

Uso de espectros solares externos aos sistemas de sensores multiespectrais como alternativa para a correção e calibração radiométrica da reflectância ToA

Use of external solar spectra to multispectral sensor systems as an alternative for radiometric correction and calibration of ToA reflectance

Jonathan Gil Müller*, Alexander Christian Vibrans **

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA, Universidade Regional de Blumenau – FURB, jgmuller@furb.br

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA, Universidade Regional de Blumenau – FURB, acv@furb.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v62i1.97170>

Resumo

A maioria das missões de satélite de observação da Terra não possui instrumentos para medir a irradiância solar em órbita. Por consequência, a variabilidade temporal da reflectância registrada é baseada apenas na radiância medida pelo sensor, uma vez que a irradiância solar incidente é considerada constante. Tal abordagem negligencia variabilidades não sazonais associadas às atividades solares e pode comprometer a acurácia dos valores de reflectância. O objetivo deste estudo foi investigar se espectros solares obtidos diariamente por instrumentos externos a sistemas de sensores multiespectrais podem contribuir para o aumento da acuracidade dos dados de reflectância do topo da atmosfera (ToA). Foram utilizados espectros solares do instrumento *Spectral Irradiance Monitor* (SIM/SORCE) e dados de reflectância ToA do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+/Landsat-7). Os dados de reflectância ToA do portal *Radiometric Calibration Network* foram utilizados como referência para a análise de acurácia. Os resultados indicam que o uso dos espectros solares do SIM/SORCE na correção radiométrica da reflectância ToA do ETM+/Landsat-7 possibilita contribuir para aumentar as taxas de acuracidade da reflectância ToA nas bandas espectrais do verde ($> \sim 1\%$), vermelho ($> \sim 0,1\%$), NIR ($> \sim 0,1\%$), SWIR-1 ($> \sim 3\%$) e SWIR-2 ($> \sim 2\%$). Além disso, foram constatadas contribuições para a estabilidade temporal nas bandas do azul, verde, NIR e SWIR-1 ($< \sim 0,2\%$). Concluímos que o uso de espectros solares diários externos pode contribuir para o melhoramento da acurácia e da estabilidade temporal dos valores de reflectância ToA obtidos por sistemas de sensores multiespectrais cujo pré-processamento é baseado em valores de radiância.

Palavras-chave:

Ciclos solares de onze anos, *Spectral Irradiance Monitor*, *Enhanced Thematic Mapper Plus*, *Radiometric Calibration Network*, Acurácia.

Abstract

Most Earth observation satellite missions do not have instruments to measure solar irradiance in orbit. Consequently, the temporal variability of the recorded reflectance is based only on the radiance measured by the sensor, since the incident solar irradiance is considered constant. This approach neglects non-seasonal variability associated with solar activity and can compromise the accuracy of reflectance values. The aim of this study was to investigate if solar spectra obtained daily by instruments external to multispectral sensor systems can contribute to increasing the accuracy of top-of-atmosphere (ToA) reflectance data. Solar spectra from the Spectral Irradiance Monitor (SIM/SORCE) instrument and ToA reflectance data from the Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+/Landsat-7) sensor were used. ToA reflectance data from the Radiometric Calibration Network portal was used as a reference for the accuracy analysis. The results indicate that the use of SIM/SORCE solar spectra in the radiometric correction of ETM+/Landsat-7 ToA reflectance can help increase the accuracy rates of ToA reflectance in the green ($> \sim 1\%$), red ($> \sim 0.1\%$), NIR ($> \sim 0.1\%$), SWIR-1 ($> \sim 3\%$) and SWIR-2 ($> \sim 2\%$) spectral bands. In addition, contributions to temporal stability were found in the blue, green, NIR and SWIR-1 bands ($< \sim 0.2\%$). We conclude that the use of external daily solar spectra can contribute to improving the accuracy and temporal stability of ToA reflectance values obtained by multispectral sensor systems whose pre-processing is based on radiance values.

Keywords:

Eleven-year solar cycles, Spectral Irradiance Monitor, Enhanced Thematic Mapper Plus, Radiometric Calibration Network, Accuracy.

I. INTRODUÇÃO

A acurácia dos valores de reflectância do topo da atmosfera terrestre (ToA) obtidos por sistemas de sensoriamento remoto (SR) multiespectral é fundamental para promover confiabilidade e credibilidade dos resultados obtidos através de estudos pautados no uso desses produtos (Helder et al., 2010; Müller; Vibrans, 2024). As práticas atualmente implementadas para o processamento desses dados possibilitam a obtenção de um bom grau de assertividade ($>95\%$) (Markham et al., 2014; USGS, 2019a; USGS, 2019b). Contudo, o constante aperfeiçoamento dessas metodologias é essencial para garantir a qualidade dos dados obtidos, bem como das pesquisas realizadas a partir da utilização dessas informações.

