

Análise preliminar da variabilidade de sedimentos na várzea Lago Grande de Curuai a partir de imagens MODIS

Alice César Fassoni-Andrade ¹
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva ¹

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS
Caixa Postal 15029 - 91501-970 - Porto Alegre - RS, Brasil
alice.fassoni@gmail.com, rodrigo.paiva@ufrgs.br

Abstract. The fluxes of water between the main channel and the floodplain control the hydrodynamic of rivers and the exchange of suspended sediments. The seasonal changes of suspended sediments in the rivers and floodplains can be analyzed from orbital images. In this study, 1196 images of the MODIS sensor were used to characterize and understand the processes related to suspended sediments variability in the floodplain Lago Grande de Curuai between 2003 and 2015. The reflectances in the red and near infrared wavelength were smoothed for outlier removal by the software Timesat. Results showed striking changes in the reflectances in the river and the floodplain between rising, falling and high water stages. In the Amazon river the variation is related to the flood period of the tributaries Solimões, Madeira e Negro. In the floodplain lake, it is observed an exponential increase during low water due to wind action, which promotes the resuspension of suspended sediments. This increase depends on the water stage, where higher values occur in years of drought and the lower values in years of extreme flooding. The entrance of suspension sediments of the river into the floodplain was also observed in the flood period, mainly in years of extreme flooding. The methodology presents great potential to understand the dynamics of floodplains.

Palavras-chave: Remote sensing, hydrology, Amazon basin, MOD09, timesat

1. Introdução

A bacia do rio Amazonas possui a mais extensa rede hidrográfica do mundo, com áreas alagadas que podem ocupar até 800 mil km². Estas várzeas são importantes para a ciclagem de nutrientes (Melack et al, 2009), sequestro de carbono orgânico sedimentar (Moreira-Turcq et al., 2004) e acumulação de sedimentos do rio (Maurice-Bourgoin et al, 2007). Mangiarotti et al. (2012) sugerem que 15% do fluxo anual dos sedimentos que passa em Óbidos, PA, são capturados nas planícies entre Itacoatiara e Óbidos. Dessa forma, o estudo da composição da água desses ecossistemas é fundamental para compreensão do funcionamento ecológico e dos ciclos biogeoquímicos.

Técnicas de sensoriamento remoto são um grande recurso para estudos relacionados à cor da água devido as propriedades ópticas dos componentes, como os sedimentos em suspensão. Em particular, os sedimentos possuem alta resposta na faixa do espectro eletromagnético correspondente ao comprimento de onda do vermelho (500 a 700 nm), de tal forma que o aumento da concentração provoca o aumento do espalhamento e do retroespalhamento da radiação eletromagnética (Novo, 2001). A faixa do infravermelho próximo também possui alta resposta em águas com elevada concentração de sedimentos, já que o aumento do espalhamento é suficiente para superar a absorção da radiação pela água nesta faixa (Jensen, 2009). O pressuposto da relação da reflectância e a concentração de sedimentos tem sido utilizado para estimar sedimentos em suspensão nos rios da bacia Amazônica (Mangiarotti et al., 2012; Villar et al., 2012; Villar et al., 2013; Montanher et al., 2014). No entanto, a utilização de mapeamentos para analisar os processos responsáveis pela dinâmica espaço-temporal de sedimentos em rios e em várzeas podem ser mais explorados (Mertes et al., 1993, Alcântara et al., 2008; Park e Latrubesse, 2014).

Neste estudo, utilizou-se imagens do sensor MODIS para caracterizar os padrões de sedimentos em suspensão em uma várzea do rio Amazonas e para compreender os processos hidrológicos relacionados a sua variabilidade. A planície de inundação que engloba o Lago Grande de Curuai, localizada na margem do rio Amazonas, foi escolhida por ser historicamente estudada, principalmente em relação a hidrodinâmica e troca de sedimentos entre o canal e a planície de inundação (Maurice-Bourgoin et al., 2007; Alcântara et al., 2008; Bonnet et al., 2008; Rudorff et al., 2014).

