

DINÂMICA DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL DO LAGO BATATA (PA) A PARTIR DO LABORATORIO VIRTUAL PARA ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Arcilan Assireu¹, Fabio Roland², André Reis¹, Egídio Arai³, André Dias⁴, Pedro Rajão⁴, Reinaldo Bozelli⁵

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)¹; Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)²; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)³; Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ)⁴; Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)⁵

RESUMO

Próximo de Porto Trombetas, no Estado do Pará, foi despejado, no Lago Batata, efluentes líquidos (rejeito) gerado pelo tratamento de bauxita, ao longo de dez anos (1979-1989). Isto impactou cerca de 30% da área do lago. Um esforço da empresa de mineração, tendo como objetivo a restauração florestal nesta área afetada, ocorreu entre 1992-1996. O objetivo deste estudo é analisar a dinâmica temporal dessa regeneração florestal. Para isso, utilizou-se uma ferramenta para a análise do uso e cobertura da terra (LULC), baseada em séries temporais de 16 anos de imagens MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), disponíveis no LAF (*Remote Sensing Laboratory for Agricultural and Forest applications*) website (<https://www.dsr.inpe.br/laf/series/en>). O índice de vegetação escolhido para o presente estudo (Enhanced Vegetation Index) destacou as variações da cobertura da terra e apresenta-se como uma ferramenta potencial para o monitoramento da dinâmica de restauração florestal.

Palavras-chave — EVI2, reflorestamento, MODIS.

ABSTRACT

Near Porto Trombetas, Pará state, liquid effluent (tailings), generated by the treatment of the mineral, was dumped into Lake Batata for ten years (1979-1989), affecting about 30% of the lake area. An effort by the mining company, in order to forest restoration at this affecting area, occurred between 1992-1996. The objective of this study is to analyze the temporal dynamics of this forest regeneration. For this, we used a tool for the land use and land cover changes (LULC) analysis, based on 16 years time series of MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) images, available in the LAF (Remote Sensing Laboratory for Agricultural and Forest applications) website (<https://www.dsr.inpe.br/laf/series/en>). The vegetation index chosen for the present study (Enhanced Vegetation Index) highlighted the land cover variations and presents a potential tool for monitoring the dynamics of forest restoration.

Key words — EVI2, reforestation, MODIS.

1. INTRODUÇÃO

Com a descoberta de enormes reservas de Bauxita na região de Porto Trombetas no município de Oriximiná (PA) foi criada, em 1967, a Mineração Rio do Norte S.A. (MRN) com o objetivo de explorar, beneficiar e comercializar este importante minério. Entre 1979 e 1989, primeira década de atividades, foram produzidas aproximadamente 125 milhões de toneladas de minério bruto, gerando algo em torno de 90 milhões de toneladas de produto embarcado para o mercado externo e interno [1]. Nesta mesma época foram lançados 18×10^6 m³/ano de sedimentos no Lago Batata [2]. O assoreamento de cerca de 30% da área do lago elevou o leito de 5 a 6 metros em alguns trechos, transformando áreas permanentemente aquáticas em áreas periodicamente inundadas [3].

Desde a década de 1980 a MRN vem dedicando-se a restauração florestal das áreas degradadas, sendo a tecnologia de restauração continuamente aperfeiçoada pelo corpo técnico da empresa, assessorado por diversos especialistas das áreas de manejo, conservação e ecologia florestal, pedologia e geologia, dentre outras [4]. Em termos fisionômicos, a restauração florestal executada pela MRN mostra-se promissora [4]. O diagnóstico desta evolução é baseado normalmente em pesquisas in situ que visam avaliar o desenvolvimento da vegetação em termos de diâmetro de troncos, alturas, diversidade de espécies, dentre outros fatores. A possibilidade de abordagem sinótica oferecida pelo Sensoriamento Remoto poderia vir a complementar estes importantes estudos e permitir avaliações comparativas entre a dinâmica da floresta tropical primária e as florestas “artificiais” resultantes do pós-larva.

