresentados, no entanto usado dois conjuntos de POI, um para cada sensor. Logo, também foram eleitas duas bandas de referência, uma para cada sensor e realizada as transformações entre bandas de um mesmo sensor. O teste em questão foi realizado usando como bandas de referência as bandas 25 e 10. A seguir (Tabela 18) são apresentados os resultados obtidos com e sem o uso da abordagem com correção das bandas.

A seguir (Fig. 65), têm-se os resultados em termos gráficos, por meio de um gráfico de barras, para melhor comparação dos resultados obtidos.

Tabela 18 – Discrepâncias dos pontos de verificação para fototriangulação com POI da banda 10 e 25

Sem Aplicação do Registro - SAG				Com Aplicação do Registro - CAG			
Ponto	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	Ponto	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
P1	0,203	0,044	0,108	P1	0,197	0,045	0,08
P2	0,098	-0,041	0,122	P2	0,099	-0,044	0,129
P3	0,039	-0,029	-0,01	P3	0,04	-0,029	0,009
P4	0,064	-0,048	-0,142	P4	0,066	-0,048	-0,122
P5	-0,121	-0,073	0,001	P5	-0,118	-0,075	0,009
P6	0,082	-0,039	-0,145	P6	0,084	-0,04	-0,128
P7	0,105	-0,061	-0,036	P7	0,107	-0,062	-0,025
P8	0,043	-0,008	-0,231	P8	0,043	-0,01	-0,225
P9	0,095	-0,017	-0,093	P9	0,096	-0,018	-0,082
REQM(m)	0,105	0,044	0,121	REQM(m)	0,104	0,046	0,112

Figura 65 - Resumo dos experimentos realizados



A primeira importante constatação obtida com os dados apresentados é que o uso de um único conjunto de POI possibilita resultados compatíveis com aqueles obtidos usando dois conjuntos de POI. Isso corrobora os objetivos deste trabalho, que é tornar o uso das imagens obtidas com FPI2015 mais prático na reconstrução tridimensional. Isso porque, apesar do uso de dois conjuntos de POI ser mais prático, a maioria dos softwares comerciais que realizam o processo de triangulação possibilita apenas a entrada de um conjunto de POI.

A segunda constatação é em relação à influência da projetiva neste teste. Vê-se por meio dos resultados que, apesar de tornar o REMQ menor, a diminuição é muito pequena, levando a crer que o custo/benefício da aplicação da abordagem não é interessante nesta situação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foram desenvolvidas e apresentadas duas abordagens para a calibração e realização da orientação interior das imagens coletadas com a câmara hiperespectral Rikola FPI2015. A primeira proposta de calibração demonstrou uma maneira completa e mais avançada de obter a solução do problema, pois se baseou no processo físico de formação do registro fotográfico neste tipo de câmara. Na segunda abordagem procurou-se corrigir a geometria das imagens na etapa de orientação interior com base nas diferenças de geometria entre as imagens das bandas espectrais adquiridas pela câmara.

Tendo em vista que a tecnologia de imageamento hiperespectral com câmaras de quadro é uma tecnologia relativamente nova, existem poucos trabalhos na literatura para subsidiar estudos na calibração deste tipo de câmara. Por essa razão foi apresentado um estudo preliminar dos resultados da calibração individual por banda, que por sua vez, fundamentou as abordagens desenvolvidas. Por meio do estudo preliminar, mostrou-se que o uso do centro geométrico dos alvos reduz significativamente a discrepância das fotocoordenadas nas distintas bandas, pois minimiza o efeito das diferenças de brilho e contraste das imagens, possibilitando estimativas de parâmetros mais precisos. Além disso, mostrou-se, por meio dele, que apenas um conjunto de parâmetros para as distorções das lentes era suficiente para modelar seu efeito, reduzindo o número de parâmetros para estimação no sistema de equações. Foi também nesta etapa que ficou clara a necessidade da câmara estar absolutamente estática no processo de calibração, necessitando inclusive do uso de mecanismos de fixação.

Os estudos acerca da calibração da câmara FPI2014, efetuados por Oliveira *et al.* (2016), foram também de substancial importância para o desenvolvimento desta pesquisa. As conclusões obtidas em seu trabalho permitiram direcionar as propostas a serem desenvolvidas. Quanto ao uso de dois conjuntos de POI propostos pelos autores supracitados, pode-se comprovar que esta necessidade era causada pelo desalinhamento entre os sensores.

Em relação aos resultados obtidos na primeira abordagem, verificou-se por meio das discrepâncias nos pontos de verificação, que a calibração da câmara FPI2015 deve contemplar alguns aspectos, sendo eles: 1) o desalinhamento entre os sensores; 2) única posição do centro perspectivo por hipercubo; 3) única posição para o ponto principal para a câmara; 4) um único conjunto de parâmetros para a distorção das lentes para a

câmara; 5) focal variável com o comprimento de onda. O uso dos POIs estimados com essas restrições minimizou os erros planimétricos e altimétricos à aproximadamente o tamanho do pixel no terreno, resultado bem melhor em relação ao uso, por exemplo, dos POIs de uma banda estimados em um processo individual.

