

Calibração radiométrica de sensor eletro-óptico em laboratório

Marcus Vinnicius de Q. S. A. Costa¹, Alvaro José Damião^{1,2}, Ruy Morgado de Castro²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA/DCTA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Os satélites de sensoriamento remoto por imageamento cumprem papel importante na tarefa de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (IVR), por permitirem coleta de informação em praticamente qualquer lugar na superfície do planeta. Para que as informações fornecidas sejam confiáveis, deve-se obter a calibração dos sensores embarcados em tais satélites. Este artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia para a calibração espectral e radiométrica, em laboratório, de uma câmera Parrot Sequoia, a qual possui quatro sensores monocromáticos e um sensor RGB, similares aos embarcados em plataformas orbitais. A metodologia descrita utiliza equipamentos existentes no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos (LaRaC), no Instituto de Estudos Avançados (IEAv). São apresentadas as Funções de Resposta Espectral dos sensores da câmera estudada, assim como os dados de Calibração Radiométrica. Destaca-se ainda que a metodologia proposta pode ser reproduzida para qualquer outro sensor eletro-óptico orbital de imageamento da superfície terrestre.

Palavras-Chave – Sensoriamento remoto óptico, calibração radiométrica, calibração espectral.

I. INTRODUÇÃO

Satélites de sensoriamento remoto são meios de Força Aérea empregados na Tarefa de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (IVR) [1]. Ao obter imagens de pontos de interesse na superfície terrestre, seu emprego amplia sobremaneira a consciência situacional das Forças Armadas, auxiliando de forma decisiva na capacidade de tomada de decisão e no planejamento das operações militares.

Para o sucesso de sua operação, a calibração dos sensores embarcados nos satélites é fundamental para que se tenha conhecimento das suas características espectrais, radiométricas e espaciais. Uma correta calibração, desde a fase pré-lançamento do satélite, permite a obtenção de dados confiáveis pelos usuários do sistema [2].

No que diz respeito especificamente à calibração radiométrica, é necessário ter conhecimento da relação entre os Números Digitais (ND) dos pixels das imagens geradas pelo sensor da câmera e a radiância que atinge este sensor, originada da superfície imageada. Para se obter a calibração radiométrica, é necessário primeiramente conhecer a Função de Resposta Espectral (FRE) da câmera, a qual define como o sensor responde à radiação em cada comprimento de onda.

Essa relação entre ND e radiância deve ser calculada desde as fases iniciais de desenvolvimento do sensor. É necessário realizar os procedimentos de calibração do sensor em laboratório, ainda antes do lançamento do satélite. É fundamental também para um operador, ao adquirir ou desenvolver um sensor orbital, ter o domínio desta metodologia, para que não dependa unicamente das informações do fabricante. Este domínio permite ainda uma

elevação da capacidade dos recursos humanos responsáveis pela operação dos satélites, permitindo mais conhecimentos, necessários para a operação do sistema no máximo de suas capacidades, além de permitir melhores tomadas de decisão quando na aquisição de novos sistemas.

Dessa forma, para prover a Força Aérea Brasileira com os conhecimentos necessários para a calibração radiométrica laboratorial de sensores ópticos orbitais, esse artigo apresenta uma metodologia para a calibração da câmera Parrot Sequoia, utilizando equipamentos disponíveis no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos (LaRaC), no Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Para tanto, na seção II são apresentados aspectos teóricos sobre a calibração de sensores ópticos. A seção III apresenta uma descrição dos principais equipamentos utilizados no processo. Na seção IV é descrito o procedimento para a caracterização espectral, enquanto na seção V discorre-se sobre a metodologia para a calibração radiométrica. A seção VI finaliza o artigo com os resultados e conclusões.

II. CALIBRAÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS

Um imageador óptico orbital é um sistema com sensores eletro-ópticos, embarcado em um satélite, capaz de receber a radiância (fluxo de radiação por área e ângulo sólido) oriunda da superfície terrestre [3]. Os sensores mais comuns são chamados de multiespectrais por operarem em diversas bandas, geralmente correspondentes ao Azul (*Blue Band*), Verde (*Green Band*), Vermelho (*Red Band*) e Infravermelho Próximo (*Near Infrared – NIR*) [4]. Na Fig. 1 são apresentadas as Funções de Resposta Espectral (FRE) de quatro sensores que equipam os satélites CBERS-4, Landsat-7 e Landsat-8 [2]. Em geral, FREs são valores de 0 a 1, que representam a sensibilidade relativa do sensor em cada comprimento de onda. Fica evidente que mesmo trabalhando em bandas semelhantes, as respostas espectrais possuem diferenças.

