



Desenvolvimento de produto mensal em imagens MODIS/MAIAC e avaliação da distribuição de dados nulos na Amazônia

Monthly Product Development in MODIS/MAIAC Images and Evaluation of Null Data Distribution in the Amazon

*Pietro de Almeida Cândido*¹
*Liana Oighenstein Anderson*²
*Yhasmin Mendes de Moura*³

Recebido em outubro de 2017.
Aprovado em abril de 2018.

RESUMO

Existe uma forte discussão sobre os métodos e resultados das análises do EVI (Enhanced Vegetation Index), oriundo do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) em estudos da fenologia e de eventos extremos na Amazônia. Esta discussão pauta-se no grande número de dados não aproveitados devido a ocorrência de nuvens na região, assim como nos métodos de correção atmosférica utilizados no produto convencional. O Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC), que é um algoritmo de correção dos dados MODIS com uma abordagem baseada no uso de séries temporais foi desenvolvido para melhorar tanto a precisão da detecção de nuvem, como a qualidade da correção atmosférica. Este produto da NASA é distribuído em mosaicos de oito dias. Nesta pesquisa, objetivou-se avaliar a qualidade do produto MODIS/MAIAC 8-dias para a bacia amazônica, e propõe-se uma metodologia de geração de mosaicos mensais, visando aumentar o número de dados de qualidade disponíveis para a área de estudo. Para tanto, foi desenvolvido uma metodologia de geração de mosaicos mensais baseada em análise espacial para detecção de nuvem, recuperação de aerossóis e correção atmosférica para o período de 2000 a 2016. Os resultados desta pesquisa apontam a metodologia de geração de mosaicos mensais diminuiu de 40% para 15% de dados sem informação. A distribuição dos dados sem

¹ Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR / Tropical Ecosystems and Environmental Sciences Laboratory – TREES, Av dos Astronautas, 1.751. Jd. Da Granja, São José dos Campos, São Paulo, Brazil, 12227-010, pietro.candido@inpe.br

² Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden, Coordenação-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, São José dos Campos - São Paulo, Brasil, 12247-016, liana.anderson@cemaden.gov.br

³ Lancaster University, Department of Biological Sciences, Lancaster Environment Centre, Lancaster LA1 4YQ, UK, yhas.mendes@gmail.com

informação apresenta uma forte correlação com o regime de chuvas na bacia. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa contribuiu para a melhoria na disponibilidade de dados observacionais para Amazônia e potencialmente pode ser transformada em um produto operacional.

PALAVRAS-CHAVE: MODIS. MAIAC. Série Temporal.

ABSTRACT

There is a scientific discussion on the methods and results from the analysis of the EVI (Enhanced Vegetation Index), derived from the moderate resolution sensor Spectroradiometer (MODIS) sensor, to detecting the phenology and the impacts of extreme drought events in Amazonia. This discussion is based on the large number of data with low quality due to the occurrence of clouds in the region, as well as in the The Multi-angle Atmospheric Correction (MAIAC) implementation, which is an algorithm for correcting MODIS data based on a time-series approach was developed to improve the accuracy of cloud detection and atmospheric correction. This NASA product is distributed in 8-days mosaics composition. The objective of this research was to evaluate a quality of MODIS/MAIAC 8-day product for the Amazon basin, and we propose a new methodology for generating monthly mosaics, aiming to increase the availability of cloud-free images. The results of this research are a methodology of monthly mosaic generation, which decreases from 40% to 15% of data with no information. The distribution of null data presents a strong correlation with the rainfall regime in the basin. The methodology developed in this study contributed to an improvement in the availability of observational data and can potentially be transformed into an operational product.

KEYWORDS: MODIS. MAIAC. Time Series.

* * *

Introdução

A bacia amazônica possui em sua floresta tropical a maior quantidade de carbono estocado em biomassa, sendo um importante componente do sistema terrestre (MYERS et al., 2000). O entendimento sobre o comportamento, vulnerabilidade e resiliência desse ecossistema tem recebido grande atenção pela comunidade científica, principalmente, devido à importância da floresta úmida tropical como agente reguladora do clima global (MALHI et al., 2008).

Devido sua extensão, diversidade ecológica e restrições de dados coletados in situ, a Amazônia tem no sensoriamento remoto orbital uma

importante fonte de dados sinópticos e periódicos para o estudo de seus ecossistemas. Dentre as mais variadas técnicas aplicadas aos dados de sensoriamento remoto para o entendimento da dinâmica de florestas tropicais, consagrou-se a utilização dos índices de vegetação, como o índice de vegetação melhorado - EVI (do inglês *Enhanced Vegetation Index*) e índice de vegetação de diferença normalizado NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) principalmente oriundos do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (HUETE et al., 1997, 2002; POVETA, et al., 2004; XIAO et al., 2006).

A utilização de dados de sensoriamento remoto para estudos dos padrões fenológicos vem avançando rapidamente, com o advento de recursos e técnicas, proporcionando uma nova visão sobre a dinâmica florestal. Esses avanços permitiram uma integração mais robusta entre sensoriamento remoto, dados de campo e modelagem, fornecendo uma visão mais abrangente dos processos dos ecossistemas florestais (MELACK et al., 2004).

Diferentes estudos baseados em dados de sensoriamento remoto têm abordado a questão da influência sazonal da precipitação sobre o comportamento fenológico da floresta (ASNER et al., 2004; BRANDO et al., 2010; ANDERSON et al., 2010). No entanto, algumas investigações têm apresentado resultados contraditórios sobre a fenologia da floresta e sua vulnerabilidade à períodos secos (HUETE et al., 2006; SALESKA et al., 2007; SAMANTA et al., 2010).

