

Comparação de Espectrorradiômetros por Radiância Espectral para uso Combinado

Thamis da Silva Salles¹, Thaynara Pereira Coelho Americano¹, Marcelo Girão Pessoa^{1,2}, Alvaro José Damião² e Ruy Morgado de Castro²

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

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

Resumo – Este trabalho tem por objetivo apresentar a comparação de dados de radiância espectral entre 350 e 2.500 nm obtidos, em laboratório, utilizando três espectrorradiômetros de campo e uma esfera integradora, com o objetivo de avaliar a compatibilidade e robustez dos dados. Os resultados obtidos são apresentados em função do comprimento de onda e da potência fornecida pela esfera integradora. Pela análise da radiância total no espectro, calculou-se a variação média entre as potências analisadas, por espectrorradiômetro. Por meio de ferramentas estatísticas como o coeficiente de variação entre potências, identificou-se faixas do espectro em que o uso dos espectrorradiômetros deve ser ponderado e evitado em situações de caracterização e calibração de sensores e superfícies.

Palavras-Chave – Espectrorradiômetro, comparação de espectrorradiômetros.

I. INTRODUÇÃO

A precisão de espectrorradiômetros em medições de radiância e irradiância é crítica para aplicações em sensoriamento remoto. Em aplicações de análise e caracterização de materiais e superfícies, a confiabilidade de amostras de dados espectrais é ainda mais vital, pois baliza e delimita seu uso e aplicação. No cenário de segurança nacional, obter informações detalhadas utilizando instrumentos de sensoriamento remoto de interesse dual (civil e militar) permitem ampliar a capacidade de reconhecimento e vigilância, promovendo adequada pronta-resposta [1]. No entanto, variações intrínsecas entre instrumentos, ainda que da mesma linha e fabricante, podem introduzir incertezas nos processos de caracterização e calibração de sensores, comprometendo a confiabilidade dos dados quando empregados em conjunto e simultaneamente. Além disso, apontar eventuais inconsistências de medição favorece a definição de incertezas experimentais de forma sistemática [2].

Assim, este trabalho buscou comparar as medições de radiância de três espectrorradiômetros ASD FieldSpec [3] do laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos – LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados – IEAv. Assim, utilizando uma esfera integradora (EI) [4] e uma mesma geometria de medição, os dados obtidos dos espectrorradiômetros podem ser comparados, e utilizados de forma combinada em procedimentos de caracterização e calibração de superfícies e sensores em campo que exijam uso concomitante de múltiplos equipamentos, e, por meio de uma constante de equivalência, reduzir as incertezas experimentais que existem quando se emprega diferentes instrumentos ao mesmo tempo, sem correlação definida.

Thamis da Silva Salles, salles@ita.br. Thaynara Pereira Coelho Americano, thaynara@ita.br. Marcelo Girão Pessoa, marcelogiraomgp@fab.mil.br. Alvaro José Damião, damiao@ita.br. Ruy Morgado de Castro, ruymcastro@gmail.com

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Arranjo Experimental

O arranjo experimental é indicado na Fig 1, e envolveu os espectrorradiômetros (comparados com o FieldSpec 19084, tomado como referência) e uma esfera integradora.

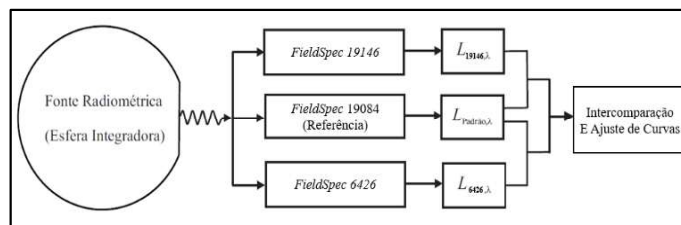


Fig. 1. Fluxograma da metodologia de comparação. Adaptado de [2].

As medições foram conduzidas no LaRaC, com umidade e temperatura controladas e estáveis em 60% e 20 °C, respectivamente, ao longo das medições. Os três espectrorradiômetros utilizados são os FieldSpec da *Analytical Spectral Devices* (ASD): o modelo “Pro”, nº 6426 (adquirido em 2.003); e os modelos “4”, nº 19084 (adquirido em 2.023); nº 19146 (adquirido em 2.024).