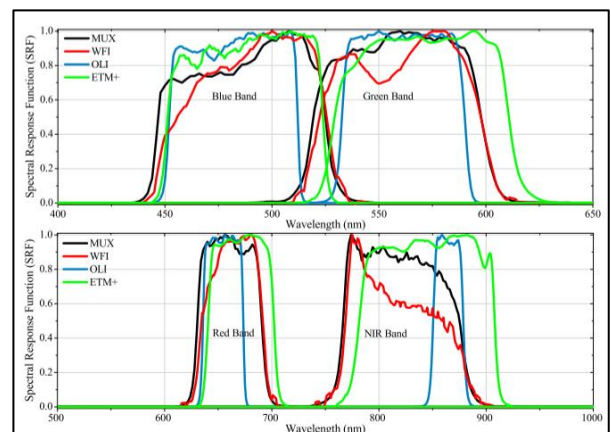


Fig. 1. FREs de quatro diferentes sensores ópticos orbitais [2].

Ao serem expostos à radiação nas suas faixas de operação, os detectores internos ao sensor geram sinais elétricos que são convertidos em números digitais (ND). Um exemplo muito utilizado deste tipo de sistema são as câmeras CCD (*charge coupled devices*), que possuem matrizes de detectores [4]. Nesta matriz de detectores, cada célula corresponde a um pixel que apresentará um número digital proporcional à radiação por ele recebida. A imagem gerada corresponde à composição de todos os pixels da matriz de detectores, onde cada número digital está associado a uma intensidade de cinza em uma escala relacionada com a resolução radiométrica do sensor.

A resolução radiométrica é definida pelo número de bits (n). Cada detector pode gerar n números binários (0 ou 1) proporcionais ao sinal elétrico, que, por sua vez, é proporcional à energia incidente. Com isso, é possível discretizar a energia recebida em até 2^n níveis digitais, que é o total de combinações possíveis dos n números binários [4].

É possível ao operador, a partir dos valores de ND, chegar aos valores de radiância da superfície observada. Em geral, os fabricantes projetam os sensores de forma que essa relação entre ND e radiância siga a função linear (1) [5].

$$L_i = G_i \cdot ND_i + B_i \quad (1)$$

onde L_i é a radiância na banda i , G_i é o coeficiente de ganho na banda e B_i é o coeficiente de *bias* ou *offset* na mesma banda, que está relacionado à corrente escura do detector, ou seja, a resposta do mesmo na ausência de radiância recebida [4].

A calibração de um sensor consiste justamente na determinação dos coeficientes G_i e B_i , que permitem obter uma estimativa da radiância a partir dos ND da imagem.

III. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Devido à indisponibilidade de sensores orbitais para a realização deste trabalho, este procedimento de calibração utilizou como sensor a câmera Parrot Sequoia. Apesar de não ser uma câmera destinada à aplicação orbital, ela foi escolhida por suas características similares aos sensores ópticos embarcados em satélites de sensoriamento remoto.

Para a primeira etapa, de caracterização espectral com o objetivo de se chegar à Função de Resposta Espectral (FRE), utilizou-se uma fonte luminosa associada a um Monocromador para a iluminação do sensor com luz monocromática em comprimentos de onda específicos.

Na sequência, utilizou-se uma Esfera Integradora, com lâmpadas com potências conhecidas. A radiância da luz emitida na saída da Esfera é medida com o espectrorradiômetro FieldSpec 4. A descrição geral do procedimento de calibração consta nas seções IV e V.

A. Câmera Parrot Sequoia

A câmera Parrot Sequoia foi projetada para ser embarcada em drones, para a realização de sensoriamento remoto à agricultura de precisão [6]. Apesar da aplicação principal não ser coincidente com a dos sensores orbitais, suas características são semelhantes e o procedimento de calibração

é idêntico. Na Fig. 2 está ilustrado o equipamento e na Tabela I constam algumas de suas características.



Fig. 2. Câmera Parrot Sequoia [7].

TABELA I. CARACTERÍSTICAS DA PARROT SEQUOIA [6].

| Sensor | Comp. de onda (nm) | Larg. da banda (nm) | Definição máxima | Resolução Radiométrica (BITS) |
|---------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|
| Green | 550 | 40 | 1,2 MEGA PIXELS | 10 |
| Red | 660 | 40 | | |
| Red Edge (REG) | 735 | 10 | | |
| Near Infrared (NIR) | 790 | 40 | 16 MEGA PIXELS | 8 |
| RGB | - | | | |

É possível perceber que as bandas de operação da Sequoia são similares aos sensores orbitais apresentados no exemplo da Fig. 1, com exceção da banda Azul, inexistente nos sensores monocromáticos na Sequoia, e da banda *Red Edge* (REG), inexistente nos sensores orbitais. A Sequoia dispõe ainda do sensor RGB (*Red, Green e Blue*), capaz de gerar imagens coloridas. Foi também possível obter, nos metadados das imagens da câmera, os valores de *f-number* de 2,2 para os sensores monocromáticos e 2,3 para o RGB, além de um *Field-of-View* de 61,9° para os monocromáticos e 65,5° para o RGB.

