

Utilização de câmeras hiperespectrais para caracterização fenológica de dosséis florestais: um estudo de caso na Floresta Nacional do Tapajós – Pará

Yhasmin Mendes de Moura^{1*}
Lênio Soares Galvão¹
Thomas Hilker^{2 (IN MEMORIAM)}
Cibele Hummel do Amaral³
Scott Saleska⁴
Jin Wu⁵
Raimundo Cosme de Oliveira⁶
Carolyne Bueno Machado¹
Aline Pontes Lopes⁷
Bruce Walker Nelson⁷
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
*yhas.mendes@gmail.com

² University of Southampton, Department of Geography and Environment, Southampton
SO17 1BJ, United Kingdom

³ Universidade Federal de Viçosa – MG, 36570-900, Brazil

⁴ University of Arizona, Department of Ecology and Evolutionary Biology, Tucson, AZ
85721

⁵ Brookhaven National Laboratory, Environmental & Climate Sciences Department,
Upton, NY 11973-5000

⁶ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Centro de Pesquisa
Agroflorestal da Amazônia Oriental, 66095100 – Belém, PA, Brasil

⁷ Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), Departamento de Dinâmica Ambiental,
Manaus, AM 69067-375, Brasil

Abstract. We investigate how canopy spectral signals are linked with phenological processes during the 2012 dry season in the Tapajós National Forest, Pará, Brazil. We disentangled the spectral components of canopy phenology processes and analyzed their variations over time using six images acquired by a tower-mounted hyperspectral camera. We applied two techniques over the data (spectral mixture analysis - SMA and principal component analysis - PCA) and calculated two vegetation indices (Enhanced Vegetation Index - EVI and Normalized Difference Vegetation Index - NDVI). The results showed that the differences in timing and intensity of leaf flushing and leaf shedding between the species produced different green vegetation (GV) and non-photosynthetic vegetation (NPV) SMA-fractions. Differences in canopy phenology between the species were also confirmed by PCA. Temporal variations in the described patterns of canopy phenology were detected by the EVI and NDVI, presenting statistical differences (0.05 significance level) between the species and across the dates. Canopy phenology patterns of leaf flushing increased the EVI values toward the end of time series due to the observed changes in the NIR reflectance from mature to young leaves. NDVI was more sensible to canopy phenology patterns of leaf shedding, decreasing over time due to the reduction in chlorophyll content and the resultant increase in the red reflectance with deciduousness. We conclude that tower-based networks of

phenological observations can provide new opportunities for better understand tropical ecosystem phenology as well as for scaling these processes across the landscape with the use of moderate spatial resolution satellite data.

Key-words: hyperspectral, phenology, Amazon, tower-mounted cameras, EVI, NDVI

1. Introdução

A quantificação em larga escala de ciclos fenológicos é de fundamental importância para o devido entendimento dos fluxos de carbono em florestas tropicais. No entanto, este conhecimento é atualmente bastante limitado. A utilização de sensoriamento remoto para descrição e monitoramento de eventos fenológicos na Amazônia tem se mostrado desafiadora (Samanta et al., 2012; Huete et al., 2006; Myneni et al., 2007; Morton et al., 2014; Bi et al., 2015). Estudos baseados em dados de sensoriamento remoto têm mostrado resultados contraditórios sobre a resposta fenológica da floresta tropical frente a eventos climáticos extremos. A partir da utilização do índice de vegetação *Enhanced Vegetation Index* (EVI) na Amazônia, Saleska et al. (2007) reportaram um aumento em *greenness* associado com a seca severa de 2005, enquanto Xu et al. (2011) observaram um declínio em *greenness* durante a seca severa de 2010. Enquanto alguns estudos observaram oscilações sazonais bem delimitadas entre a estação seca e a chuvosa (Huete et al., 2006; Myneni et al., 2007; Zhou et al., 2014), outras investigações sugeriram que a floresta mantém um verdor consistente e nenhuma evidência de variações sazonais (Atkinson et al., 2011; Morton et al., 2014). Análises de dados coletados em campo, no entanto, indicam que a floresta tropical sofre com o estresse hídrico causado por estes eventos de seca, aumentando a probabilidade da ocorrência de fogo e mortalidade, com alteração da composição florística e biodiversidade (Phillips et al., 2009).