Os três FieldSpecs em questão operam na faixa espectral compreendida entre 350 nm a 2.500 nm, cobrindo as regiões do ultravioleta (UV), visível, infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). Os três equipamentos são igualmente compostos por três radiômetros independentes (um operando de 350 a 1.000 nm, outro de 1.000 a 1.850 nm e o último de 1.850 a 2.500 nm), os quais são sensibilizados pela radiação proveniente de um cabo composto por 57 fibras ópticas, sendo que cada radiômetro recebe a radiação de 19 fibras [2].

A Esfera Integradora utilizada foi a modelo USS2000, da *Labsphere*. A EI é revestida internamente com *Spectrafluo*® e possui quatro lâmpadas halógenas, demarcadas como “A”, “B”, “C” e “D” com potências nominais de 150, 45, 100 e 45 W, respectivamente. A lâmpada C está montada em um iluminador com um obturador. Deste modo, com a combinação destas lâmpadas, podem ser obtidas 11 irradiâncias diferentes.

Além disso, utilizou-se uma plataforma integrada à mesa da esfera integradora, sobre a qual foi fixada um suporte de fibra óptica dos espectrorradiômetros, garantindo assim o alinhamento horizontal entre o conjunto, sem angulação zenital e azimutal entre os equipamentos (EI e ponta do guia de fibras do FieldSpec), conforme Fig. 2.

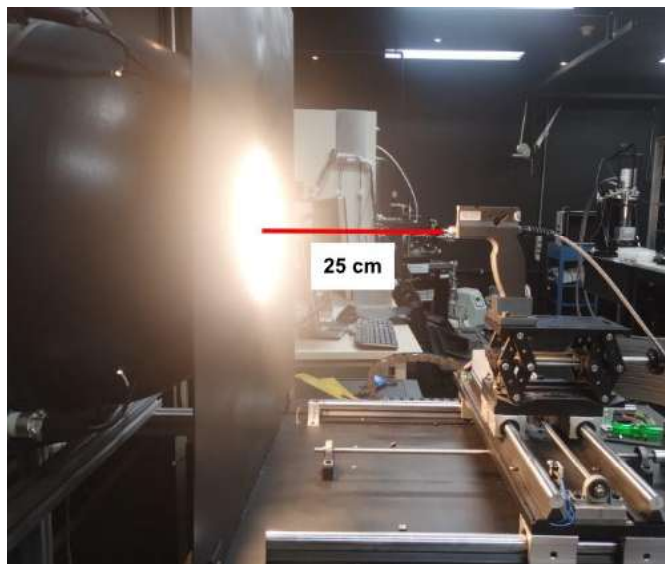


Fig. 2. Visão do posicionamento do suporte da fibra óptica fixada até a esfera integradora.

A ponta do conjunto de fibras foi posicionada a uma distância de 25 cm da abertura da EI, como visto na Fig. 2, sendo apontada perpendicularmente no centro da abertura da esfera, de forma que o campo de visada (*Field of View* - FOV) fosse completamente preenchido pela abertura da EI para reduzir possíveis ruídos. Com o objetivo de garantir que todos os espectrorradiômetros e lâmpadas da esfera integradora estivessem devidamente aquecidos, todo o conjunto era ligado uma hora antes das medições a fim de aguardar o equilíbrio térmico das lâmpadas. Ao longo das medições, toda e qualquer fonte de iluminação no laboratório, exceto a proveniente da EI, era apagada. Como forma de garantir o controle de qualidade nas medições, e evitar erros de leitura por saturação da radiação proveniente da esfera integradora, ao iniciar cada rodada de medições, realizadas a cada 5 min, os espectrorradiômetros eram otimizados e configurados para fornecer *output* em radiância ($W/m^2 \cdot sr \cdot nm$) [3]. Em seguida uma lâmpada da combinação era desligada e as medições prosseguiram, até que todas as combinações de lâmpadas fossem medidas, conforme apresentado na TABELA I.

