

Variáveis para análises de dinâmicas sazonais da Floresta Amazônica

Rennan Andres Paloschi¹
Ranieli dos Anjos de Souza Muler¹
Laura De Simone Borma¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
rennan.paloschi@inpe.br, ranieli@dsr.inpe.br, laura.borma@inpe.br

Abstract. Large tropical forests like the Amazon, important in carbon and water cycling, constantly are targets for climate change research and studies on the seasonality of the vegetation that seek to correlate the various types of data in order to develop theoretical models, obtain projections or thresholds for different phenomena, vegetation mechanisms, climate feedback from changes in forest behavior and possible relationships with global climate change, however, all currently used techniques have limitations that may hinder complex analysis. Data obtained locally are generally known as field truth, but imply high costs and therefore are not performed on a large scale. As far as the data obtained by remote orbital sensors are concerned, the limitations generally lie in the temporal and spatial scales covered by the sensors, in the interferences and noise of the signal received by the sensor and also in its ability to indicate, with relative fidelity, processes of operation of the terrestrial system occurring in situ. This study aimed to identify and assess the main variables used in the study of seasonal dynamics of the Amazon rainforest. The variables identified were the vegetation indices NDVI and EVI, the Gross Primary Productivity (GPP), the Solar-Induced Fluorescence (SIF) and the Evapotranspiration.

Palavras chave: remote sensing, temporal analysis of tropical vegetation, hydric stress, sensoriamento remoto, análise temporal de vegetação tropical, estresse hídrico.

1. INTRODUÇÃO

A importância da bacia amazônica na ciclagem de carbono e água, em escala regional e global têm conduzido à existência de uma série de programas de pesquisa de longa duração na região, nas últimas décadas, tais como o ABRACOS e o LBA (FERREIRA DA COSTA et al., 1998; BETTS e SILVA DIAS 2010). Em geral, esses estudos correlacionam variáveis climáticas tais como precipitação, evapotranspiração e respostas espectrais da vegetação, expressas em índices de vegetação ou níveis de fluorescência. Por meio de correlações entre essas variáveis busca-se explicar uma série de aspectos da relação clima-floresta, tais como: i) comportamento sazonal das florestas tropicais e resposta aos extremos climáticos de estiagem e chuva (BORMA et al., 2009; RESTREPO-COUBE et al., 2013; BAKER et al., 2013; GUAN et al. 2015); ii) impactos passados e futuros sobre o funcionamento da floresta Amazônica, incluindo capacidade de armazenamento de água em estações chuvosas e resiliência às secas prolongadas; iii) *feedback* climático decorrente de mudanças no comportamento da floresta e possíveis relações com as mudanças climáticas globais (BETTS et al., 2004; RESTREPO-COUBE et al., 2013).

Nestes estudos, diversos tipos de ferramentas e metodologias vêm sendo desenvolvidas e adaptadas de forma a auxiliar a extração de informação sobre os processos hidrológicos e ecológicos. Em linhas gerais, as metodologias englobam medidas in situ obtidas in loco ou remotamente, podendo ou não estarem associados aos modelos de funcionamento do sistema terrestre. Contudo, todas as técnicas atualmente utilizadas possuem limitações que podem dificultar análises complexas. Os dados obtidos in loco são geralmente conhecidos como a verdade de campo, porém implicam em custos elevados e, portanto, não são realizados em larga escala (JENSEN, 2007; NOVO, 2010). No que se refere aos dados obtidos por sensores

remotos orbitais, as limitações residem, em geral, nas escalas temporais e espaciais abrangidas pelos sensores, nas interferências e ruídos do sinal recebido pelo sensor e, ainda, na sua capacidade de indicar, com relativa fidelidade, processos do funcionamento do sistema terrestre que estejam ocorrendo in situ. No entanto, os dados por eles fornecidos são de fundamental importância para o entendimento do funcionamento da floresta amazônica na escala de interesse necessária para os processos climáticos.