Neste sentido, a fenologia de florestas tropicais permanece um dos mais desafiadores componentes de parametrização nos modelos de ecossistemas (Arora e Boer, 2004). Parte das incertezas está relacionada ainda com a limitada capacidade dos dados de sensoriamento remoto nos trópicos, principalmente associado à alta cobertura de nuvens, concentração de aerossóis e, como resultado, diminuição da qualidade dos dados para observação dos padrões fenológicos (Samanta et al., 2010, 2012; Hilker et al., 2012). Com o desenvolvimento de novas e mais robustas metodologias para correção atmosférica (p. ex., *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction* - MAIAC) (Lyapustin et al., 2011) e a utilização de imagens de alta resolução espacial (Zelazowski et al., 2011), alguns avanços têm sido alcançados. No entanto, o escalonamento entre dados ainda é um desafio para observação dos padrões fenológicos na Amazônia.

Uma possibilidade para avançar nosso conhecimento sobre os padrões fenológicos de florestas tropicais é a utilização de câmeras instaladas em torres de observação. Estas câmeras possuem alta resolução espacial permitindo acompanhar os padrões fenológicos no nível de dossel florestal. Este tipo de dado fornece sinais espectrais que são sensíveis às variações de processos biofísicos, permitindo um melhor entendimento sobre a resposta fenológica. Além disto, este tipo de dado é baseado nos mesmos princípios utilizados por sensores ópticos de nível orbital, porém também permite interpretações em nível de campo devido à alta resolução espacial. Alguns estudos recentes vêm utilizando câmeras de observação na Amazônia para observação de padrões fenológicos (Wu et al., 2016; Lopes et al., 2016). Estes estudos demonstraram que o padrão fenológico de *greenness* durante a estação seca na Amazônia Central foi associado com a ocorrência de folhas novas (“*leaf flush*”) na região, em sincronia com a maior disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *Photosynthetic Active Radiation*) neste período, também observado em outros trabalhos (Anderson et al., 2011; Myneni et al., 2007) e em coletas em campo (Restrepo-Coupe et al., 2013).

Enquanto câmeras de observação contribuem para aumentar nosso entendimento sobre a fenologia de florestas tropicais, um detalhamento sobre como estes padrões fenológicos observados afetam a resposta espectral de bandas específicas ainda não foi abordado. Este entendimento será determinante para avançar nos estudos sobre o ciclo sazonal de florestas tropicais, bem como, para servir como uma base sólida de padrões fenológicos em larga escala que serão observados por futuras missões hiperespectrais orbitais como a alemã *Environmental Mapping and Analysis* (EnMAP) (Guanter et al., 2015).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi a utilização de dados de uma câmera hiperespectral instalada na torre de fluxo da Floresta Nacional do Tapajós, PA, localizada na Amazônia Oriental, para analisar quais atributos espectrais melhor representam os padrões fenológicos observados em três diferentes espécies. Para isto, foram utilizadas seis imagens coletadas na estação seca do ano de 2012 e aplicadas duas técnicas de processamento de imagens para realce dos padrões fenológicos: modelo linear de mistura espectral (MLME) e Análise por Componentes Principais (ACP). A análise também incluiu o cálculo dos índices de vegetação NDVI e EVI.

2. Materiais e Métodos

As imagens hiperespectrais foram adquiridas em 128 bandas estreitas (largura de 5nm) posicionadas entre 388 e 1051 nm pela Surface Optics Corporation 710 camera. Para assegurar a confiança na análise de dados e evitar dados ruidosos, foram delimitadas as bandas espectrais entre 437 e 898 nm. Seis imagens foram cuidadosamente selecionadas para manter a qualidade dos dados e condições de céu claro. Um painel Spectralon, instalado permanentemente dentro do campo de visão da câmera, foi utilizado como referência para calibrar os dados. As imagens foram adquiridas na visada off-nadir (45°) no sentido de retro-espalhamento e ao meio-dia solar (11:30 hora local) para reduzir os efeitos de sombreamento intra- e entre as copas em cada data.