A solução com registro de bandas apresentou resultados significativos também, possibilitando o uso mais prático desta câmara, um dos principais objetivos desta pesquisa. O uso dos parâmetros da transformação projetiva obtidos na pré-calibração, reduziu a discrepância nos pontos de verificação a resultados similares aos obtidos com a primeira abordagem.

De certa forma, a similaridade nos resultados obtidos nas duas abordagens, revela que as duas metodologias foram eficazes para a modelagem da geometria interna da câmara, mas de formas distintas. A primeira abordagem realiza a modelagem de forma mais rigorosa, enquanto a segunda, de forma mais produtiva e prática. Nesse sentido, os resultados obtidos corroboram com objetivos deste trabalho, evidenciando que eles foram cumpridos.

No que se refere a recomendações para futuros trabalhos, têm-se as seguintes sugestões:

- Desenvolver as calibrações com uma placa, para uso como campo de calibração, cujos alvos sejam determinados diretamente no centro geométrico dos alvos, pois esse tipo de alvo é mais adequado na calibração da FPI2015.

- Realizar um estudo temporal dos POIs desta câmara, pois por meio dele será possível identificar a sua rigidez interna, e definir a periodicidade da calibração.

- Desenvolver uma abordagem conjunta das metodologias desta pesquisa, pois o uso da transformação projetiva pode ser feito para reduzir as diferenças entre bandas de um mesmo sensor devido à variação do *air-gap*, enquanto a segunda abordagem pode ser aplicada para estimar o desalinhamento entre bandas de referência de sensores distintos.

REFERÊNCIAS

- AASEN, H., BURKART, A., BOLTEN, A., BARETH, G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 108, p. 245–259, 2015.
- ABDEL-AZIZ, Y., KARARA, H. **Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in Close-Range Photogrammetry**. Virginia, American Society of Photogrammetry, 1971.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 2003.
- BARAZZETTI, L., MUSSIO, L., REMONDINO, F., SCAIONI, M. Targetless camera calibration. In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, Trento, Vol. XXXVIII-5 /W16, pp. 335-342, 2011b.
- BAZAN, W. S. **Calibração de um sistema dual de câmaras digitais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 37(8): 855-866, 1971.
- CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Record**, 16(91): 51–66, 1998.
- ELMASRY, G., SUN, D. Principles of hyperspectral imaging technology. In: SUN, D. **Hyperspectral imaging for food quality analysis and control**. 1. Ed. Elsevier, 2010, P.3 – 43.
- FIETE, R. D. Elements of Photogrammetric optics. In: MCGLONE, C. **Manual of Photogrammetry**. 6. Ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013.
- GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba PR, 1993.
- GALO, M., TOMMASELLI, A. M. G., HASEGAWA, J. K. Calibração de uma câmara digital multiespectral com três sensores CCD. In: **Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia**, Macaé RJ. 2005. p. 1-9.
- GALO, M., HASEGAWA, J. K., TOMMASELLI, A. M. G., IMAI, N. N. Registration analysis and inner calibration of a three CCD multispectral frame camera. In: **EUROCOW – International Calibration and Orientation Workshop**, 2006, 25-27 January, Castelldefels. p. 1-6.
- GALO, M., TOMMASELLI, A. M. G., **Calibração de Câmaras**. *Visão Computacional*, Editora Gráfica Viena, Presidente Prudente, p.53-112, 2011.

GAT, N., **Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review**. The International Society for Optical Engineering, 2000.

HABIB, A., MORGAN, M. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 71(6):733–741, 2005.

HONKAVAARA, E., SAARI, H., KAIVOSOJA, J., PÖLÖNEN, I., HAKALA, T., LITKEY, P., MÄKYNEN, J., PESONEN, L. Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. **Remote Sensing**, v. 5, n. 10, p. 5006–5039, 2013.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p. Tradução da segunda edição.

KRAUS, K. **Photogrammetry – Geometry from images and Laser Scans**. 2. Ed. Walter de Gruiter, Berlin, 2007.

MÄKYNEN, J. **A Light weight Hyperspectral Imager**. 2009. 74f. Master's Thesis, Helsinki University of Technology (2009).

MAKELAINEN, A., SAARI, H., HIPPI, I., SARKEALA, J., SOUKKAMAKI, J. **2D hyperspectral frame imager camera data in photogrammetric mosaicking**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(1/W2): 263–267, 2013.

MATA, J. A., **Calibracion geométrica de camaras no métricas. Estudios de metodologias y modelos matemáticos de distorción**. Tese (Doutorado). Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 2016.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S., MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. John Wiley e Sons, 2001.

MIYOSHI, G. T. **Caracterização espectral de espécies de mata atlântica de interior em nível foliar e de copa**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente, UNESP, 2016.

