

ESTUDO DOS EFEITOS DE ILUMINAÇÃO SOLAR SOBRE A DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO HIPERESPECTRAIS COM BASE NA MUDANÇA DE ÓRBITA DO SATÉLITE EO-1

Lênio Soares Galvão¹, Alana Almeida de Souza²

^{1,2}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Avenida dos Astronautas, 1758, São José dos Campos-SP.

¹lenio.galvão@inpe.br, ²alana.souza@inpe.br

RESUMO

O satélite *Earth Observing-One* (EO-1) foi desativado em 2017 após operar por mais de 16 anos. Em fevereiro de 2011, o satélite ficou sem o combustível necessário para manter sua órbita estável. Consequentemente, a mudança de órbita produziu passagens equatoriais em horários cada vez mais próximos do início da manhã. Este estudo descreve um experimento hiperespectral, investigando os efeitos de iluminação solar sobre a determinação de vários índices de vegetação (IVs) medidos pelo sensor Hyperion/EO-1 em florestas tropicais. Os resultados mostraram que a mudança no horário de passagem do satélite EO-1 de 10:30 horas (pré-deriva) para 8:30 horas (deriva) produziu fortes efeitos sobre a determinação de IVs, especialmente para dados adquiridos a partir de 2015 e até a desativação do satélite, conforme indicado pela análise de pontos de mudanças em séries temporais. Os IVs associados com conteúdo de água foliar foram menos sensíveis aos efeitos de iluminação solar.

Palavras-chave — Amazônia, efeitos de iluminação solar, Hyperion, índices de vegetação, hiperespectral.

ABSTRACT

The Earth Observing-One (EO-1) satellite was decommissioned in 2017 after completing more than 16 years of operation. In February 2011, the satellite ran out of the fuel necessary to maintain orbit. As a result, there was a change in orbit that produced increasingly earlier equatorial crossing times. This study describes a hyperspectral experiment, investigating solar illumination effects on the determination of several narrowband vegetation indices (VIs) measured by the Hyperion/EO-1 instrument over tropical forests. The results showed that the change in EO-1 overpass time from 10:30 a.m. (pre-drift period) to 8:30 a.m. (drift period) produced large effects on VI determination, especially for Hyperion data acquired from 2015 until decommissioning, as indicated by the change-point analysis in time series. VIs associated with leaf/canopy water content were less sensitive to solar illumination effects.

Key words — Amazon, solar illumination effects, Hyperion, vegetation indices, hyperspectral.

1. INTRODUÇÃO

O satélite *Earth Observing-One* (EO-1), lançado em 21 de novembro de 2000, foi desativado em 2017, sendo considerado um marco no sensoriamento remoto hiperespectral. O satélite tinha a bordo o sensor Hyperion, que adquiria dados em 242 bandas (cada banda com 10 nm de largura), tendo 198 bandas radiometricamente calibradas. Os dados eram adquiridos entre 400 e 2400 nm com resolução espacial de 30 metros e tempo de revisita de 16 dias. A faixa de imageamento era 7,7 km, portanto, permitindo apenas a amostragem de faixas estreitas da superfície terrestre pelo sensor [1]. Em fevereiro de 2011, o satélite ficou sem o combustível necessário para manter sua órbita estável [2]. A mudança de órbita subsequente produziu passagens equatoriais em horários cada vez mais próximos do início da manhã, quando comparados com o horário regular de aquisição dos dados (10:30 horas).

Na literatura, alguns trabalhos têm analisado o impacto de mudanças de órbita sobre índices de vegetação tradicionais como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Os estudos têm abordado sensores como o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e o *Thematic Mapper* (TM)/Landsat-5 [3,4]. Nenhum destes estudos abordou a análise de índices de vegetação hiperespectrais devido à óbvia escassez de dados. Portanto, a mudança de órbita do satélite EO-1, que ocorreu a partir de 2011, representa uma oportunidade única para que essa avaliação seja feita com dados hiperespectrais.

Neste trabalho, utilizando uma pequena série temporal composta por 10 imagens do Hyperion/EO-1, adquiridas entre 2004 e 2016, avaliou-se o efeito de iluminação solar sobre a determinação de 16 índices de vegetação de bandas estreitas medidos em florestas tropicais do sul da Amazônia. Portanto, os efeitos resultantes do aumento do ângulo zenital solar (AZS), decorrentes da mudança da órbita do satélite EO-1 do período de pré-deriva (antes de 2011) para o de deriva (2011-2016), foram estudados. Resultados preliminares são reportados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo é um fragmento preservado de floresta estacional semidecidual (8 x 4 km), estando localizada no

Estado do Mato Grosso (S 13°12'22" e W 52°20'59") (Figura 1).