Para representação do comportamento fenológico das espécies, foram selecionados aleatoriamente 150 pixels por espécie, que foram mantidos fixos em posição sobre as copas iluminadas pelo sol para reduzir a sombra por vizinhos ou árvores emergentes. Foram aplicados testes *t* para verificar se a diferença de médias entre o início e o fim da série temporal foi estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança. Em seguida foram utilizadas diferentes métricas hiperespectrais para caracterização fenológica das espécies, incluindo escores ACP, frações MLME, EVI e NDVI.

A ACP foi aplicada para avaliação dos sinais espectrais que melhor descrevem o comportamento fenológico. ACP é uma técnica adequada para lidar com valores de reflectância altamente correlacionados, para reduzir a dimensionalidade dos dados e detectar as bandas espectrais mais importantes responsáveis pela maior parte da variância dos dados nas variáveis originais (Moreira e Galvão, 2010). Neste trabalho, foi aplicado a ACP para o conjunto de 7650 pixels (150 pixels, três espécies e 17 datas) para identificar padrões de fenologia do dossel, usando a reflectância das 89 bandas da câmera Surface Optics Corporation posicionadas entre 437 e 898 nm como variáveis de entrada. A extração das componentes baseou-se na matriz de correlação e nos autovalores superiores a 2, que são geralmente responsáveis por mais de 90% da variância cumulativa dos dados. A contribuição de cada banda para explicar cada componente foi determinada a partir da análise dos *loadings*. Os escores das primeiras componentes foram plotados sem rotação para análise da semelhança espectral entre as espécies. Os *outliers* foram removidos antes da análise.

O MLME foi utilizado para o realce das características fenológicas de cada espécie e para a análise das variações fenológicas ao longo do tempo, usando as seis imagens hiperespectrais. Esta técnica assume que a resposta espectral de determinado alvo contida num pixel é derivada de uma mistura de informações de superfície captadas pelo sensor, que

através da resolução espacial do sistema imageador integram estas informações em um único valor. A aplicação do MLME se fundamenta em separar diferentes componentes do pixel ou *endmembers* (Haertel e Shimabukuro, 2005) estimando sua proporção dentro de cada pixel na geração de imagens fração. Neste estudo foram selecionadas três *endmembers*, compostos por vegetação verde (GV), vegetação não-fotossinteticamente ativa (NPV) e sombra. Para seleção dos *endmembers* GV e NPV, aplicou-se sequencialmente *Minimum Noise Fraction* (MNF) (Green et al., 1988) e *Pixel Purity Index* (PPI) (Boardman et al., 1993) sobre a primeira imagem da série temporal, projetando-se os resultados em um visualizador *n*-dimensional. Para seleção do *endmember* da fração sombra foi adotada a metodologia proposta por Roberts et al. (1997), a qual utiliza um espectro contínuo de baixa reflectância. O conjunto de três *endmembers* (GV, NPV e sombra) foi então utilizado para aplicação do MLME para todas as imagens, plotando-se as frações ao longo do tempo a fim de avaliar variações fenológicas para cada espécie durante a estação seca.

Os índices EVI e NDVI foram calculados para todo o conjunto de imagens a fim de avaliar sua sensibilidade a eventos fenológicos na área de estudo. Para tanto, foram utilizadas as bandas estreitas da câmara hiperspectral posicionada em 472 nm (azul), 661 nm (vermelho) e 861 nm (NIR). Ambos os índices são os principais componentes dos produtos de índice de vegetação do sensor *Moderate Resolution Spectroradiometer* (MODIS) (Huete et al., 2002). Este sensor vem sendo amplamente utilizado em estudos sobre as florestas tropicais amazônicas (Huete et al., 2006, Saleska et al., 2007, Atkinson et al., 2011, Galvão et al., 2011, Moura et al., 2012). As equações e parâmetros foram os mesmos utilizados nos produtos MODIS.