2. Área de estudo

A planície de inundação que abrange o Lago Grande de Curuai possui 2.440 km² e está localizada próxima ao município de Óbidos, Pará, Brasil. É limitada ao norte pelo rio Amazonas e ao sul por terras altas, entre as coordenadas 56.10° W até 55° W e 2.3° S até 1.9° S (Figura 1). A várzea é composta por diversos lagos rasos interligados por canais permanentes ou temporários que estão sujeitos às variações anuais do fluxo da água (Bonnet et al., 2008).

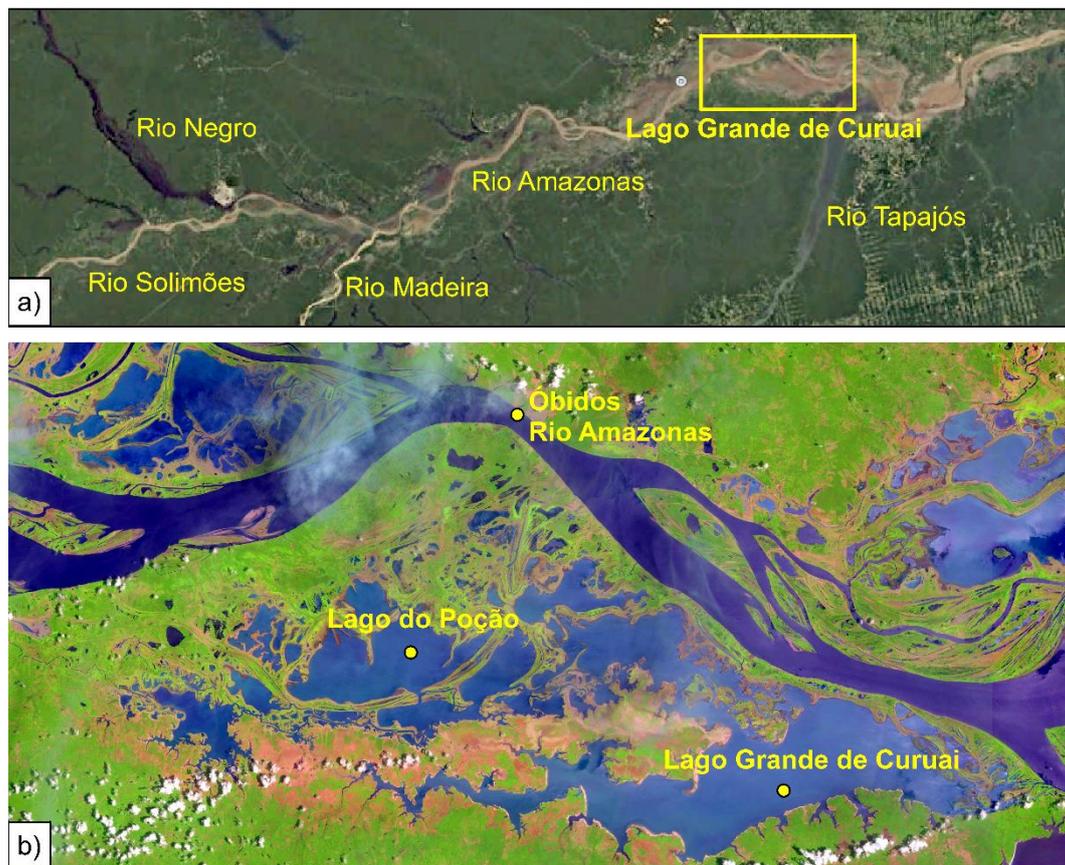


Figura 1. Área de estudo. a) Região central da bacia do rio Amazonas com os principais rios (Figura retirada do Google Earth). b) Planície de inundação que abrange o Lago Grande de Curuai em período de águas baixas (MSI/Sentinel-2, 12/10/2016).