Nas últimas décadas, imagens multitemporais geradas por satélites de observação da terra têm se tornado importante fonte de informações sobre mudanças relacionadas ao uso e ocupação da superfície terrestre [5]. Estes estudos têm ganhado notoriedade não só pela comunidade científica mas também pelos tomadores de decisão, já que o ecossistema terrestre exerce grande influência nas mudanças e variabilidades climáticas [6]. Tendo em vista democratizar e tornar mais amigável aos usuários o acesso a este tipo de informação, Freitas et al. (2011) [7] desenvolveram uma plataforma para visualização multitemporal destas imagens integrado ao Google Map, disponível em <https://www.dsr.inpe.br/laf/series/en>.

Séries temporais de imagens de satélite vêm sendo utilizadas em várias aplicações relacionadas a cobertura do solo. Por exemplo, Sakamoto et al. (2005) [8] desenvolveram um método, baseado em séries temporais de imagens MODIS, para o monitoramento da fenologia de plantações de milho. Mudanças na cobertura vegetal da Amazônia brasileira foram avaliados por Adams et al. (1995) [9]. Almeida-Filho et al. (2002) [10] fizeram uso de séries temporais de imagens Landsat para mapear e monitorar áreas degradadas pelas minas de ouro no estado de Roraima. Neste contexto, o presente trabalho visa analisar a variação temporal, ao longo dos últimos 16 anos, da cobertura do solo na região de reflorestamento, refletida pelo parâmetro EVI2 [11] que consiste da combinação da reflectância nas bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo. A hipótese que norteia este trabalho é a de que os valores de EVI2 observados para a floresta tropical que se encontra na região (baseline) é aquele que deve ser atingido para as áreas de reflorestamento, se o reflorestamento estiver sendo bem sucedido. Assim, nesta investigação, busca-se verificar se os valores de EVI2 para as áreas de reflorestamento estão convergindo, ao longo do tempo, para os valores observados na floresta tropical adjacente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O Lago Batata (Fig. 1) é situado no município de Oriximiná, próximo a Porto Trombetas, no estado do Pará. É um lago classificado como de águas claras e posicionado a direita do Rio Trombetas [12]. A alta carga de sedimentos impactou grande área do lago fazendo com que grande parte deste ficasse coberto por rejeitos que alteraram drasticamente as propriedades físicas, químicas, biológicas e ecológicas do solo [13]. Isto gerou um ecossistema de baixa resiliência, ou seja, seu retorno ao estado anterior pode ou não ocorrer ou ser extremamente lento. Nestes ecossistemas degradados a ação antrópica para a recuperação é necessária, pois estes não dispõem dos mecanismos naturais de regeneração.

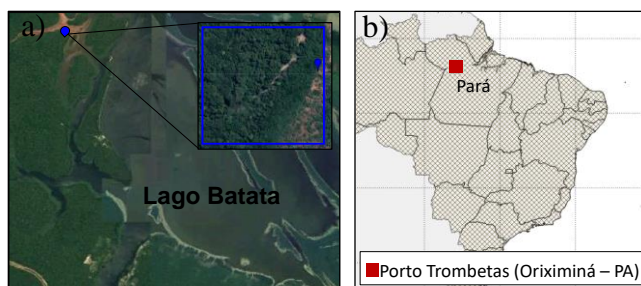


Figura 1. Imagem do lago Batata e imagem de alta resolução espacial do Google Map para uma região reflorestamento do lago (a) localizado em Porto Trombetas, município de Oriximiná – PA (b).