Nesse contexto, a melhora da acurácia dos dados de SR tende a ser resultado da soma de pequenas contribuições específicas que podem interferir nas etapas de processamento (Müller; Vibrans, 2024). É de conhecimento que os ciclos solares de onze anos (longo prazo) e os fenômenos de atividade solar de curto prazo interferem no saldo de energia incidente no ToA. Desta forma, os sistemas de SR cuja correção radiométrica é baseada em valores de radiância (quando é considerado apenas a variabilidade do sinal registrado pelo sensor enquanto a irradiância solar é tratada como constante) podem apresentar a acurácia dos valores de reflectância

ToA comprometida (Müller; Vibrans; Pinto, 2024; Müller; Vibrans, 2024). Nesses casos, em que os sistemas de sensores não possuem instrumentos para medição direta da irradiância solar espectral em órbita, o parâmetro de irradiância solar exoatmosférica média (ESUN) é padronizado por um valor fixo durante o pré-processamento dos dados coletados (Markham et al., 2002; Li et al., 2020; Müller; Vibrans; Pinto, 2024; Müller; Vibrans, 2024). Esse valor fixo é implementado no processamento dos dados durante todo o período de operação do sensor.

Alguns sistemas de SR mais recentes, como o OLI/Landsat-8 e o OLI-2/Landsat-9, contam com instrumentos integrados que coletam e registram dados de irradiação solar em órbita de forma intermitente para auxiliar na calibração radiométrica e minimizar os efeitos da variabilidade não sazonal da energia incidente (Thome, 2001; Markham et al., 2014; USGS, 2019b). Nesses casos, a calibração e a correção radiométrica é pautada em valores de reflectância (Markham et al., 2014; Thome, 2001). No entanto, os sistemas de sensores que não contam com esse recurso (que representa a maioria das missões de satélite de observação da Terra), responsáveis pela obtenção do acervo histórico de informações sobre a superfície terrestre, podem ter a estabilidade temporal dos dados registrados prejudicada (Müller; Vibrans; Pinto, 2024; Müller; Vibrans, 2024). Consequentemente, estudos de monitoramento temporal referentes ao uso e ocupação da terra, bem como estudos que estimem variáveis biofísicas, como biomassa vegetal e qualidade da água, podem registrar pequenas variações que não são provenientes dos alvos observados, mas da irradiação solar incidente que não foi devidamente corrigida durante o pré-processamento dos dados (Müller; Vibrans; Pinto, 2024; Müller; Vibrans, 2024).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é investigar se espectros solares obtidos diariamente por instrumentos externos a sistemas de sensores multiespectrais, cuja calibração radiométrica é baseada em radiância, podem contribuir para aumentar a acuracidade do pré-processamento de dados de reflectância ToA de diversos sensores. Os objetivos específicos são três: (i) avaliar a contribuição dos espectros solares do instrumento SIM/SORCE para a correção e a calibração radiométrica da reflectância ToA do sensor ETM+/Landsat-7 e, consequentemente, dos sensores multiespectrais cujo pré-processamento é baseado em valores de radiância; (ii) analisar o impacto do uso dos espectros solares diários do SIM/SORCE na recuperação dos efeitos provocados pelas atividades solares na estabilidade temporal dos valores de reflectância ToA do ETM+/Landsat-7; e (iii) obter subsídios teóricos para ilustrar o uso de espectros solares diários externos à missão de satélite utilizada para a correção e calibração radiométrica da reflectância ToA de seus dados. Esperamos que o uso de espectros solares diários externos no processo de correção e de calibração radiométrica da

reflectância ToA de sensores multiespectrais contribua com o melhoramento da acurácia e da estabilidade temporal destes dados.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo (representada por meio de um resumo gráfico no arquivo de materiais suplementares) consiste na análise e comparação de três conjuntos de dados de reflectância ToA. Um conjunto com valores de referência, disponibilizados pela RadCalNet; um conjunto referente aos valores originais obtidos pelo sensor ETM+/Landsat-7; e um conjunto referente aos valores do ETM+/Landsat-7 radiometricamente corrigidos a partir do uso dos espectros solares do instrumento SIM/SORCE.

2.1 Aquisição dos dados

2.1.1 Dados de reflectância ToA de referência

Os valores de reflectância ToA de referência utilizados foram obtidos no portal RadCalNet [<https://www.radcalnet.org/>], que consiste em uma iniciativa estabelecida em 2013 para fornecer dados com consistência temporal e local para a calibração radiométrica de sensores remotos ópticos de observação da Terra (Bouvet et al., 2014). A rede conta com quatro locais automatizados de coleta de dados, são eles: La Crau, na França; Railroad Valley Playa, em Nevada, EUA; Baotou, na China; e Gobabeb, na Namíbia.

A RadCalNet disponibiliza dados de reflectância ToA obtidos para visualização nadir em intervalos de 30 minutos (das 9h às 15h no horário padrão de cada local) (Bouvet et al., 2014). Os dados disponibilizados cobrem a região do espectro eletromagnético entre 400 nm e 1000 nm (em todos os locais) e alguns locais fornecem uma cobertura espectral mais ampla de até 2500 nm, sendo o intervalo espectral dos dados de 10 nm (Bouvet et al., 2014).

Cada local que pertence a RadCalNet possui instrumentação para coleta de dados de reflectância da base da atmosfera (BoA) e medições atmosféricas, como profundidade óptica espectral do aerossol, tamanho dos aerossóis, quantidade de ozônio e vapor d'água (Bouvet et al., 2014). Os dados atmosféricos são utilizados para realização da correção atmosférica dos valores de reflectância BoA e, assim, gerar informações de reflectância ToA por meio do modelo de transferência radiativa MYSTIC (Bouvet et al., 2014). Os conjuntos de dados de reflectância ToA, reflectância BoA e medições atmosférica de cada um dos locais estão disponibilizados desde 2018. As configurações dos sítios da RadCalNet constam na Tabela 1 do arquivo de materiais suplementares. Estes dados foram utilizados para obtenção de séries temporais com valores de reflectância ToA de referência, calculados para diferentes bandas espectrais.

