

## ANÁLISE DA FENOLOGIA E DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA DE UMA FLORESTA ALAGÁVEL NA AMAZÔNIA ATRAVÉS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO MELHORADO (EVI)

Leticia d'Agosto Miguel Fonseca<sup>1</sup>, Laura De Simone Borma<sup>2</sup>, Ricardo Dalagnol<sup>3</sup>, Iane Brito Tavares<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, São José dos Campos, SP 12227-010, leticia.fonseca@inpe.br; <sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, laura.borma@inpe.br; <sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ricds@hotmail.com e <sup>4</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, iane@uft.edu.br.

### RESUMO

O estudo consistiu em avaliar a produtividade primária bruta - GPP (*do inglês*, gross primary production) e a fenologia de uma floresta sazonalmente alagável na região de transição Amazônia-Cerrado, através de dois produtos derivados de satélite. Os resultados foram comparados com observações de campo. Para tal, foram obtidos os dados de GPP estimados através de um sistema de fluxos turbulentos e os dados de produção de serrapilheira no sítio experimental Javaezinho (JAV), Tocantins. O índice de vegetação melhorado (EVI) foi calculado a partir de imagens MODIS de reflectância da superfície corrigidos pelo algoritmo MAIAC (EVI-MAIAC), e comparados com o EVI do produto MOD13Q1 (EVI-MOD13). Observou-se melhor representação da sazonalidade da GPP e da serapilheira com o EVI-MAIAC quando comparado com o EVI-MOD13. Esses resultados reforçam a potencialidade do EVI-MAIAC, sugerindo que o índice é sensível às mudanças na estrutura foliar da floresta e na capacidade de assimilar carbono em função da dinâmica do alagamento.

**Palavras-chave** — Produtividade Primária Bruta, Fenologia, EVI, MAIAC.

### ABSTRACT

*This study aimed to evaluate the gross primary production (GPP) and the phenology of a floodplain forest in the Amazon- Cerrado transition region, through two satellite data. The results were compared with field data. It was obtained the estimated GPP from the LBA flux tower and litterfall data at Javaezinho site, Tocantins state. The enhanced vegetation index (EVI) was calculated from the MODIS surface reflectance images corrected by the MAIAC algorithm (EVI-MAIAC), and compared with the EVI product from MOD13Q1 (EVI-MOD13). It was observed a better representation of GPP and phenology seasonality with EVI-MAIAC, when compared with EVI-MOD13. This result suggests that the EVI-MAIAC is sensitive to changes in leaf structure which influences on the forest capacity of assimilating carbon as a result of flooding dynamic.*

**Key words** — Gross Primary Production, Phenology, EVI, MAIAC.

### 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos vêm sendo realizados em busca do entendimento dos mecanismos de controle sazonal da vegetação, tais como a disponibilidade de água ou de luz [16, 21], uma vez que estes são os principais requisitos para entendermos como a floresta responde à sazonalidade climática natural e aos eventos extremos de seca [13].

A sazonalidade das florestas tropicais tem sido estudada através de índices de vegetação derivados de dados de sensoriamento remoto. Enquanto alguns estudos apontavam a resiliência da floresta às secas sazonais [9] e também às secas extremas [17, 18], outros estudos, no entanto, observaram a sensibilidade da floresta, argumentando que o aumento no índice de vegetação ("*greening*") poderia ser atribuído ao aparecimento de novas folhas. Esse efeito se daria mais em resposta ao aumento na disponibilidade de luz do que ao aumento da biomassa [1, 6]. No entanto, estudos mais recentes têm demonstrado a forte correlação da fenologia e da produtividade da floresta amazônica com o índice de vegetação melhorado (EVI) do sensor MODIS [12, 22] após melhorias no algoritmo de detecção de nuvens pelo *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC) e normalização da geometria de iluminação e de visada [11].

