

## Avaliação da sazonalidade da Floresta Nacional do Tapajós em resposta à disponibilidade de água e radiação utilizando dados MODIS MAIAC

Carolyne Bueno Machado<sup>1</sup>  
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
carolyne.machado@inpe.br; laragao@dsr.inpe.br

**Abstract.** Several studies have presented increase in photosynthetic capacity of the Equatorial Amazon Forest during the dry season, induced by the greater availability of incoming solar radiation, which indicates that for most of the region water availability is not a limiting factor. However, other studies show that the MODIS sensor registers artifacts due to changes in the solar-zenith angle, resulting in less shaded fractions in the dry season. This paper aimed to evaluate the seasonal behavior of the FLONA Tapajós using MODIS-MAIAC data, in response to water and radiation availability. Phenology was associated to the NDVI, EVI and to the shadow, green vegetation and non-photosynthetic vegetation (NPV) fractions, obtained from the linear spectral mixing model. The time series were evaluated with the BFAST package. The radiation had a significant ( $p$ -value  $<0.05$ ) negative correlation with the soil moisture, besides that vegetation can still have access to water after rainfall ceases, because soil moisture response has a lag of two months in relation to rainfall. EVI and NPV presented positive correlation with the radiation (0.88 and 0.80). The existence of MODIS artifacts does not fully explain the observed results, as the shadow fraction does not fall during the dry months, so that structural changes can occur, coinciding with studies that observed tree mortality, flushing of leaves and loss of senescent leaves.

**Palavras-chave:** remote sensing, Amazon Forest, vegetation index, time series, sensoriamento remoto, Floresta Amazônica, índices de vegetação, séries temporais.

### 1. Introdução

Florestas tropicais com extensas áreas contínuas, como a Amazônica, são muito mais que aglomerados de árvores e repositórios de biodiversidade, tratam-se também de grandes estocadores de carbono, com interação dinâmica com o ambiente e capacidade de condicionamento climático (NOBRE, 2014). As superfícies vegetadas nas regiões tropicais contribuem com a formação de massas de ar com capacidade de transportar e gerar no mínimo o dobro de precipitação que áreas sem cobertura florestal (ARAGÃO, 2012).

A disponibilidade de água e radiação, como também os nutrientes presentes no solo, são as variáveis responsáveis por regular os processos de fotossíntese e respiração, assim, suas oscilações sazonais e interanuais interferem no fluxo biótico da floresta e em sua capacidade de armazenar carbono (SALESKA et al., 2003). Neste aspecto, historicamente os modelos simulam que as florestas apresentam declínio em sua capacidade fotossintética em eventos de seca (SALESKA et al., 2009). No entanto, esse padrão foi confrontado por Saleska et al. (2003), por meio de torres de fluxo na FLONA Tapajós; e por Huete et al. (2006), através de índices espectrais orbitais (EVI MODIS - ver seção 2.3), inferindo que a maior radiação solar disponível na estação seca impulsiona a capacidade fotossintética da floresta (*Green-up*), que, por possuir árvores de raízes profundas, garante o acesso à água, o que não ocorre se a floresta for convertida para pastagem. De forma contraditória, para Morton et al. (2014) o *Green-up* observado com o EVI MODIS seria um artefato produzido pela geometria do sensor-Sol, na aquisição das imagens, e não uma mudança estrutural da vegetação.

O sensoriamento remoto orbital permite o monitoramento de vastas regiões e o acesso às propriedades biofísicas dos alvos, com base em seu comportamento espectral. Os pigmentos fotossintetizantes da vegetação absorvem a radiação eletromagnética no espectro visível, principalmente no vermelho; em contrapartida a estrutura interna foliar espalha fortemente a radiação na região do infravermelho próximo; já o teor de umidade é responsável pela absorção no infravermelho médio (PONZONI; SHIMABUKURU, 2010). Dessa forma, o ciclo de vida das plantas e alterações fenológicas e morfológicas influenciam na sua resposta espectral.

Folhas mais jovens são fotossinteticamente mais eficientes que folhas senescentes (MYNENI et al., 2007) e, conforme a vegetação perde água ocorre também a degradação dos pigmentos fotossintetizantes, ocasionando a suavização das bandas espectrais de absorção (PONZONI; SHIMABUKURU, 2010).