3. Resultados e Discussão

O campo de visada da câmera permitiu a análise fenológica de três espécies: *Erismia uncinatum* Warm., *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. e *Chamaecrista xinguensis* (Ducke) H.S.Irwin & Barneby. As imagens compreendem o período da estação seca na região entre 29 de julho e 25 de setembro de 2012. Na área de estudo, a vegetação predominante é Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2004). O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é AmW, com precipitação anual média de 1700 mm. A estação seca ocorre entre os meses de julho e novembro (Aragão et al., 2008; Saleska et al., 2009). A temperatura média anual é de 26° C. A topografia é relativamente plana, com uma altitude inferior a 200 m. O tipo de solo predominante na área é Latossolo Amarelo distrófico (Xanthic acriférrico na Taxonomia de Solos EUA).

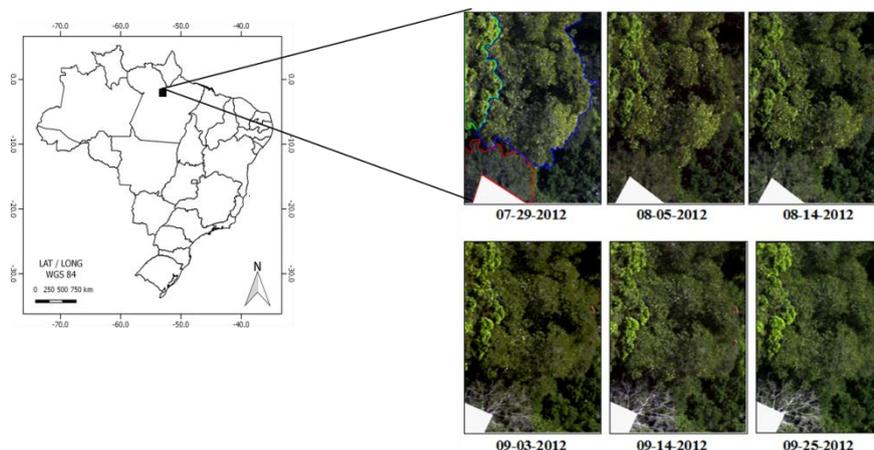


Figura 1. Localização da área de estudo e composição colorida (cor verdadeira) para seis imagens coletadas a partir da câmera hiperspectral montada na torre do k67 na FLONA. As linhas verde (*Erismia uncinatum*), azul (*Manilkara huberi*) e vermelha (*Chamaecrista*

xinguensis) na primeira data indicam a delimitação das três espécies investigadas neste trabalho.

Diferenças fenológicas entre as espécies foram claramente visíveis na avaliação das imagens composição verdadeira, usando bandas posicionadas em 661 nm, 563 nm e 487 nm em vermelho, verde e azul, respectivamente (Figura 1). A variação fenológica, principalmente das espécies *Erismia uncinatum* e *Chamaecrista xinguensis*, foram observadas entre o início e o fim da série temporal (Figura 2). Para *Chamaecrista xinguensis* pode-se observar um padrão claro de perda de folhas com o avanço da estação seca, que se refletiu em diminuição da reflectância espectral na região do infravermelho próximo (Figura 2a). Para *Erismia uncinatum*, os resultados mostraram um leve aumento na reflectância no verde, indicando o aparecimento de folhas novas para esta espécie (Figura 2b). Os padrões fenológicos distintos para estas duas espécies foram observados também pela resposta espectral, especialmente nas bandas do verde e do infravermelho.