Por exemplo, uma das críticas ao uso dos produtos MODIS gerados regularmente para a região da bacia Amazônica refere-se à grande incerteza dos dados associados à frequente cobertura de nuvens e aerossóis na região (SAMANTA et al., 2010). Ambos os fatores estão associados aos procedimentos de correção atmosférica, sendo necessário o desenvolvimento de novos métodos de correção de dados para melhoria da qualidade dos mesmos (HILKER et al., 2012). Portanto, identifica-se que novos métodos de correção de dados de sensoriamento remoto para a região Amazônica

constituem um elemento chave para a acurácia dos estudos que envolvam compreender a dinâmica destas florestas. Em resposta a essa necessidade, foi desenvolvido o *Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC), que é um algoritmo que promove melhorias significativas em termos de precisão da reflectância de superfície nos dados MODIS em relação aos produtos derivados da correção convencional (HILKER et al., 2012 e 2015). MAIAC é um algoritmo de correção dos dados MODIS que utiliza uma abordagem baseada no uso de séries temporais com o objetivo de melhorar a precisão da detecção de nuvem, dados aerossóis e correção atmosférica. Atualmente os dados MAIAC são gerados a cada 8 dias e são distribuídos gratuitamente através do portal da NASA (National Aeronautics and Space Administration): <ftp://dataportal.nccs.nasa.gov/DataRelease/>

A melhoria na qualidade de dados para análise da dinâmica florestal permitirá avaliar e reproduzir alguns estudos já realizados com uma melhor acurácia e diminuição de incertezas.

Com o aprimoramento das imagens MODIS maximizando a capacidade de observação da dinâmica da vegetação na bacia amazônica, o presente trabalho visa responder as seguintes perguntas: (i) qual a proporção de dados desconsiderados (nulos) no produto EVI-MODIS/MAIAC de oito dias (produto original da NASA)? (ii) qual melhora em número de observações e onde elas ocorrem na Amazônia se utilizarmos mosaicos mensais? Para tanto, neste estudo foi desenvolvido uma metodologia de geração de mosaicos mensais baseada em análise espacial para detecção de nuvem, recuperação de aerossóis e correção atmosférica. A partir dos mosaicos mensais, foram: (i) quantificados o número de observações com dados inviáveis, e (ii) a distribuição espacial destes dados.

2 Material e métodos

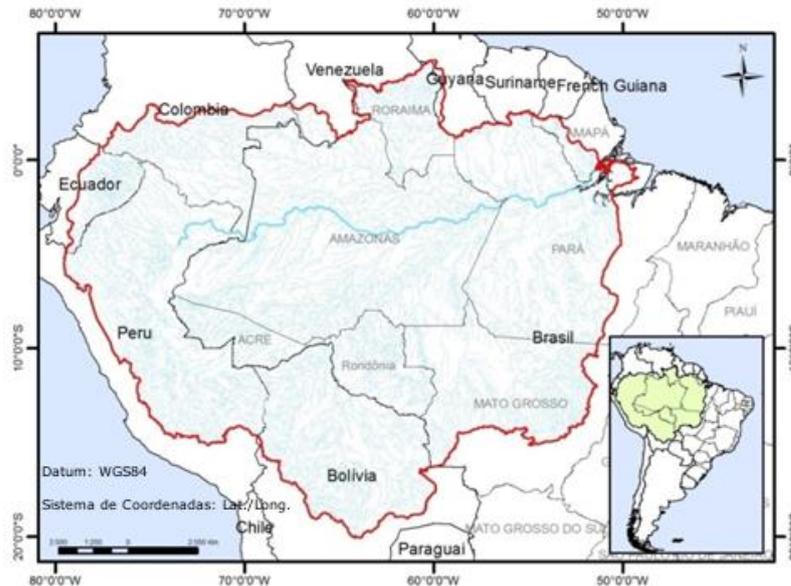
A descrição da área de estudo, assim como os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos são apresentados nesta seção.

2.1 Área de Estudo

A bacia Amazônica ocupa 2/5 da América do Sul e 5% da superfície do planeta (MAYORGA et al., 2012). Sessenta e três por cento da bacia amazônica se encontra em território brasileiro, onde ocupa a totalidade de cinco unidades da federação (Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Roraima), grande parte de Rondônia (98,8%), mais da metade de Mato Grosso (54%), além de parte de Maranhão (34%) e Tocantins (9%). Além do Brasil, a bacia alcança os territórios de Peru (17%), Bolívia (11%), Colômbia (5,8%), Equador (2,2%), Venezuela (0,7%) e Guiana (0,2%) (MAYORGA., et al., 2012). As sub-bacias que compõem o quadro são Amapá-litoral, Foz Amazonas, Madeira, Negro, Paru, Purus, Solimões, Tapajós, Trombetas e Xingu.

A Figura 1 a seguir, apresenta o limite da bacia amazônica utilizado (MAYORGA et al.,2012) e encontra-se disponibilizado no website do LBA <https://daac.ornl.gov/LBA/guides/CD06_CAMREX.html>. O produto constituiu-se por um shapefile que se estende de 80,5 a 48,5° W e 20,5° S a 6,0° N.

Figura 1 - Definição de limite da Bacia Amazônica adotado neste estudo.



Fonte: Adaptado de Mayorga et al. (2012).

2.2 Processamento de dados MODIS/MAIAC

A série temporal utilizada referiu-se ao período de abril de 2000 a julho de 2016 sendo estes o total de dados disponíveis até o momento de conclusão deste estudo.

Para este estudo, foram utilizadas séries temporais do produto MODIS/MAIAC 8-dias. Este produto corresponde a composições de 8-dias normalizados para os efeitos bidirecionais. Deste produto utilizou-se somente as imagens de Índice de Vegetação Melhorado (EVI). Além disso, foi adquirido o produto BRDF-MAIAC, que refere-se ao Fator de Reflectância Bidirecional, também, denominado de Reflectância de Superfície, e possui resolução espacial de 1 km para as bandas 1 a 12 do MODIS.

O terceiro produto utilizado foi o RTLS (*Ross Thick Li-Sparce*) sendo que estes contém parâmetros do modelo para a normalização geométrica da superfície de reflectância.