Sua configuração padrão consiste em um modo automático de ajuste de ISO e tempo de exposição, utilizando um sensor chamado Sunshine Sensor, que detecta a luminosidade do ambiente para realizar os ajustes mais adequados. Entretanto, para os experimentos de calibração é necessário utilizar o modo manual para garantir que a câmera esteja exatamente nas mesmas configurações em todas as medições. O modo manual é configurado utilizando um API (*Application Programming Interface*) com o *software* Postman [8].

B. Monocromador

O Monocromador utilizado neste trabalho foi o Acton SpectraPro-2500i, que possui torretas com três grades de difração, que podem ser escolhidas e instaladas de acordo com os comprimentos de onda que se pretende utilizar em cada experimento. Ao receber a radiação de uma fonte luminosa de banda larga em sua entrada, o equipamento tem a capacidade de difratar a radiação recebida, separando-a angularmente em comprimentos de onda específicos. A radiação na saída do monocromador terá o comprimento de onda específico

selecionado pelo usuário no software controlador, com acurácia de $\pm 0,2$ nm [9] (Fig. 3).

Neste trabalho foi utilizada a grade de difração otimizada para o comprimento de onda de 500 nm, uma vez que a banda utilizada nos experimentos foi de 400 a 850 nm. A fonte luminosa utilizada foi uma lâmpada de Tungstênio de 100 W.



Fig. 3. Monocromador Acton SpectraPro-2500i [9].

C. Esfera Integradora

Neste trabalho foi utilizada a esfera Labsphere USS-2000, com diâmetro de 500 mm e porta de saída de 200 mm. O interior da esfera é coberto com revestimento Spectraflot®, com alta reflectância difusa de 250 a 2.400 nm [10].

A Esfera Integradora dispõe de 4 lâmpadas halógenas com diferentes potências, identificadas como A (150 W), B (45 W), C (100 W) e D (45 W). A combinação das lâmpadas permite a emissão de radiação com 11 potências diferentes. Na Fig. 4 observa-se a Esfera Integradora no arranjo experimental com o espectrorradiômetro FieldSpec 4.

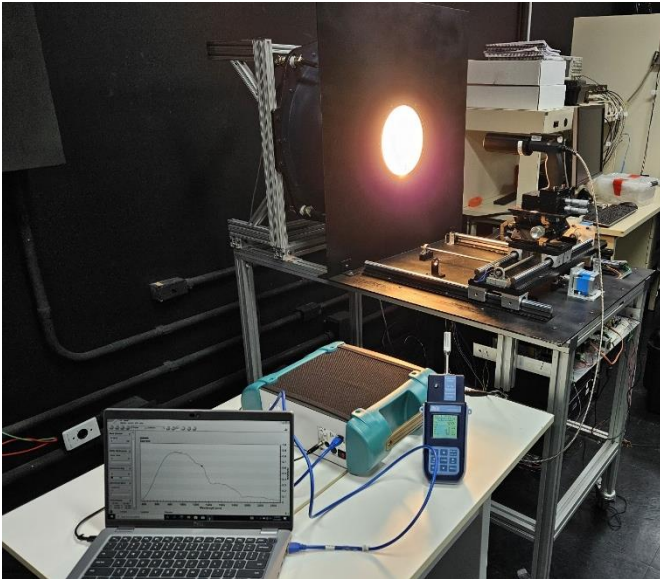


Fig. 4. Arranjo experimental para a medição radiométrica da Esfera Integradora utilizando o FieldSpec 4.

D. Espectrorradiômetro FieldSpec 4

O Espectrorradiômetro FieldSpec 4, apresentado na Fig. 4 no arranjo experimental utilizado juntamente com a Esfera Integradora, é um espectrorradiômetro com um conjunto de

fibras ópticas fixas, capaz de medir a energia radiante na faixa espectral de 350 a 2.500 nm, ou seja, nas bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho curto. É preparado para o sensoriamento remoto em campo, com capacidade de coletar espectros a cada 0,2 segundos [11].

IV. CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL (OBTENÇÃO DA FRE)

Esta primeira etapa tem por objetivo obter a sensibilidade relativa do sensor em cada comprimento de onda. O resultado obtido é a Função de Resposta Espectral (FRE), a qual é necessária também para a continuação dos experimentos na próxima etapa, de calibração radiométrica.