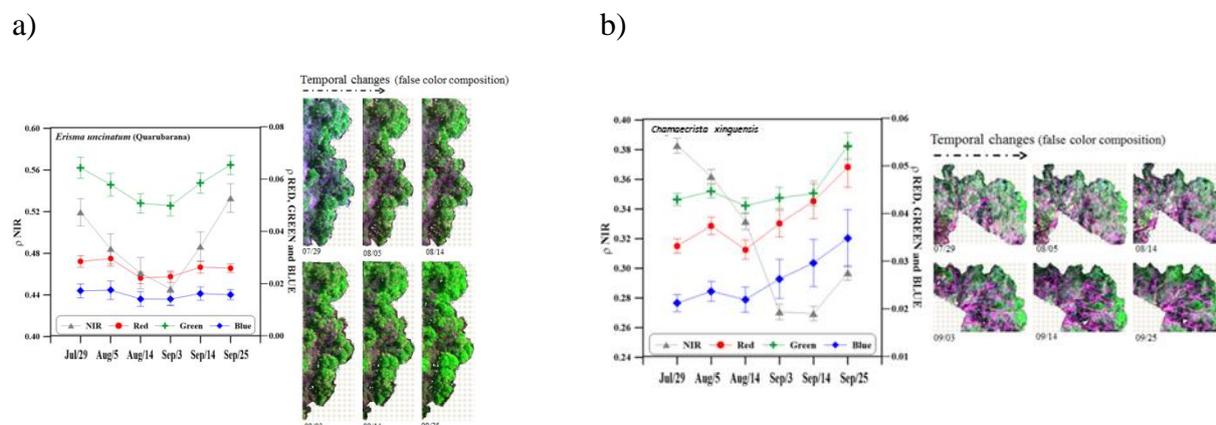


Figura 2. Variação sazonal da reflectância espectral das bandas do azul (487 nm), verde (563 nm) e vermelho (661 nm) para análise do comportamento fenológico das espécies *Erismia uncinatum* e *Chamaecrista xinguensis* no período de julho a setembro de 2012.

Os resultados da ACP mostraram que 90,1% da variância cumulativa dos dados se concentrou nas duas primeiras componentes. A primeira componente (CP1) representou 61,5% de variância, enquanto a segunda componente (CP2) capturou 29,6% de variância. A análise dos *loadings* (Figura 3) das duas primeiras componentes (que são as correlações entre a reflectância da banda e o componente) mostrou que para CP1 os valores de *loadings* foram especialmente superiores entre 500 e 650nm e entre 700 e 898nm. Em contraste, PC2 apresentou valores altos de *loadings* na região espectral do azul (450-490nm) e na região de absorção do vermelho (650-680nm), e valores mais baixos na região do infravermelho próximo entre 750 e 898nm. O padrão observado na PC2, com o aumento na região espectral do azul e vermelho e diminuição do infravermelho caracterizou os componentes fenológicos de perda de folhas presentes na cena. Pode-se observar que enquanto CP1 foi impulsionado principalmente pelas variações de brilho na cena, observado quando do aparecimento de folhas novas, CP2 representou as características espectrais da vegetação não-fotossinteticamente ativa.

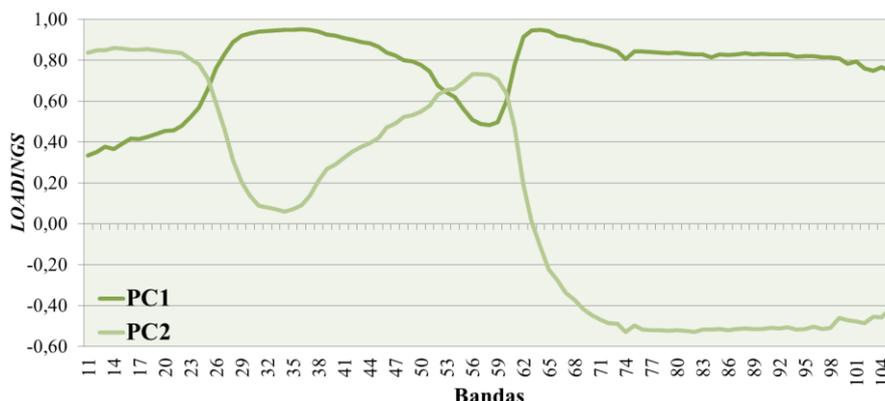


Figura 3. Gráfico da influência de cada variável original nas componentes principais representado pelos *loadings* da primeira (PC1) e segunda (PC2) componente.