Apesar do avanço no conhecimento acerca da resposta da floresta amazônica de terra firme às secas sazonais e extremas, poucos estudos exploraram a resposta de florestas sazonalmente alagadas, que estão presentes em cerca de 30% da bacia amazônica [10]. Algumas pesquisas realizadas no entorno dos rios Solimões/Amazonas apontam para a resiliência dessas florestas às secas sazonais [15, 20, 23]. No entanto, esse padrão de comportamento não pode ser generalizado para as áreas sazonalmente alagáveis como um todo. Por exemplo, Costa (2015) ao estudar a região sazonalmente alagável do Parque Estadual do Cantão localizado às margens do rio Javaés, evidenciou a ocorrência de um padrão bimodal de assimilação de carbono, em que a assimilação diminui no auge do alagamento e no final do período seco, com base nos dados do sistema de fluxo do Programa LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment*) [3]. Também foram verificadas reduções no crescimento do tronco das árvores no período alagado, como resposta ao estresse por excesso

de água, e no período seco, devido ao estresse hídrico [20]. Estudos anteriores realizados nesse sítio indicaram que durante as secas sazonais, a vegetação acessou a água armazenada nas camadas mais profundas do solo (< 2 m) para atender às demandas hídricas da atmosfera [2]. Além disso, nessa mesma área, foi verificada maior mortalidade de árvores durante a seca extrema de 2005 [7], como resultado da baixa capacidade de retenção de umidade dos solos da região [2, 3, 7].

Dadas as incertezas da resposta das florestas sazonalmente alagadas frente aos eventos sazonais e extremos de seca, este estudo buscou avaliar o potencial dos produtos de sensoriamento remoto em representar a sazonalidade da fenologia e da GPP da floresta sazonalmente alagável do Parque Estadual do Cantão, na região de transição Amazônia-Cerrado, Tocantins.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no sítio Javaezinho (JAV), localizado no Parque Estadual do Cantão (PEC), município de Pium, Tocantins (Figura 1). Trata-se de um dos sítios do programa LBA situado em área sazonalmente alagável, às margens dos rios Javaés-Araguaia, transição Floresta Amazônica – Cerrado. O clima na região é quente e úmido, com precipitação média anual de 1.755 mm e temperatura média variando de 21,5°C em janeiro a 26,5°C em setembro. A estação seca ocorre entre maio e setembro, e a estação chuvosa ocorre entre outubro e abril [2].

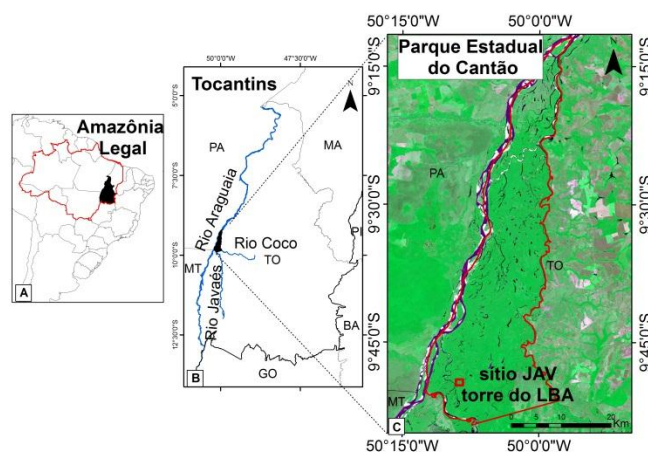


Figura 1. Localização do sítio Javaezinho e da torre de fluxo do LBA no contexto da Amazônia Legal, (a) estado do Tocantins (b) e no interior do Parque Estadual do Cantão (c).