Na Fig. 5 é apresentado esquematicamente o processo de coleta e análise dos dados desta etapa. São apresentados em laranja claro os equipamentos utilizados para obtenção dos dados, quais sejam, a câmera Parrot Sequoia e o Detector de referência, ambos sendo iluminados pela radiação que passa pelo monocromador. Os números em vermelho correspondem aos dados gerados em cada fase, dados esses que serão utilizados durante esta etapa de caracterização espectral e, também, durante a calibração radiométrica. Em azul estão apresentados os dados obtidos e, quando necessário, os códigos utilizados para o processamento dos dados. A sigla $ND_{cam}(\lambda)$ corresponde aos números digitais gerados pela câmera em cada comprimento de onda, $V_{det}(\lambda)$ diz respeito à voltagem gerada pelo detector de referência em cada comprimento de onda e os desvios-padrão dos dados são representados por $\sigma(\lambda)$. A $FRE_{det}(\lambda)$ corresponde à Função de Resposta Espectral do detector de referência, enquanto $FRE_{cam}(\lambda)$ é a FRE da câmera, objetivo principal desta etapa. Após sua normalização, esta FRE passa a ser chamada de $FRE_{norm}(\lambda)$.

Para se chegar à FRE da câmera, é necessário observar a resposta da câmera em números digitais para cada comprimento de onda proveniente do monocromador e comparar com a resposta do detector de referência. Para isso, a câmera foi instalada em uma esfera integradora posicionada na saída do monocromador. A esfera integradora teve por objetivo garantir que o feixe luminoso emitido pelo monocromador chegasse aos sensores da câmera da maneira mais homogênea possível.

A relação matemática para calcular a FRE da câmera, $FRE_{cam}(\lambda)$, está apresentada em (2) [12].

$$FRE_{cam}(\lambda) = \frac{ND_{cam}(\lambda) \times FRE_{det}(\lambda)}{V_{det}(\lambda) \times FRE_{cam_{max}}} \quad (2)$$

onde $ND_{cam}(\lambda)$ corresponde à média de Números Digitais obtidos pela câmera iluminada pela fonte luminosa em cada comprimento de onda, $FRE_{det}(\lambda)$ é a Função de Resposta Espectral do detector de referência (já conhecida) e $V_{det}(\lambda)$ é a voltagem em Volts obtida pelo detector de referência nas medições com a fonte luminosa em cada comprimento de onda. O fator $FRE_{cam_{max}}$ é o valor máximo da FRE em cada banda, utilizado para proceder a normalização necessária para cálculos posteriores na fase de calibração radiométrica, de forma que os valores de FRE passem a variar de 0 a 1.

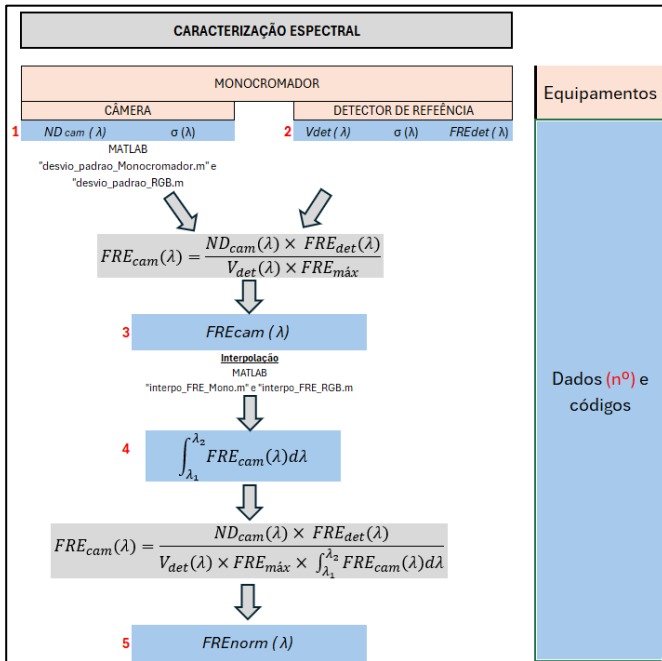


Fig. 5. Diagrama de Processamento de dados da caracterização espectral.

Para a posterior utilização da FRE na etapa de calibração radiométrica, faz-se necessário ainda proceder mais uma normalização, dividindo-se (2) pelo valor da integral da FRE_{cam} em cada banda, conforme apresentado em (3).

$$FRE_{norm}(\lambda) = \frac{ND_{cam}(\lambda) \times FRE_{det}(\lambda)}{V_{det}(\lambda) \times FRE_{max} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_{cam}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

Com relação às configurações da câmera, foi utilizado o ajuste manual de ISO e Tempo de Exposição. Os valores apresentados na Tabela II foram selecionados para permitir uma maior sensibilidade dos sensores à baixa intensidade de luz proveniente da saída do monocromador, mantendo os números digitais em níveis adequados, sem perda de informação [13], obtendo-se valores altos de ND quando nos comprimentos de onda centrais de cada banda.