A separação dos componentes espectrais representando a dinâmica fenológica das espécies foi feita a partir das imagens-frações geradas pelo MLME. Diferentes padrões de fenologia do dossel por espécie foram observados nas imagens frações GV, NPV e sombra (Figura 4). A espécie *Erismia uncinatum* apresentou um aumento de GV do início para o final da estação seca, conforme indicado pelas cores verdes mais brilhantes observadas ao longo da estação seca. Em contraste, *Chamaecrista xinguensis* apresentou frações de NPV crescentes com a ocorrência de perda de folhas. O comportamento da espécie *Manilkara huberi* foi diferente das outras duas espécies. A fração de NPV primeiro aumentou no início de agosto e depois diminuiu nas datas subsequentes, indicando um aparecimento de folhagens novas para esta espécie. A imagem fração sombra, considerando a cena como um todo, apresentou uma diminuição da componente sombra ao longo do período estudado, indicando a influência dos efeitos da iluminação solar durante a estação seca.

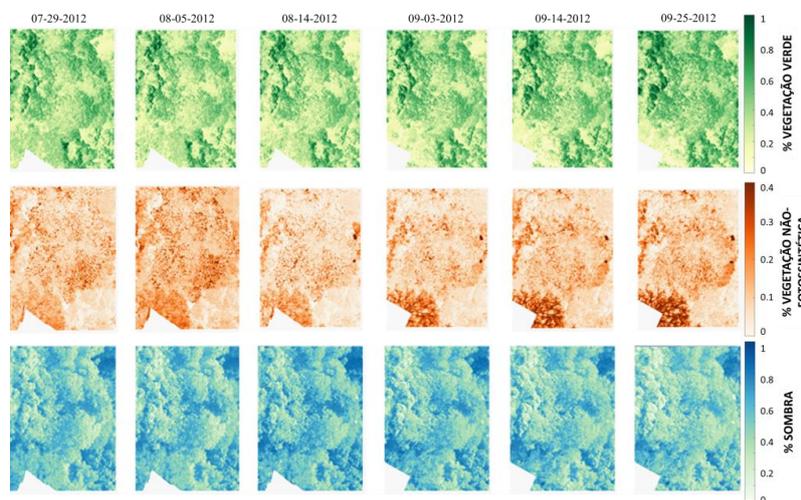


Figura 4. Imagens fração vegetação verde (verde), vegetação não-fotossinteticamente ativa (vermelho) e sombra (azul), mostrando variações fenológicas ao longo do tempo (de julho a setembro).

Variações nos padrões descritos de fenologia do dossel também foram detectadas após a determinação do NDVI e EVI (Figura 11). Houve diferenças estatísticas entre as espécies e entre as datas para o EVI nas espécies *Erismia uncinatum* e *Chamaecrista xinguensis*. O aparecimento de folhas novas para a espécie *Erismia uncinatum* do início para o final da série temporal produziu aumentos nos valores de EVI (Figura 11a), devido às alterações observadas na NIR. Como demonstrado em estudos anteriores, o EVI é fortemente dependente da

reflectância NIR (Galvão et al., 2011; Moura et al., 2012). Para a espécie *Chamaecrista xinguensis*, o NDVI diminuiu ao longo do tempo, indicando uma maior sensibilidade à redução do teor de clorofila e ao aumento resultante da reflectância da banda do vermelho com a perda de folhas (Figura 11b).