Entre os dias 19 e 29 de janeiro de 2017 foram realizados trabalhos de campo no Lago Batata onde, dentre outros dados, foram levantados pontos geográficos relacionados a

áreas do reflorestamento que visualmente poderiam ser enquadrados como bem ou medianamente bem sucedidos. Alguns destes pontos foram analisados no laboratório virtual de análises de séries temporais de imagens MODIS do INPE (LAF) (<https://www.dsr.inpe.br/laf/series/en>). O produto selecionado foi o MOD13Q1 que apresenta resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 250 m. O índice de vegetação escolhido para o presente estudo é o EVI2 (Índice de realce da vegetação) [14] que tem sido amplamente empregado como um eficiente quantificador de variações no uso e cobertura da superfície. Este índice é obtido a partir da reflectância de superfície para as bandas do vermelho (red) e infravermelho próximo (IVP) seguindo a equação a seguir:

$$EVI2 = 2,5 * \frac{IVP-red}{(IVP+2,4*red+1)}(1)$$

3. RESULTADOS

Tendo em vista familiarizar o leitor com a forma de interpretação dos resultados provenientes das análises realizadas no LAF, foi escolhido uma área que, dentro da janela temporal de análise (entre 2000 e 2016), passou por mudanças significativas quanto ao padrão de cobertura.

3.1. Exemplo Canônico

Tendo em vista familiarizar o leitor com a análise aqui apresentada, foi escolhida uma área com mudanças significativas de uso e ocupação, para exemplo. A área marcada na parte central da Figura 2b localiza-se no município de Feliz Natal (MT) e, até o ano de 2004, era inteiramente coberta por floresta primária. Em meados de 2004 foi realizado um corte raso em toda a área e, a partir de 2007 teve início a prática de agricultura sazonal. O balão azul no centro da Figura 2b indica o local correspondente na imagem, recente, às coordenadas informadas ao LAF enquanto o quadrado em azul indica o correspondente pixel analisado (entre os anos de 2000 e 2016), com dimensões de 250 m x 250 m. A Figura 2a traz as análises, para a área demarcada pelo quadrado azul, onde a linha vermelha indica a evolução temporal do índice EVI2 (estimador de biomassa vegetal) e as barras azuis a precipitação estimada a partir do radar meteorológico TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Uma análise da evolução do EVI2 indica que o índice se apresenta como uma métrica eficiente para as mudanças de cobertura ocorridas no local. Verifica-se que até 2004, correspondente a floresta primária, o valor permanece em torno de 0,50 com flutuações de pequena amplitude em escala sazonal. Após o corte raso (meados de 2004) até 2007 quando teve início a cultura agrícola sazonal, este índice caiu para próximo a 0,10 e, após a introdução da cultura agrícola sazonal passou a apresentar um padrão sazonal de oscilação de grande amplitude, entre 0,10 e 0,75, correspondentemente ao padrão de variação da biomassa vegetal para este tipo de manejo agrícola.

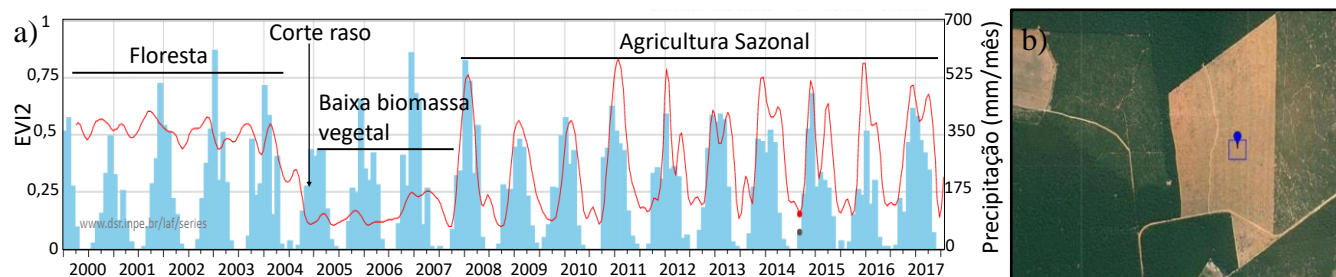


Figura 2. A série temporal do EVI2 do sensor MODIS (b) e imagens de alta resolução espacial do google Map (a) para uma região com drásticas mudanças, ao longo do tempo, no padrão de cobertura do solo. A linha vermelha indica a evolução temporal do índice EVI2 (estimador de biomassa vegetal) e as barras azuis a precipitação estimada a partir do radar meteorológico TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