Os dados foram disponibilizados pelo Centro de Simulação Climática da NASA (do inglês NCCS-NASA) – endereço: <ftp://maiac@dataportal.nccs.nasa.gov/DataRelease/SouthAmerica>.

Ao total foram adquiridos todos os tiles em HDF dos produtos citados acima que abrangem a área de estudo, somando 27.000 arquivos.

O foco desta pesquisa foi na avaliação dos dados de EVI. No entanto, as imagens referente ao período de agosto de 2014 a agosto de 2016, foram disponibilizados dados com um nível a menos de processamento, sendo necessária a normalização da geometria de aquisição, para a geometria fixa de visada nadir e ângulo solar zenital de 45o, compondo, assim, toda a série temporal de 2000 a 2016 no mesmo nível de processamento. Para tanto, foi necessário utilizar parâmetros do modelo de normalização de efeitos bidirecionais e de aquisição das imagens, além das próprias imagens brutas. Esses parâmetros estão disponibilizados em dois arquivos HDFs, o primeiro de superfície de reflectância MODIS/MAIAC e o segundo com os parâmetros kernels.

Os dados de índice de vegetação disponibilizados estão organizados e distribuídos em arquivos HDF 4.0 e separados por tiles locais. Os arquivos de dados são organizados em sub-diretórios nomeados com números de tiles locais. A convenção de nomenclatura é geralmente no seguinte o formato MAIACXXX.hHHvVV.YYYYDDDHHMM.hdf, no qual XXX é o tipo de arquivo de dados (BRFm, AOT, RTLS ou VI, sendo, respectivamente, correspondentes a superfície de reflectância, aerossol, parâmetros do modelo para a normalização geométrica da superfície de reflectância, e os índices de vegetação), HH e VV são os números dos tiles locais, YYYYDDDHHMM é o ano, data do calendário Juliano, hora e minuto do correspondente 5 minutos MODIS L1BA.

Para a realização da normalização geométrica, conforme fórmula (1) a seguir, é necessário a utilização dos valores da Função volumétrica (Fv) e geométrica (Fg), esses com resolução espacial de 5 km.

A geometria das imagens de fator de reflectância bidirecional foram corrigidos para a visada nadir e normalizadas para um ângulo solar zenital de 45° (LYAPUSTIN et al., 2012). Conforme a seguinte equação (1):

$$BRFn = BRF * (kL - 0.04578 * kV - 1.10003 * Kg) / (kL + Fv * kV + Fg * Kg)$$

Onde Fv são os valores volumétricos parametrizados do modelo *Ross Thick Li-Sparse* e o Fg geometrias ópticas. kL, kV, kg são os valores da função do *kernel* para uma dada geometria, com 10km de resolução espacial: kL corresponde ao espalhamento isométrico, kV corresponde ao espalhamento volumétrico e Kg ao espalhamento geométrico, respectivamente, gerados a partir de 8 dias de observação.

O processamento dos dados para a obtenção dos produtos foi desenvolvido em linguagem de programação *Python*, utilizando-se as bibliotecas *ArcPy*, *Numpy*, *Shutil*, *OS* e *Gdal*.

2.3 Dados auxiliares

Duas bases de dados auxiliares foram utilizadas nesta pesquisa: dados de chuva e dados de focos de calor. Abaixo apresenta-se uma descrição detalhada destes dados e em seguida, seu processamento.

2.3.1 Dados auxiliares

O satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) é resultado de uma missão espacial realizada em consórcio entre a NASA e a Japan Aerospace Exploratory Agency (JAXA), com objetivo de acompanhamento, previsão e análise da precipitação em regiões tropicais (KUMMEROW et al., 1998). Lançado em 1997 e submetido a uma alteração de altitude para aumento de sua vida útil, os dados do sensor compõem-se em uma valiosa base de dados para estudos em regiões tropicais.

O satélite TRMM fornece as informações na forma de produtos, em diversos níveis de processamento que podem ser escolhidos pelo usuário. O TRMM contém cinco instrumentos: o radar de precipitação; o imageador de microondas passivo, que fornece as informações quantitativas de precipitação; o scanner de radiação visível e infravermelha; e o sensor para coleta de informações de descargas elétricas. Maiores informações e especificações sobre os produtos TRMM podem ser encontradas em <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>.

Nesta pesquisa utilizou-se o produto TRMM - 3B43 v.7. Os dados de chuva do TRMM de cálculos mensais (3B43) combinam as estimativas geradas pelo TRMM e outros satélites, além de dados de calibração global de pluviometria produzidos pelo Centro de Previsão Climática da NOAA e o produto global de pluviometria produzido pelo Centro Global de Climatologia de Precipitação (GPCC). A saída é a precipitação (unidades: mm / h) para as grades de 0,25x0,25 graus para cada mês.

2.3.2 Dados de focos de calor

O INPE realiza o monitoramento operacional de focos de queimadas e de incêndios florestais detectados por satélites desde 1986. Para tanto, são utilizados todos os satélites que possuem sensores óticos operando na faixa termal-média de 4µm e que o INPE recebe. Atualmente são processadas operacionalmente, na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - DSA as imagens AVHRR/3 dos satélites polares NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 e METOP-B, as MODIS dos NASA TERRA e AQUA, as VIIRS do NPP-Suomi, e as imagens dos satélites geoestacionários, GOES-13 e MSG-3. Cada satélite de órbita polar produz pelo menos dois conjuntos de imagens por dia, e os geoestacionários geram várias imagens por hora, sendo que no total o INPE processa mais de 200 imagens por dia especificamente para detectar focos de queima da vegetação (INPE, 2011).