Dentro deste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento sazonal da Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós a nível orbital em resposta às variáveis ambientais, porém, utilizando o dado MODIS processado com um novo algoritmo de correção atmosférica e com correção do ângulo de aquisição das imagens (HILKER et al., 2014). Objetivou-se também, associar a fenologia da vegetação não somente ao índice EVI, mas às frações de vegetação verde, seca e de sombras, geradas com o modelo linear de mistura espectral. A metodologia consistiu em analisar as séries temporais, de 2004 a 2014, com o pacote estatístico BFAST, que permitiu verificar a existência de mudanças no padrão de tendência e correlacionar a sazonalidade das variáveis.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo trata-se da Floresta Nacional do Tapajós, no Estado do Pará, fronteira com a Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163) a leste e com o Rio Tapajós a oeste (Figura 1). A FLONA Tapajós é uma extensa área de floresta tropical primária fechada, de aproximadamente 450.000 ha (PYLE et al., 2008), se estendendo pelos municípios de Belterra, Santarém, Aveiro, Rurópolis e Placas. Sua área situa-se sobre um amplo planalto, com solos bem drenados e predominantemente compostos por latossolo amarelo argiloso, de teor baixo de nutrientes e matéria orgânica. Os dosséis tem altura aproximada de 40 m com árvores emergentes espalhadas que podem chegar até 55 m (DOUGHTY; GOULDEN, 2008). A região recebe em média 1920 mm de precipitação anualmente, com 5 meses de estação seca, julho-novembro, (meses com precipitação abaixo de 100 mm) (SALESKA et al., 2003).

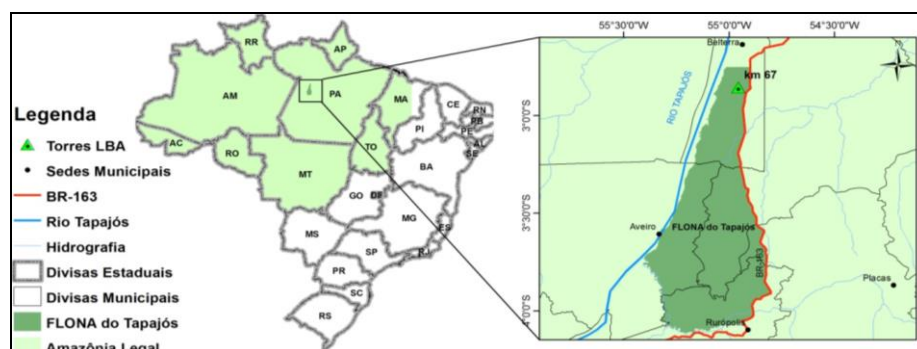


Figura 1. Localização da FLONA Tapajós.

### 2.2 Banco de dados

Os dados utilizados neste trabalho estão descritos na Tabela 1. Foram utilizadas imagens obtidas pelo sensor MODIS/Terra Coleção 6, com calibração radiométrica e correção geométrica, de janeiro de 2004 a junho de 2014, correspondentes ao *tile* h02v01. Os dados utilizados são relativos à reflectância de superfície com composição de oito dias, normalizados para o ângulo de visada fixo de 45°, possuindo já a correção atmosférica pelo algoritmo *Multiangle Implimentation of Atmospheric Correction* (MAIAC). O MAIAC trata-se de um novo algoritmo que mascara a cobertura de nuvens e corrige a influência atmosférica nas imagens, por meio de análise de séries temporais e um processo de agrupamento de pixels, criando um modelo de aerossóis e reflectância de superfície sem a utilização dos típicos métodos empíricos (HILKER et al., 2014).

A precipitação mensal foi obtida com o produto 3B43 da missão TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), disponibilizado pela *National Aeronautics and Space Administration*

(NASA). Este produto é gerado por um algoritmo que calcula a precipitação global em fina escala, através da combinação de estimativas de múltiplos sensores orbitais passivos e ativos (HUFFMAN et al., 2007).