TABELA II. CONFIGURAÇÕES DA CÂMERA PARA A CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL

| Sensor | ISO | Tempo de Exposição (μs) |
|--------|------|--------------------------------|
| Green | 6378 | 5988 |
| Red | 6378 | 5988 |
| REG | 6378 | 12.048 |
| NIR | 6378 | 12.048 |
| RGB | 1592 | 40.000 |

Na Fig. 6 são apresentados alguns exemplos de imagens obtidas nesta etapa. Com o objetivo de padronizar os cálculos e utilizar regiões mais uniformes em termos de intensidade de ND, os valores de ND de cada comprimento de onda consistiram na média e desvio padrão, em cada imagem, dos pixels de um círculo central com diâmetro igual à metade da largura da imagem.

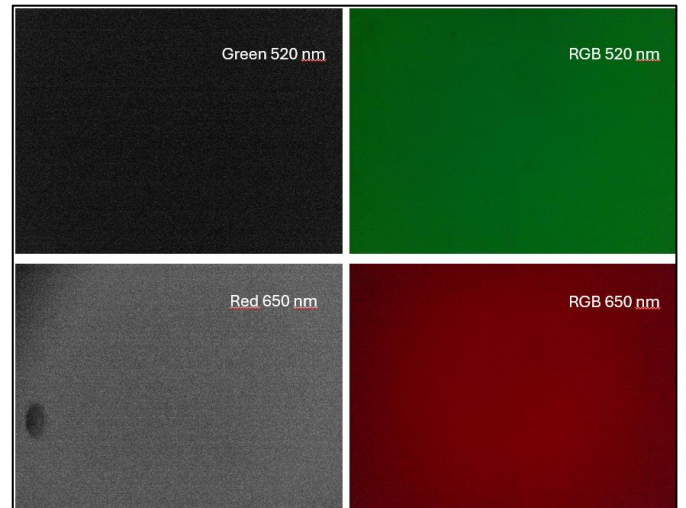


Fig. 6. Exemplos de imagens obtidas com a câmera na etapa de caracterização espectral.

V. CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA

Após a obtenção da FRE, passa-se então à calibração radiométrica. O objetivo desta etapa é obter uma relação entre as médias de Números Digitais (ND) dos pixels de uma imagem e a radiância que atinge o sensor da câmera. Para isso, em uma primeira etapa, foram obtidos os valores de radiância emitidos pela Esfera Integradora, utilizando o espectrorradiômetro, (Fig. 4). Em uma segunda etapa foram obtidas imagens da Esfera Integradora utilizando a câmera Parrot Sequoia na mesma posição do FieldSpec 4, a 41,4 cm da saída da Esfera Integradora (Fig. 7). Foi também utilizado um sensor de parâmetros ambientais para monitorar as condições de temperatura ambiente, pressão e umidade relativa do ar, de forma a garantir que tais parâmetros não apresentassem mudanças significativas durante e entre as medições, o que poderia influenciar os resultados.

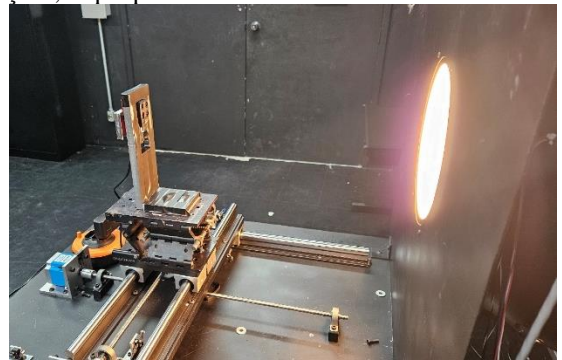


Fig. 7. Arranjo experimental para a obtenção de imagens da Esfera Integradora com a câmera Parrot Sequoia.

Na Fig. 8 está apresentado um diagrama do processamento de dados desta etapa, com os principais equipamentos utilizados nos campos em laranja claro. Os números em vermelho representam os principais dados gerados, seguindo a sequência já empregada na fase anterior, de caracterização espectral, na Fig. 5. A sigla $ND(Pot)$ corresponde aos números digitais gerados pela câmera em cada potência gerada pela Esfera Integradora, $l(\lambda, Pot)$ diz respeito à radiância

espectral obtida pelo FieldSpec 4 em cada potência gerada pela Esfera Integradora e os desvios-padrão dos dados são representados por $\sigma(\lambda, Pot)$. A $FRE_{norm\lambda}$ corresponde à Função de Resposta Espectral normalizada obtida na fase de caracterização espectral. O símbolo $L_{\lambda, Pot}$ diz respeito ao valor de radiância espectral recebido pelo sensor da câmera após a multiplicação pelos valores de FRE e $L_{B, Pot}$ é o valor da radiância total na banda após a integração nos limites de comprimento de onda da banda de interesse.