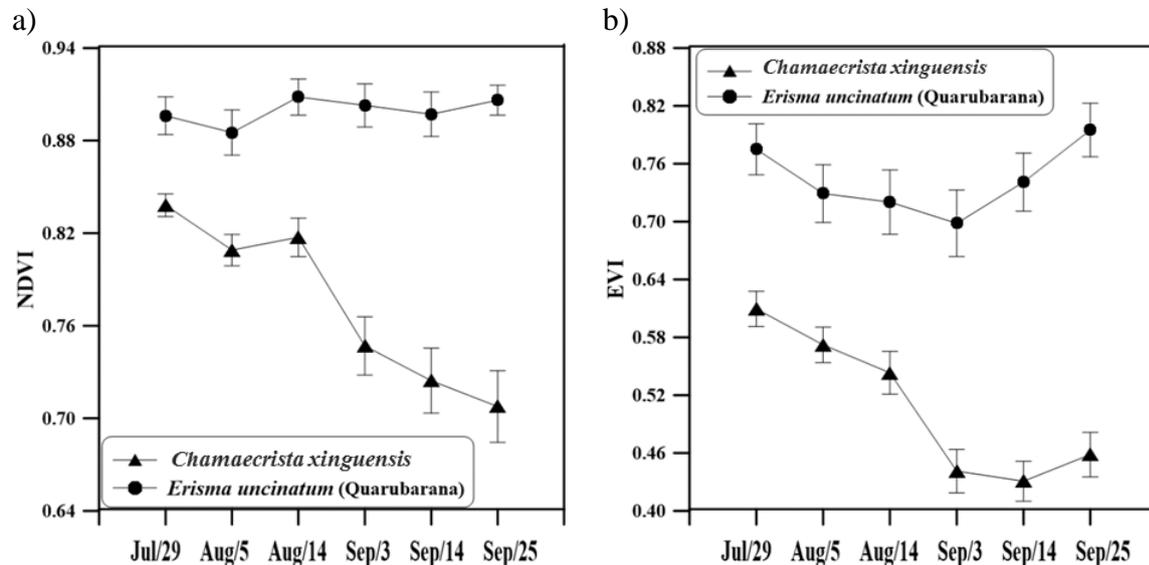


Figura 5. Variação temporal do EVI (a) e NDVI (b) para as espécies *Erisma uncinatum* e *Chamaecrista xinguensis* entre o período de julho a setembro de 2012 (estação seca).

4. Conclusão

Neste trabalho foram analisados os componentes espectrais da fenologia do dossel de três espécies: *Erisma uncinatum*, *Manilkara huberi* e *Chamaecrista xinguensis*. Os resultados mostraram padrões distintos de fenologia entre as espécies. As diferenças no tempo e na intensidade da perda de folhas e aparecimento de folhas novas produziram variabilidade nos dados principalmente nas frações vegetação verde e vegetação não-fotossinteticamente ativa derivados do MLME. Este padrão associado a diferenciações fenológicas entre as espécies foi também observado a partir da ACP e dos IVs. Conclui-se que redes de monitoramento por câmeras hiperespectrais podem fornecer novas oportunidades para uma melhor compreensão da fenologia dos ecossistemas tropicais e para dimensionar essa compreensão no espaço e no tempo. É importante notar que é necessária uma ligação mais estreita entre a detecção remota e alterações fisiológicas na cobertura vegetal para melhorar a interpretação a partir de dados de sensoriamento remoto.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto GOAmazon, financiado em conjunto com U.S. DOE (DE-SC0008383), FAPESP (2013/50533-5; 2015/23868-1) e FAPEAM (062.00570/2014). TH contou com auxílio da CAPES (12881-13-9) e CNPq (PVE 401025/2014-4).

Referências

- Anderson, L. O., Aragão, L. E. O. C., Shimabukuro, Y. E., Almeida, S., & Huete, A. (2011). Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, 32(2), 387–408.
- Aragão, L. E. O. C., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., & Saatchi, S. (2008). Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363(1498), 1779–85. <http://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>
- Arora, V. K., & Boer, G. J. (2005). A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. *Global Change Biology*, 11(1), 39–59. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00890.x>