2.1.2 Dados de reflectância ToA do Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

O sensor ETM+ é um radiômetro multiespectral a bordo do satélite Landsat-7 e produz imagens de alta resolução da superfície da Terra nas regiões espectrais do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas longas (SWIR) e infravermelho termal (USGS, 2019a). Sua resolução espacial é de 30 m nas bandas do VIS, NIR e SWIR (USGS, 2019a). A resolução radiométrica e temporal é de 8 *bits* e 16 dias, respectivamente, e possui órbita polar síncrona com o Sol de 705 km de altitude (USGS, 2019a). Sua calibração e correção radiométrica são baseadas na radiância (Markham et al., 2002). Foram utilizados recortes das cenas do ETM+/Landsat-7 (*Collection-2 Level-1*) que coincidem com os cinco locais de coleta de dados da RadCalNet. Os dados de reflectância dos recortes das cenas do ETM+ (mediana dos valores dos *pixels*) constituem as séries temporais de reflectância ToA originais do ETM+ utilizados durante as análises.

O sensor ETM+ foi selecionado para este estudo por três motivos: 1) por coincidir com o período de coleta de dados do instrumento SIM/SORCE, conforme descrição no subitem 2.1.3; 2) viabilizar a análise da lacuna indicada por Müller e Vibrans (2024) referente à melhora da acurácia da correção radiométrica da reflectância ToA com ajuda dos espectros solares do SIM/SORCE; e 3) investigar a possibilidade de utilizar espectros solares variáveis para melhorar a acurácia dos produtos de reflectância de missões de satélite cuja calibração e correção radiométrica é baseada em valores de radiância (Markham et al., 2014).

2.1.3 Dados dos espectros solares do Spectral Irradiance Monitor (SIM)

O SIM/SORCE é um espectrorradiômetro que coleta e registra dados diários de irradiação solar ToA nas regiões espectrais entre 310 e 2400 nm e com resolução espectral entre 1 e 27 nm (Harder et al., 2005; LASP, 2022). Os valores disponibilizados são padronizados para uma distância média Terra-Sol de uma unidade astronômica (1 UA) e a velocidade de linha de visão relativa é zero em relação ao Sol (Harder et al., 2005; LASP, 2022). O instrumento SIM/SORCE coletou dados de irradiância solar espectral ToA diários entre abril de 2003 e fevereiro de 2020 [<https://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/>].

Embora existam missões orbitais com instrumentos mais precisos para monitorar a irradiância solar ToA, como o *Total and Spectral Solar Irradiance Sensor* (TSIS-1), foram utilizadas as informações do SIM/SORCE por coincidirem, simultaneamente, com a disponibilidade de dados de reflectância ToA em todos os locais da RadCalNet, durante o período de operação do ETM+.

As cenas/datas analisadas na proposta metodológica deste estudo foram escolhidas em função da disponibilidade simultânea de dados de reflectância ToA da RadCalNet, de cenas do sensor ETM+ obtidas nos sítios da RadCalNet e de dados de irradiância solar espectral ToA registradas pelo instrumento SIM.

2.2 Processamento e análise dos dados

2.2.1 Cálculo dos espectros solares (ESUN) ajustados

A correção radiométrica implementada nos valores de reflectância ToA obtidos pelo sensor ETM+ foi realizada ajustando o parâmetro ESUN de cada uma das cenas analisadas. Uma vez que esse parâmetro é considerado constante durante a obtenção dos valores de reflectância ToA originais das cenas, foram utilizados os espectros solares diários registrados pelo instrumento SIM/SORCE para o cálculo dos valores de ESUN ajustados, conforme proposto por Müller, Vibrans e Pinto (2024) (Equação 1).

$$ESUN = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot SRF(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SRF(\lambda) d\lambda} \quad [Wm^{-2}\mu m^{-1}] \quad (1)$$

Sendo λ_1 e λ_2 os limites espectrais da banda do ETM+ (nm); $E(\lambda)$ a irradiância solar espectral do ToA obtida pelo instrumento SIM/SORCE para o comprimento de onda λ ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$); e $SRF(\lambda)$ o valor de resposta espectral da região da banda do ETM+ (disponível em [https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer]) para o comprimento de onda λ (adimensional). As integrações propostas na Equação 1 foram realizadas numericamente através do método dos trapézios, uma vez que os dados de irradiância solar do ToA e de resposta espectral são discretos. Maiores detalhes sobre essa metodologia podem ser conferidos na sessão de materiais e métodos de Müller, Vibrans e Pinto (2024).

2.2.2 Cálculo dos valores de reflectância ToA

Foram analisadas séries temporais com valores de reflectância ToA referente aos cinco locais de operação do RadCalNet (RVUS, LCFR, GONA, BTCN e BSCN) e as seis bandas espectrais do ETM+ (azul, verde, vermelho, NIR, SWIR-1 e SWIR-2). Estes conjuntos de dados foram obtidos de acordo com a disponibilidade de dados de reflectância ToA do portal RadCalNet e de irradiância solar espectral ToA do instrumento SIM/SORCE, simultaneamente. A seguir estão detalhados os cálculos para obtenção das diferentes classes de valores de reflectância ToA analisados.