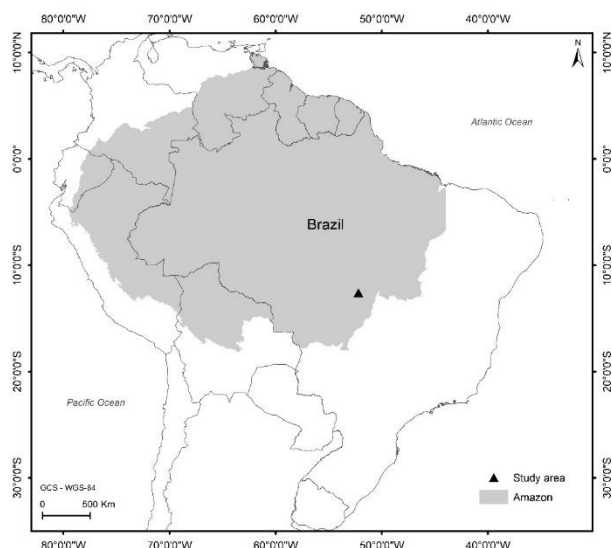


Figura 1. Localização da área de estudo.

Para esta área de estudo, foram selecionadas 10 cenas livres de cobertura de nuvens e com visada de imageamento ao nadir. Para reduzir a influência sazonal do AZS e da fenologia da vegetação, fixou-se um período restrito de busca de imagens na estação seca (20 julho a 11 de agosto). As datas de aquisição das imagens Hyperion/EO-1 foram: 1) 8 de agosto de 2004; 2) 27 de julho de 2005; 3) 2 de agosto de 2006; 4) 22 de julho de 2008; 5) 22 de julho de 2010; 6) 24 de julho de 2011; 7) 20 de julho de 2013; 8) 29 de julho de 2015; 9) 10 de agosto de 2015; e 10) 11 de agosto de 2016.

Após redução de *stripes*, as imagens foram convertidas para reflectância de superfície, portanto, corrigidas dos efeitos atmosféricos, usando o algoritmo *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (Harris Geospatial Solutions, Inc., Melbourne, Florida). Um modelo tropical com aerossol rural foi selecionado. Os dados de visibilidade foram estimados com o auxílio do método K-T [5].

Para fins de análise de dados, foram selecionados 16 índices de vegetação de bandas estreitas, com variações potencialmente associadas à estrutura do dossel, à bioquímica e à fisiologia [6]. Os índices selecionados foram: *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI); *Enhanced Vegetation Index* (EVI); *Enhanced Vegetation Index-2* (EVI2); *Leaf Water Vegetation Index-2* (LWVI-2); *Moisture Stress Index* (MSI); *Normalized Difference Infrared Index* (NDII); *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI); *Normalized Difference Water Index* (NDWI); *Photochemical Reflectance Index* (PRI); *Pigment Specific Simple Ratio* (PSSR); *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI); *Red-Edge Normalize Difference Vegetation Index* (RENDVI); *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI); *Visible*

Atmospherically Resistant Index (VARI); *Visible Index Green* (VIG); e *Water Band Index* (WBI). Equações e referências destes índices podem ser vistas na Tabela 1.

Usando um procedimento automático para escolha aleatória de dados, 500 pixels foram selecionados por data. Para determinar se mudanças estatisticamente significativas ocorreram na série temporal e a data destas mudanças, uma análise de pontos de mudança (*change-point analysis*) foi aplicada sobre os dados. Para este propósito, utilizou-se o pacote *Change Point Model* (CPM), disponível em R (*R Development Core Team*). Esta análise é um meio efetivo e computacionalmente eficiente de se detectar múltiplas mudanças em séries temporais [7]. Um modelo não-paramétrico foi usado na abordagem.

Tabela 1. Índices de vegetação selecionados para análise usando dados do sensor Hyperion/EO-1. A classificação dos índices foi feita com base em Roberts et al. [6]. ρ é a reflectância. As equações originais foram adaptadas para as bandas do Hyperion. As abreviações dos índices são definidas no texto.