3. Metodologia

Foram utilizadas 1.196 cenas do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra (produto MOD09Q1 v.6) e Aqua (produto MYD09Q1 v.6) entre janeiro de 2003 e dezembro de 2015. Ambos os produtos correspondem a composição de 8 dias da reflectância superficial diária na faixa do vermelho (620 a 670 nm) e infravermelho próximo (841 a 876 nm) e possuem resolução espacial de 250 m.

As imagens podem apresentar cobertura de nuvens e/ou ruídos que dificultam ou impedem as análises. Para remover os *outliers* foi feita a suavização da reflectância ao longo do tempo utilizando o *software* Timesat (Jönssone e Eklundh, 2002; Jönssone e Eklundh, 2004). A Figura 2 exemplifica a suavização do espectro temporal para um pixel no rio Amazonas, onde a linha em azul representa a reflectância das imagens brutas e em vermelho a reflectância das imagens filtradas.

O ajuste dos dados foi feito a partir de uma função complexa, utilizando o filtro Logístico duplo (Jönssone e Eklundh, 2004). A função considera valores anteriores e posteriores para o ajuste, impossibilitando um bom ajuste nos valores extremos da série temporal. Dessa forma, os anos de 2003 e 2015 foram repetidos para a execução da filtragem e posteriormente foram descartados da análise.

Como parâmetro para a filtragem, estabeleceu-se pesos para o ajuste da função de tal forma que valores de reflectância de 0 a 20% receberam peso 1, de 20% a 55% peso 0,5 e de 50% a 100% peso 0,001. Os pesos estão embasados no fato de que a reflectância da água rica em sedimentos é pequena em relação à reflectância das nuvens e permitiram o melhor ajuste da função, principalmente em períodos com picos de reflectância.

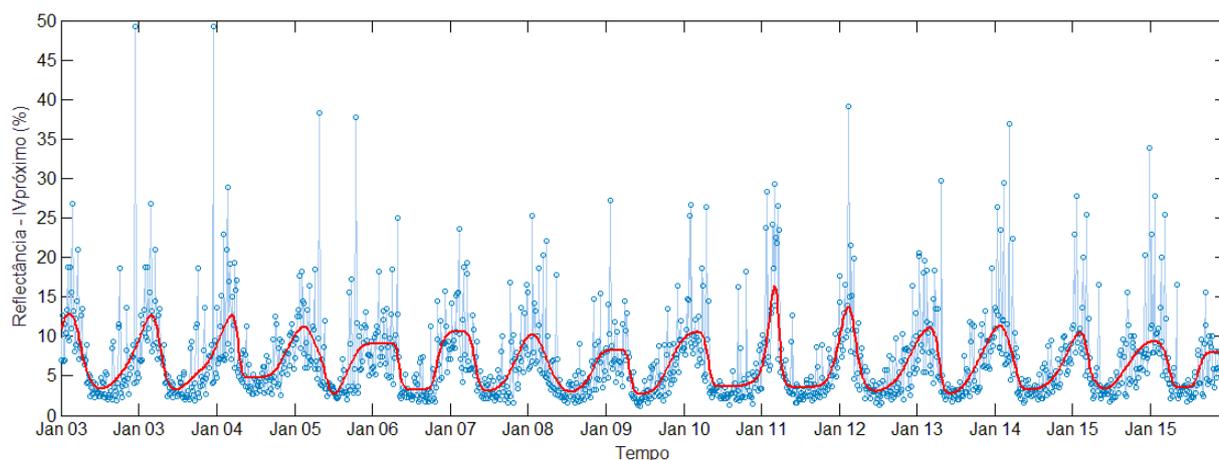


Figura 2. Reflectância na faixa espectral do IVP (b2 MOD09Q1) no rio Amazonas entre 2003 e 2015. Em azul as imagens brutas e em vermelho as imagens filtradas.