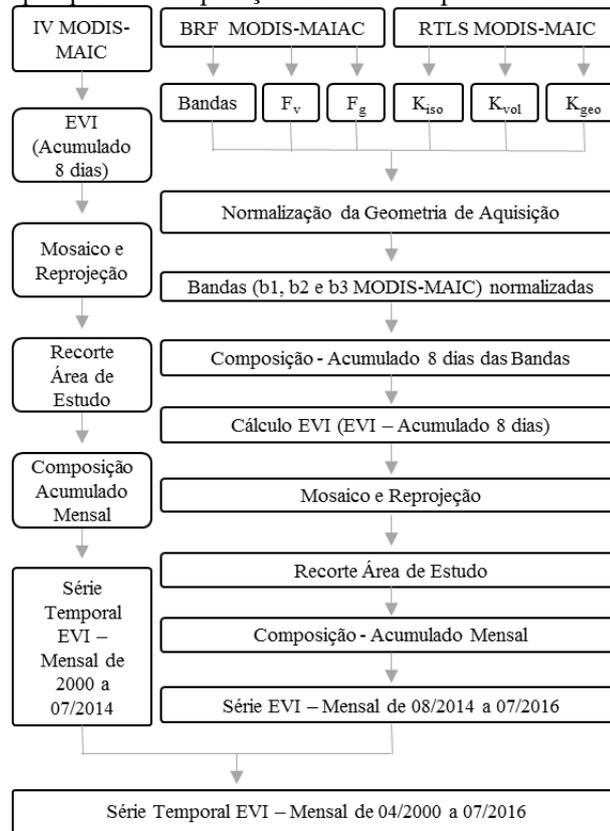
Para a presente análise espaço-temporal, não se utilizou dados de todos os satélites disponibilizados pelo INPE, devido ao fato de não se manter um padrão metodológico e a quantidade de sensores ativos durante os anos da série temporal analisada. Assim, optou-se pelos satélites de referência. Do ano 2000 a 03 de julho de 2002 foi utilizado o NOAA-12 (sensor AVHRR, passagem no final da tarde), e a partir de então o AQUA_M-T (sensor MODIS, passagem no início da tarde) até o final da série. Por usarem o mesmo método e o mesmo horário de imageamento ao longo dos anos, os resultados dos satélites de referência permitem analisar as tendências espaciais e temporais dos focos.

Os focos de calor foram transformados em imagens raster, utilizando a técnica que permite somar a quantidade de focos para cada pixel. A resolução espacial das imagens foi definida para 25 km, seguindo como referência as imagens TRMM. A partir das imagens acumuladas de focos de calor para cada mês da série temporal, os dados foram utilizados como suporte à análise da série temporal de dados MODIS/MAIAC.

2.4 Metodologia

Todos os procedimentos para a composição da série temporal EVI Mensal de 2000 a 2016 estão sintetizados na figura (2) a seguir. O organograma deve ser lido de cima para baixo, iniciando com os arquivos HDFs, seguindo para as imagens e parâmetros extraídos de cada um e seguindo todo o pré-processamento realizado até a composição final da série temporal.

Figura 2 - Etapas para a composição da série temporal EVI – Mensal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O pré-processamento do produto EVI-MODIS/MAIAC, foi realizado utilizando a linguagem Python a partir da biblioteca ARCPY. As etapas para a obtenção do produto final utilizados neste estudo se deram em três passos: 1) extração dos rasters dos arquivos de compactação de dados HDF; nesse processo foi realizada a identificação da projeção original do dado em esférica sinusoidal; 2) formação do mosaico dos tiles que constituem a área de estudo, definindo-se a projeção: LAT/LONG-, Datum WGS-84 e 3) Recorte da máscara da área de estudo e multiplicação pelo fator de escala.

Já para os dados a partir de agosto de 2014 houve a necessidade da realização da normalização do ângulo de visada.

Primeiramente, foram adquiridos todos os tiles em HDF dos produtos BRF-MAIAC e RTLS-MAIAC que abrangem a área de estudo do ano 2014 a 2016. Para a realização da normalização geométrica, conforme a equação 1 é

necessário a utilização dos valores da função volumétrica (F_v) e geométrica (F_g). Além dos arquivos de entrada presentes nos HDFs BRF, também, são necessários os coeficientes de Kernel RTLS, presente no arquivo HDF RTLS MODIS/MAIAC. Para a realização dos cálculos, os arquivos com 5 km de resolução espacial foram degradados para 1 km.

Após a extração dos parâmetros necessários dos arquivos HDFs para TIFF, é realizada a normalização geométrica para cada banda de superfície de reflectância utilizada na geração do EVI. Com as bandas normalizadas é realizada a geração do EVI para cada observação. A partir dos dados de EVI_N é realizado o acumulo de 8 dias dos dados, utilizando ambos os satélites como sugerido por HILKER, et al (2015). Por indicação dos autores e desenvolvedores dos produtos MODIS/MAIAC, o acumulado de 8 dias foi realizado utilizando-se os valores de mediana (LYAPUSTIN, et al., 2011, 2012a & 2012b). Assim, tem-se em média 22 passagens para cada composição de 8 dias. Com os dados de 8 dias de EVI é realizado o mesmo pré-processamento aplicado aos dados índice de vegetação MODIS/MAIAC.

Ao final do pré-processamento obtém-se a série temporal de março de 2000 a agosto de 2016 de imagens EVI, com resolução espacial de 1km, resolução radiométrica de 32 bits float, abrangendo toda a região da bacia amazônica, constituída por 7.500.000 pixels.

Baseando-se no produto final foram realizadas análises espaciais a partir da porcentagem da ocorrência de pixels nulos, chuva e focos de calor para cada ano da série temporal. Também, foi realizado mapas de média da série temporal e média intra-anual.