TABELA I. CONFIGURAÇÕES DAS LÂMPADAS PARA AS MEDIÇÕES DE RADIÂNCIA DISTRIBUÍDAS EM TURNOS DE MEDIÇÃO

TURNO 1	TURNO 2	TURNO 3	TURNO 4	TURNO 5
ABCD	ABD	ACD	BCD	AD
ABC	AB	CD	BD	
BC	A	C	D	
B				

No início de cada sequência de medição a ponta do conjunto de fibras de cada espectrorradiômetro era ajustada no suporte de fibra, sempre fixo e imóvel no arranjo, ao longo de todo o período de medições.

Cada espectro (de 350 a 2.500 nm) fornecido pelos espectrorradiômetros corresponde à média aritmética de 10 medições. Além disso, as medições de radiância são amostradas de 1 nm em 1 nm.

Deste modo, em cada sequência de medição, coletou-se dez espectros. Com isto, obteve-se um valor médio e um desvio padrão (para cada comprimento de onda) para a sequência de medição.

Assim, para cada espectrorradiômetro foram obtidos 140 espectros, correspondendo a 10 espectros para cada uma das 14 combinações de lâmpadas.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados foram coletados, variando a potência fornecida por meio das combinações das lâmpadas A, B, C e D, conforme já descrito e apresentado na Fig. 3. Em seguida foi feita a análise dos espectros de cada espectrorradiômetro.

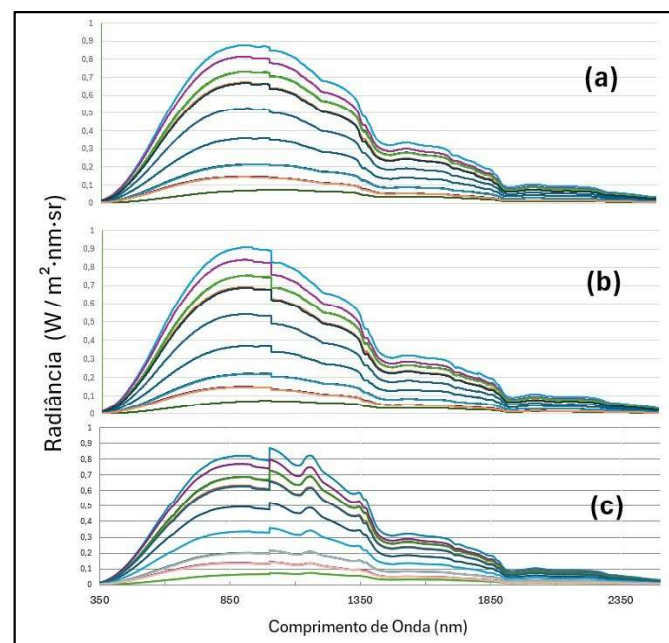


Fig. 3. Radiância por potência (combinação de lâmpadas) antes da correção. Em (a), potência do FieldSpec 19084, usado como referência, em (b) potência do FieldSpec 19146 e em (c) potência do FieldSpec 6426.

A. Análise Exploratória

Devido a própria construção dos espectrorradiômetros [6], verificou-se uma descontinuidade sistêmica em 1000 nm, com maior intensidade nos espectrorradiômetros 19146 e 6426, conforme pode-se verificar nos gráficos (b) e (c) da Fig. 3. A variação, entre as medições dos espectrorradiômetros e dos radiômetros de um mesmo equipamento, foram superiores a 5%. Este fato sugere um eventual problema com as fibras ópticas dos equipamentos.

Deste modo, procedeu-se a uma verificação de integridade das fibras nos espectrorradiômetros FieldSpec 19084 e 19146 (conforme Fig. 4). A partir destas verificações observou-se o “rompimento” de uma fibra que direciona a radiação ao radiômetro do SWIR 1 (1.000 a 1.850 nm) para o FieldSpec

19146 (imagem (b) da Fig. 4). Muito embora o FieldSpec 6426 não possua um sistema para verificar a integridade das fibras, o comportamento dos dados (conforme observado em “c”, Fig. 3) sugere o “rompimento” de uma fibra na faixa do UV/VNIR (350 a 1000 nm).

