

ESTUDO DOS EFEITOS DE ILUMINAÇÃO SOLAR SOBRE DADOS DE CONSTELAÇÃO DE SATÉLITES ADQUIRIDOS NA ESTAÇÃO SECA DA AMAZÔNIA

Caio Arlanche Petri¹, Lênio Soares Galvão¹, Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão¹, Ricardo Dalagnol², Catherine Torres de Almeida³, Afonso Henrique Moraes Oliveira⁴, e Iara Musse Felix⁴

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. {caio.petri;lenio.galvao;lui.aragao}@inpe.br. ²Center for Tropical Research, University of California, Los Angeles, USA. dalagnol@ucla.edu; ³Universidade Estadual Paulista, Registro, SP. catherine.almeida@unesp.br. ⁴SCCON Geospatial, São Paulo, SP. {afonso.oliveira;iara.musse}@scccon.com.br}

RESUMO

Utilizamos um conjunto de imagens PlanetScope para investigar efeitos de iluminação solar em atributos espectrais e espaciais calculados na estação seca em 12 áreas na Amazônia. Fizemos uma ACP para detectar alterações de brilho na vegetação antes de se calcular dois IVs com diferentes níveis de anisotropia. Métricas texturais foram obtidas a partir da banda do infravermelho próximo. Finalmente, frações-sombra foram calculadas a partir de um MLME. Os resultados mostraram que a iluminação solar afetou diferentemente os IVs. A ACP indicou aumento no brilho da vegetação durante da estação seca, enquanto as métricas texturais indicaram variações espaciais relacionadas à menor quantidade de sombras no final da estação seca. Este fato foi confirmado pelas frações-sombra, que diminuíram de junho para setembro. Os resultados indicam a importância do uso de constelação de satélites nos estudos de fenologia da vegetação da Amazônia e o cuidado no uso de IVs anisotrópicos para tal finalidade.

Palavras-chave — Iluminação solar, constelação de satélites, florestas tropicais, Amazônia.

ABSTRACT

We used a set of PlanetScope images to investigate solar illumination effects on spectral and spatial attributes calculated in the dry season over 12 sites of the Amazon. A PCA was performed to detect changes in vegetation brightness before calculating VIs with different levels of anisotropy. Texture metrics were obtained from the near-infrared band. Finally, shade fractions were calculated from an LSMM. The results showed that solar illumination affected the VIs differently. PCA indicated an increase in vegetation brightness through the dry season, while textural metrics had spatial variations related to lower amounts of shadows at the end of the dry season. This fact was confirmed by shade-fractions that decreased from June to September. The results highlight the importance of the use of satellite constellation data to study vegetation phenology in the Amazon and the care required when using anisotropic VIs for this purpose.

Key words — Solar illumination, satellite constellations, tropical forests, Amazon.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia possui as maiores extensões de florestas tropicais do planeta, possuindo um papel fundamental nos ciclos de carbono globais [1]. Resultados contraditórios sobre o comportamento do *Enhanced Vegetation Index* (EVI), obtido a partir do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), criaram um debate sobre a resiliência de florestas tropicais a eventos de seca extrema, com consequências para a construção de cenários de mudança climática [2, 3, 4, 5]. Possíveis efeitos de verdejamento observados em secas extremas de 2005 e 2010 pelo EVI poderiam ser explicados por um sinal biofísico medido pelo índice [2, 6, 7, 8] ou por efeitos bidirecionais de iluminação e aquisição das imagens [9, 10, 11, 12]. Adicionalmente, o próprio comportamento do EVI durante a estação seca em anos sem seca severa não possui completo embasamento para justificar as discussões.

Compreendendo que parte das incertezas observadas nas imagens MODIS são originadas pela anisotropia do EVI, um índice não normalizado fortemente correlacionado com a resposta do NIR [8, 9], e pelo largo campo de visada do sensor, que causa efeitos bidirecionais mais intensos em sua aquisição, correções para tais efeitos parecem solucionar grande parte da variabilidade do índice [13]. Entretanto, efeitos residuais ainda levantam dúvidas sobre uma resposta biofísica do dossel durante a estação seca (junho a setembro).

Neste contexto, constelações de satélites de alta resolução espacial oferecem uma diferente perspectiva sobre a construção de séries temporais, oferecendo alta revisita de cena e a possibilidade de cobertura significativa de regiões como a Amazônia. Tais dados podem contribuir para melhor compreender a resposta de índices de vegetação (IVs) obtidos na Amazônia usando CubeSats com visada ao nadir e alta resolução espacial e temporal. Mais especificamente, resta também compreender se efeitos causados pela variação da iluminação solar ao longo da estação seca existem nesses conjuntos de dados.