Os produtos EVI de 8 dias foram avaliados conforme a quantidade de pixels não úteis às análises propostas. Os produtos MODIS/MAIAC excluem pixels com nuvens e sombras de nuvens; pixels contendo neve e água; pixels com alto grau de aerossóis, cuja sensibilidade das medições da superfície de reflectância é baixa (LYAPUSTIN et al., 2011). Ressalta-se que em todos os processamentos realizados com as imagens e parâmetros utilizados para se obter os produtos EVI de 8 dias, não foram realizadas exclusões de pixels a

partir dos dados de qualidade ou qualquer outro parâmetro fora dos estabelecidos pela descrição do algoritmo MAIAC (LYAPUSTIN et al., 2008, 2011).

Para realizar as análises se tornou necessário a transformação dos dados de 8 dias de EVI para dados mensais.

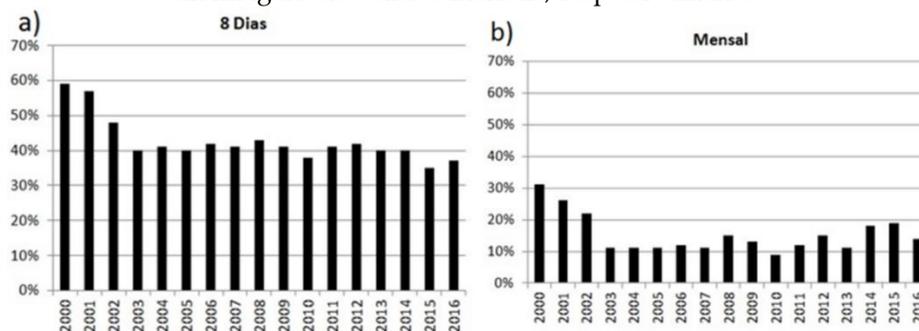
3 Resultados

Os resultados são apresentados em três seções. Primeiramente apresenta-se a geração dos mosaicos mensais. Em seguida explora-se o padrão espacial dos dados sem observações, denominados “No Data”. Finalmente são apresentados os resultados das análises entre o produto gerado e os dados de chuva e de focos de calor.

3.1 Geração de mosaicos mensais

O desenvolvimento dos mosaicos mensais diretamente impactou no volume de dados analisados: diminuição significativa no espaço de armazenamento do banco de dados: 28 gibagites (Gb) para 14,7 Gb. Outro resultado relevante refere-se a melhora qualitativa das imagens utilizadas, diminuindo a área sem dados, ou “NoData” (Figura 3).

Figura 1 - Frequência média da ocorrência de “NoData” em imagens MODIS/MAIAC EVI para toda a série temporal. A) e B) Médias sazonais da série temporal da frequência de “NoData” em imagens de 8 dias e mensais, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelos autores.

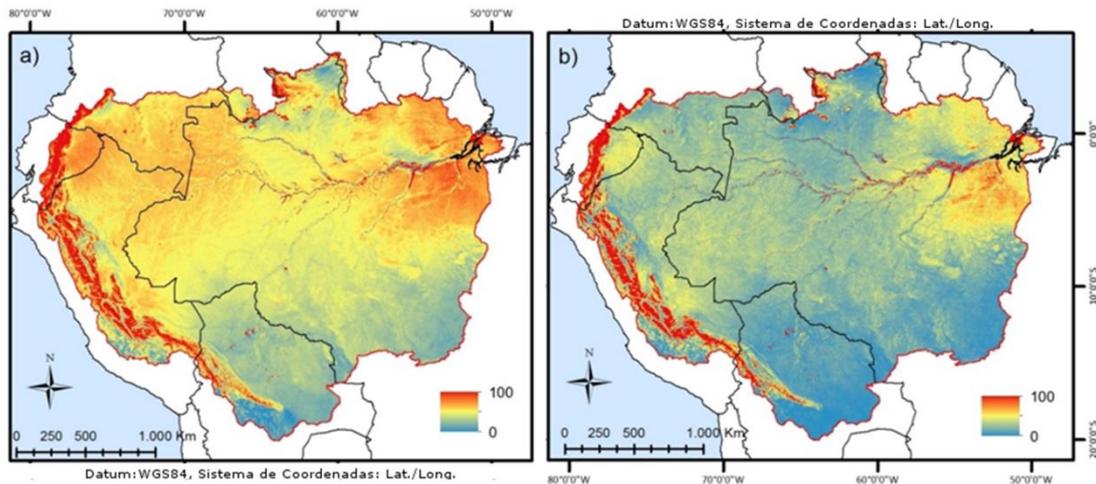
A distribuição dos pixels não úteis, também denominados “NoData” é apresentado na Figura 3. Observa-se uma diminuição em torno de 30% de pixels sem dados em toda a série histórica. Os anos que apresentam maior porcentagem de pixels “NoData” são os de 2000 e 2002, sendo que os anos de 2005 e 2010 apresentam a menor porcentagem de dados “NoData”.

É interessante notar que os anos de 2000 a 2002 apresentaram maior frequência de pixels nulos, sem apresentar maior frequência nos outros fatores analisados. Isto deve-se aos primeiros anos após o lançamento da plataforma MODIS. A partir de 2002 foram implementados os dados do satélite Aqua, o que contribui com o aumento no número de observações. Além disso, como o algoritmo MODIS/MAIAC é baseado na análise da série temporal, precisa de um período representativo para a calibração encontrar um número suficiente de observações para rodar o algoritmo de forma mais robusta. O menor número de pixels validos nos anos de 2005 e 2010 pode estar associado a ocorrência das secas nestes anos e, portanto, supõe-se uma menor presença de nuvens. No entanto, deve-se considerar a possibilidade da influência de aerossóis decorrentes de incêndios florestais (LYAPUSTIN, et al., 2012c).

3.2 Padrão espacial de dados sem observação

A distribuição espacial dos pixels nulos entre as imagens de acumulados de 8 dias e mensal, apresentam padrões semelhantes em escalas de ocorrência diferentes. Nas imagens 8-dias, observa-se o predomínio da ocorrência de pixels sem dados no noroeste da área de estudo, entre os limites do Brasil e sul da Colômbia. Há também uma distribuição dos pixels nulos na região extremo leste da área de estudo (Figura 4a). Observando-se a composição mensal, destaca-se que aumenta-se o número de observações no noroeste da área de estudo, porém o problema persiste, em uma área menor, na região do extremo leste (Figura 4b).