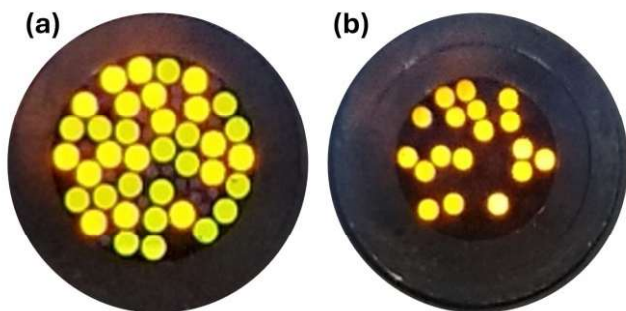


Fig. 4. Imagem do teste de integridade das fibras para o espectrorradiômetro FieldSpec 19146. Em (a) se observa as fibras ativas em dois radiômetros (UV/VNIR e SWIR 1) e na imagem da direita apenas 18 fibras ativas relativas ao radiômetro SWIR 1 (de 1.000 a 1.850 nm).

Para corrigir os dados de radiância provenientes dessas faixas do espectro, com vistas a normalizar os dados ao que seria esperado em caso de integridade total de fibras, utilizou-se (1):

$$Dado_{esperado} = \frac{Dado_{obtido}}{n^{\circ} \text{ de fibras íntegras}} \cdot 19 \quad (1)$$

onde: $Dado_{esperado}$ corresponde ao dado obtido em caso de não rompimento de fibras para cada um dos três espectrorradiômetros componentes de cada banda espectral e $Dado_{obtido}$ é o dado obtido considerando a fibra rompida.

Após o ajuste, os dados de radiância dos FieldSpec 19146 e 6426 ajustados são apresentados, conforme Fig. 5.

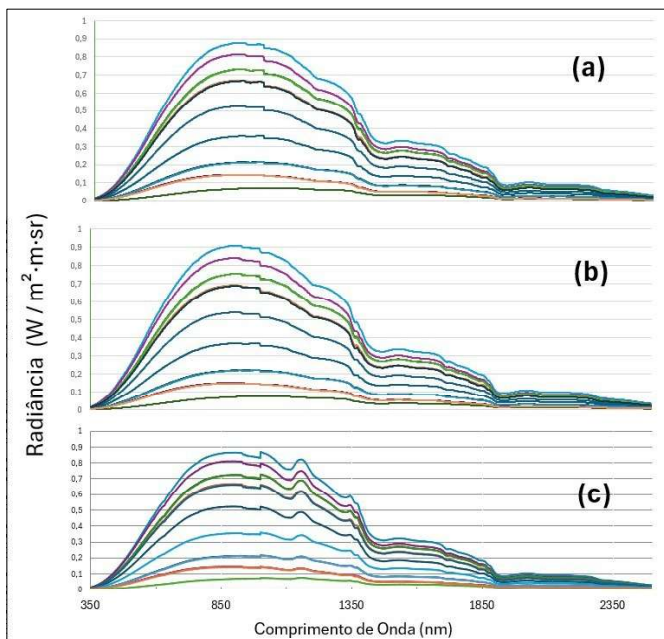


Fig. 5. Radiância por potência corrigida (combinação de lâmpadas). Em (a), potência do FieldSpec 19084, usado como referência, em (b) potência do FieldSpec 19146 e em (c) potência do FieldSpec 6426.

Após a correção, verificou-se também algumas discrepâncias ao longo dos espectros obtidos com o FieldSpec 6426 (gráfico “c” da Fig. 5), que são discutidas na Seção III.C.

B. Radiância Total

A partir dos dados corrigidos estudou-se a variação da radiância total entre os instrumentos. Para isto calculou-se a radiância total, integrando as radiâncias espectrais ao longo do espectro (de 350 a 2.500 nm), conforme (2):

$$L_{Total, Pot} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda_{Pot}) \cdot d\lambda \quad (2)$$

onde $L_{Total, Pot}$ é a radiância total do espectro, por potência (ou arranjo de lâmpadas), e $L(\lambda_{Pot})$ é a radiância por comprimento de onda, para uma potência definida.