A partir dos dados obtidos é estabelecida a relação entre os números digitais $ND(Pot)$ e a radiância em cada banda $L_{B, Pot}$, para cada potência fornecida pela Esfera Integradora em que não haja extrapolação dos NDs nas imagens. Finalmente, para se chegar aos coeficientes da reta de calibração é utilizado o método dos mínimos quadrados, MMQ. São ainda apresentadas as ferramentas computacionais (nos campos verdes) utilizadas para a análise e processamento dos dados.

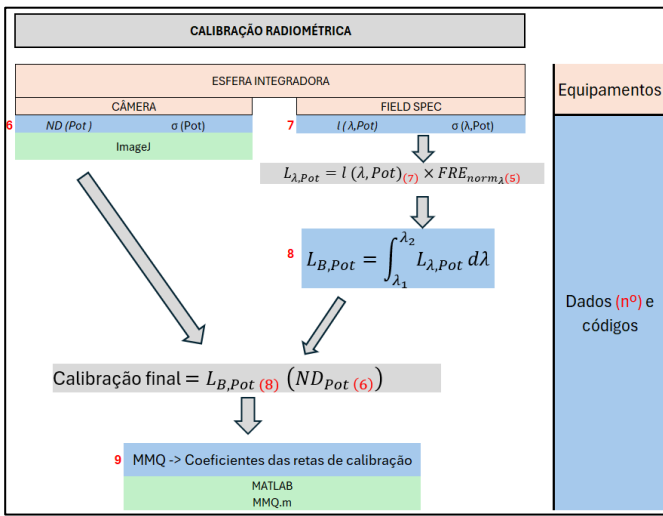


Fig. 8. Fluxograma da calibração radiométrica.

O espectrorradiômetro FieldSpec 4 fornece dados espectrais de radiância em $W/sr \cdot m^2 \cdot nm$. Para cada potência da Esfera Integradora foram calculados 10 espectros de radiância, a partir dos quais se obteve um valor de média e desvio padrão de radiância espectral. Na Fig. 9 são apresentados os valores de radiância espectral para comprimentos de onda entre 350 a 2500 nm, para as 11 combinações de potência da Esfera Integradora.

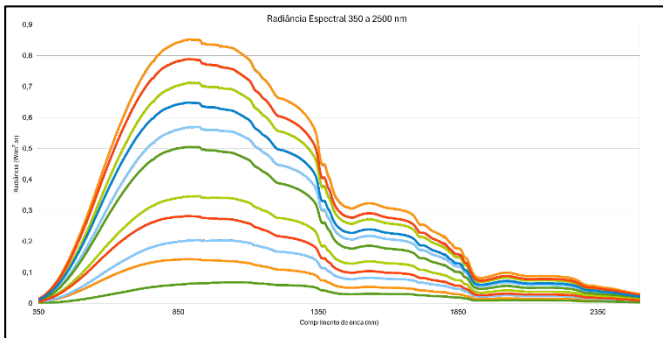


Fig. 9. Radiância espectral para as 11 potências da Esfera Integradora.

Uma vez obtida a radiância espectral relativa a cada potência, é possível calcular a radiância que sensibiliza os sensores da câmera multiplicando-se os valores de radiância pelos valores da FRE normalizada de cada sensor, conforme (4).

$$L_{\lambda, Pot} = l(\lambda, Pot) \times FRE_{norm\lambda} \quad (4)$$

onde $L_{\lambda, Pot}$ é o valor da radiância espectral obtida pelo sensor da câmera já considerando sua FRE, $l(\lambda, Pot)$ é o valor de radiância espectral obtido pelo espectrorradiômetro e $FRE_{norm\lambda}$ é a FRE normalizada de cada sensor da câmera.

Na sequência, é necessário obter o valor total de radiância na banda de interesse para cada potência da Esfera Integradora, integrando-se os valores de $L_{\lambda, Pot}$ conforme (5).

$$L_{B, Pot} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, Pot} d\lambda \quad (5)$$

Este valor de radiância será o utilizado para a calibração final. Para os sensores monocromáticos a banda de operação da câmera é de 500 a 850 nm, enquanto para o sensor RGB a banda é de 400 a 850 nm.