Tabela 1. Banco de dados e respectivo tema estudado.

Dado orbital	Res. Espacial	Sensor/fonte	Tema estudado
Reflectância de superfície (bandas 1, 2, 3, 4 e 7)	1 km	MODIS/Terra-MAIAC	Fenologia da vegetação
Precipitação mensal (mm/mês)	0,25°	TRMM	Disponibilidade de água
Profundidade de armazenamento de água no solo - AAS (cm)	1°	GRACE	Disponibilidade de radiação solar
Fluxo de radiação de ondas curtas para a superfície - RSDSCS (W/m <sup>2</sup> )	1°	CERES	

A disponibilidade de umidade para a vegetação na superfície foi avaliada com o coeficiente de armazenamento de água no solo (AAS), obtido com os dados da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) da NASA. Os coeficientes de AAS são disponibilizados em centímetros equivalentes de profundidade de água e são obtidos, em conjunto a dados auxiliares, por meio de medições da oscilação espaço-temporal do campo gravitacional da Terra, que ocorre primariamente devido às variações nas massas de água da superfície. Estas medições são feitas através de um sistema de micro-ondas (banda k) que mede a distância do satélite com a superfície (SYED et al., 2008).

O fluxo de radiação solar de ondas curtas incidente na superfície, em condições de céu limpo, foi obtido pelo produto EBAF-Surface Ed 2.8 (*Energy Balanced and Filled*), proveniente do projeto CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) da NASA, que possui sensores de banda larga acoplados nos satélites Terra e Aqua. O dado utilizado corresponde ao RSDSCS (*Surface Downwelling Clear-Sky Shortwave Radiation*). O sistema CERES incorpora ao processamento quatro modelos diferentes para as estimativas de fluxo na superfície, além de englobar nuvens e aerossóis obtidos com o sensor MODIS e medições meteorológicas de satélites geoestacionários e de campo. O algoritmo se baseia em modelo de transferência radiativa, que utiliza o fluxo de ondas curtas refletido pelo topo da atmosfera e a água precipitável para derivar o fluxo que chega à superfície. Os fluxos descendentes e ascendentes são então calculados por meio do albedo (YAN et al., 2011).

### 2.3 Processamento dos dados

As imagens MODIS-MAIAC foram reprojadas da projeção Sinusoidal para Geográfica e *Datum* WGS84 e também tiveram sua resolução temporal reamostrada de oito para 30 dias, para serem compatíveis com os demais dados, totalizando 126 imagens. Foram calculados os índices mensais NDVI (*Normalized difference vegetation index*) e EVI (*Enhanced vegetatin index*), para o período estudado. O NDVI (Equação 1) consiste na diferença normalizada entre a reflectância nas bandas do infravermelho próximo (b2) e vermelho (b1), devido ao comportamento espectral antagônico da vegetação nessas bandas (THENKABAIL et al., 2011). O NDVI é bastante utilizado como indicativo da atividade fotossintética da vegetação, porém, satura com altos valores de índice de área foliar, além de variar com o ângulo de visada do sensor e com o substrato (HUETE et al., 1997).

$$NDVI = \frac{b2 - b1}{b2 + b1} \quad (1)$$

O EVI foi formulado por Huete et al. (1997) e incluiu: a correção do substrato, ao adicionar o coeficiente (L=1), e a correção do espalhamento atmosférico, através da adição da reflectância da banda do azul (b3) (THENKABAIL et al., 2011). Na equação do EVI (Equação

2) também foi adicionado o coeficiente G, sendo um fator de ganho ajustado a 2,5 e as constantes C1 e C2, que discretizam o uso das bandas 1 e 3, correspondendo a 6 e 7,5, respectivamente. O EVI mostra melhora na sensibilidade em regiões de alta biomassa, permitindo um monitoramento mais satisfatório da vegetação (JENSEN, 2011). Porém, de acordo com Galvão et al. (2011), por não ser um índice normalizado, é influenciado pelos efeitos topográficos e pelo ângulo de iluminação na aquisição da imagem.