2.2.2.1 Reflectância ToA de referência – RadCalNet

Os valores que compõem as séries temporais de reflectância ToA de referência foram obtidos através da integração dos dados disponibilizados no portal RadCalNet para as regiões espectrais que pertencem as bandas analisadas do sensor ETM+/Landsat-7 (Equação 2).

$$\rho_{REF} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot SRF(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SRF(\lambda) d\lambda} \quad [\text{adimensional}] \quad (2)$$

Onde ρ_{REF} corresponde a reflectância ToA de referência para as bandas espectrais analisadas (adimensional); λ_1 e λ_2 são os limites espectrais das bandas do ETM+ (nm); $\rho(\lambda)$ a refletância espectral ToA disponibilizada pelo RadCalNet para o comprimento de onda λ (adimensional); e $SRF(\lambda)$ o valor de resposta espectral das regiões das bandas do ETM+ (disponível em [https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer]) para o comprimento de onda λ (adimensional). As integrações propostas na Equação 2 foram realizadas numericamente por meio método dos trapézios.

Com isso, foi obtida uma série temporal com valores de referência para comparar com as reflectâncias registradas pelo ETM+/Landsat-7 nos alvos escolhidos. Foram utilizados os limites espectrais de cada banda analisada e escolhidos os valores de $\rho(\lambda)$ mais próximos do horário de obtenção das cenas de cada sensor.

2.2.2.2 Reflectância ToA original – ETM+

Inicialmente, as cenas do ETM+/Landsat-7 foram recortadas de acordo com os cinco locais de coleta de dados do RadCalNet. Para cada subconjunto obtido (*clipper*), como superfícies com características homogêneas, foi obtida a mediana entre os pixels que a compõem (em número digital – DN), desconsiderando os valores nulos e/ou saturados, para que pixels impactados por ruído não comprometam a análise. A mediana foi utilizada como valor de referência para obter os valores de radiância (Equação 3) e, posteriormente, reflectância (Equação 4) para as cenas do ETM+.

$$L_0 = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{DN_{max} - DN_{min}} \right) \cdot (DN - DN_{min}) + L_{min} \quad [Wm^{-2}\mu m^{-1}] \quad (3)$$

Com L_0 representando a mediana da radiância dos *clippers* do ETM+ (em $Wm^{-2}\mu m^{-1}$); L_{max} e L_{min} a radiância máxima e mínima, respectivamente, das bandas do ETM+ analisadas (em $Wm^{-2}\mu m^{-1}$); DN_{max} e DN_{min} o número digital máximo e mínimo de cada banda analisada, respectivamente (adimensional); e DN o número digital correspondente a mediana de cada *clipper* (adimensional). As informações sobre L_{max} , L_{min} , DN_{max} e DN_{min} constam no arquivo de metadados das cenas da série temporal analisada.

$$\rho_{ETM+} = \frac{\pi L_0 d^2}{ESUN \cos(\theta_z)} \quad [\text{adimensional}] \quad (4)$$

Sendo ρ_{ETM} a reflectância ToA original dos *clippers* do ETM+ (adimensional); L_0 a radiância ToA correspondente, obtida através da Equação 3 (em $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$); d a distância Terra-Sol (em UA); e θ_z o ângulo zenital solar (em radianos); e ESUN o parâmetro de irradiância solar incidente. Os valores de d e θ_z de cada uma das cenas utilizadas são disponibilizados no respectivo arquivo de metadados das cenas. Foram utilizados os valores de ESUN padronizados, conforme sugerido no handbook do Landsat 7: $1970 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 1 (azul); $1842 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 2 (verde); $1547 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 3 (vermelho); $1044 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 4 (NIR); $225.7 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 5 (SWIR-1) e $82.06 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 7 (SWIR-2) (USGS, 2019a). Esses parâmetros foram gerados usando o espectro solar ChKur (USGS, 2019a).

Os valores obtidos para $\rho_{\text{ETM+}}$ compõem as séries temporais de reflectância ToA originais do sensor ETM+/Landsat-7. Estas, foram utilizadas para analisar a acurácia do sensor em relação aos valores de referência da RadCalNet (reflectância ToA de referência).

2.2.2.3 Reflectância ToA corrigida – ETM+/SIM

Os valores de reflectância ToA corrigidos do ETM+ (ρ_{FIXED}) foram obtidos implementando a correção radiométrica a partir do uso de espectros solares variáveis ajustados, conforme proposto por Müller, Vibrans e Pinto (2024). Essa etapa consiste em corrigir os valores de ESUN de acordo com a Equação 1 e, posteriormente, aplicar esses resultados no cálculo da reflectância ToA do ETM+ (Equação 4), substituindo o ESUN padronizado pelo corrigido. Os resultados obtidos compõem a série temporal de reflectância ToA corrigida do ETM+ e foram utilizados para quantificar a acurácia da correção radiométrica pautada no uso dos espectros solares do SIM/SORCE.

Para os dois conjuntos de dados de reflectância ToA do sensor ETM+ ($\rho_{\text{ETM+}}$ e ρ_{FIXED}), foram utilizadas apenas as cenas sem cobertura de nuvens nas localidades de análise (sítios), enquanto os dados de reflectância ToA da RadCalNet são disponibilizados com correção atmosférica para eliminar possíveis efeitos provenientes da presença de nuvens durante a coleta dos dados.