Em função do exposto, o trabalho aqui apresentado buscou identificar as variáveis mais utilizadas em análises sazonais da resposta da Floresta Amazônica às forçantes climáticas, obtidas remotamente, avaliando as potenciais informações fornecidas e limitações e informações que estas variáveis podem trazer.

2. VARIÁVEIS PARA ESTUDO DAS DINÂMICAS SAZONAIS

Dentro do conjunto de variáveis utilizadas em estudos sazonais da Floresta Amazônica destacam-se a evapotranspiração, os índices de vegetação (IV), as imagens de fluorescência por indução solar (SIF) e a Produção Primária Bruta (PPB). Estes índices são geralmente utilizados na busca de quantificar a resposta da vegetação a uma determinada disponibilidade hídrica (RESTREPO-COUBE et al., 2013).

Os índices de vegetação são razões entre bandas específicas do espectro eletromagnético, baseadas em valores digitais de intensidade da radiação eletromagnética com o intuito de avaliar a biomassa ou vigor vegetativo. Algumas relações entre bandas têm sido definidas aplicando-se conhecimentos de comportamento espectral da vegetação viva. Essa estratégia pode ser especialmente efetiva tendo em vista a existência de uma relação inversa entre a refletância nas regiões espectrais do vermelho e do infravermelho (CAMPBELL e WYNNE, 2011).

Índices de vegetação podem ser obtidos a partir de dados orbitais como os dados do sensor MODIS. Os dados MODIS são disponibilizados gratuitamente na forma de composições de imagens de 16 dias, com resolução espacial de 250 m. Entre os diversos produtos MODIS, são disponibilizados dois índices de vegetação utilizados com grande frequência nos estudos amazônicos: o *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o *Enhanced Vegetation Index* - EVI (Índice de Realce da Vegetação).

Os índices de vegetação minimizam as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados em dados multitemporais. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (COUTO JUNIOR et al., 2011).

O EVI foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de proporcionar redução das influências atmosféricas (HUETE et al., 1999). O NDVI é um bom estimador de biomassa, sendo um índice bastante utilizado em pesquisas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal, tais como o acompanhamento e a avaliação de rendimento de culturas na agricultura de precisão (PONTES, 2005).

Outra variável utilizada na análise sazonal da floresta é a produtividade primária bruta (*Gross Primary Production* - GPP). Por meio do processo de fotossíntese as plantas retiram o carbono da atmosfera assimilando-o na planta, uma fração do carbono assimilado é liberado de volta para a atmosfera na forma de gás carbônico durante a subsequente respiração da planta. Sendo assim, a GPP é a soma da Produtividade Primária Líquida (*Net Primary Production* - NPP) com a respiração da planta. O NPP é dependente tanto da atividade fotossintética quanto da respiração, o que dificulta sua estimativa, por outro lado o GPP é teoricamente dependente apenas da atividade fotossintética e esta pode ser estimada por

correlação entre índices obtidos por sensores radiométricos (AMTHOR e BALDOCCHI, 2001).

Danelichen et al. (2015) estimou a GPP da Amazônia e do Cerrado por meio de séries temporais de EVI e NDVI, calculados a partir de imagens dos sensores MODIS e Landsat 5 TM, validando os resultados com as medidas das torres de fluxo presentes em campo verificando que ambos os índices apresentam boa correlação, porém, o EVI apresentou mais alta correlação e menor taxa de erros em relação ao NDVI.

Outra variável a ser considerada é a fluorescência por indução Solar (*Solar-induced Fluorescence* – SIF), este índice que vem ganhando espaço em pesquisas sobre comportamentos sazonais, trata-se da emissão de radiação eletromagnética na faixa 650-800nm proveniente da atividade fotossintética da planta e é, teoricamente, linearmente correlacionada com a taxa de transporte de elétrons da atividade fotossintética (ZHANG et al., 2014; NOVO, 2010; GUANTER et al., 2012; ZARCO-TEJADA et al., 2013).