- Atkinson, P. M., Dash, J., & Jeganathan, C. (2011). Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade. *Geophysical Research Letters*, 38(19), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2011GL049118>
- Bi, J., Knyazikhin, Y., Choi, S., Park, T., Barichivich, J., Ciais, P., ... Myneni, R. B. (2015). Sunlight mediated seasonality in canopy structure and photosynthetic activity of Amazonian rainforests. *Environmental Research Letters*, 10(6), 064014. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/10/6/064014>
- Boardman, & W., J. (1993). Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. NASA Technical Reports Server (NTRS)
- Galvao, L. S., dos Santos, J. R., Roberts, D. a., Breunig, F., Marcelo, B., Toomey, M., & de Moura, Y. M. (2011). 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. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.035>
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1), 65–74. <http://doi.org/10.1109/36.3001Haertel e Shimabukuro, 2005>
- Hilker, T., Lyapustin, A. I., Tucker, C. J., Sellers, P. J., Hall, F. G., & Wang, Y. (2012). Remote sensing of tropical ecosystems: Atmospheric correction and cloud masking matter. *Remote Sensing of Environment*, 127, 370–384. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.035>
- Hochberg, E. J., Roberts, D. A., Dennison, P. E., & Hulley, G. C. (2015). Special issue on the Hyperspectral Infrared Imager (HypIRI): Emerging science in terrestrial and aquatic ecology, radiation balance and hazards. *Remote Sensing of Environment*, 167, 1-5.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195–213.
- Huete, A. R., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana, P., Saleska, S. R., Hutyra, L. R., ... Myneni, R. (2006). Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33(6), L06405. <http://doi.org/10.1029/2005GL025583>
- IBGE. 2004. Mapa de Vegetação do Brasil. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro.
- Lopes, A. P., Nelson, B. W., Wu, J., Graça, P. M. L. de A., Tavares, J. V., Prohaska, N., ... Saleska, S. R. (2016). Leaf flush drives dry season green-up of the Central Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 182. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.009>
- Lyapustin, A.I., Martonchik, J., Wang, Y., Laszlo, I., Korokin, S. (2011). Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D3).
- Moreira, R. C., & Galvão, L. S. (2010). Variation in spectral shape of urban materials. *Remote Sensing Letters*, 1(3), 149–158. <http://doi.org/10.1080/01431161003692032>
- Morton, D. C., Nagol, J., Carabajal, C. C., Rosette, J., Palace, M., Cook, B. D., ... North, P. R. J. (2014). Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. *Nature*, doi:10.103(7487), 221–4. <http://doi.org/10.1038/nature13006>
- Moura, Y. M., Galvao, L. S., dos Santos, J. R., Roberts, D. A., & Breunig, F. M. (2012). 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, 260–270. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.013>
- Myneni, R. B., Yang, W., Nemani, R. R., Huete, A. R., Dickinson, R. E., Knyazikhin, Y., ... Salomonson, V. V. (2007). Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(12), 4820–3. <http://doi.org/10.1073/pnas.0611338104>
- Phillips, O. L., Aragão, L. E. O. C., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-gonzález, G., ... Salamão, R. (2009). Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science*, 323(5919), 1344-1347.
- Restrepo-Coupe, N., da Rocha, H. R., Hutyra, L. R., da Araujo, A. C., Borma, L. S., Christoffersen, B., ... Saleska, S. R. (2013). 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*, 182-183, 128–144. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.031>
- Saleska, S. ., da Rocha, H. ., Kruijt, B. ., & Nobre, H. (2009). Ecosystem Carbon Fluxes and Amazonian Forest Metabolism (pp. 373–387). American Geophysical Union. <http://doi.org/10.1029/2008GM000739>
- Saleska, S. R., Didan, K., Huete, A. R., & da Rocha, H. R. (2007). Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5850), 612. <http://doi.org/10.1126/science.1146663> Samanta et al., 2010
- Samanta, A., Ganguly, S., Vermote, E., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2012). Why Is Remote Sensing of Amazon Forest Greenness So Challenging? *Earth Interactions*, 16(7), 1–14. <http://doi.org/10.1175/2012EI440.1>
- Wu, J., Albert, L. P., Lopes, A. P., Restrepo-Coupe, N., Hayek, M., Wiedemann, K. T., ... Saleska, S. R. (2016). Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. *Science*, 351(6276). <http://doi.org/10.1126/science.aad5068>
- Xu, L., Samanta, A., Costa, M. H., Ganguly, S., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2011). Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(7), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2011GL046824>
- Zelazowski, P., Sayer, A. M., Thomas, G. E., & Grainger, R. G. (2011). Reconciling satellite-derived atmospheric properties with fine-resolution land imagery: Insights for atmospheric correction. *Journal of Geophysical Research*, 116(D18), D18308. <http://doi.org/10.1029/2010JD015488>
- Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R. B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y. Y., ... Hwang, T. (2014). Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 509(7498), 86–90. <http://doi.org/10.1038/nature13265>