Para a análise das imagens filtradas, os corpos d'água foram isolados a partir de uma máscara criada com um limiar de 20% da reflectância na faixa do infravermelho próximo (IVP). Este limiar foi escolhido por ajustamento visual, pois percebeu-se que o limiar ótimo é variável ao longo tempo.

Os valores de reflectância das imagens foram analisados em conjunto com dados de nível da água em Óbidos afim de compreender os processos relacionados a variabilidade de sedimentos. Para mostrar a relação da reflectância com a concentração de sólidos em suspensão (SS) foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre a concentração de SS observada em Óbidos e a reflectância na faixa do IVP e na faixa do vermelho (VER). Os dados de nível e de concentração de SS são disponibilizados pelo HYBAM (<http://www.ore-hybam.org/>).

4. Resultados e Discussão

O coeficiente de correlação de Pearson entre a concentração SS observada em Óbidos e a reflectância VER em Óbidos foi 0,81, já com a reflectância IVP foi 0,83, e com a razão entre as bandas (IVP/V) foi 0,69. A alta correlação mostra que a filtragem das imagens mantém a relação da concentração de SS com a reflectância e pode ser utilizada como indicativo de massas d'água ricas/pobres em SS.

A Figura 3 mostra as reflectâncias VER e IVP entre 2003 e 2015 no rio Amazonas (Óbidos), no Lago Grande de Curuai e no Lago do Poção, regiões permanentemente inundadas (Figura 1), juntamente com o nível da água observado em Óbidos e a data das imagens da Figura 4, indicadas por linhas pretas. Na Figura 4 são apresentadas as imagens de reflectância VER e IVP para os períodos caracterizados por águas baixas (Nov), enchente (Fev), águas altas (Jun) e vazante (Out).

As reflectâncias VER e IVP possuem um padrão semelhante no rio Amazonas (Figura 3a). Durante a enchente, os valores aumentam de novembro a março e reduzem de março a junho. De junho a outubro, durante a vazante, os valores apresentam ligeiro acréscimo. O período de aumento das reflectâncias está de acordo com o período de cheia dos afluentes Solimões e Madeira, carregados de SS, e o período de redução com a cheia do rio Negro, que possui baixa concentração de SS.