Este trabalho buscou avaliar os possíveis efeitos de iluminação solar presentes em imagens PlanetScope (PS) durante a estação seca na Amazônia, traduzidos por atributos espaciais e espectrais, entre os anos de 2017 e 2019 em 12 áreas selecionadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram obtidas 493 imagens PS livres de nuvens para 12 áreas de 5x5 km, distribuídas ao longo do bioma Amazônia, no Brasil, entre 2017 e 2019 (Figura 1). As áreas selecionadas abrangem florestas tropicais de diferentes características, com dosséis densos e regime de chuvas típico do bioma nas áreas ao norte e florestas de transição e regime de chuvas mais sazonal nas áreas ao sul [14]. Os metadados da aquisição das imagens e a posição relativa do sol durante as passagens dos sensores foram calculados para a compreensão da variação de iluminação durante a estação seca em todas as áreas. Para a análise espectral, foi realizada uma análise por componentes principais (ACP) utilizando amostras de 1.000 pixels em cada área para datas centrais nos meses de junho a setembro de 2018, assumidos aqui como período representativo da estação seca [15]. Os IVs EVI e NDVI foram calculados para todas as imagens, buscando criar curvas anuais representativas para os três anos de imagens disponíveis.

Para as análises espaciais, a matriz de co-ocorrência (GLCM) foi utilizada para obter métricas de textura das imagens, com foco na média e na variância. As amostras de 1.000 pixels para o ano de 2018 foram utilizadas para resumir graficamente os resultados. Finalmente, um modelo linear de mistura espectral (MLME) foi aplicado com foco na obtenção de frações-sombra ao longo da estação seca e compreensão da influência da iluminação solar na detecção de sombras nos dosséis. Os *endmembers* foram obtidos no primeiro mês da estação seca (junho) e mantidos até setembro. De forma complementar, o comportamento espectral das bandas e dos dois IVs foi testado com um alvo invariante composicionalmente (solo) para confirmar efeitos de iluminação solar.

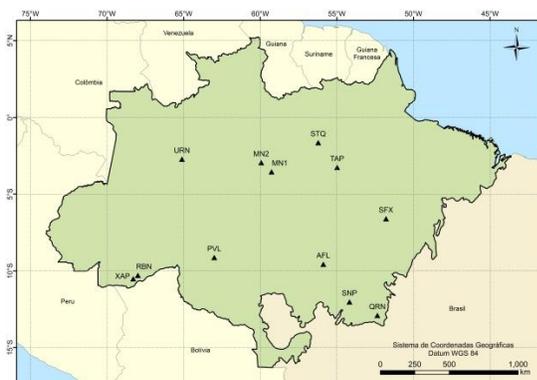


Figura 1. Localização das 12 áreas de estudo na Amazônia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a aquisição de imagens PS, os fatores que influenciam a geometria solar são o ângulo zenital solar (AZS) e o ângulo azimutal solar (AAS). A diferença entre o mês final (setembro) e inicial (junho) para a estação seca na Amazônia mostrou que o AZS tende a variar mais em áreas

ao sul, enquanto que o AAS possui comportamento contrário (Figura 2).

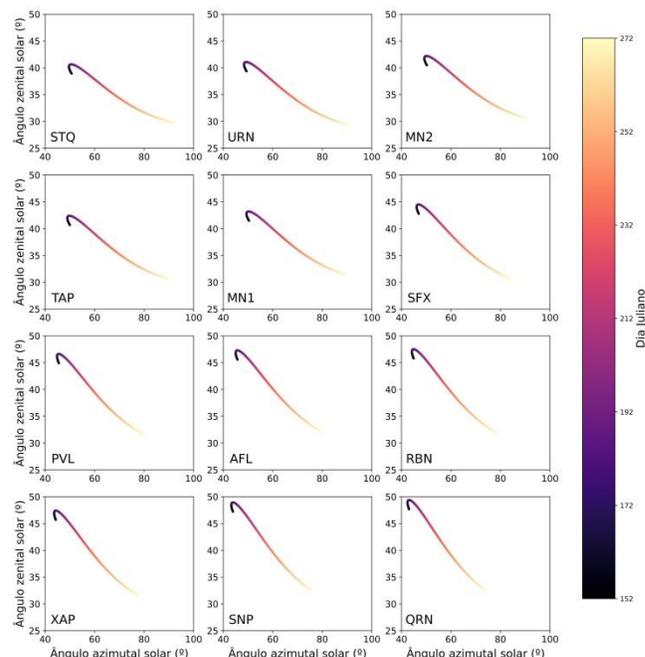


Figura 2. Variação durante a estação seca (junho a setembro) do ângulo zenital solar (AZS) e ângulo azimutal solar (AAS) nas 12 áreas de estudo, organizadas por latitude.