Figura 4 - Distribuição espacial de pixels nulos a) Imagens acumuladas de 8 dias; b) Imagens acumuladas mensal. A escala de distribuição de ocorrência de dados nulos vai de 0% a 100% de presença de pixels nulos de média por ano na série temporal, utilizando-se da escala do azul até o vermelho, indicando as regiões com menor e maior frequência de dados nulos.

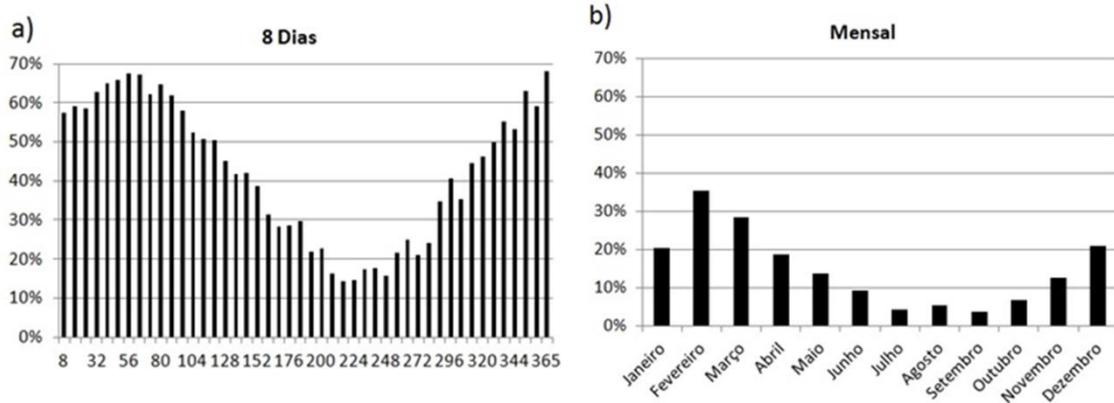


Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Relação entre dados sem observação e sazonalidade de chuvas e focos de calor

Na bacia amazônica, a distribuição de pixels nulos apresenta forte tendência do regime de chuva na região (figuras 5a e 5b), com um maior número de pixels excluídos entre dezembro a março e menor número entre junho a outubro. Comparando-se as imagens de 8 dias com as mensais, observa-se a diminuição do somatório de pixels “NoData” para cada data, em alguns períodos diminuindo-se em 40% a quantidade de área sem dados.

Figura 5 - a) Frequência média da ocorrência de “NoData” em imagens MODIS-MAIAC EVI para toda a série temporal; b) Médias sazonais da série temporal da frequência de “NoData” em imagens de 8 dias e mensais, respectivamente.