2.2.3 Análise da acurácia dos dados de reflectância ToA

A acurácia dos valores de reflectância ToA originais e corrigidos foram obtidos considerando a diferença entre os valores de referência da RadCalNet. Foi realizada a comparação direta da acurácia entre os conjuntos de dados originais e corrigidos do ETM+ através do Parâmetro de acurácia melhorada (EAP), proposto para este estudo (Equação 5).

$$EAP = \left(\frac{|\rho_{\text{ORI}} - \rho_{\text{REF}}| - |\rho_{\text{FIX}} - \rho_{\text{REF}}|}{\rho_{\text{REF}}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Com ρ_{ORI} e ρ_{FIX} representando as reflectâncias ToA originais e corrigidas do ETM+ (adimensionais), respectivamente; e ρ_{REF} indicando a reflectância ToA de referência (adimensional). O valor de EAP indica o impacto percentual na acurácia dos valores de reflectância ToA em relação ao padrão de referência disponibilizado pela RadCalNet. Este, pode ser positivo, indicando uma melhora na acurácia das cenas corrigidas; ou negativo, sinalizando uma piora. A descrição detalhada dos valores de EAP obtidos em cada um dos sites analisados está apresentada no arquivo de materiais suplementares.

Outras métricas estatísticas foram utilizadas para fundamentar a análise da melhoria de acurácia dos valores corrigidos. Foram calculados os parâmetros de Erro Percentual Absoluto Médio Simétrico (*Symmetric Mean Absolute Percentage Error* – SMAPE); Erro Percentual Absoluto Médio (*Mean Absolute Percentage Error* – MAPE); Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* – MAE); e BIAS.

2.2.4 Análise da estabilidade temporal dos valores de reflectância ToA

Para quantificar o efeito que os eventos de atividade solar promovem na estabilidade temporal de longo prazo da reflectância ToA das cenas analisadas foi utilizado o parâmetro de estabilidade temporal melhorada (ETS) (Equação 6), conforme proposto por Müller e Vibrans (2024).

Os valores de ETS sugerem o percentual de estabilidade temporal que pode ser melhorada durante a implementação da calibração radiométrica proposta (Müller; Vibrans, 2024). Essa comparação foi realizada entre o par de séries temporais de reflectância ToA corrigida do ETM+ em relação à reflectância ToA original do ETM. Nessa abordagem, valores positivos indicam uma redução na dispersão dos dados que compõe a série temporal analisada em relação a série de referência (melhora da estabilidade temporal), enquanto os valores negativos indicam aumento na dispersão desses dados (menor estabilidade).

$$ETS = \left(\frac{CV_1 - CV_2}{CV_1} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

Onde CV_1 e CV_2 representam os coeficientes de variação (CV) da reflectância ToA do par de séries temporais comparadas (adimensional), sendo CV_2 em relação a CV_1 .

Também foram realizados testes estatísticos de comparação de variâncias entre as séries temporais comparadas. Foi utilizado o teste de Bartlett nos conjuntos de dados paramétricos e o teste de Levene nos dados não-paramétricos. Os resultados da análise de estabilidade temporal de cada um dos sites estão apresentados no arquivo de materiais suplementares.

Todos os parâmetros analisados neste estudo foram obtidos por meio do conjunto de dados brutos (com *outliers*). Uma vez que os efeitos dos valores atípicos são proporcionais nos dois conjuntos de dados analisados (valores originais e corrigidos), eles não comprometem a comparação da acurácia e da estabilidade temporal entre esses valores. O processamento digital das imagens e a realização de todos cálculos e análises propostas nesse estudo foram implementados em linguagem Python.

III. RESULTADOS

Os resultados obtidos na análise da quantidade de cenas com melhor acurácia mostram que a correção proposta pode contribuir para o aumento da acurácia dos produtos de reflectância ToA do sensor ETM+ nas bandas espectrais do vermelho, NIR, SWIR-1 e SWIR-2 (Tabela 1). No entanto, considerando que esses resultados refletem uma média da compilação dos cinco sites, a análise isolada dos resultados obtidos para cada site pode proporcionar interpretações diferentes em relação à melhora da acurácia por banda espectral (ver materiais suplementares). Nesses casos isolados, a reflectância ToA corrigida de determinada banda pode apresentar melhora/piora na acurácia em relação a análise com os dados de todos os sítios compilados.

Tabela 1 – Compilação da análise de acurácia dos valores originais e corrigidos da reflectância ToA do sensor ETM+ em relação aos dados de referência dos cinco sites da RadCalNet.

Banda	Dados	Total de Cenas	Cenas com melhor acurácia		SMAPE (%)	MAPE (%)	MAE	BIAS
			N	%				
Azul	ETM+	145	92	63,45	10,2846	9,9687	0,0210	0,0014
	FIXED	145	53	36,55	10,7215	10,2296	0,0216	-0,0028
Verde	ETM+	142	73	51,41	10,3000	9,6411	0,0214	0,0012
	FIXED	142	69	48,59	10,3024	9,5616	0,0213	-0,0010
Vermelho	ETM+	144	64	44,44	10,1548	9,3874	0,0226	0,0019
	FIXED	144	80	55,56	10,1545	9,3866	0,0226	0,0019
NIR	ETM+	145	48	33,10	12,2567	12,0970	0,0312	0,0142
	FIXED	145	97	66,90	12,2506	12,0899	0,0312	0,0142
SWIR-1	ETM+	113	49	43,36	9,0713	8,0214	0,0277	0,0020
	FIXED	113	64	56,64	8,7843	7,5312	0,0258	-0,0090
SWIR-2	ETM+	26	1	3,85	14,7263	13,5214	0,0247	-0,0165
	FIXED	26	25	96,15	13,3244	12,3436	0,0223	-0,0133

Fonte: autores.