A ACP mostrou aumento do brilho da vegetação (reflectância média) entre o início e o final da estação seca para a maioria das áreas na Amazônia (resultados não apresentados). Este resultado foi importante para compreender a existência de um aumento real da reflectância do infravermelho próximo e das demais bandas do visível durante a estação seca. Os IVs EVI e NDVI foram calculados de forma a obter curvas anuais para todas as 12 áreas de estudo.

Em geral, o EVI apresentou sazonalmente maior variabilidade do que o NDVI em todas as áreas de estudo. Isso ocorre por que o EVI é um índice não normalizado, com grande influência da resposta espectral do infravermelho próximo. O EVI possui maior sensibilidade às mudanças detectáveis no dossel e também a fatores relacionados com a geometria de aquisição das imagens. Na Figura 3, os resultados para a área QRN, localizada mais ao sul, são apresentados.

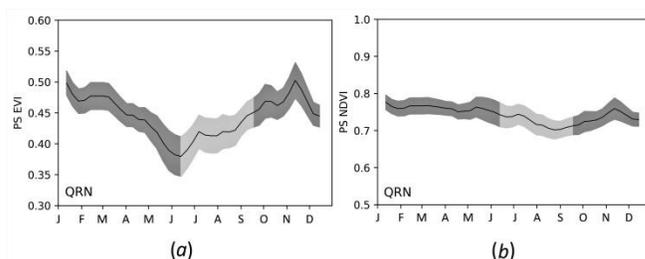


Figura 3. EVI e NDVI médio calculado entre 2017 e 2019 para a área de estudo QRN (Querência, MT).

Ao correlacionar os dois IVs com o AZS e o AAS, usando dados de todos os sites, observou-se que o EVI apresentou valores de r maiores do que o NDVI, indicando sua maior sensibilidade aos efeitos de iluminação solar (Figura 4). As amostras utilizadas contemplam os mesmos 1.000 pixels utilizados para a ACP, sendo representados graficamente pela média dos pixels em cada área e em cada mês da estação seca.

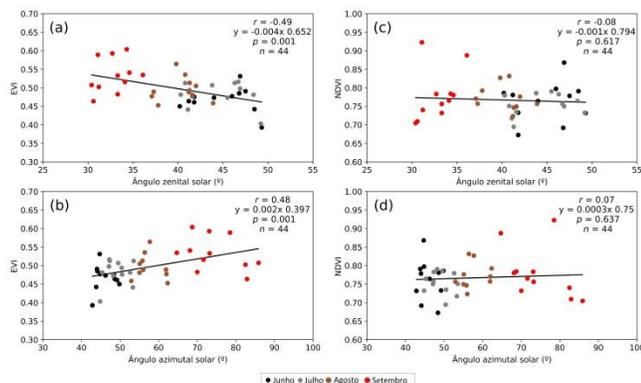


Figura 4. Correlações por pontos representando a média mensal de cada área de estudo ao longo da estação seca de 2018 entre (a) EVI e AZS, (b) EVI e AAS, (c) NDVI e AZS, e (d) NDVI e AAS.

Seguindo o mesmo padrão de análise de correlação, o EVI apresentou valor de r de 0,86 em relação à média da textura obtida pela análise GLCM, enquanto que o NDVI apresentou valor de 0,45 na mesma comparação (Figura 5). Os resultados da variância da textura apresentaram valores de r de -0,47 e -0,4 para EVI e NDVI, respectivamente (resultados não mostrados).

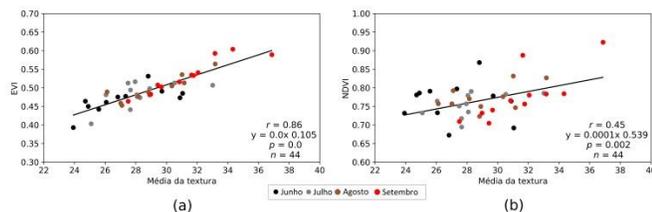


Figura 5. Correlações por pontos representando a média mensal de cada área de estudo ao longo da estação seca de 2018 entre (a) EVI e média da textura, e (b) NDVI e média da textura.