$$EVI = G \frac{b2 - b1}{b2 + C1 * b1 - C2 * b3 + L} \quad (2)$$

O modelo linear de mistura espectral (MLME) foi aplicado às imagens mensais MODIS-MAIAC. O MLME trata-se de uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente presente na mistura de um pixel, sendo necessário aplicar algoritmos de inversão de modelos para estimar sua proporção, com base na curva espectral de cada componente considerado, obtida a partir da identificação de “pixels puros” (*endmembers*) na cena (PONZONI; SHIMABUKURU, 2010). Foram considerados os *endmembers* de vegetação verde (GV), sombra e vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV). A fração sombra representa componentes de baixo albedo, como água ou parcelas sombreadas dos dosséis florestais. O NPV dentro da floresta consiste em troncos, vegetação seca e serrapilheira (ASNER, 1998) e pode ser utilizado para avaliar a resposta da vegetação a eventos de seca.

Para a seleção do *endmember* de GV e sombra foi utilizado o índice de pureza do pixel (PPI). O algoritmo do PPI analisa repetidamente o espectro de todos os pixels da imagem e separa aqueles menos redundantes, com base em um limiar, identificando os pixels candidatos a *endmembers* (KUMAR et al., 2007). Os espectros de PPI foram então analisados com o *scatterplot* das bandas 1 e 2, atribuindo: GV com alta reflectância na banda 2 e baixa na banda 1; sombra com baixa reflectância em ambas. Os *endmembers* de GV foram gerados para cada mês, utilizando as imagens de 2004 (totalizando 12), com o intuito de diminuir a influência da alteração do ângulo zenital solar durante o ano, pois, quanto menor é o ângulo solar, mais componentes dos dosséis podem estar iluminados, influenciando na radiação refletida diretamente para o sensor (GALVÃO et al., 2011). O *endmember* de sombra foi obtido com a média dos espectros de sombra de cada mês. O *endmember* de NPV foi gerado com base em um espectro do sensor hiperespectral HVIS da *Surface Optics Corporation*, posicionado na torre do km 67 (Figura 1). Este espectro foi coletado de uma imagem de julho de 2012, em uma etapa independente deste trabalho. A imagem HVIS tem resolução espacial submétrica, o que facilitou na identificação de um pixel de NPV, porém, a resposta da floresta para este sensor é muito maior que a resposta do MODIS, que possui o pixel de 1x1 km (por exemplo, a reflectância da vegetação no infravermelho próximo é em média de 80% - HVIS, contra 30% - MODIS). Assim, o espectro de NPV do MODIS foi interpolado do NPV hiperespectral, através da relação: GV hiperespectral *versus* GV MODIS. Um exemplo dos *endmembers* utilizados nas imagens MODIS-MAIAC de janeiro é apresentado na Figura 2. Após a aplicação do MLME foram obtidas as imagens mensais de fração GV, sombra e NPV, relativas ao percentual por pixel de cada componente.

Os dados TRMM, GRACE e CERES tiveram a resolução espacial reamostrada para a resolução MODIS (1km) com a interpolação bilinear, como feito por Hilker et al. (2014).

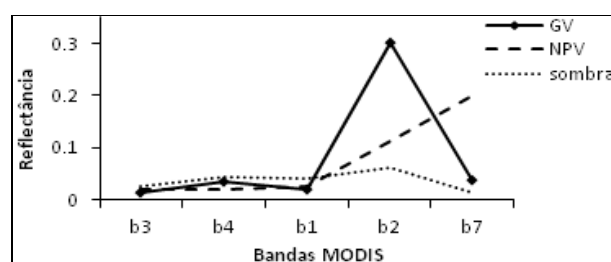


Figura 2. Curva espectral dos *endmembers* aplicados às imagens de janeiro.

## 2.4 Análise das séries temporais

A série temporal de cada variável (NDVI, EVI, GV, NPV, sombra, precipitação, umidade do solo e radiação) foi obtida para os 126 meses a partir da média zonal dos dados, aplicada à área de floresta. Essa área foi considerada como os pixels com NDVI médio acima de 0,8, dentro do contorno da FLONA (Figura 1).