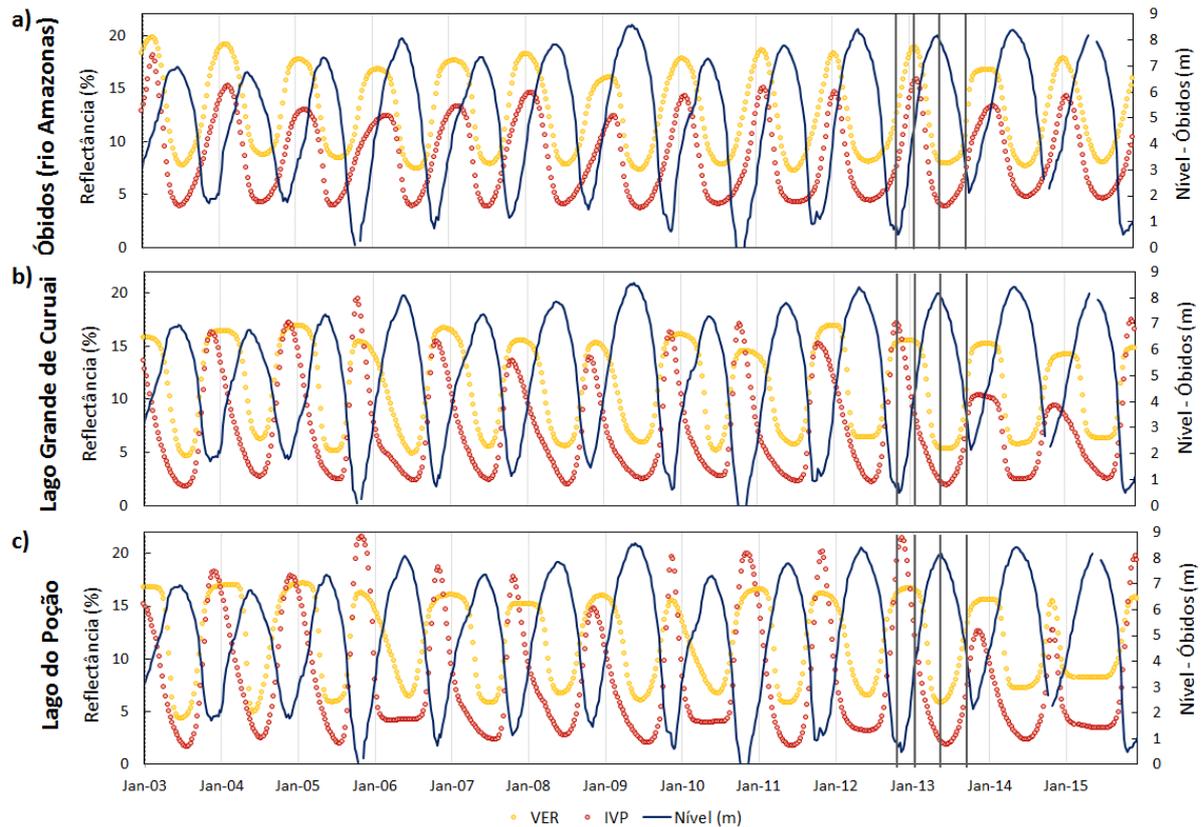


Figura 3 - Reflectância no IVprox e Verm em: a) Óbidos; b) Lago Grande de Curuai e c) Lago do Poçõ. As linhas pretas representam as datas das imagens da Figura 4.

No Lago Grande de Curuai e no Lago do Poçõ, o padrão das reflectâncias VER e IVP são diferentes do padrão do rio (Figura 3bc). O aumento da reflectância IVP se inicia em agosto e ocorre de forma exponencial, com pico no final de outubro ou início de novembro (Figura 4b) e rápida redução. Esse padrão está de acordo com o padrão de concentração de SS observado por Maurice-Bourgoin et al. (2007). Os autores observaram valores de até 1.600 mg/l nessa planície de inundação em outubro (concentração seis vezes superior à concentração máxima observada no rio Amazonas) e atribuíram o aumento à eventos de vento que favorecem a ressuspensão de sedimentos de fundo. Alcântara et al. (2008) também observou um aumento na turbidez em períodos de águas baixas devido a ação do vento. Dessa forma, o aumento exponencial da reflectância IVP, no período onde o nível é mínimo, pode ser atribuído a ação do vento. Nota-se que a reflectância IVP máxima no Lago do Poçõ é maior do que no Lago Grande de Curuai. É provável que a ação da onda produzida pelo vento e a ressuspensão de sedimentos sejam maiores neste lago do que no Lago Grande de Curuai. O aumento da reflectância VER nos dois lagos também ocorre em agosto, como a