Índice	Equação	Referência
Estrutura		
EVI	$2.5 \times ((\rho_{864nm} - \rho_{660nm}) / (\rho_{864nm} + 6 \times \rho_{660nm} - 7.5 \times \rho_{467nm} + 1))$	Huete et al. (2002)
EVI2	$2.5 \times ((\rho_{864nm} - \rho_{660nm}) / (\rho_{864nm} + 2.4 \times \rho_{660nm} + 1))$	Jiang et al. (2008)
NDVI	$(\rho_{864nm} - \rho_{660nm}) / (\rho_{864nm} + \rho_{660nm})$	Rouse et al. (1973)
VARI	$(\rho_{559nm} - \rho_{660nm}) / (\rho_{559nm} + \rho_{660nm} - \rho_{487nm})$	Gitelson et al. (2002)
VIG	$(\rho_{559nm} - \rho_{660nm}) / (\rho_{559nm} + \rho_{660nm})$	Gitelson et al. (2002)
Bioquímica		
ARI	$(1/\rho_{559nm}) - (1/\rho_{721nm})$	Gitelson et al. (2002)
LWVI2	$(\rho_{1094nm} - \rho_{1205nm}) / (\rho_{1094nm} + \rho_{1205nm})$	Galvão et al. (2005)
MSI	$(\rho_{1598nm}) / (\rho_{823nm})$	Hunt e Rock (1989)
NDII	$(\rho_{823nm} - \rho_{1649nm}) / (\rho_{823nm} + \rho_{1649nm})$	Hunt e Rock (1989)
NDWI	$(\rho_{854nm} - \rho_{1245nm}) / (\rho_{854nm} + \rho_{1245nm})$	Gao (1996)
PSSR	$\rho_{803nm} / \rho_{671nm}$	Blackburn (1998)
PSRI	$(\rho_{681nm} - \rho_{498nm}) / \rho_{752nm}$	Merzlyak et al. (1999)
SIPI	$(\rho_{803nm} - \rho_{467nm}) / (\rho_{803nm} + \rho_{681nm})$	Penuelas et al. (1995)
WBI	$\rho_{905nm} / \rho_{972nm}$	Penuelas et al. (1997)
Fisiologia		
PRI	$(\rho_{529nm} - \rho_{569nm}) / (\rho_{529nm} + \rho_{569nm})$	Gamon et al. (1997)
RENDVI	$(\rho_{752nm} - \rho_{701nm}) / (\rho_{752nm} + \rho_{701nm})$	Gitelson et al. (1996)

Finalmente, para cada índice de vegetação, foram calculadas mudanças relativas nos valores de mediana de 2016 em relação aos valores de mediana do período pré-deriva do satélite. No presente conjunto de dados, 2016 foi o ano de máxima deriva do satélite, o que correspondeu ao período de aquisição das imagens com o maior valor de AZS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base em inventário de campo prévio, constatou-se que a floresta estacional semidecidual da área de estudo é composta por três estratos de árvores com diferentes alturas: <10 m (8% das árvores), 10-20 m (62%) e > 20 m (26%) [8]. As árvores restantes são emergentes. Portanto, o dossel é relativamente uniforme com altura média de 23,8±2,7 m e área basal média de 14,3±2,52 m²/ha.

O período de deriva do satélite iniciou em 2011. Após inspecionar os metadados, observou-se um significativo declínio no horário local de passagem do satélite, quando comparado com o horário regular de aquisição dos dados (10:30 horas). O horário de passagem equatorial do satélite diminuiu em 15 minutos em 2011 até duas horas em 2016. Consequentemente, mudanças significativas no AZS durante a aquisição das imagens foram observadas. O AZS aumentou de 45° antes da deriva para 47° em 2011, 51° em 2013, 55° em 2014, 59° em 2015 e 67° em 2016.

Quando a análise de pontos de mudanças foi aplicada sobre os dados Hyperion, observou-se, com 95% de confiabilidade estatística, que as primeiras mudanças na série temporal foram detectadas em 2015 para a maioria dos índices de vegetação estudados (Tabela 2). VIG mostrou mudanças com os efeitos de iluminação solar em 2014, enquanto EVI-2 foi mais sensível a estes efeitos somente em 2016. Quando comparado com o período regular de aquisição de dados no presente estudo (2004-2010), 2015 representou uma diferença em AZS de 14° que aumentou em 2016 para 22° com a diminuição no horário de passagem do satélite para 8:30 horas. Este resultado é importante, visto que as mudanças sazonais de AZS observadas por sensores da série Landsat são normalmente superiores a 14° no sul da Amazônia. Elas deveriam ser consideradas na análise de séries temporais, especialmente para índices de vegetação sensíveis aos efeitos de iluminação solar.