Foi utilizado o pacote BFAST (*Breaks For Additive Seasonal and Trend*), do software R, para analisar as séries temporais. O BFAST integra a decomposição de séries temporais em tendência, sazonalidade e componentes residuais, sendo capaz de detectar mudanças fenológicas dentro de séries temporais de dados de sensoriamento remoto, respondendo às perturbações abruptas (VERBESSELT et al., 2010). O algoritmo foi inicializado com os parâmetros *default* e modelo de ajuste harmônico. O objetivo foi verificar se as séries fenológicas apresentam quebras de tendência que combinem, no tempo, com mudanças nas variáveis ambientais, e, correlacionar a sazonalidade de cada série (oscilação média das variáveis de janeiro a dezembro para o período de 2004 a 2014), de forma a identificar a influência da disponibilidade de água e radiação na fenologia da floresta.

Também foi realizada a correlação por pixel entre o EVI, NDVI e as variáveis ambientais, considerando somente os meses secos do período estudado. Os meses secos de cada pixel foram associados aos meses de anomalia mensal negativa.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1 Análise das séries temporais

As séries temporais da FLONA Tapajós estão apresentadas na Figura 3. A maior precipitação média mensal para a região foi de 627 mm em março de 2008. Os meses mais secos são julho, agosto e setembro, com precipitação abaixo de 100 mm em média, já os mais chuvosos são fevereiro, março e abril, com média mensal acima de 300 mm. A precipitação acumulada de julho a novembro foi mais expressiva em 2007 (623 mm), quase três vezes maior que a precipitação acumulada na estação seca de 2009 (241 mm). Em 2008 ocorreu o maior valor acumulado de janeiro a junho (2.011 mm) e em 2010 o menor (1.354 mm). A combinação das baixas precipitações consecutivas, na estação seca de 2009 e na estação chuvosa de 2010, podem ter causado os baixos coeficientes de ASS em 2010 e a forte queda nos índices EVI e NDVI em agosto de 2010 (Figura 3). De acordo com Xu et al. (2011) ocorreu perda intensa e generalizada na capacidade fotossintética da Amazônia durante a seca severa de 2010. O NDVI demonstrou menor oscilação que as demais variáveis fenológicas, o que pode ser devido à sua saturação em regiões de floresta densa. As frações de NPV e sombra apresentaram percentual médio baixo na área de estudo, não ultrapassando 15 %, já a fração GV teve um percentual médio variando a partir de 80 %.

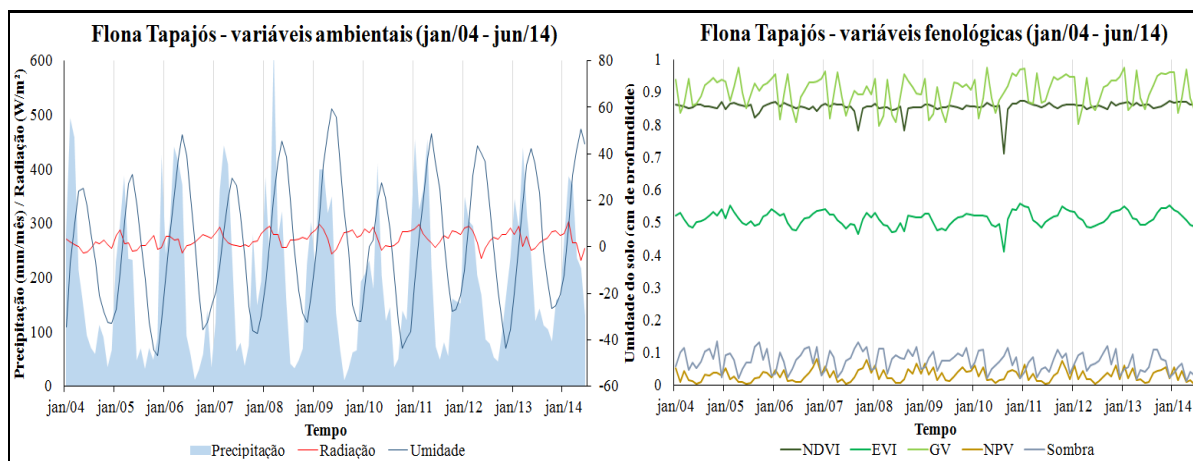


Figura 3. Séries temporais extraídas da área da FLONA Tapajós.