A análise das frações-sombra revelou uma diminuição das sombras detectadas no dossel pelos CubeSats do início (junho) para o final (setembro) da estação seca. Na Figura 6, são mostrados os resultados para as áreas QRN e MN2, localizadas ao sul e ao norte da Amazônia, respectivamente. No caso de MN2 ainda é possível observar efeitos de iluminação do terreno, cujas feições topográficas associadas

à rede de drenagem se tornam menos evidentes de junho para setembro.

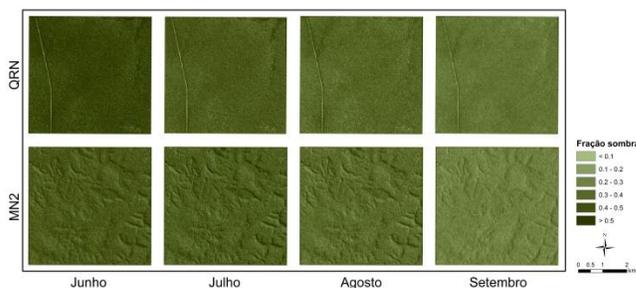


Figura 6. Frações-sombra das áreas QRN e MN2 entre os meses de junho e setembro, representadas por porcentagem do MLME representado pela fração.

Finalmente, foi necessário assegurar que as variações de brilho, IVs, textura e sombras nas áreas de estudo não corresponderam unicamente a um efeito biofísico, invalidando as correlações observadas. Para isso, observamos o comportamento das 4 bandas das imagens PS e do EVI e NDVI ao longo da estação seca em um alvo pseudo-invariante (solo exposto). A figura 7 apresenta os resultados para a área QRN, mais ao sul, onde pode-se observar variações espectrais em bandas e índices. Esse resultado indica que os efeitos de iluminação solar existem e variam ao longo da estação seca na Amazônia, influenciando o brilho, textura e sombras detectadas nos dosséis.

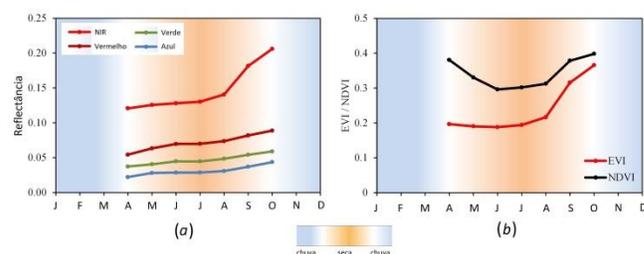


Figura 7. Comportamento espectral de um alvo pseudo-invariante na área QRN (Querência, MT) representado por (a) 4 bandas espectrais PS, e (b) EVI e NDVI.

Em geral, os resultados obtidos evidenciam que há influência de efeitos de iluminação solar na determinação do EVI, mesmo em imagens obtidas ao nadir, devido a sua forte dependência à resposta espectral da banda do infravermelho próximo. Estes efeitos são reduzidos com a determinação do NDVI, que utiliza em sua equação diferenças normalizadas entre a reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Os resultados apontam para o uso promissor da constelação de satélites PlanetScope para estudos fenológicos de florestas tropicais, complementando o conhecimento pré-existente e preenchendo eventuais lacunas de conhecimento.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permitiu, em geral, concluir que há influência da iluminação solar na variação espectral e espacial em imagens PS para florestas tropicais em diferentes regiões da Amazônia. Especificamente, a ACP indicou aumento de brilho da vegetação do início para o final da estação seca, que foi confirmado pelo aumento de reflectância de junho para setembro nas 4 bandas do PS. Quando comparado com o NDVI, também foi possível observar maior anisotropia do EVI para iluminação solar. Métricas GLCM apontaram aumento da média da textura e redução da variância da textura, indicando respectivamente aumento de sinal generalizado e redução na variabilidade dentro das imagens. Também foi possível observar maiores correlações entre a média da textura e o EVI, que são métricas também mais influenciadas pelo brilho. O MLME revelou redução de sombras detectadas nos dosséis do início para o fim da estação seca com as variações nos ângulos solares. Por fim, mesmo quando o alvo pseudo-invariante do ponto de vista composicional (solo exposto) foi utilizado na análise, os efeitos de iluminação solar também foram detectados.