2.3 Aplicação ao Lago batata

Tendo em vista avaliar a evolução da restauração florestal no Lago Batata, utilizando-se como métrica o EVI2, a coordenada de um dos pontos de controle (pontos que são visitados periodicamente e cujas características fisionômicas são estudadas) foi inserido no LAF (balão azul na Figura 1a). Ao receber as coordenadas de interesse, o LAF acomoda este ponto no pixel correspondente que não necessariamente terá como centro as coordenadas de interesse. No caso em análise, por exemplo, boa parte do pixel cobre a mata primária (quadrado na Fig. 1a). O correspondente EVI2 vem da integração do respectivo pixel. Assim, grande parte do resultado vem da contribuição da floresta primária. Porém, o EVI2 para esta componente é praticamente constante, de forma que a variação temporal observada neste índice (Fig. 3), ao longo dos 16 anos observados, pode ser atribuída a variações quanto a biomassa do setor correspondente a restauração florestal. Uma análise atenciosa desta evolução

aponta para uma tendência de longo prazo em que os valores iniciais de 0,25 convergem para os valores típicos caracterizadores de floresta (0,5). Percebe-se também que esta tendência não é monotônica, mas apresentou degraus em 2002, 2005 e 2011. Nota-se que a partir de 2011 os valores de EVI2 flutuam em torno de 0,5, valor que tanto no exemplo canônico (Fig. 2) quanto para a floresta primária no entorno do Lago Batata, correspondem a floresta densa. Como a restauração, de acordo com Lewis (1982) [15], é o retorno de uma condição perturbada ou totalmente alterada a um estado anterior existente naturalmente, a convergência dos valores de EVI2 para patamares associados ao estado anterior (floresta densa) é visto como um indicador do sucesso dos trabalhos de restauração que vêm sendo realizados no Lago Batata. Segundo Moscatelli et al. (1993) [14] a restauração refere-se ao retorno a um estado pré-existente sem, necessariamente, que o sistema retorne às suas características originais. O EVI2 é uma métrica da biomassa florestal e, portanto, é este o estado que é avaliado por este índice.

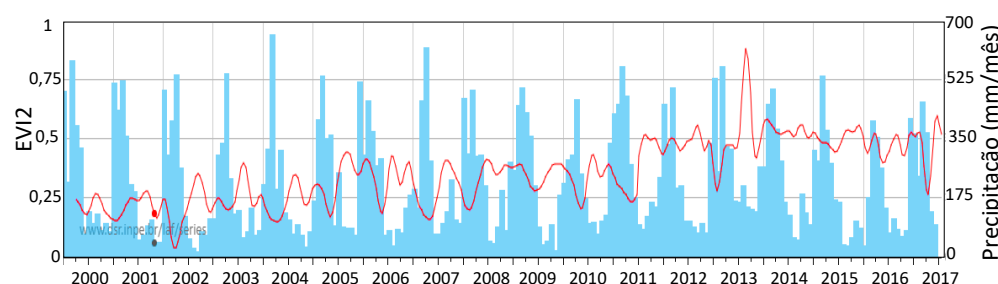


Figura 3. Série temporal do EVI2 do sensor MODIS para o pixel selecionado na figura 1.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a aplicação do EVI2 (índice de realce da vegetação) obtidos a partir de 16 anos de imagens do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) como métrica para a dinâmica da restauração florestal no Lago Batata. Os resultados, baseados neste índice e na resolução utilizada, apontam que a cobertura local está retornando ao seu estado inicial ou pré-existente, considerando como baseline as florestas primárias adjacentes. A ferramenta mostra-se com potencial ainda para mapear áreas de regeneração florestal com diferentes idades.

Como trabalhos futuros recomenda-se a aplicação em imagens com melhor resolução do que 250 m x 250 m utilizadas aqui e a integração com dados de nível da água a fim de verificar se e como o pulso de inundação estaria modulando as oscilações em escalas sazonais observadas no índice.