reflectância IVP (Figura 3bc). No entanto, com o aumento do nível entre novembro e março, a reflectância VER permanece constante (visualizada nas Figuras 4ac) e a redução ocorre entre março e junho, seguindo o padrão da reflectância no rio.

É provável que a diferença nos padrões das reflectâncias VER e IVP estejam relacionadas ao tipo de sedimento. O aumento, em ambas, ocorre devido à ressuspensão de sedimentos de fundo, como mostrado. E o período em que a reflectância VER permanece constante (novembro a março) sugere que essa está indicando tanto os sedimentos provenientes da ressuspensão quanto os sedimentos provenientes do rio, já que o pico no rio ocorre em março e depois a redução da reflectância VER nos lagos e no rio são semelhantes. De fato, durante o período de águas baixas e subida das cheias a planície de inundação recebe sedimentos do rio (Maurice-

Bourgoin et al, 2007; Park e Latrubesse, 2014). Ainda, segundo Rudorff et al. (2014), em períodos de águas baixas do rio, a única conexão da planície com o rio se dá por dois canais na região oriental. A inundação se inicia por estes canais e, com o aumento do nível do rio, a enchente passa a ocorrer por canais ocidentais e por extravasamento da calha do rio. Em junho 97% da entrada de água na várzea ocorre dessa forma. Observa-se a entrada de água do rio na região ocidental da várzea em junho na Fig 4e (VER), o que não é observado na Fig 4f (IVP).