MITISHITA, E. A.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas a partir de aerofotos digitalizadas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.7, n.1, p. 64-76, 2001.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

MONIWA, H. **Analytical camera calibration for close-range photogrammetry**, New Brunswick, Thesis, Master of Science, University of New Brunswick, 104p., 1972.

MORIYA, E. A. S., IMAI, N. N., TOMMASELLI, A. M. G., MIYOSHI, G. T. Mapping Mosaic Virus in Sugarcane Based on Hyperspectral Images. **IEEE Journal of**

Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 10, p. 1-9, 2016.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011.

OLIVAS, M. A. A. **Calibração de Câmaras Fotogramétricas – Aplicação dos métodos: Câmaras Convergentes e Campos Mistos**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba PR, 1980.

OLIVEIRA, R. A., TOMMASELLI, A. M. G., HONKAVAARA, E., HYYPPA, J.; IMAI, N. N., HAKALA, T., JAAKKOLA, A. Avaliação do correção de imagens coletadas por uma câmara hiperespectral de quadro. In: **XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento XXV Exposicarta**, 2014, Gramado. Anais do XXVI CBC, 2014b.

OLIVEIRA, R. A., TOMMASELLI, A. M. G., HONKAVAARA, E. Geometric calibration of a hiperespectral frame camera. **The Photogrammetric Record** 31(155): 325–347 (September 2016) DOI: 10.1111/phor.12153, 2016.

QIN, J. Hyperspectral imaging instruments. In: SUN, D. **Hyperspectral imaging for food quality analysis and control**. 1. Ed. Elsevier, 2010, p.129 – 172.

PALMER, C. **Diffraction grating handbook**. 6. Ed. Nova Iorque: Newport Corporation, 2005.

SAARI, H., AALLOS, V. V., AKUJÄRVI, A., ANTILA, T., HOLMLUND, C., KANTOJÄRVI, U., OLLILA, J. Novel miniaturized hyperspectral sensor for UAV and space applications. In: **SPIE Europe Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics**, 2009. Proc. of SPIE. 2009. p. 74741M-74741M-12.

SILVA, S. L. A., TOMMASELLI, A. M. G., ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados do tipo aruco na automação do processo de calibração de câmaras. **Boletim de Ciências Geodésicas** (Online), v. 20, p. 626-646, 2014.

TSAL, R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-self TV cameras end lenses. **IEEE Journal of Robotics and Automation**, 1987.

TELLES, S. S. S; TOMMASELLI, A. M. G. Um modelo matemático para calibração de câmaras baseado em linhas retas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n.3, 2005.

TOMMASELLI, A. M. G.; ALVES, A. O. Calibração de uma estereocâmara baseada em vídeo: uma avaliação experimental. 30 anos da pós-graduação em ciências geodésicas no Brasil In: **Séries em Ciências Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 2001. v. 1. p. 199-213.

TOMMASELLI, A. M. G; TOZZI, C. L. Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional, **Jornada EPUSP/IEEE**, 1990.

ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions** on. 22. 1330 - 1334. 10.1109/34.888718, 2000.

WOLF, P. R., DEWITT, B., WILKINSON, B. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS.**v. 3. New York: McGraw-Hill. 2000.

WOLF, P. R., GHILANI, C. D. **Elementary Surveying: an introduction to geomatics.**10 ed: Upper Saddle River, 2010.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	Lucas Dias Santos 28/03/1993
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Santos, Lucas Dias Santos, L.D.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/4911987443399203
ORCID	https://orcid.org/0009-0006-5884-606X
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
04/2017	Engenharia Cartográfica (Bacharel) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
04/2019	Ciências Cartográficas (Mestre) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
SANTOS, L. D.; TOMMASELLI, A. M. G.; BERVEGLIERI, A.; IMAI, N. N.; OLIVEIRA, R. A.; HONKAVAARA, E., 2022. Geometric calibration of a hyperspectral frame camera with simultaneous determination of sensors misalignment. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , v. 4 , Article 100015. DOI: 10.1016/j.ophoto.2022.100015. TOMASELLI, A.M.G., SANTOS, L.D., OLIVEIRA, R.A., BERVEGLIERI, A., IMAI, N.N., HONKAVAARA, E., 2019. Refining the interior orientation of a hyperspectral frame camera with preliminary bands co-registration. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens. 12, 2097–2106. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2911547. BERVEGLIERI, A., TOMASELLI, A.M.G., SANTOS, L.D., HONKAVAARA, E., 2019. Bundle adjustment of a time-sequential spectral camera using polynomial models. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 57, 9252–9263. https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2925783. TOMASELLI, A.M.G., SANTOS, L. D., BERVEGLIERI, A., OLIVEIRA, R.A., HONKAVAARA, E., 2018. A study on the variations of inner orientation parameters of a hyperspectral frame camera. In: ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Presented at the Innovative Sensing - from Sensors to Methods and Applications. ISPRS, Karlsruhe.	