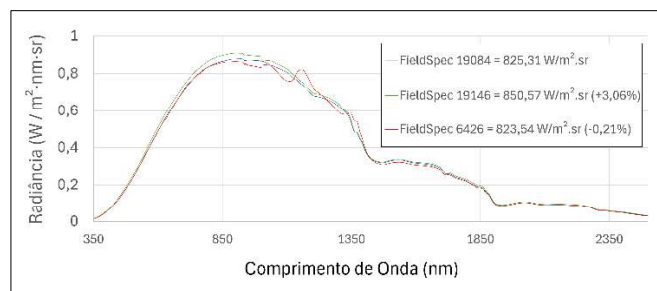


Fig. 6. Curva de Radiância Espectral, corrigida, obtida pela média aritmética de dez amostras por FieldSpec (desvio padrão e testes de normalidade foram executados) para todas as lâmpadas ligadas (ABCD).

Assim, obtém-se a relação entre as radiâncias totais por potência fornecida pela esfera integradora. Esta comparação permite quantificar os eventuais erros de medição entre os instrumentos. Para facilitar a comparação, adotou-se o FieldSpec 19084 como referência, visto que os dados para este espectrorradiômetro não necessitavam de correções devido ao comprometimento de fibras. O resultado obtido para a variação da radiância total em função de cada arranjo de lâmpadas ($L_{Total, Pot}$) pode ser observado na Fig. 12.

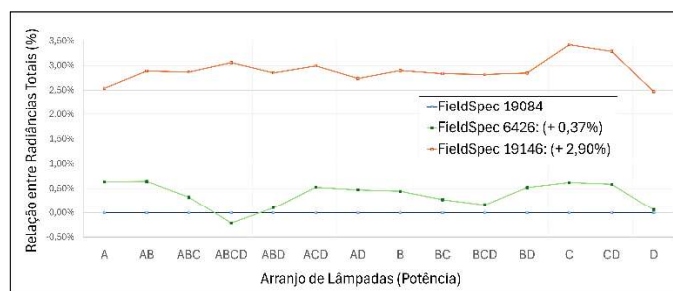


Fig. 7. Relação entre radiâncias totais por FieldSpec. Na legenda, a variação média de radiância total ($L_{Total, Pot}$), considerando todos os arranjos de lâmpadas.

Assim, tem-se que a média de variação da radiância total para todas as potências é de 0,37 % entre o FieldSpec 6426 e a referência, e 2,90% para o FieldSpec 19146.

C. Radiância Relativa

Outra comparação realizada foi a da diferença das radiâncias, definida pela razão entre a diferença das radiâncias espectrais obtidas pelos espectrorradiômetros e tomado como referência o FieldSpec 19084. Na Fig. 8 pode ser observado o resultado desta comparação, onde os diversos arranjos de potência medidos pelo FieldSpec 6426 estão apresentados em tons de verde, e pelo FieldSpec 19146 em tons de roxo.

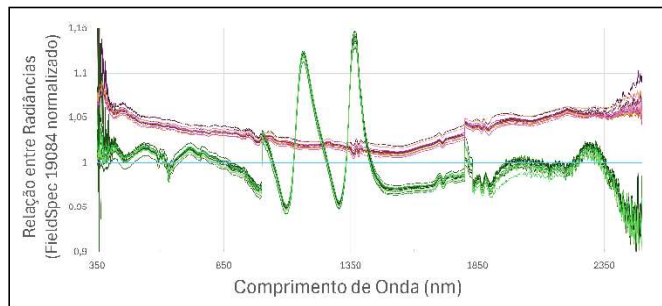


Fig. 8. Radiância relativa dos FieldSpec 19146 e 6426 em função dos dados normalizados do FieldSpec 19084 (azul em $y=1$).

Analisando a Fig. 8, é possível perceber que há um comportamento sistemático das medições dos espectrorradiômetros, independentemente da potência, quando se compara com os dados em função da normalização do FieldSpec 19084 (em azul).

Percebe-se que o FieldSpec 19146 fornece uma resposta sistematicamente maior, em relação ao FieldSpec 19084, ao longo de todo o espectro. Também pode ser observado que o FieldSpec 6426 possui, em média, uma resposta parecida com o do FieldSpec 19084. Entretanto, possui um comportamento incomum no segundo radiômetro, SWIR 1 (de 1.000 a 1.850 nm).