Quando as mudanças relativas nas medianas foram comparadas entre o período regular de aquisição de dados e o ano de 2016, com o maior AZS na série temporal, verificou-se diferentes sensibilidades dos índices de vegetação para os efeitos de iluminação solar. Decorrente da maior quantidade de sombras vista sobre a floresta estacional decidual com o aumento de AZS em 22°, observado em 2016, os índices PSRI, ARI e SIPI apresentaram as maiores percentagens positivas de mudança com a deriva do satélite (Figura 2). Por outro lado, PRI, VARI e EVI mostraram as maiores percentagens negativas de mudanças com a diminuição do horário de passagem do satélite para 8:30 horas. Além disso, índices de vegetação como o LWVI-2, MSI, NDII e NDWI não mostraram mudanças significativas ou padrões bem definidos, o que é consistente com os resultados da Tabela 2.

Os resultados do presente estudo são concordantes com o pequeno número de investigações sobre a influência da iluminação solar na determinação de índices de vegetação medidos por sensores multiespectrais ou espectrômetros de campo. Por exemplo, para índices tradicionais como o NDVI, os resultados confirmaram observações prévias que mostraram um aumento deste índice com o aumento no AZS [4, 9-13]. Este comportamento do NDVI é resultante das maiores mudanças proporcionais observadas na reflectância do vermelho, quando comparadas com as modificações observadas no infravermelho próximo, ambas decorrentes das sombras. Quando comparado com o NDVI, o EVI diminuiu com o aumento do AZS ou com a quantidade de sombras vistas pelo Hyperion em 2016, devido à maior

dependência deste índice da reflectância da banda do infravermelho próximo, conforme também verificado por [8].

Tabela 2. Análise de pontos de mudanças em séries temporais para 16 índices de vegetação hiperespectrais, durante o período de mudança de órbita do satélite EO-1 (2011-2016). O primeiro ano de mudança na série temporal do Hyperion/EO-1, em relação ao período pré-deriva, é indicado com com 95% de confiabilidade estatística.

Índice de Vegetação	Ano de detecção de mudança
ARI	2015
EVI	2015
EVI-2	2016
LWVI-2	-
MSI	-
NDII	-
NDVI	2015
NDWI	-
PRI	2015
PSRI	2015
PSSR	2015
RENDVI	2015
SIPI	2015
VARI	2015
VIG	2014
WBI	-

No estudo de [14], usando dados multi-angulares e hiperespectrais do sensor *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS/PROBA), obtidos sobre florestas coníferas, SIPI, PRI e ARI foram indicados como os índices de vegetação mais sensíveis aos efeitos de ângulo de visada. De forma consistente, os resultados aqui obtidos mostraram que estes índices também são muito sensíveis aos efeitos de iluminação solar.

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram importantes variações para a maioria dos índices de vegetação estudados, decorrentes da mudança de órbita do satélite EO-1 (2011-2016), especialmente para dados adquiridos a partir de 2015. Em 2015, observou-se uma diferença de AZS de 14°, em relação ao período pré-deriva do satélite, que se acentuou para 22° em 2016. Em 2015 e 2016, os horários de passagem do satélite foram 9:05 e 8:30 horas, respectivamente, portanto, bem mais cedo do que o horário regular de aquisição das imagens Hyperion (10:30 horas).

Os índices de vegetação mais sensíveis aos efeitos de iluminação solar foram ARI, EVI, PSRI, PRI, SIPI e VARI. Índices como LWVI-2, MSI, NDII e NDWI foram pouco sensíveis ou não apresentaram padrões bem definidos com o aumento do AZS ou mudança de órbita do satélite.