No entanto, considerando os resultados das métricas estatísticas dos erros (SMAPE, MAPE, MAE e BIAS), nota-se que os dados de reflectância ToA corrigidos do ETM+ apresentaram valores mais acurados que os dados originais do ETM+ em todas as bandas espectrais, exceto na banda do azul (Tabela 1). Contudo, a análise separada dos resultados de cada sítio pode permitir diferentes interpretações em relação às regiões espectrais com melhor acurácia (ver materiais suplementares).

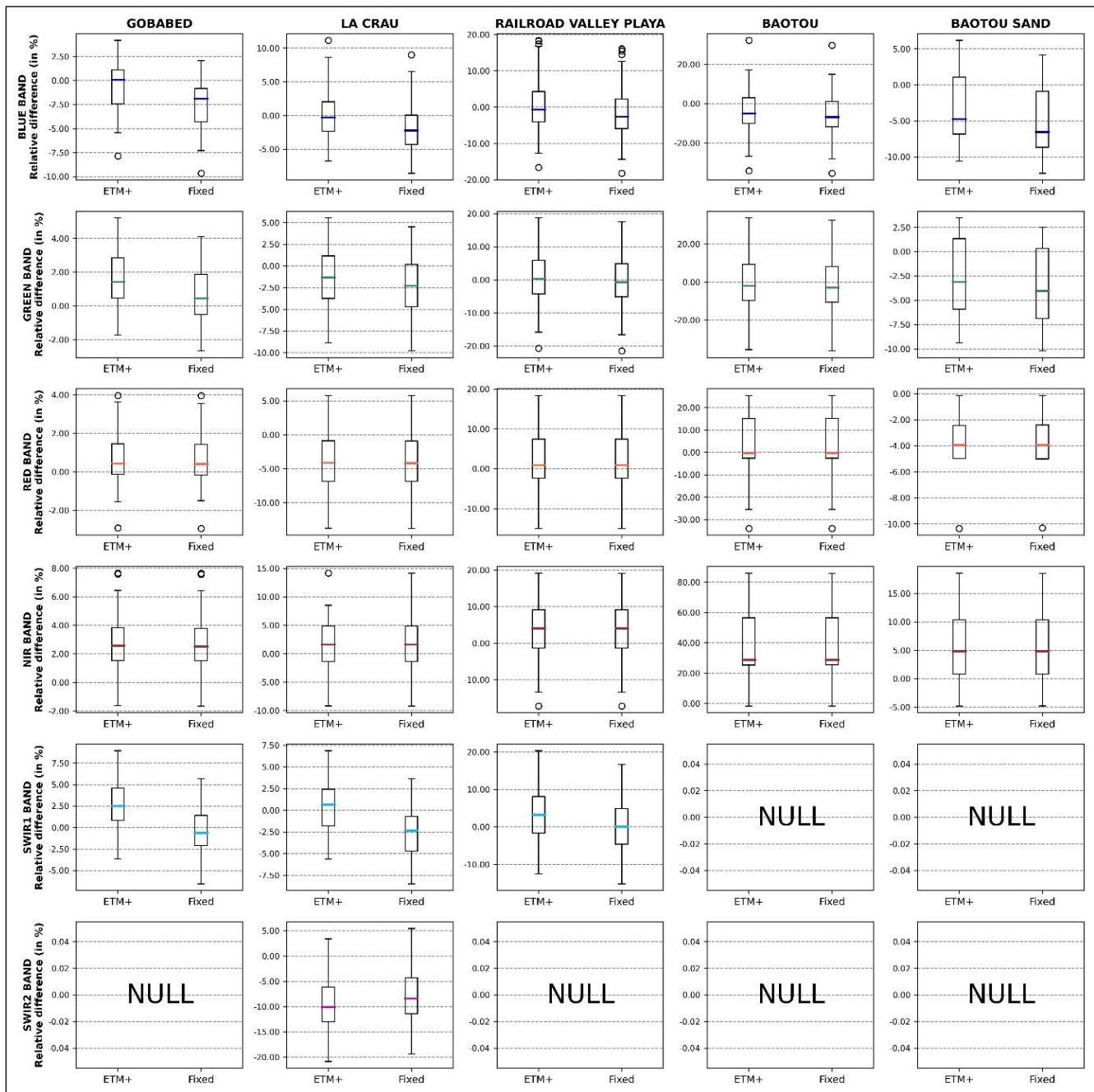


Figura 1 – Diferença relativa para a refletância ToA dos dados originais e corrigidos do sensor ETM+ em relação aos valores de referência dos cinco sites portal RadCalNet.

As análises individuais da estabilidade temporal melhorada em cada um dos sites sugerem pequenas contribuições ($ETS < 0.2\%$) em todas as bandas espectrais analisadas (ver materiais suplementares). No entanto, a análise de variância entre os conjuntos observados indica que nenhuma dessas mudanças é significativa ($p\text{-value} > 0.05$). Maiores detalhes sobre esses resultados estão apresentados nos materiais suplementares. As bandas do SWIR possuem uma quantidade menor de cenas analisadas em função da disponibilidade menor de

dados da RadCalNet para esta região espectral, visto que somente o sítio de La Crau tem instrumentos que operam nesses comprimentos de onda.