Também é possível observar que a variação da radiância relativa é muito significativa em alguns comprimentos de onda (em especial nas extremidades dos espectros, em torno de 350 nm e de 2.500 nm). Este fato está relacionado ao baixo sinal nestes comprimentos de onda, visto que a produção da radiação eletromagnética pela esfera integradora (radiação de corpo negro) é muito pequena. Além disso, mesmo em laboratório e em distâncias pequenas, ocorre a absorção da radiação pela atmosfera.

Assim, identifica-se graficamente a variação das médias, por comprimento de onda, das potências em relação à referência (FieldSpec 19084), conforme Fig. 9.

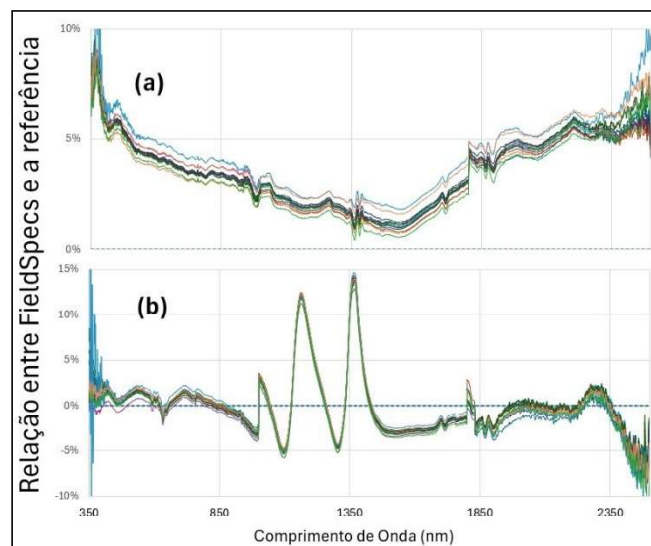


Fig. 9. Relação entre médias, por combinação de lâmpadas, entre (a) FieldSpec 19146 e a referência, e (b) FieldSpec 6426 e a referência.

Analisando a Fig. 9.b, percebe-se o mesmo padrão incomum entre 1.000 e 1.400 nm, aproximadamente, no FieldSpec 6426. Esse padrão sistemático, observado ao longo da faixa descrita e em todas as medições, no radiômetro SWIR 1 (de 1.000 a 1.850 nm), deve ser investigado em outro momento.

Para avaliar a precisão relativa com que os dados estão distribuídos entre as diversas combinações de lâmpadas, levou-se em conta o coeficiente de variação, CV, o qual permite avaliar a representatividade do desvio padrão em relação à média, e, assim, avaliar a consistência das medições ao longo das potências e do comprimento de onda. Referência [8] sugere que coeficientes de variação em torno de 2% são ideais para garantir alta precisão relativa entre equipamentos de medição. Na Fig. 10 é apresentado o gráfico que relaciona a flutuação do coeficiente de variação ao longo do espectro, considerando a referência tomada pelos dados do FieldSpec 19048.

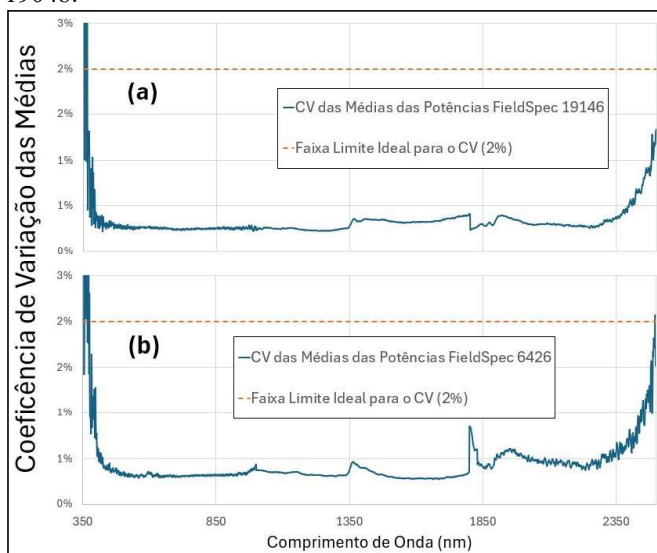


Fig. 10. Coeficiente de Variação entre Potências: em (a) o FieldSpec 19146 e referência, em (b) o FieldSpec 6426 e a referência.