6. AGRADECIMENTO

A Mineradora Rio do Norte pelo suporte aos trabalhos de campo. Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Lapa, R. P., “A bauxita e o rejeito da bauxita”. In: Bozelli, R. L.; Esteves, F. A.; Roland F. (Eds). Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema Amazônico. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, 27-5 (pp.), 2000.
- [2] Lapa, R. P. and W. Cardoso, “Tailings disposal at the Trombetas bauxite mine”. Proc. 117th TMS. *Ann. Meet.* 65-76 (pp.), 1988.
- [3] Silva, F.R. F., 1991: “Influência do pulso de inundação e do efluente de lavagem de bauxita sobre a dinâmica de fósforo, nitrogênio e carbono em um lago amazônico (L. Batata - PA.)” M. sc. thesis, PPG-ERN, Universidade Federal de Sb Carlos, Brasil, 128 (pp), 1991.
- [4] Salomão, R. P.; Rosa, N. A.; Morais, K. A. C. “Dinâmica da regeneração natural de árvores em áreas mineradas na Amazônia”. Bol. Mus. Para. Emilio Goeldi, *Ciências Naturais*. Belém, 2 (v), 2 (n.), 85-139 (pp.), 2007.
- [5] Lambin, E. F.; Linderman, M., “Time series of remote sensing data for land change science”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (v.) 7 (n.), 1926-1928 (pp.) 2006.
- [6] Defries, R. S.; Asner, G. P.; Houghton, R. A. “Ecosystems and Land Use Change”. *American Geophysical Union*, Washington, DC. 2004.
- [7] Freitas, R. M.; Arai, E.; Adami, M.; Souza, A. F.; Sato, F. Y.; Shimabukuro, Y. E.; Rosa, R. R.; Anderson, L. O.; Rudorff, B. F. T. “Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America”. *Journal of Computational Intedisciplinary Sciences*, 2 (v.), 1 (n.), 57-68 (pp.), 2011.
- [8] Sakamoto, T.; Yokozawa, M.; Toritani, H.; Shibayama, M. “A crop phenology detection method using time series MODIS data”. *Remote Sensing of Environment*, 96 (v), 4 (n.), 366-374 (pp.), 2005.
- [9] Adams, J. B.; Sabol, D. E.; Kapos, V.; Almeida-Filho, R.; Roberts, D. A.; Smith, M. O.; Gillespie, A. R. “Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon”. *Remote Sensing of Environment*, 52 (v.), 2 (n.), 137-154 (pp.), 1995
- [10] Almeida-Filho, R.; Shimabukuro, Y. E. “Digital processing of a Landsat-TM time series for mapping and monitoring degraded areas caused by independent gold miners, Roraima State, Brazilian Amazon”. *Remote Sensing of Environment*, 79 (v), 42-50 (pp.), 2002.
- [11] Jiang, Z.; Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T., “Development of a two-band Enhanced Vegetation Index without a blue band”. *Remote Sensing of Environment*, 112 (v.) 10 (n.), 3833-3845 (pp.), 2008.
- [12] Bozelli, R. L., “The Influence of Bauxite Tailings on the Cladoceran Populations of Lake Batata, Amazonia, Brazil”. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 81(v.), 4 (n.), 621-634 (pp.), 1996.
- [13] Franco, A. A.; Campello, E. F.; Silva, E. M. R.; Faria, S. M., “Revegetação de solos degradados”. Seropédica. EMBRAPA/CNPAB, Comunicado Técnico, v (9), 11 (pp.), 1992.
- [14] Moscatelli, M.; De’Carli, C.; Almeida, J. R., “Legalidade teórica e realidade prática na defesa de manguezais: estudo de caso em Angra dos Reis, Rio de Janeiro”. In: *Simpósio de Ecossistemas da Costa Brasileira: Subsídios a um Gerenciamento Ambiental*, 3, São Paulo, 93-98 (pp). 1993.
- [15] Lewis, R. R., “Mangrove forests”. In: Lewis, R. R. (Ed.). Creation and restoration of costal plant. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 154-171 (pp.), 1982.