Os resultados de diferença relativa (erro) para os cinco sítios da RadCalNet nas seis faixas espectrais selecionadas constam na Figura 1. Observa-se que, em função do nível de dispersão das diferenças relativas obtidas, os sites de Railroad Valley Playa e Baotou apresentaram resultados menos adequados para calibração radiométrica da reflectância ToA. No entanto, considerando que os pixels que compõem as cenas do ETM+ não coincidem exatamente com as regiões de calibração da RadCalNet, entende-se que os pixels que compõe os *clippers* das cenas analisadas podem estar influenciados pelas características espectrais da vizinhança externa da região de calibração. Essa questão pode interferir na quantificação dos erros dos dados analisados, principalmente nos sites de La Crau, Railroad Valley Playa e Baotou, devido ao tamanho, forma geométrica e localização geográfica dessas regiões nas cenas do Landsat.

Os dados de reflectância ToA do sensor ETM+ apresentaram erro relativo inferior ou próxima 5% na maioria das cenas que correspondem as séries temporais analisadas, conforme indicado no *handbook* do instrumento (USGS, 2019a) (Figura 1 e Tabela 1).

IV. DISCUSSÃO

Alguns fatores que podem afetar na quantificação dos resultados obtidos (incertezas) não foram considerados nas análises realizadas. São eles: (a) horário entre a obtenção das cenas ETM+ e dos registros da RadCalNet, sendo que essa diferença varia entre 0 e 15 minutos; e (b) ângulo de visualização dos alvos imageados, considerando que os dados da RadCalNet são disponibilizados para o ângulo de visualização nadir e as cenas do ETM+ não. Como a proposta deste estudo é comparar os resultados e, conseqüentemente, avaliar se a abordagem proposta pode impactar positivamente a acurácia dos valores de reflectância ToA do ETM+, estes fatores de incerteza não afetariam de maneira significativa as conclusões e por isso não foram considerados durante a abordagem realizada.

Os resultados da análise dos valores de acurácia complementam o estudo de Müller e Vibrans (2024) sobre o impacto do uso dos espectros solares do SIM/SORCE na correção radiométrica dos produtos de reflectância ToA do sensor ETM+. Os autores constataram que os impactos são significativos, porém, não concluíram se estes são positivos, ou seja, se contribuem para o melhoramento da acurácia dos produtos, ou não. Os resultados aqui obtidos viabilizam essa avaliação e sinalizam a possibilidade desses impactos serem positivos para os produtos das bandas do verde, vermelho, NIR, SWIR-1 e SWIR-2.

A quantificação dos impactos na acurácia das cenas, representados pelo parâmetro EAP (ver materiais suplementares), estão de acordo com as diferenças percentuais médias entre os espectros solares diários do SIM/SORCE e os respectivos valores de ESUN de referência, sugeridos para a correção radiométrica do ETM+ (Müller; Vibrans; Pinto, 2024; Müller; Vibrans, 2024). Nesse sentido, a semelhança entre os espectros solares do SIM/SORCE nas regiões do vermelho e NIR com os respectivos valores de ESUN de referência, justificam os baixos impactos na acurácia dessas bandas espectrais.

Além disso, é importante que a metodologia proposta neste estudo também seja realizada com espectros solares de instrumentos mais modernos e precisos do que o SIM/SORCE, tais como as missões TSIS, por exemplo. Dessa forma, será possível estabelecer intervalos de confiança com mais exatidão para os impactos na acurácia das cenas corrigidas.

Em relação à estabilidade temporal dos dados do ETM+, os resultados sugerem que uma pequena parcela (não significativa) dessa estabilidade, tanto dos valores de acurácia como da reflectância ToA, pode ser melhorada com a utilização espectros solares obtidos diariamente por instrumentos não acoplados ao sistema do próprio sensor. Sendo assim, essa abordagem pode ser uma alternativa para contribuir com a calibração radiométrica de sensores que não contam com instrumentos integrados em seu sistema para registro da irradiância em órbita (calibração radiométrica baseada na radiância), recuperando uma parcela da variabilidade ocasionada por eventos solares não sazonais.

A utilização da acurácia (ou erro) para avaliar a estabilidade temporal das cenas obtidas foi uma alternativa para minimizar os efeitos da variabilidade das características espectrais dos alvos imageados ao longo do tempo. Desta forma, foi possível isolar os efeitos provenientes da instabilidade do sensor da variância correspondente aos alvos observados durante as análises.

Müller e Vibrans (2024), concluíram que a variabilidade ocasionada pelos ciclos solares na irradiância solar do ToA impacta a calibração radiométrica da reflectância ToA de sensores multiespectrais. Como a disponibilidade de dados que compõem as séries temporais analisadas nesse estudo são pequenas para alguns sites, e abrangem um período inferior a um ciclo solar, é possível que os indicadores obtidos estejam subestimados em relação aos impactos proporcionados pelos ciclos solares. Além disso, a cobertura temporal dos dados utilizados coincidiu com o período final do ciclo solar de número 24, fora do máximo solar. Nesse estágio, as variações da irradiação solar do ToA encontravam-se em ritmo de estabilização e não contemplaram períodos com variações mais expressivas, provenientes da atividade solar extrema. É provável que estudos

futuros com uma maior cobertura temporal obtenham indicadores mais promissores para sustentar a viabilidade de implementar essa abordagem nos processos de calibração radiométrica.