Analisando a Fig. 10 é possível identificar regiões do espectro em que é necessário cautela ao se utilizar os FieldSpecs 19146 e 19084 combinados quando houver necessidade de uso em caracterização e calibração. Como mencionado anteriormente: a região entre 350 nm e 370 nm possui um CV superior a 22,5 %; já ao final do espectro, apesar da tendência de aumento do CV, o desvio padrão entre potências varia em torno de 1,5% entre os últimos comprimentos de onda.

A mesma comparação foi aplicada para o FieldSpec 6426. Observa-se que, apesar da alta variabilidade na região entre 1.000 nm e 1.400 nm (conforme demonstrado em (b) na Fig. 9), estatisticamente, os dados apresentam baixa variabilidade do desvio padrão em relação à média, para essa mesma faixa, conforme explicitado pelo coeficiente de variação, demonstrado em (b) na Fig. 10. Devido a este comportamento, não se recomenda a utilização deste equipamento para medições de radiância na faixa do radiômetro SWIR 1 (de 1.000 a 1.850 nm).

Em relação a variação do CV nas extremidades dos espectros valem as mesmas observações da análise do FieldSpec 19146.

III. CONCLUSÃO

Quando realizadas as comparações, percebe-se que, para a radiância total, a variação média entre as potências analisadas é de 2,90% para o FieldSpec 19146 e 0,37% para o 6426.

Já para o uso combinado, espectralmente deve-se ter atenção à faixa compreendida entre 350 nm e 370 nm, considerando a alta variabilidade combinada, para os dois FieldSpecs usados na comparação, havendo estabilidade significativa, em torno de 0,5%, a partir de 370 nm.

Foi observado no radiômetro SWIR 1 (de 1.000 a 1.850 nm) do espectrorradiômetro FieldSpec 6426 um comportamento incomum, e deve ser investigado posteriormente.

Deste modo conclui-se que os espectrorradiômetros podem ser utilizados de forma combinada, com exceção do radiômetro SWIR 1 do FieldSpec 6426.

REFERÊNCIAS

- [1] COSTA, Marcus V. de Q. S. A. **Metodologia de Caracterização Espectral, Radiométrica e Espacial de Sensor Eletro-óptico de Sensoriamento Remoto**. 2025. 118f. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2025.
- [2] PINTO, Cibele T. **Avaliação das incertezas na caracterização de superfícies de referência para calibração absoluta de sensores eletroópticos**. 2011. 135f. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
- [3] ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES, INC (ASD). Technical guide. 3. ed. Boulder, Colorado, USA: Analytical Spectral Devices, 1999. 140 p.
- [4] Integrating Sphere Manual. North Sutton: Labsphere. USS-2000, 2005.
- [5] SERENO, H. R. S.; SHERMETIEFF, A. J. Guia para elaboração de um plano de manutenção da confiabilidade metrológica de instrumentos de medição – escolha dos instrumentos. 2007. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/producao intelectual/obras_intelectuais/247_obraIntelectual.pdf>.
- [6] ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES, INC (ASD). User guide. 3. ed. Boulder, Colorado, USA: Analytical Spectral Devices, 2002. 136 p.

- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO/IEC 17025: Requisitos Gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, Rio de Janeiro, 2005.
- [8] GALLEANO, R., ZAAIMAN, W., VIRTUANI, A., PAVANELLO, D., MORABITO, P., MINUTO, A., SPENA, A., BARTOCCI, S., FUCCI, R., LEANZA, G., FASANARO, D., & CATENA, M. (2014). **Intercomparison campaign of spectroradiometers for a correct estimation of solar spectral irradiance: results and potential impact on photovoltaic devices calibration**. *Progress in Photovoltaics*, 22(11), 1128–1137. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/PIP.2361>>.