Em seguida, a câmera Sequoia foi posicionada em frente à Esfera Integradora para obter imagens com seus 5 sensores, nas 11 potências possíveis. As imagens foram obtidas no modo manual, com as configurações descritas na Tabela III. O cálculo de médias de ND de cada imagem se deu realizando um corte de um círculo central de diâmetro igual a 250 pixels para os sensores monocromáticos e 900 pixels para o RGB, o que equivale a aproximadamente 27% da área do círculo luminoso original. Este recorte da imagem e o cálculo das médias e desvios padrões de ND foram realizados com o software ImageJ.

As configurações escolhidas visaram o aproveitamento máximo da câmera sem perdas de informação, ou seja, com ND próximo ao máximo nas maiores potências, porém sem saturação, como no exemplo da Fig. 10, que mostra o corte circular realizado na imagem do sensor REG com somente a lâmpada de 150 W ligada, acompanhado do histograma de distribuição de valores de ND.

Por fim, os dados de média e desvio padrão de ND obtidos foram utilizados para realizar a calibração final juntamente com os dados de radiância, chegando-se à relação da Radiância em função dos números digitais, $L_{B, Pot}(ND_{Pot})$.

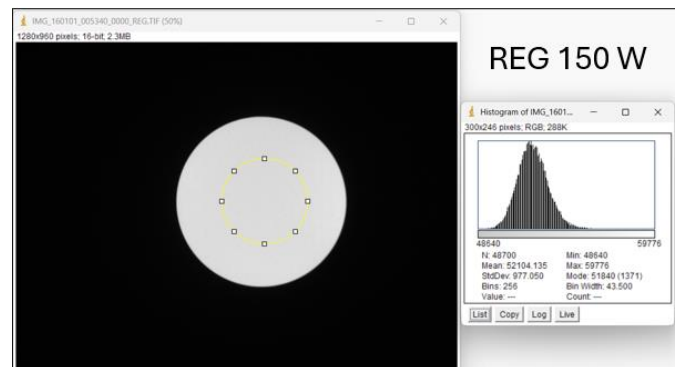


Fig. 10. Exemplo de imagem obtida na Esfera Integradora, com o corte circular e o histograma de distribuição de ND.

TABELA III. CONFIGURAÇÕES PARA A CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA.

| Sensor | ISO | Tempo de Exposição (μ s) |
|--------|-----|-------------------------------|
| Green | 100 | 30 |
| Red | 100 | 30 |
| REG | 100 | 230 |
| NIR | 100 | 30 |
| RGB | 100 | 200 |

VI. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A metodologia apresentada permitiu a caracterização espectral e calibração radiométrica da câmera Parrot Sequoia. Nas Fig. 11 e Fig. 12, estão as FREs dos sensores monocromáticos e do sensor RGB, respectivamente. Pode-se observar que as FREs obtidas estão condizentes com as informações fornecidas pelo fabricante da câmera, apresentadas na Tabela I.

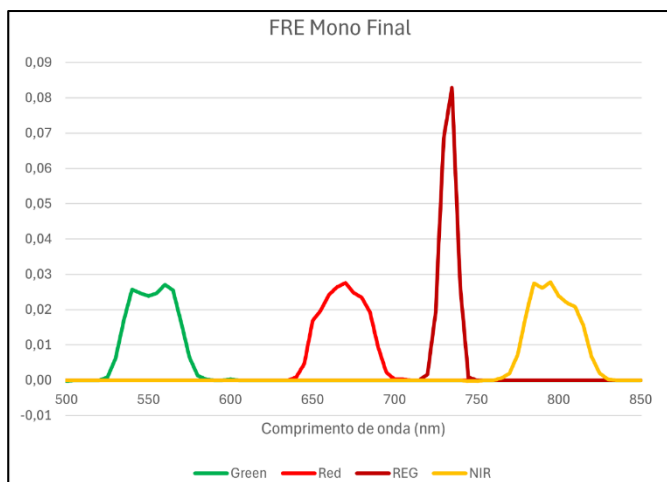


Fig. 11. FRE dos sensores monocromáticos da Sequoia.

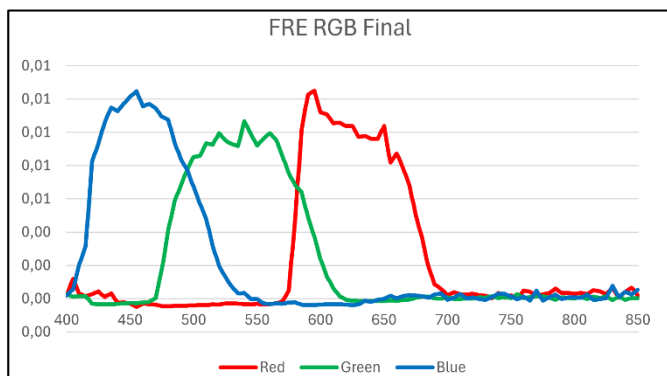


Fig. 12. FRE do sensor RGB da Sequoia.