A Figura 4-a apresenta as componentes de tendência das séries temporais. Dentre as variáveis ambientais somente a série de umidade do solo apresentou *breakpoints*, nos meses: dez/05, jun/07, mar/09, set/10 e abr/12. Essas quebras de tendência não foram compatíveis no tempo com as de EVI (ago/07), NPV(jan/06) e GV (jul/07 e dez/11). Este resultado pode ser consequência das séries temporais terem sido extraídas de uma área muito grande, em comparação a uma análise por pixel, como realizado por Arantes (2014), que identificou *breakpoints* com o BFAST em imagens MODIS, para monitorar mudanças no uso da terra.

A componente de sazonalidade extraída do BFAST (Figura 4-b) apresenta um desvio de dois meses entre o ciclo de precipitação e o de umidade do solo, com coeficiente de correlação de Pearson (R) significativo (p-valor<0,05) de 0,99, o que pode caracterizar que a vegetação continua tendo acesso à água após cessarem as chuvas, isto poderia enfraquecer a correlação entre as variáveis fenológicas e a precipitação.

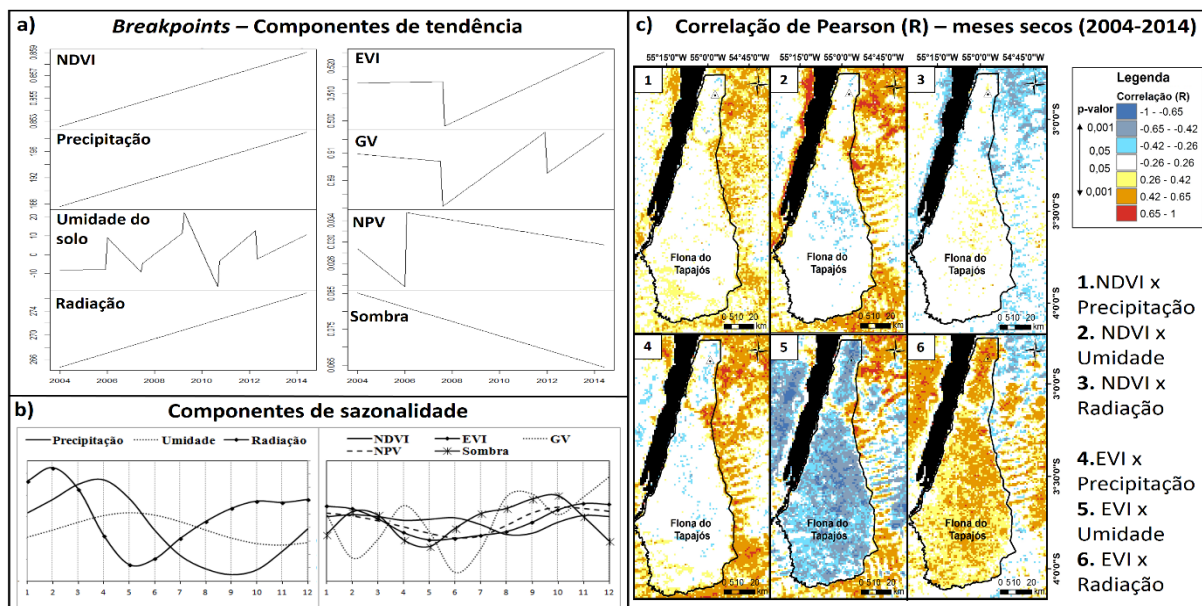


Figura 4. Componentes de tendência das variáveis para o período (jan/04-jun/14) (a). Componentes de sazonalidade extraídas do BFAST (b). Análise espacial da correlação entre EVI e NDVI com as variáveis ambientais, durante os meses secos (c).