### 2.1. Dados de satélite e pré-processamento

Para as análises por sensoriamento remoto foram obtidas séries temporais do EVI-MAIAC, EVI-MOD13 e precipitação do *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM) para a coordenada que corresponde à torre de fluxo do JAV (Figura 1). Para calcular o EVI-MAIAC, obteve-se a reflectância de superfície do sensor MODIS

(Terra/Aqua), para o período de 2004 a 2017 com correção atmosférica a partir do algoritmo MAIAC (*Multi-angle implementation of atmospheric correction*) [11]. Os dados, com 1 km de resolução espacial e agregados temporalmente em composições de 16 dias foram normalizados para visada ao nadir e ângulo zenital solar de 45 graus, por meio da *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) [4]. Essas imagens foram utilizadas para o cálculo do (EVI) de acordo com a seguinte expressão [8].

$$EVI = 2,5 * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + (6 * \rho_{Red} - 7,5 * \rho_{Blue}) + 1}$$

Em que,  $\rho_{NIR}$  é a reflectância do infravermelho próximo,  $\rho_{Red}$  é a reflectância do vermelho e  $\rho_{Blue}$  é a reflectância do azul.

Também foi obtido para o mesmo período o EVI do produto MOD13Q1 (EVI-MOD13), com resolução de 250 m, e agregados temporalmente em 16 dias, extraídos através da plataforma Google Earth Engine Explorer e os dados de precipitação do TRMM [5].

### 2.2 Dados de campo

Os dados de GPP da torre de fluxo foram calculados a partir dos dados de fluxos turbulentos (*eddy covariance*) instalados na torre micrometeorológica no sítio JAV (Figura 1), para o período entre 2011 e 2013. Os dados foram obtidos em parceria com os pesquisadores da Universidade Federal de São Paulo [3, 16]. Também foram obtidos os dados de precipitação da torre para o período de 2004 a 2017.

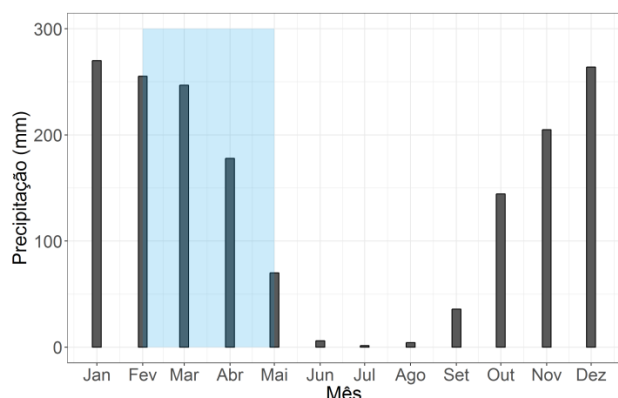
O período de análise fenológica compreende parte dos anos de 2004 e 2005, tendo em vista a disponibilidade de dados de produção de serapilheira no sítio JAV [14].

### 2.3 Análise

Para verificar a consistência dos produtos de sensoriamento remoto EVI-MAIAC e EVI-MOD13, comparamos sua variação sazonal nos períodos chuvoso, alagado e seco com os dados de campo. Para tanto, foram ajustados modelos lineares, obtendo o coeficiente de correlação de Pearson ( $R^2$ ) e significância estatística (p-value a 5% de significância) entre as variáveis.

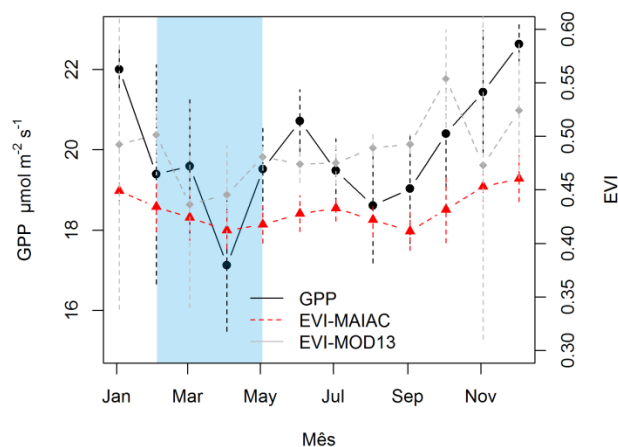
## 3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a média mensal dos dados de precipitação do TRMM para o período de 2004 a 2017. Optou-se por trabalhar com o TRMM em função da falha de dados de precipitação da torre e da alta correlação ( $R^2 = 0,7$ ) entre esses as duas variáveis. Observa-se que 90% da água que entra no sistema se concentra no período chuvoso. A precipitação diminui até o final do período alagado (hachurado em azul), atingindo os menores valores (ou inexistente) no período seco (Maio a Setembro).