Por fim, este estudo apresenta subsídios para incentivar o início de discussões sobre uso de espectros solares diários obtidos por instrumentos externos ao sistema sensor na calibração e correção radiométrica de imagens multiespectrais. Os resultados aqui apresentados sugerem que tal abordagem possa ser favorável para o melhoramento da acurácia e da estabilidade temporal em algumas regiões espectrais. Contudo, mais estudos são necessários para analisar qual é o instrumento de medição de irradiação solar espectral do ToA mais adequado para este objetivo.

V. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos pode-se afirmar que não há indícios suficientes e determinantes para refutar a hipótese de estudo; de que o uso de espectros solares externos contribua com o melhoramento da acurácia e da estabilidade temporal da reflectância ToA obtidas por sensores multiespectrais cuja correção radiométrica é baseada em valores de radiância. Embora os impactos constatados nos dados radiometricamente corrigidos não apresentem significância estatística, constatamos que a abordagem proposta pode contribuir com um pequeno percentual do aperfeiçoamento da acurácia dos valores de reflectância ToA analisados, tanto na precisão dos registros como na sua estabilidade temporal. As principais conclusões são três: (i) a calibração radiométrica da reflectância ToA de sensores remotos multiespectrais que não possuem painéis difusores solares acoplados em seu sistema pode ser aprimorada com a utilização de espectros solares obtidos diariamente por instrumentos externos ao sensor calibrado; (ii) a utilização dos espectros solares obtidos pelo instrumento SIM/SORCE nos processos de correção e calibração radiométrica da reflectância ToA do sensor ETM+ pode contribuir com o melhoramento da acurácia e da estabilidade temporal desses valores; (iii) o uso de espectros solares diários obtidos por instrumentos externos aos sistemas de sensores calibrados contribui com a recuperação da instabilidade temporal associada aos fenômenos não sazonais de atividade solar.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Secretaria de Educação do Estado de Santa Catarina, Brasil (FUMDES/UNIEDU); pela Universidade Regional de Blumenau (FURB/PROPEX); pela bolsa de pesquisa do CNPq 305199/2022-6 para A. C. V.

VI. REFERÊNCIAS

- BOUVET, M. Radiometric comparison of multispectral imagers over a pseudo-invariant calibration site using a reference radiometric model. *Remote Sensing of Environment*, v. 140, p. 141–154, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.039>.
- HARDER, J.; LAWRENCE, G.; FONTENLA, J.; ROTTMAN, G.; WOODS, T. The Spectral Irradiance Monitor: Scientific Requirements, Instrument Design, and Operation Modes. *Solar Physics*, v. 230, p. 141–167, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11207-005-5007-5>.
- HELDER, D. L.; BASNET, B.; MORSTAD, D. L. Optimized identification of worldwide radiometric pseudo-invariant calibration sites. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 36, n. 5, p. 527-539, 2010. <https://doi.org/10.5589/m10-085>.
- LASP (Laboratory for Atmospheric and Space Physics). *SORCE - Solar Radiation and Climate Experiment*, 2022. <https://lasp.colorado.edu/home/sorce/>.
- LI, F.; JUPP, D. L. B.; SAGAR, S.; SCHROEDER, T. The Impact of Choice of Solar Spectral Irradiance Model on Atmospheric Correction of Landsat 8 OLI Satellite Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p. 1–11, 2020. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.3011006>.
- MARKHAM, B.; BARKER, J. L.; BARS, J. A.; KAITA, E.; THOME, K. J.; HELDER, D. L.; PALLUCONI, F. D.; SCHOTT J. R.; SCARAMUZZA, P. Landsat-7 ETM+ radiometric stability and absolute calibration. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2002. <https://doi.org/10.1117/12.462998>.
- MARKHAM, B.; BARS, J.; KVARAN, G.; ONG, L.; KAITA, E.; BIGGAR, S.; CZAPLA-MYERS, J.; MISHRA, N.; HELDER, D. Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability. *Remote Sensing*, v. 6, n. 12, p. 12275–12308, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs61212275>.
- MÜLLER, J. G.; VIBRANS, A. C.; PINTO, C. T. Impact of Solar Activity on the Calculation of ToA Reflectance Values of Multispectral Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 62, p. 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3364523>.
- MÜLLER, J. G.; VIBRANS, A. C. Variations in solar irradiance caused by solar cycle affect the temporal stability of ETM+ (LS7) ToA reflectance values at pseudo-invariant calibration sites (PICS). *International Journal of Remote Sensing*, v. 45, n. 16, p. 5530–5543. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2371085>.
- RadCalNet (Radiometric Calibration Network portal). *RadCalNet Quick Start Guide*. 2018. <https://www.radcalnet.org>.
- USGS (United States Geological Survey). *Landsat 7 (L7) Data Users Handbook*. 2 ed. [S.l.]: [s.n.]. 2019a. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-7-data-users-handbook>.
- USGS (United States Geological Survey). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. 5 ed. 2019b. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
- THOME, K. J. Absolute Radiometric Calibration of Landsat 7 ETM Using the Reflectance-based Method. *Remote Sensing of Environment*, v. 78, p. 27-38, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00247-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00247-4).