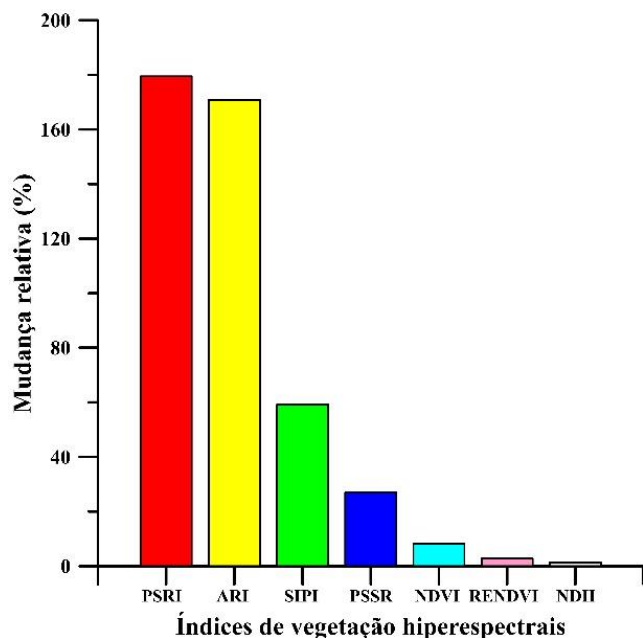


Figura 2. Exemplos de variações relativas nas medianas para índices de vegetação do Hyperion calculados durante a mudança de órbita do satélite EO-1 em 2016 (hora local de passagem = 8:30 horas; SZA = 67°). Os resultados são apresentados em relação ao período regular de aquisição de dados (hora de passagem = 10:30 horas; AZS = 45°) entre 2004 e 2008.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (301486/2017-4) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) (Código de Financiamento 001). Agradecimentos também são devidos ao USGS e EO-1 NASA Science Team pela cessão dos dados e extensão da missão.

6. REFERÊNCIAS

[1] Pearlman, J.S., Barry, P.S., Segal, C.C., Shepanski, J., Beiso, D., Carman, S.L. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, p. 1160–1173, 2003.

[2] Franks, S., Neigh, C.S.R., Campbell, P.K., Sun, G., Yao, T., Zhang, Q., Huemmrich, K.F., Middleton, E.M., Ungar, S.G., Frye, S.W. EO-1 data quality and sensor stability with changing orbital precession at the end of a 16 year mission. *Remote Sensing*, v. 9, article 412, 2017.

[3] Privette, J.L., Fowler, C., Wick, G.A., Baldwin, D., Emery, W.J. Effects of orbital drift on advanced very high resolution radiometer products: normalized difference vegetation index and sea surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, v. 53, p. 164–171, 1995.

[5] Kaufman, Y.J., Tanré, D., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A., Holben, B.N. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, p. 17051–17067, 1997.

[4] Zhang, H.K., Roy, D.P. Landsat 5 Thematic Mapper reflectance and NDVI 27-year time series inconsistencies due to satellite orbit change. *Remote Sensing of Environment*, v. 186, p. 217–233, 2016.

[6] Roberts, D.A., Roth, K.L., Perroy, R.L. Hyperspectral vegetation indices. In: Thenkabail, P.S., Lyon, J.G., Huete, A. (Eds.), *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, pp. 309–327, 2012.

[7] Ross, G.J. Parametric and nonparametric sequential change detection in R: the cpm package. *Journal of Statistical Software*, v. 66, p. 1–20, 2015.

[8] Galvão, L.S., dos Santos, J.R., Roberts, D.A., Breunig, F., Marcelo, B., Toomey, M., de Moura, Y.M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 2350–2359, 2011.

[9] Middleton, E.M. Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, v. 38, p. 45–62, 1991.

[10] Huete, A.R., Hua, G., Qi, J., Chehbouni, A., van Leeuwen, W.J.D. Normalization of multidirectional red and NIR reflectance with the SAVI. *Remote Sensing of Environment*, v. 41, p. 143–154, 1992.

[11] Epiphanio, J.N., Huete, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, v. 51, p. 351–360, 1995.

[12] Gao, F., Jin, Y., Schaaf, C.B., Strahler, A.H. Bidirectional NDVI and atmospherically resistant BRDF inversion for vegetation canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 40, p. 1269–1278, 2002.

[13] Goodin, D.G., Gao, J., Henebry, G.M. The effect of solar illumination angle and sensor view angle on observed patterns of spatial structure in Tallgrass Prairie. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 42, p. 154–165, 2004.

[14] Verrelst, J., Schaepman, M.E., Koetz, B., Kneubuehler, M. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 2341–2353, 2008.