**Figura 2.** Médias mensais das variações intra-anuais da precipitação com base nos dados do TRMM. O período sombreado em azul corresponde ao período alagado.

A Figura 3 representa a sazonalidade da GPP, EVI-MAIAC e EVI-MOD13. As variáveis GPP e EVI-MAIAC apresentaram correlação forte, positiva e significativa ( $R^2 = 0,88$ ;  $p < 0,001$ ). Já as variáveis GPP e EVI-MOD13 não apresentaram correlação significativa ( $R^2 = 0,44$ ;  $p = 0,14$ ). Pode-se observar que o período alagado corresponde ao período com menor valor de GPP (Figura 3), apresentando queda abrupta no fluxo de  $\text{CO}_2$  no mês de abril ( $17,12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Enquanto isso o EVI-MAIAC apresentou uma pequena queda gradativa nesse período, atingindo o menor valor no mês de abril (0,41). Também no mesmo mês, o EVI-MOD13 apresentou o menor valor da série (0,42), apesar de apresentar altos valores de desvio padrão nesse período, variando de 0,35 a 0,55.

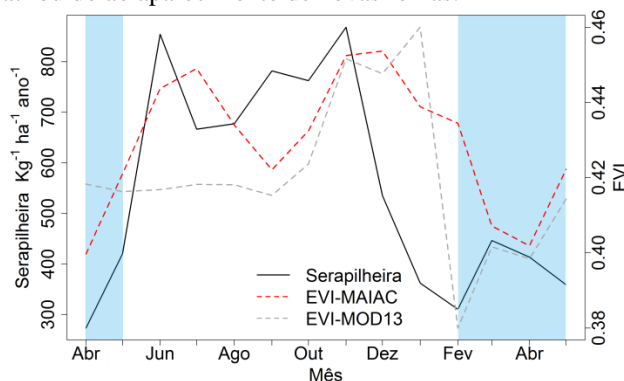


**Figura 3.** Sazonalidade mensal do GPP, EVI – MAIAC e EVI-MOD13 para o período de 2011 a 2013. As barras das variáveis indicam o desvio padrão.

No início do período seco, de maio a julho, é observado o aumento da GPP (Figura 3), com maior valor em junho ( $20,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), bem como o aumento do EVI-MAIAC. Entretanto, com o prolongamento do período seco, ao final da estação, ambos apresentaram queda no mês de setembro.

A partir do mês de outubro, com o início do período chuvoso, o sistema voltou a aumentar a assimilação de carbono, atingindo o pico máximo em dezembro ( $22,63 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). O EVI-MAIAC apresentou aumento gradativo até atingir o pico em dezembro (0,46). Já o EVI-MOD13 permaneceu em torno do mesmo valor (0,50) durante o período seco, e apresentou pico de queda em novembro (0,47), com alto valor de desvio padrão (0,16).

A fenologia da vegetação apresentou correlação positiva e significativa ( $R^2=0,55$ ;  $p < 0,04$ ) com o EVI-MAIAC, sugerindo que o índice descreve a sazonalidade da fenologia observada em campo, já a correlação com o EVI-MOD13 não foi significativa ( $R^2=0,29$ ;  $p=0,31$ ) (Figura 4). O aumento da serrapilheira de  $420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em maio para  $854 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em junho, permanecendo alto até novembro ( $868 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) foi sincronizado com o aumento do EVI-MAIAC (de 0,42 em maio para 0,44 em junho, até 0,45 em novembro), esse aumento pode ser atribuído ao aparecimento de novas folhas.