A correlação da sazonalidade de radiação com a precipitação não foi significativa, mas foi significativa com a de umidade ( $R=-0,68$ ). De acordo com Saleska et al. (2009) nas regiões Equatoriais a irradiância solar disponível é controlada primariamente pela cobertura de nuvens, assim, durante a estação seca, ela aumenta consideravelmente. A sazonalidade da radiação é então uma combinação da menor cobertura de nuvens, durante os meses secos, e da intensidade de radiação solar que chega à superfície, dependente da declinação solar, que aumenta na região a partir do solstício de junho até próximo do equinócio de março.

A sazonalidade do EVI (Figura 4-b) mostra o mesmo comportamento observado por Huete et al. (2006): ganho nos valores de junho a janeiro, com forte correlação significativa com a sazonalidade da radiação ( $R=0,88$ ) e correlação negativa com a umidade ( $R=-0,85$ ). Este comportamento indicaria que a vegetação aumenta sua capacidade fotossintética mais em resposta à radiação do que à disponibilidade de água. Já o NDVI apresentou uma sazonalidade mais fraca que o EVI, e, não possuiu correlação significativa com as variáveis ambientais, assim como as frações GV e sombra. Porém, a fração NPV apresentou um comportamento muito próximo do EVI ( $R=0,92$ ), e conseqüentemente, também teve forte correlação significativa com a disponibilidade de radiação e umidade, 0,80 e -0,91, respectivamente.

A sazonalidade da fração sombra e GV apresentam em alguns períodos um comportamento adverso, que poderia ser interpretado da seguinte forma: conforme se altera o ângulo zenital

solar durante o ano algumas frações dos dosséis ficam mais iluminadas, diminuindo a fração sombra, o que aumentaria a fração GV e os índices de vegetação (GALVÃO et al., 2011). Isto ocorre devido à resposta espectral da vegetação também ser afetada pela arquitetura dos dosséis: quando a fonte de iluminação está posicionada exatamente atrás do sensor, é detectada uma maior proporção de componentes da vegetação diretamente iluminados e as sombras presentes nos dosséis são escondidas pela folhagem iluminada, conferindo uma reflectância maior (PONZONI; SHIMABUKURU, 2010). Porém, de junho a setembro tanto a fração GV quanto a sombra aumentam. Além disso, o EVI não apresentou correlação negativa significativa com a fração sombra, como observado por Galvão et al. (2011), de forma que, com a metodologia aplicada, o aumento do GV e EVI nos meses secos não pode ser explicado somente como um artefato nas imagens.

Na análise espacial (Figura 4-c) também é possível observar que o NDVI apresentou correlações fracas e não significativas com as variáveis ambientais, ao contrário do EVI, que possuiu o mesmo comportamento das componentes de sazonalidade. Além disso, o padrão de correlação da área de floresta é o oposto das regiões fora do contorno da FLONA, que em sua maioria são áreas de pastagem ou agricultura.

O *Green-up* observado poderia ser também reflexo de mudanças estruturais nos dosséis florestais, como observado por Anderson et al. (2010), no qual o EVI teve correlação significativa com o aumento de mortalidade de árvores. Doughty e Goulden (2008) observaram brotamento de folhas novas, e também perda de folhas senescentes no meses mais secos, na região do Tapajós, conferindo aumento de serrapilheira. De forma que: a abertura de clareiras e a maior disponibilidade de radiação podem impulsionar o *flushing* de folhas jovens, fotossinteticamente mais eficientes, alterando assim a resposta detectada pelo sensor orbital, e, aumentando ao mesmo tempo o percentual de NPV, o que também foi observado no presente trabalho.

#### 4. Conclusões

A componente de sazonalidade extraída do pacote estatístico BFAST permitiu uma análise satisfatória das séries temporais, pois sintetizou as informações e gerou resultados, a respeito da FLONA Tapajós, também observados em outros trabalhos.

O fato da floresta poder ter acesso à água após o término das chuvas pode ser o fator que garante o *flushing* de folhas novas quando a radiação disponível aumenta, simultaneamente à perda de folhas senescentes, aumentando assim a fração NPV na floresta e alterando a estrutura dos dosséis florestais, o que, conseqüentemente, altera a resposta registrada pelo sensor orbital. A fração sombra não foi inversamente proporcional ao EVI, para fortalecer a hipótese do efeito *Green-up* ser somente um artefato nas imagens MODIS, porém, os *endmembers* utilizados podem influenciar nas frações geradas com o MLME, sendo interessante testar e aplicar outros espectros.