Estudos ligados à estimativa de SIF em escala global são recentes (FRANKENBERG et al., 2011; JOINER et al., 2013), estes trabalhos utilizam dados do *Fourier Transform Spectrometer* (STF) a bordo do satélite japonês *Greenhouse Gases Observing Satellite* (GOSAT). Um método estatístico de estimativa de SIF para os dados do Experimento de Monitoramento do Ozônio Global (*Global Ozone Monitoring Experiment - GOME-2*) foi proposto por Joiner et al. em 2013 e, mais recentemente, um novo método simplificado, utilizando o mesmo satélite, foi proposto por Köhler et al. (2015).

Estudos teóricos e experimentais (VAN DER TOL et al., 2009; ZARCO-TEJADA et al., 2013) demonstram que, sob temperatura normal e sob condições normais de luz, a SIF é linearmente correlacionada com a GPP e co-varia com a GPP sob tensões ambientais (estresses hídricos). Guan et al. (2015) comprovou essa correlação do SIF com GPP comparando imagens SIF geradas por dados do satélite GOME-2 com os dados obtidos das 8 torres de fluxo dispostas na Amazônia. Esse estudo possibilitou estimar o limiar de precipitação anual necessário para o qual as florestas tropicais não entrariam em estresse hídrico. Os referidos autores mostraram também a existência de uma forte correlação entre o SIF e o EVI em todas as florestas tropicais do mundo.

Boa parte dos estudos encontrados sobre a utilização de SIF partem de pesquisadores relacionados com projeto alemão GlobFluo (*Global assessment of vegetation photosynthesis through the monitoring of chlorophyll fluorescence from space*), criado com o objetivo de desenvolver e implementar técnicas avançadas no monitoramento global da vegetação, utilizando, em particular, aspectos relacionados à fluorescência induzida por radiação solar (SIF). O projeto GlobFluo fornece gratuitamente (no portal *GFZ German Research Centre for Geosciences*) dados globais de estimativa SIF, com resolução de 0,5 grau (sensor GOME-2) e de 1,5 grau (sensor SCIAMACHY) (KÖHLER et al., 2015).

Outra variável que tem sido utilizada no estudo de atividades fenológicas da vegetação tropical é a evapotranspiração. Utilizada já há duas décadas em modelos agrometeorológicos de crescimento para estimativa de produtividade agrícola. A evapotranspiração é amplamente conhecida por possibilitar a mensuração de estresses hídricos da vegetação, já que, conhecendo a quantidade típica de evapotranspiração de uma determinada vegetação, em um ciclo sazonal específico, é possível verificar reduções atípicas na evapotranspiração e dessa forma mensurar o estresse hídrico sofrido (ALLEN et al., 1998; JOHANN, 2012).

Como o vigor vegetativo também está diretamente relacionado à disponibilidade hídrica e consequentemente à atividade biológica e à evapotranspiração, existem estudos que buscam relacionar índices de vegetação de forma a estimar a evapotranspiração e melhorar sua representação (MASELLI et al., 2014). Allen et al. (2013) realizou, com qualidade significativa, a estimativa de evapotranspiração por NDVI com MODIS e Landsat 5 TM no Novo México. Dados de Evapotranspiração de Referência (ET₀) estimados com alta acurácia

(JOHANN, 2012) são disponibilizados pelo modelo europeu ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*), estes dados são coletados por meio de um sistema que engloba estações meteorológicas espalhadas pelo mundo, radares meteorológicos, satélites entre outras fontes, são obtidos cada 6 horas em uma resolução de 1 grau e, posteriormente, são processados em uma grade de 25km, sendo disponibilizados gratuitamente pela JCR (*Joint Research Center*).

3. CONCLUSÕES

Este estudo identificou e apresentou cinco importantes variáveis de grande potencial no estudo de dinâmicas sazonais da Floresta Amazônica, os índices de vegetação EVI e NDVI, o índice de fluorescência induzida por energia solar (SIF), o índice de produção primária bruta (GPP) e a evapotranspiração, sendo os três primeiros índices (EVI, NDVI e SIF) estimados por dados de sensores radiométricos e os últimos dois (GPP e evapotranspiração) medidos in loco ou obtidos como subprodutos de outros índices.