Os resultados obtidos destacam a importância do uso de constelações de satélites (alta resolução espacial e temporal) para estudos fenológicos em florestas tropicais da Amazônia, indicando cautela no uso de IVs anisotrópicos para esta finalidade.

6. AGRADECIMENTOS

À SCCON Geospatial pela cessão dos dados e discussões pertinentes. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Gatti, L. V., L. S. Basso, J. B. Miller, M. Gloor, L. Gatti Domingues, H. Cassol, G. Tejada, et al. Amazonia as a Carbon Source Linked to Deforestation and Climate Change. *Nature*, 595 (7867): 388–393, 2021.
- [2] Saleska, S. R., K. Didan, A. R. Huete, and H. R. Da Rocha. Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought. *Science*, 318 (5850): 612, 2007.
- [3] Samanta, A., S. Ganguly, H. Hashimoto, S. Devadiga, E. Vermote, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni. Amazon Forests Did not Green-up During the 2005 Drought. *Geophysical Research Letters*, 37 (5): L05401, 2010.
- [4] Atkinson, P. M., J. Dash, and C. Jeganathan. Amazon Vegetation Greenness as Measured by Satellite Sensors Over the Last Decade. *Geophysical Research Letters*, 38 (19): L19105, 2011.
- [5] Xu, L., A. Samanta, M. H. Costa, S. Ganguly, R. R. Nemani, and R. B. Myneni. Widespread Decline in Greenness of

Amazonian Vegetation Due to the 2010 Drought. *Geophysical Research Letters*, 38 (7): L07402, 2011.

- [6] Myneni, R. B., W. Yang, R. R. Nemani, A. R. Huete, R. E. Dickinson, Y. Knyazikhin, and V. V. Salomonson. Large Seasonal Swings in Leaf Area of Amazon Rainforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 4820–4823, 2007.
- [7] Anderson, L. O., Y. Malhi, L. E. Aragão, R. Ladle, E. Arai, N. Barbier, and O. Phillips. Remote Sensing Detection of Droughts in Amazonian Forest Canopies. *The New Phytologist*, 187 (3): 733–750, 2010.
- [8] Moura, Y. M., L. S. Galvão, T. Hilker, J. Wu, S. Saleska, C. H. Do Amaral, and L. E. Aragão. Spectral Analysis of Amazon Canopy Phenology During the Dry Season Using a Tower Hyperspectral Camera and Modis Observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131: 52–64, 2017.
- [9] Galvão, L. S., J. R. dos Santos, D. A. Roberts, F. M. Breunig, M. Toomey, and Y. M. de Moura. On Intra-Annual EVI Variability in the Dry Season of Tropical Forest: A Case Study with MODIS and Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 115 (9): 2350–2359, 2011.
- [10] Moura, Y. M., L. S. Galvão, J. R. dos Santos, D. A. Roberts, and F. M. Breunig. Use of Misr/terra Data to Study Intra-And Inter-Annual EVI Variations in the Dry Season of Tropical Forest. *Remote Sensing of Environment*, 127, 2012.
- [11] Morton, D. C., J. Nagol, C. C. Carabajal, J. Rosette, M. Palace, B. D. Cook, and P. R. North. Amazon Forests Maintain Consistent Canopy Structure and Greenness During the Dry Season. *Nature* 506 (7487): 221–224, 2014.
- [12] Petri, C. A. and L. S. Galvão. Sensitivity of Seven MODIS Vegetation Indices to BRDF Effects During the Amazonian Dry Season. *Remote Sensing*. 11 (14): 1650, 2019.
- [13] Lyapustin, A. I., Y. Wang, I. Laszlo, T. Hilker, F. G. Hall, P. J. Sellers, C. J. Tucker, and S. V. Korkin. Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric Correction. *Remote Sensing of Environment*, 127: 385–393, 2012.
- [14] Almeida, C. T., L. S. Galvao, L. E. O. C. Aragão, J. P. H. B. Ometto, A. D. Jacon, F. R. de Souza Pereira, L. Y. Sato, et al. Combining LiDar and Hyperspectral Data for Aboveground Biomass Modeling in the Brazilian Amazon Using Different Regression Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111323, 2019.
- [15] Moura, Y. M., T. Hilker, A. I. Lyapustin, L. S. Galvão, J. R. Santos, L. O. Anderson, C. H. R. Sousa, and E. Arai. Seasonality and Drought Effects of Amazonian Forests Observed from Multi-Angle Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 171: 278–290, 2015.