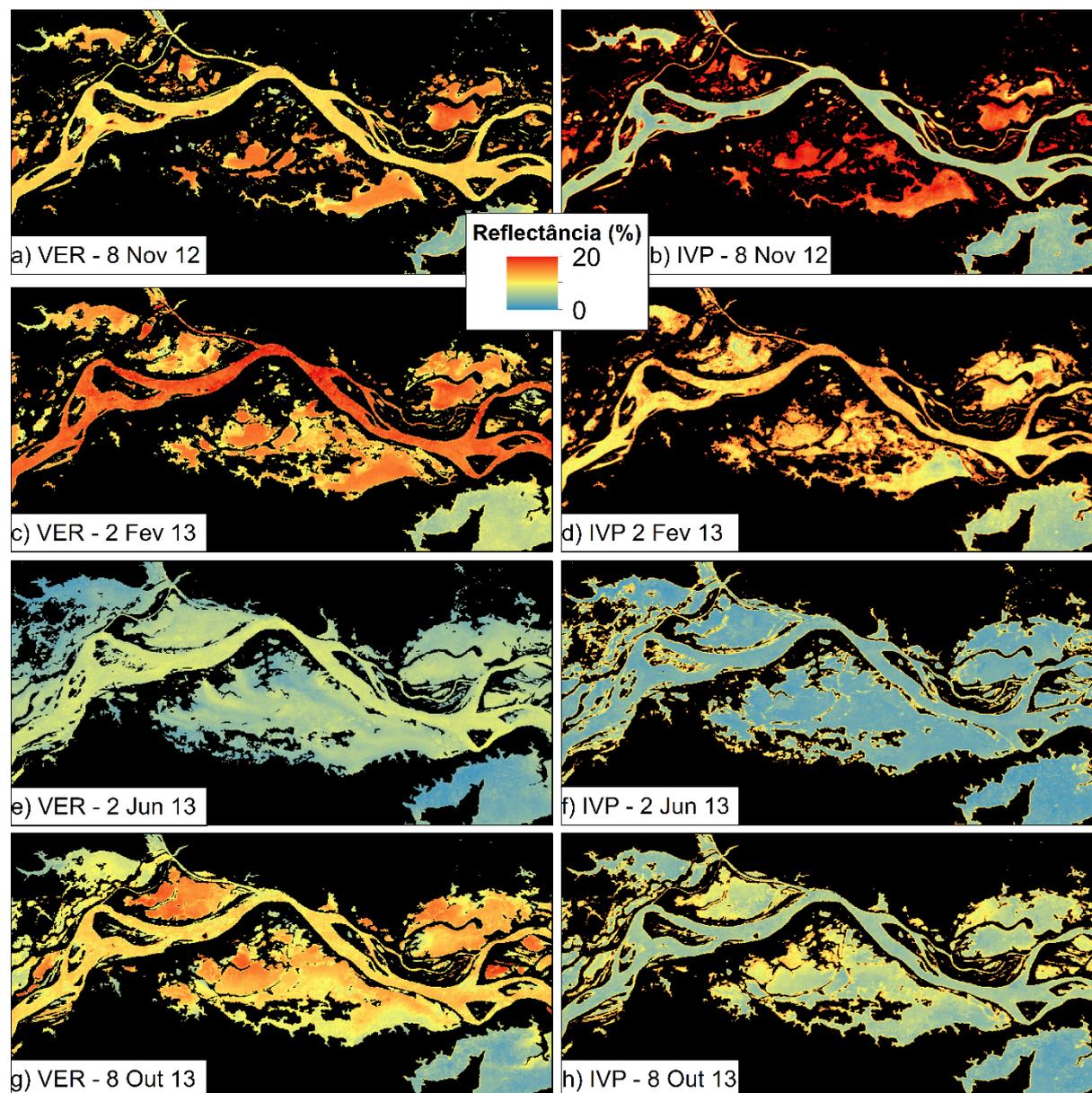


Figura 4 – Reflectância na faixa do VER e do IVP no período de a) e b) Águas baixas; c) e d) Enchente; e) e f) Águas altas; g) e h) Vazante.

Outra forma de analisar os dados é a partir do gráfico do nível versus reflectância. Na Figura 5, onde foi plotado a reflectância IVP no Lago Grande de Curuai referente aos anos de 2005/2006 e 2013/2014, observa-se que a variação de sedimentos difere em anos de seca e cheia extrema. Em novembro de 2005, quando o nível do rio atingiu valores muito baixos em relação aos outros anos, a reflectância aumentou exponencialmente até 19%, e rapidamente reduziu com o aumento do nível. Já em novembro de 2013, quando o nível mínimo foi alto em relação a série temporal, a reflectância chegou a valores de no máximo 10% e se manteve constante

com o aumento do nível até agosto. Esse padrão sugere que em anos de seca, como 2005, os lagos ficam mais rasos e a ressuspensão de sedimentos pela ação dos ventos é maior, indicada pelo aumento exponencial da reflectância até 19%. No entanto, com o nível do rio baixo, os fluxos de entrada de água para a várzea são reduzidos, e a importação de sedimentos do rio para a várzea é baixa, resultando no decaimento rápido da reflectância. Em anos de cheia, como 2013, o processo de ressuspensão nos lagos é limitado, sem aumento considerável de sedimentos (reflectância atinge valores de até 10%), mas com o nível alto o rio contribui com maior importação de sedimentos para a várzea, indicado pelo período que a reflectância permanece constante.