**Figura 4.** Padrão sazonal de produção de serrapilheira em relação ao EVI-MAIAC e o EVI-MOD13 para o período de Abr/2004 a Mai/2005.

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados mostram a forte correlação do EVI-MAIAC com a GPP, assim como encontrado em outros sítios com torre de fluxo do LBA situados em florestas de terra firme da Amazônia [12, 21, 22], evidenciando que o padrão fenológico (aparecimento de novas folhas) é uma força da produtividade do ecossistema e, está sincronizada com o EVI-MAIAC. Sendo assim, ressalta-se a potencialidade do produto corrigido pelo algoritmo MAIAC em descrever também a sazonalidade de assimilação de carbono em florestas alagáveis.

Nessa região, o solo apresenta baixa capacidade de retenção de água, composto predominantemente por areia aos 200 cm de profundidade [20]. A baixa capacidade de retenção de umidade no solo limita a evapotranspiração no período seco [2], e, portanto, diminui a capacidade de assimilar carbono, atingindo os menores valores no período máximo da seca, mais especificamente no mês de setembro [3]. Esse efeito



também é refletido na oscilação do EVI, que apresenta o menor valor no final do período seco.

Os dados de serapilheira apresentaram correlação forte e positiva com os dados do EVI-MAIAC. Acreditamos que o aumento da serapilheira no final da estação alagada esteja associado com a troca de folhas no dossel da floresta devido à diminuição do estresse pelo alagamento. O índice de vegetação EVI-MAIAC, por sua vez, capturou o aparecimento de novas folhas. Esse resultado corrobora com o encontrado por outros autores [12, 22], ao observarem a sincronia da serapilheira com o aparecimento de novas folhas e sua correlação com o EVI-MAIAC na Amazônia.

## 5. CONCLUSÕES

A sazonalidade da produtividade na floresta alagável foi bem representada pelo produto EVI corrigido pelo algoritmo MAIAC, enquanto que o produto MOD13Q1 não conseguiu representar sua sazonalidade.