Na Fig. 13 são apresentadas as curvas e coeficientes de calibração radiométrica dos sensores monocromáticos. Como pode ser observado, foram obtidos apenas 6 dados da radiação em função dos números digitais por conta da extrapolação dos NDs nas potências mais elevadas.

A partir dos gráficos verifica-se a linearidade dos dados, o que permitiu o ajuste de uma reta aos dados experimentais, fornecendo os coeficientes de calibração radiométrica.

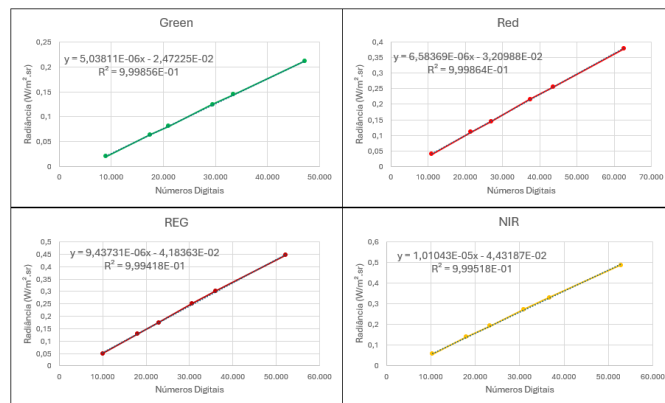


Fig. 13. Calibração dos sensores monocromáticos.

Esta metodologia pode ser repetida para a calibração pré-lançamento de qualquer sensor eletro-óptico orbital embarcado em satélites de sensoriamento remoto.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Portaria nº 1.225/GC-3, de 10 de novembro de 2020. Aprova a edição da Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira (DCA 1-1) – Volume 2. Boletim do Comando da Aeronáutica, Brasília, n. 205, 12 nov. 2020.
- [2] C. Pinto *et al.*, “First in-flight radiometric calibration of MUX and WFI on-board CBERS-4”, *Remote Sens (Basel)*, vol. 8, nº 5, 2016, doi: 10.3390/rs8050405.
- [3] M. V. Q. S. A. Costa, A. J. Damião, e R. M. De Castro, “Estudo de métodos de calibração radiométrica de sensores ópticos orbitais”, em *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE 2023)*, 2023. [Online]. Disponível em: https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2023/st/235420_1.pdf?x34048
- [4] F. J. Ponzoni, C. T. Pinto, R. A. C. Lamparelli, J. Z. Junior, e M. A. H. Antunes, “*Calibração de Sensores Orbitais*”. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Acessado: 17 de julho de 2023. [Online]. Disponível em: <https://play.google.com/books/reader?id=IBDkBWAAQBAJ&pg=GBS.PT2.w.0.0.0.3&hl=pt>
- [5] C. T. Pinto *et al.*, “Evaluation of the uncertainty in the spectral band adjustment factor (SBAF) for cross-calibration using Monte Carlo simulation”, *Remote Sensing Letters*, vol. 7, nº 9, p. 837–846, set. 2016, doi: 10.1080/2150704X.2016.1190474.
- [6] PARROT, Parrot Sequoia User Guide V1.1. Maio 2017. Disponível em: https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/sequoia-userguide-en-fr-es-de-it-pt-ar-zh-jp-ko_0.pdf
- [7] M. Franzini, G. Ronchetti, G. Sona, e V. Casella, “Geometric and radiometric consistency of parrot sequoia multispectral imagery for precision agriculture applications”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, nº 24, dez. 2019, doi: 10.3390/app9245314.
- [8] J. Dos Santos, A. J. Damião, e R. M. De Castro, “Avaliação da saturação de imagens para a caracterização espacial de sensores imageadores eletro-ópticos”. [Online]. Disponível em: <https://proceedings.science/p/164408?lang=pt-br>
- [9] ACTON RESEARCH CORPORATION, Spectrapro-2500i: Operating instructions. Acton, MA, 2003
- [10] LABSPHERE, Uniform Source System USS-600,1200,2000, AQ-00273-000, Rev 3”.
- [11] ASD Inc. PANALYTICAL, FieldSpec ® 4 User Manual, ASD Document 600979, Rev F, Maio 2016.
- [12] LIMA FILHO, Geraldo Mulato de. “Metodologia de caracterização de sistema eletro-óptico para missões de busca e patrulha marítima”. 2015. 106f. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [13] P. D. Hiscocks, “Measuring Luminance with a Digital Camera”, 2011. [Online]. Acessado em: 06 de julho de 2024 Disponível em: https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/Tektronix-J16_Application.pdf