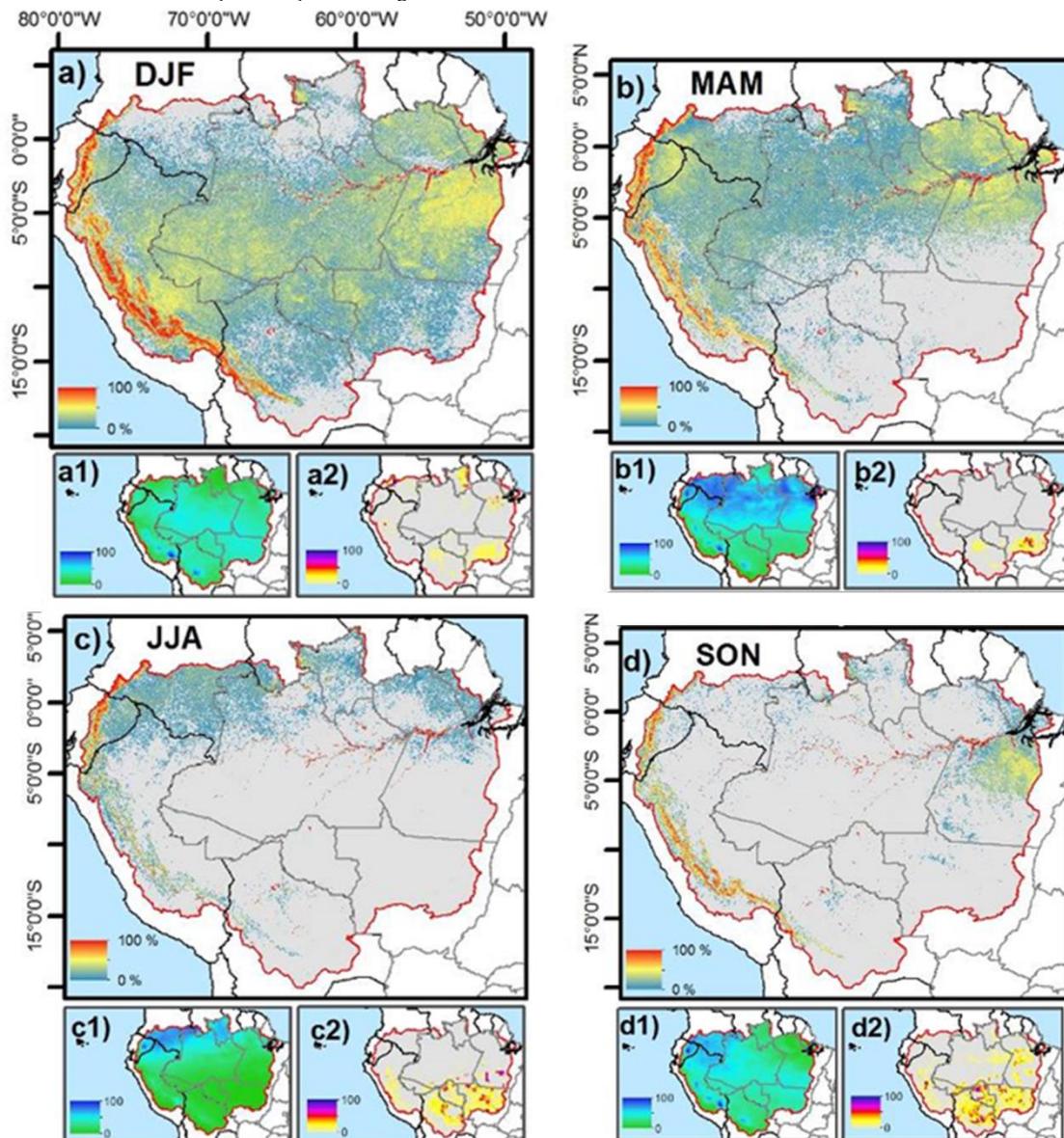


Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando as diretrizes de exclusão de pixels na metodologia MODIS/MAIAC, foi proposta a análise conjunta entre os principais vetores de exclusão de pixels: a formação de nuvens pautadas pelas chuvas na bacia e a emissão de aerossol por meio de queimadas e incêndios florestais na região. Para tanto, foi realizada a análise anual da ocorrência de pixels nulos nos dados mensais, juntamente com a ocorrência acumulada anual de chuva e queimadas. Desta forma, observa-se a distribuição espacial dos principais vetores da ocorrência de pixels nulos na bacia.

A média da distribuição espacial dos pixels nulos na série temporal de forma intra-anual é apresentada na Figura 6 a seguir, juntamente com as médias da distribuição espacial de chuva e focos de calor.

Figura 6 - Média da distribuição espacial de pixels nulos (painéis a, b, c); média da distribuição de chuva (painéis a1, b1, c1) e média da distribuição espacial de focos de calor (painéis a2, b2, c2), respectivamente. DJF = meses de dezembro, janeiro e fevereiro; MAM = março, abril e maio; JJA = junho, julho e agosto; SON = setembro, outubro e novembro.

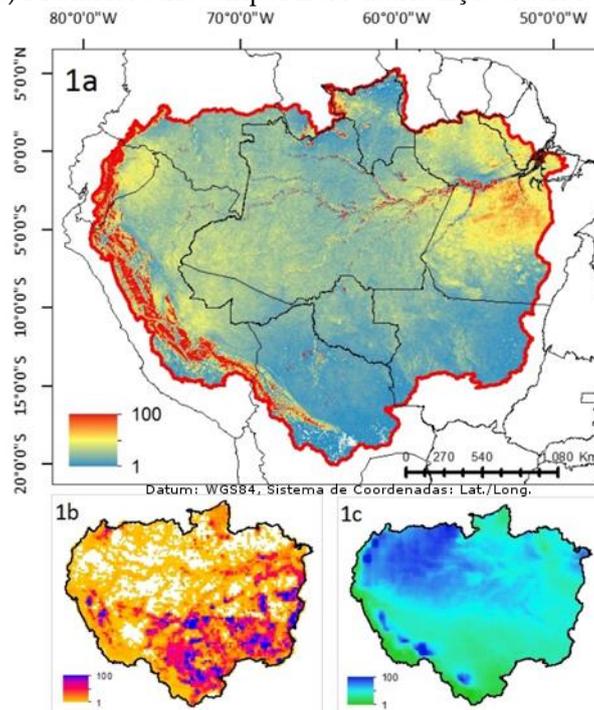


Fonte: Elaborado pelos autores.

Os mapas de porcentagens do acumulado anual de dados nulos assinalam a concentração desses dados nos primeiros anos da série, entre os anos 2000 a 2002, com concentração espacial dos pixels “NoData” nas regiões noroeste e nordeste da bacia. Juntamente com esses mapas, pode-se observar a concentração de chuva e focos de calor para cada ano,

respectivamente. Esses apresentam uma ocorrência espacial constante entre os anos, com maior concentração de chuva no noroeste. No caso das análises dos focos de calor, esses apresentaram uma maior concentração na região sul da bacia. Ou seja, os anos da análise temporal apresentam padrões semelhantes, e os pixels nulos estão mais relacionados a máscara de nuvens provenientes dos produtos MAIAC. A ocorrência média de dados nulos, focos de calor e chuva são apresentados na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Média da distribuição espacial da ocorrência de pixels nulos em imagens de acumulado mensal para toda a série temporal. a) Média na série temporal da distribuição de pixels nulos na Bacia Amazônica; b) Média na série temporal da distribuição de focos de calor; e c) Média na série temporal da distribuição de chuva.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 Discussão

A quantidade de pixels “NoData” no produto MAIAC de oito dias, apresentou em média de 45% de dados descartados anualmente, enquanto, na compilação para dados mensais há uma queda de 30% de dados inválidos. A maior frequência de pixels nulos se reporta aos primeiros anos

da série temporal (2000, 2001 e 2002), que estão associados ao acúmulo de observações iniciais que o modelo precisa para parametrizar as equações (LYAPUSTIN et al., 2011, HILKER et al., 2012). Além disso, a maior contribuição para o aumento no número de observações provavelmente está relacionado ao lançamento do sensor Aqua em 2002 (LYAPUSTIN et al., 2012).

Os dados, também, foram analisados pela média mensal na série temporal. Observou-se a predominância de maior porcentagem de pixels excluídos entre junho a outubro, com as mínimas de pixels excluídos indo de 15%, entre os meses de julho a agosto para a composição de 8 dias, para 5% na composição mensal. Já o período de ano com maior percentual de pixels excluídos foi em fevereiro, indo de 70% para 35%, das composições de 8 dias para mensal, respectivamente. Estes padrões apresentam o mesmo padrão do período de seca no hemisfério sul.