## AGRADECIMENTOS

O estudo foi suportado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, Brasil, processo 2013/50531-2 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Anderson, L. O.; Malhi, Y.; Aragão, I. E.; Ladle, R.; Arai, E.; Barbier, N.; Phillips, O. Remote sensing detection in amazonian of droughts forest canopies. *New Phytologist*, 187 (3), 733–750. 2010.
- [2] Borma, L. S. et al. “Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazônia”. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 114, n. 1, p. 1–12, 2009.
- [3] Costa, G. B. “Fluxos de energia, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> sobre a floresta em planície de inundação da Ilha do Bananal”. *Tese (Doutorado em Ecologia aplicada) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Centro de Energia Nuclear na Agricultura*, Piracicaba, 142, 2015.
- [4] Dalagnol, R. Wagner, F.H.; Galvão, L.S.; Nelson, B.; Aragão, L. E. O. “Life cycle of bamboo in southwestern Amazon and its relation to fire events”. *Biogeosciences* p. 1-28, 2018.
- [5] Google Earth Engine: Uma plataforma de análise geoespacial de escala planetária. 2015. Disponível em: <https://earthengine.google.com/platform/>. Acesso em: 08/07/2018.
- [6] Hilker, T.; Lyapustin, A. I.; Tucker, C. J.; Hall, F. G.; Myneni, R. B.; Wang, Y.; Bi, J.; M. M, Y.; Sellers, P. J. “Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the amazon”. *Proceedings of the national academy of sciences*, 111(45), 16041–16046. 2014.
- [7] Homeier, J.; Kurzatkowski, D.; Leuschner, C. “Stand dynamics of the drought-affected floodplain forests of Araguaia River, Brazilian Amazon”. *Forest Ecosystems*. 4, pg 10. 2017.
- [8] Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.; Gao, X.; Ferreira, L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83, 195–213. 2002.
- [9] Huete, A. R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y. E.; Ratana, P.; Saleska, S. R.; Hutya, I. R.; Yang, W.; Nemani, R. R.; Myneni, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *“Geophysical research letters”*, 33(6), 2–5. 2006.
- [10] Junk, W. J. et al. “A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands”. *Wetlands*, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011.
- [11] Lyapustin, A. Wang, Y. Laszlo, I. & Hilker, T. “Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC). Part 3: Atmospheric correction”. *Remote Sensing of Environment*, 127, 385–393. 2012.
- [12] Maeda, E. E. Moura, Y. M, Wagner, F. Hilker, T. Lyapustin, A. I. Wang, Y. Chave, J. , Mottus, M. Aragão, L. E. O. C. Shimabukuro, Y. “Consistency of vegetation index seasonality across the Amazon rainforest”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 53, 42-53. 2016.
- [13] Malhi, Y.; Aragão, L. E. O. C.; Galbraith, D.; Huntingford, C.; Fisher, R.; Zelazowski, P.; Sitch, S.; Mcsweeney, C.; Meir, P. “Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the amazon rainforest”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (49), 20610–5. 2009.
- [14] Moreira, K. S. “Avaliação na queda de Liteira em Ecótonos no Entorno da Ilha do Bananal”. I Congresso Científico da UFT. Palmas. 4 p, 2005.
- [15] Parolin, P. et al. “Central Amazonian floodplain forests: tree adaptations in a pulsing system”. *The Botanical*, 2004.
- [16] Restrepo-Coupe, N.; Da Rocha, H. R.; Hutya, L. R.; Da Araujo, A. C.; Borma, L. S.; Christoffersen, B. O.; Cabral, O. M. R.; De Camargo, P. B.; Cardoso, F. L.; Da Costa, A. C. L.; 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.; Leonardo, D. A.; 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*, 182, 128–144. 2013.
- [17] Saleska, S. R.; Didan, K.; Huete, A. R.; Da Rocha, H. R. Brevia “Amazon forests green-up during 2005 drought”. *Science*, 318, 612-612. 2007.
- [18] Samanta, A.; Ganguly, S.; Hashimoto, H.; Devadiga, S.; Vermote, E.; Knyazikhin, Y.; Nemani, R. R.; Myneni, R. B. “Amazon forests did not green-up during the 2005 drought”. *Geophysical research letters*, 37(5), 1–5. 2010.
- [19] Schongart, J. et al. “Phenology and stem-growth periodicity of tree species in Amazonian floodplain forests”. *Journal of Tropical Ecology*. p. 581–597. 2002.
- [20] Tavares, I. B. Influência da inundação em uma floresta sazonalmente alagável no estado do Tocantins, Brasil. *Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, 2018.
- [21] Wagner, F. H., Héroult, B., Rossi, V., Hilker, T., Maeda, E. E., Sanchez, A., Lyapustin, A. I., Galvão, L. S., Wang, Y., and Aragão, L. E. “Climate drivers of the Amazon forest greening”. *PLoS ONE*, 12, 1–15. 2017.
- [22] Wu, J.; Albert, L. P. Lopes, A. P. Restrepo-Coupe, N.; Hayek, M.; Wiedemann, K. T. Guan, K.; Stark, S. C. Christoffersen, B.; Prohaska, N.; Tavares, J. V. Marostica, S.; Kobayashi, H.; Ferreira, M. L. Campos, K. S.; Silva, R. Brando, P. M.; Dye, D. G.; Huxman, T. E.; Huete, A. R.; Nelson, B. W. Saleska, S. R. “Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests”. *Science*, 351, 972-976. 2016.