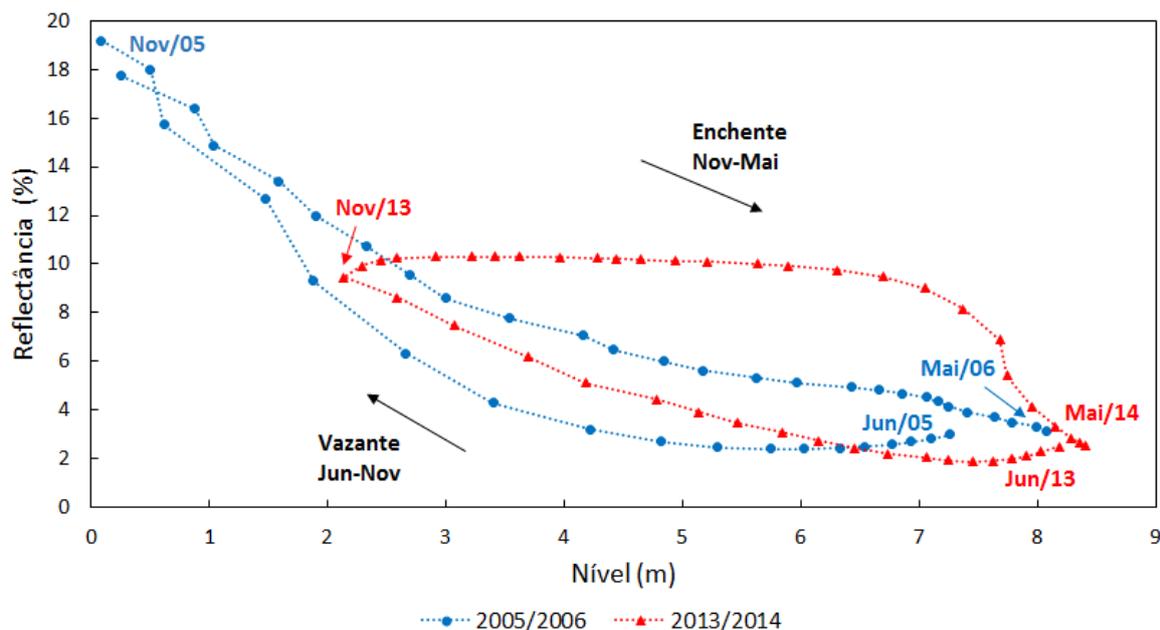


Figura 5. Reflectância na faixa do IPV no Lago Grande de Curuai versus nível da água em Óbidos para os anos de 2005 e 2013.

4. Conclusões

Os resultados preliminares desse trabalho mostram o potencial da suavização da reflectância VER e IVP para análise espaço-temporal de sedimentos e dos processos que provocam a sua variabilidade na planície que engloba o Lago Grande de Curuai. Foi possível verificar, por exemplo, o aumento da concentração de sedimentos devido a ação dos ventos nos lagos e seu maior (menor) efeito em anos de seca (cheia) extrema. A partir da aplicação da metodologia em um ambiente conhecido e documentado, pode-se partir, em uma próxima etapa, para análise de outras planícies de inundação que se tem pouco ou nenhum conhecimento. Ressalta-se que a validação dos dados a partir da correlação da concentração de SS na planície com a reflectância será feita em uma etapa posterior.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio de bolsa de doutorado concedido ao primeiro autor.

Referências

- Alcântara, E., Novo, E., Stech, J., Lorenzetti, J., & Barbosa, C. (2008). The turbidity behavior in an Amazon floodplain: a spatiotemporal approach. *Sensors*, 8, 2.
- Bonnet, M. P., Barroux, G., Martinez, J. M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G., et al. (2008). Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuai). *Journal of Hydrology*, 349, 18–30

- Jensen, J. R. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução: José Carlos Neves Epiphany et al.(coord.). São José dos Campos: Parêntese. 589 p.
- Jönsson, P., Eklundh, L. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(8), 1824-1832.
- Jönsson, P., Eklundh, L. (2004). TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845.
- Maurice-Bourgoin, L., Bonnet, M. P., Martinez, J. M., Kosuth, P., Cochonneau, G., Moreira-Turcq, P., et al. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuai floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 335, 140–156.
- Mangiarotti, S., Martinez, J. M., Bonnet, M. P., Buarque, D. C., Filizola, N., & Mazzega, P. (2013). Discharge and suspended sediment flux estimated along the mainstream of the Amazon and the Madeira Rivers (from in situ and MODIS Satellite Data). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 341-355.
- Melack, J.M., Novo, E. M., Forsberg, B. R., Piedade, M. T., & Maurice, L. (2009). Floodplain ecosystem processes. Pages 525-541. In J. Gash, M. Keller and P. Silva-Dias (eds.). *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series 186*.
- Mertes, L. A. K., Smith, M. O., Adams, J. B. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, v. 43, n. 3, p. 281-301.
- Montanher, O. C., Novo, E. M., Barbosa, C. C., Rennó, C. D., Silva, T. S. (2014). Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 29, 67-77.
- Novo, E. M. L. M. (2001). Comportamento Espectral da Água. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. da S. (Org.). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, p.203-222
- Park, E., and E. M. Latrubesse (2014), Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data, *Remote Sens. Environ.*, 147, 232–242.
- Rudorff, C. M., Melack, J. M., & Bates, P. D. (2014). Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. *Water Resources Research*, 50(1), 619-634.
- Villar, R. E., Martinez, J. M., Guyot, J. L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., Lavado, W. (2012). The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *Journal of hydrology*, 444, 221-228.
- Villar, R. E., Martinez, J. M., Le Texier, M., Guyot, J. L., Fraizy, P., Meneses, P. R., et al. (2013). A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remotesensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 45–54.