A partir dos dados mensais foi realizada a espacialização destes valores, observando a frequência para cada ano da ocorrência de pixels descartados, juntamente com a frequência de focos de calor e chuva. Anualmente observou-se que a maior correlação espacial de pixels descartados ocorre com os padrões espaciais de chuva na bacia. Enquanto os padrões espaciais da ocorrência de queimadas não implicam em um alto valor percentual de ocorrência de pixels nulos. Os anos que não se observaram estes padrões foram os primeiros anos da série (2000, 2001 e 2002), com maior ocorrência de pixels nulos no noroeste da bacia, padrão não encontrado nem nos dados de chuva quanto do de queimadas. Destaca-se que esta análise foi realizada para observar a espacialização dos pixels nulos para cada ano, impossibilitando a observação interanual destas ocorrências.

A partir da análise da proporção de dados desconsiderados nos produtos EVI- MODIS/MAIAC foi estabelecida a série temporal que foi utilizada para observação da resposta da vegetação. Os anos de 2001 e 2002, foram inclusos mesmo tendo maior porcentagem de “NoData” da série. Isso

se deve a análise de Hilker et al. (2012) que comparou os dados de máscara de nuvens derivada do MODIS/MAIAC (nesse caso foram utilizados produtos de reflectância diário do sensor Aqua) com os dados padrão MODIS diários e sua composição de 16 dias (MCD43A4). Na avaliação de Hilker et al. (2012), os dados MAIAC apresentaram um ganho significativo de dados livres a comparação com as saídas dos produtos padrões MODIS. A máscara de nuvem derivada do MODIS/MAIAC produziu em média cerca de 25% mais observações livres de nuvens. Ou seja, mesmo com um percentual muito acima dos padrões da série analisada, ainda assim, os produtos MAIAC apresentam maior robustez de dados comparados com os dados utilizados nas revisões bibliográficas que serão reproduzidas (SALESKA et al., 2006; HUETE et al., 2007; XIAO et al., 2006).

Finalmente, acredita-se que com os avanços nos processamentos dos dados MODIS/MAIAC, melhorias na identificação de dados livres de nuvens e ou ruídos, como os propostos nesta pesquisa, irão permitir o melhor entendimento do funcionamento da floresta Amazônia e suas respostas a extremos climáticos.

5 Considerações finais

A metodologia empregada neste estudo permitiu explorar os produtos de índice de vegetação do MODIS/MAIAC, avaliando a quantidade de observações que são desconsideradas por seu algoritmo (“NoData”). A proporção de dados desconsiderados nos produtos EVI-MODIS/MAIAC de oito dias pela metodologia de série temporal e análise espacial para detecção de nuvem, recuperação de aerossóis e correção atmosférica apresentam em média 45% e realizando o mosaico mensal este valor chega a 10%.

A distribuição dos dados nulos nas imagens EVI-MODIS/durante a série temporal de março de 2000 a agosto de 2016 na bacia amazônica é espacialmente correlacionada com a distribuição da ocorrência de chuvas.

Esses valores demonstram a potencialidade dos produtos MODIS/MAIAC para explorar a bacia amazônica de forma mais precisa e sistemática e, principalmente, potencializar as análises em períodos de chuva intensa.

Agradecimentos

A agência CAPES pela bolsa de Mestrado concedida ao primeiro autor. Os autores agradecem a NASA pelo fornecimento de dados sem custo MODIS-MAIAC e as plataformas de softwares livres utilizados. L. O. Anderson agradece ao CNPq pela Bolsa Produtividade, processo: 309247/2016-0.

Referências

- 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, 2010. pp. 733-750.
- ASNER, G. P.; NEPSTAD, D.; CARDINOT, G.; RAY, D. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 101, 2004. pp. 6039–6044.
- BRANDO, P. M.; GOETZ, S. J.; BACCINI, A.; NEPSTAD, D. C.; BECK, P. S. A.; Christman, M. C. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 107, 2010. pp. 14685-14690.
- HILKER, T. A. I. LYAPUSTIN, C. J. TUCKER, P. J. SELLERS, F. G. HALL, Y. WANG. Remote Sensing of Tropical Ecosystems: Atmospheric Correction and Cloud Masking Matter. **Remote Sensing of Environment**, 2012.
- HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; HALL, F. G.; MYNENI, R.; KNYAZIKHIN, Y.; WANG, Y.; TUCKER, C. J.; SELLERS, P. J. On the measurability of change

- in Amazon vegetation from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 166, 2015. pp. 233–242.
- HUETE A.; DIDAN K.; MIURA T.; RODRIGUEZ E. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, 2002. pp. 195–213.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L06405, 2006.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. Disponível em <http://www.inpe.br/queimadas>. 2011
- LYAPUSTIN, A.; MARTONCHIK J.; WANG Y.; LASZLO I.; KORKIN S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. D3, p. D03210, fev. 2011.
- LYAPUSTIN, A. WANG Y, LASZLO I, KAHN R, KORKIN S, REMER L. Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction for MODIS (MAIAC). Part 3: Atmospheric Correction. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, 2012. pp. 385–393.
- 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 (PNAS)**, v. 106, 2009. pp. 20610–20615.
- MAYORGA, E., M.G. LOGSDON, M.V.R. BALLESTER, AND J.E. RICHEY. LBA-ECO CD-06 Amazon River Basin Land and Stream Drainage Direction Maps. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 2012.
- MYERS N.; MITTERMEIER R. A.; MITTERMEIER C. G.; Da FONSECA G. A. B. KENT J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, 2000. pp. 853–858.

- SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, 2007. pp. 612-612.
- SAMANTA, A.; GANGULY, S.; HASHIMOTO, H.; DEVADIGA, S.; VERMOTE, E.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMAMI, R. R.; MYNENI, R. B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 37, 2010. pp. 1-5.
- XIAO, X.; HAGEN, S., ZHANG, Q., KELLER, M., MOORE, B. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 4, 2006. pp. 465-473.