#### Agradecimentos

À CAPES pela bolsa de mestrado e ao Projeto FAPESP (Processo 2013/50533-5).

#### Referências Bibliográficas

ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. Remote sensing detection of droughts in amazonian forest canopies. *New phytologist*, v. 187, n. 3, p. 733–750, ago. 2010.

ARAGÃO, L. E. O. C. Environmental science: the rainforest's water pump. *Nature*, p. 8–9, 5 set. 2012.

ARANTES, T. B. Análise de séries temporais compostas por imagens sintetizadas a partir da fusão de dados MODIS-TM. 2014. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2014.

- ASNER, G. P. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 3, 1998.
- DOUGHTY, C. E.; GOULDEN, M. L. Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and co<sub>2</sub> exchange. **Journal of geophysical research**, v. 113, p. G00B06, 14 out. 2008.
- GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; DE MOURA, Y. M. On intra-annual variability in the dry season of tropical forest: a case study with modis and hyperspectral data. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 9, p. 2350–2359, 2011.
- HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; TUCKER, C. J.; HALL, F. G.; MYNENI, R. B.; WANG, Y.; BI, J.; MENDES DE MOURA, Y.; SELLERS, P. J. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the amazon. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 111, n. 45, p. 16041–16046, 11 nov. 2014.
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.
- HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G.; NELKIN, E. J.; BOWMAN, K. P.; HONG, Y.; STOCKER, E. F.; WOLF, D. B. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**. v. 8, p. 38-55, 2006.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**. 2ª Edição Traduzida. Editora Parêntese. 2011. 598 p.
- KUMAR, U.; KERLE, N.; RAMACHANDRA, T. V. In: ELLEITHY, K. (Org.). Constrained linear spectral unmixing technique for regional land cover mapping using modis data. Dordrecht: **Springer Netherlands**, 2008. 416–423 p.
- MYNENI, R. B. et al. Large seasonal swings in leaf area of amazon rainforests. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 104, n. 12, p. 4820–4823, 20 mar. 2007.
- NOBRE, A. D. **O futuro climático da amazônia: relatório de avaliação científica**. São José dos Campos, SP: ARA CCST-INPE INPA, 2014.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2010. 127 p.
- PYLE, E. H.; SANTONI, G. W.; NASCIMENTO, H. E. M.; HUTYRA, L. R.; VIEIRA, S.; CURRAN, D. J.; VAN HAREN, J.; SALESKA, S. R.; CHOW, V. Y.; CARMAGO, P. B.; LAURANCE, W. F.; WOFSY, S. C. Dynamics of carbon, biomass, and structure in two amazonian forests. **Journal of geophysical research**, v. 113, n. 1, p. G00B08, 14 nov. 2008.
- SALESKA, S.; DA ROCHA, H. R.; KRUIJT, B.; NOBRE, A. Ecosystem carbon fluxes and amazonian forest metabolism. **Amazonia and global change**, v. 186, p. 389–407, 2009.
- SALESKA, S. R. et al. Carbon in amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science (new york, n.y.)**, v. 302, n. 5650, p. 1554–1557, 2003.
- SYED, T. H.; FAMIGLIETTI, J. S.; RODELL, M.; CHEN, J.; WILSON, C. R. Analysis of terrestrial water storage changes from grace and gltas. **Water resources research**, v. 44, n. 2, p. W02433, fev. 2008.
- THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G.; HUETE, A. R. **Hyperspectral remote sensing of vegetation**. Boca Raton, London, New York: 2011. 688 p.
- VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; ZEILEIS, A.; CULVENOR, D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. **Remote sensing of environment**, v. 114, n. 12, p. 2970–2980, 15 dez. 2010.
- XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Widespread decline in greenness of amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical research letters**, v. 38, n. 7, p. L07402, abr. 2011.
- YAN, H.; HUANG, J.; MINNIS, P.; WANG, T.; BI, J. Comparison of CERES surface radiation fluxes with surface observations over Loess Plateau. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 6, p. 1489-1500, 2011.