O índice EVI apresentou considerável vantagem no estudo sazonal em relação ao NDVI já que, apesar de ser obtido a partir dos mesmos sensores (com mesma resolução temporal e espacial), apresenta menor saturação (melhor sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa) e melhor correlação com a GPP indicando maior sensibilidade às alterações do comportamento fisiológico da vegetação.

O estudo do SIF em escala global é relativamente novo e, portanto, apresenta melhor margem para novos estudos científicos. O SIF apresentou melhor correlação com a GPP em relação ao EVI, porém, o EVI pode ser obtido com melhor resolução temporal e espacial (MODIS e Landsat TM/OLI) em relação ao SIF (STF, GOME-2 e SCIAMACHY), além disso, os índices EVI e NDVI possuem maiores séries temporais disponíveis para análise e maior respaldo acadêmico.

Os índices GPP e evapotranspiração, quando obtidos in loco, apresentam informações mais ricas e precisas para análises de dinâmicas sazonais do que os índices EVI, NDVI e SIF, porém, com representação espacial e área de cobertura muito reduzida. Ao serem estimados como subprodutos de outros índices, de forma a ampliar a resolução espacial, ficam sujeitos a maiores erros de estimativa, esse erro pode ser reduzido com calibração por dados coletados in campo, como as torres de fluxo dispostas pela Amazônia e estações meteorológicas próximas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**-Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage. Paper FAO-56. Rome, ISBN 92-5-104219-5, 1998.
- ALLEN, R. G.; ROBISON, C. W.; TREZZA, R.; GARCIA, M.; KJAERGAARD, J. Comparison of evapotranspiration images from MODIS and Landsat along the middle Rio Grande of New Mexico. **Remote Sensing**, v. 5 p. 5397-5423, 2013.
- AMTHOR J. S.; BALDOCCHI, D.D. **Terrestrial global productivity: Terrestrial higher plant respiration and Net Primary Production**. Academic Press, 2001. 59 p.
- BAKER, I. T.; HARPER, A. B.; ROCHA, H. R. da; DENNING, A. S.; ARAÚJO, A. C.; BORMA, L. S.; FREITAS, H. C.; GOULDEN, M. L.; MANZI, A. O.; MILLER, S. D.; NOBRE, A. D.; RESTREPO-COUBE, N.; SALESKA, S. R.; STÖCKLI, R.; von RANDOW, C.; WOFSY S. C.; Surface ecophysiological behavior across vegetation and moisture gradients in tropical South America. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 1, p. 0168-1923, 2013.
- BETTS, A. K.; M. A. F. SILVA DIAS. Progress in understanding land-surface-atmosphere coupling from LBA research, **J. Adv. Model. Earth Syst.**, v. 2, p. 20. 20

BETTS, R. A.; COX, P. M.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C.D. The role of eco system atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 157–175, 2004.

BORMA, L. S.; ROCHA, H. R. da; CABRAL, O. M.; von RANDOW, C.; COLLICCHIO, E.; KURZATKOWSKI, D.; BRUGGER, P. J.; FREITAS, H.; TANNUS, R.; OLIVEIRA, L.; RENNÓ, C. D.; ARTAXO, P. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 114 p. 1-12, 2009.

CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to remote sensing**. New York: Guilford Press, 2011. 667 p.

COUTO JUNIOR; CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTIN, E. S.; SANTANA, O.A.; SOUZA, V.V.; ENCINASJ.I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, p. 699-705, 2011.

DANELICHEN, V. H. M.; BIUDES, M. S.; VELASQUE, M. C. S.; MACHADO, N. G.; GOMES, R. S. R.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. S. Estimating of gross primary production in an Amazon-Cerrado transitional forest using MODIS and Landsat imagery. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 87, n. 3, p. 1545-1564, 2015.

FERREIRA DA COSTA, R.; FEITOSA, J. R. P. FISCH, G.; SOUZA S. S. de.; NOBRE, C. A. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e pastagem na Amazônia. **ACTA Amazonica**. v. 28, p.396-408. 1998.

FRANKENBERG, C.; FISHER, J. B.; WORDEN, J.; BADGLEY, G.; SAATCHI, S. S.; LEE, J.-E.; TOON, G. C.; BUTZ, A.; JUNG, M.; KUZE, A.; YOKOTA, T. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. **Geophys.Res. Lett.**, v. 38, p. 1944-8007, 2011.

GUAN, K.; PAN, M.; Li, H.; WOLF, A.; WU, J.; MEDVIGY, D.; CAYLOR, K. K.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; MALHI, Y.; LIANG, M.; KIMBALL, J. S.; SALESKA, S. R.; Berry, J.; Joiner, J.; Lyapustin A. I.; Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 284-289, 2015.

GUANTER, L.; FRANKENBERG, C.; DUDHIA, A.; LEWIS, P. E.; GOMEZ-DANS, J.; KUZE, A.; SUTO, H.; GRAINGER, R. G. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 121 p. 236–251, 2012.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. VAN. Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis. **Environmental Sciences**, 1999. MODIS - NASA. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf>. Acesso em: 6.maio. 2015.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. Pearson, 2007. 608 p.

JOHANN, J. A. **Calibração de dados agrometeorológicos e estimativa de área e produtividade de culturas agrícolas de verão no Estado do Paraná**. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP 2012.

JOINER, J.; GUANTER, L.; LINDSTROT, R.; VOIGT, M.; VASILKOV, A. P.; MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; YOSHIDA, Y.; FRANKENBERG, C.. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate spectral resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, v. 6 p. 3883–3930, 2013.

KÖHLER, P.; GUANTER, L.; JOINER, J.A Linear Method for the Retrieval of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence from GOME-2 Data. **Atmospheric Measurement Technique**, v. 8, p. 2589-2608, 2015.

MASELLI, F.; PAPALE, D.; CHIESI M., MATTEUCCI, G.; ANGELI L.; RASCHI, A.; SEUFERT, G. Operational monitoring of daily evapotranspiration by the combination o of MODIS NDVI and ground meteorological data: Application and evaluation in Central Italy. **Remote Sensing of Enviroment**, v. 152 p. 279-290 2014.

NOVO, E. M. D. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010. 292 p.

PONTES, P. P. B. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana de açúcar. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 217-224.

RESTREPO-COUBE, N.; ROCHA, H. R. da; HUTYRA, L. R.; ARAUJO, A. C. da, BORMA, L. S.; CHRISTOFFERSEN B.; CABRAL, O. M.R.; CAMARGO, P. B. de; CARDOSO, F. L.; COSTA, A. C. L. da; FITZJARRALD, D. R.; GOULDEN, M. L.; KRUIJT, B.; MAIA, J. M.F.; MALHI, Y. S.; MANZI, A. O.; MILLER, S. D.; NOBRE, A. D.; von RANDOW, C., ABREUSA, L. D.; SAKAI, R. K.; TOTA, J.; WOFSY, S. C.; ZANCHI, F. B.; SALESKA, S. R. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182-183, p.128-144, 2013.

VAN DER TOL, C.; VERHOEF, W.; ROSEMA, A.; A model for chlorophyll fluorescence and photosynthesis at leaf scale, **Agric. For. Meteorol.**, V. 149, p. 96–105, 2009.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MORALES, A; TESTI, L.; VILLALOBOS, F. J. Spatio-temporal patterns of chlorophyll fluorescence and physiological and structural indices acquired from hyperspectral imagery as compared with carbon fluxes measured with eddy covariance, **Remote Sens. Environ.**, v. 133, p. 102–115, 2013.

ZHANG, Y.; GUANTER, L.; BERRY, J.; JOINER, J.; VAN DER TOL, C.; HUETE, A.; GITELSON, A.; VOIGT, M.; KÖHLER, P. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models., **Glob. Chang. Biol.**, v. 20, p. 1365-2486, 2014.