

DINÂMICA ESPAÇO TEMPORAL DE SEDIMENTOS EM RIOS E LAGOS NA BACIA AMAZÔNICA UTILIZANDO DADOS MODIS

Alice César Fassoni-Andrade¹; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹

Resumo – As propriedades ecológicas em rios e lagos da bacia Amazônica, como riqueza de peixes, crescimento da vegetação e fertilidade do solo, são influenciadas pela concentração de sedimentos. Embora o monitoramento sistemático desse parâmetro seja difícil, a dinâmica de sedimentos pode ser observada por dados de sensoriamento remoto. Neste estudo, 1196 imagens de reflectância no comprimento de onda do vermelho e infravermelho próximo do sensor MODIS foram utilizadas para observar a dinâmica espaço temporal de sedimentos em rios e em lagos da bacia Amazônica. Para isso, um procedimento foi feito para remover ruídos e nuvens dos dados. Foi possível observar um aumento da reflectância, utilizada como proxy da concentração, nos lagos no período de vazante do rio. Essas observações foram atribuídas à processos, como a ressuspensão de sedimentos no lago de depressão e entrada de água com alta concentração de sedimentos no lago tipo *RIA*. Também foi observado a entrada de água do rio no lago de depressão por *overbank flow* e a predominância de água com baixa concentração no lago tipo *RIA* durante a enchente do rio. Estes resultados sugerem que as imagens auxiliam a compreensão de processos que ocorrem nos lagos e complementam dados de monitoramento.

Palavras-Chave – Reflectância vermelho e infravermelho, Lago Grande de Curuai, Lago Coari.

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF SEDIMENT IN RIVERS AND LAKES IN THE AMAZON BASIN USING MODIS DATA

Abstract – The ecological properties in rivers and lakes of the Amazon basin, such as fish richness, vegetation growth and soil fertility, are influenced by sediment concentration. Although systematic monitoring of this parameter is difficult, the sediment dynamic can be observed by remote sensing data. In this study, 1196 reflectance images in the red and near infrared wavelength of the MODIS sensor were used to observe the spatial and temporal dynamics of sediment in rivers and lakes in the Amazon basin. For this, a procedure was done to remove noises and clouds from the data. We observed an increase in reflectance, used as a sediment concentration proxy, in lakes during the river receding-water. These observations were attributed to processes, such as sediment resuspension in the depression lake and entrance of water with high sediment concentration in the *RIA* lake. It was also observed the entrance of river water in the depression lake by *overbank flow* and the predominance of water with low concentration in the *RIA* lake during the river rising-water. These results suggest that the images aid in the understanding of processes that occur in lakes and complement monitoring data.

Keywords – Red and infrared reflectance, Lago Grande de Curuai, Lago Coari.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. Caixa Postal 15029. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970;
Autor correspondente: alice.fassoni@ufrgs.br.

INTRODUÇÃO

A classificação dos tipos de água dos rios da bacia Amazônica em água branca, preta e clara está fundamentada em características como, por exemplo, pH, condutividade, substância inorgânicas e orgânicas presentes. Essas características influenciam propriedades ecológicas específicas, como riqueza de peixes, crescimento da vegetação e fertilidade do solo (Junk *et al.*, 2011). Rios de água branca, como o rio Madeira e o rio Solimões, têm origem nos Andes e transportam grande quantidade de sedimentos ricos em nutrientes. Rios de água preta, como o rio Negro, possuem baixa quantidade de material em suspensão e grande quantidade de ácidos húmicos. E os rios de água clara são transparentes, com baixa concentração de sedimentos e sólidos dissolvidos. A bacia Amazônica também possui extensas áreas alagadas com lagos sujeitos ao pulso de inundação do rio. Esses lagos possuem produtividade dependente do tipo de água do rio e são importantes, por exemplo, para a ciclagem de nutrientes (Melack *et al.*, 2009) e acumulação de sedimentos do rio (Maurice-Bourgoin *et al.*, 2007).

A concentração de sedimentos é um parâmetro difícil de ser monitorado sistematicamente com medições *in situ*, principalmente em grandes lagos da Amazônia. No entanto, a observação da variação de sedimentos ao longo do tempo pode ser feita com dados de sensoriamento remoto. Isso é possível devido a interação da radiação eletromagnética com os componentes presentes (espalhamento ou absorção). Por exemplo, o aumento da concentração de sedimentos provoca um aumento do espalhamento da radiação principalmente na faixa do comprimento de onda do vermelho (500 a 700 nm) e do infravermelho próximo (800 nm; Kirk, 2011). Outros componentes, como ácidos fúlvicos e húmicos, presentes principalmente em águas pretas, absorvem a radiação em comprimentos de onda menores, decrescendo quase exponencialmente até valores muito baixos em 700 nm (vermelho) (Novo, 2001). Dessa forma, os dados de sensoriamento remoto, correspondentes as faixas mais sensíveis aos componentes presentes na água, são utilizadas para observação e/ou estimativas dos componentes.

Apesar dos avanços nos estudos para estimativa da concentração de sedimentos em alguns rios da bacia Amazônica a partir do sensoriamento remoto (Villar *et al.*, 2012; Villar *et al.*, 2013; Montanher *et al.*, 2014; Park e Latrubesse, 2014), a utilização de mapeamentos para análise dos processos responsáveis pela dinâmica espaço-temporal de sedimentos em rios e lagos podem ser mais explorados (Mertes *et al.*, 1993, Alcântara *et al.*, 2008; Park e Latrubesse, 2014). Neste trabalho, as reflectâncias no vermelho e no infravermelho próximo, utilizadas como proxy da concentração de sedimentos, foram analisadas em alguns rios e lagos da bacia Amazônica buscando compreender sua variabilidade.

METODOLOGIA

O proxy da concentração de sedimentos em rios e lagos da região central da bacia Amazônica foi avaliado a partir de mapas de reflectância no vermelho e no infravermelho. Para isso, 1196 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 foram utilizadas. Ambos os produtos fornecem a melhor observação dentro de um período de 8 dias da reflectância superficial na faixa do espectro eletromagnético do vermelho (620-670 nm) e do infravermelho próximo (841-876 nm) com 250 m de resolução e com correção atmosfera (eliminação da contribuição do efeito da atmosfera no sinal recebido pelo sensor).

Para remover cobertura de nuvens e ruídos das imagens foi feita a suavização da reflectância ao longo do tempo utilizando o software TIMESAT (Jönssone e Eklundh, 2002; Jönssone e Eklundh,

2004). A Figura 1 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 da função nos dados foi feito utilizando o filtro logístico duplo (Jönssone e Eklundh, 2004). 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 com sedimentos é pequena em relação à reflectância das nuvens.

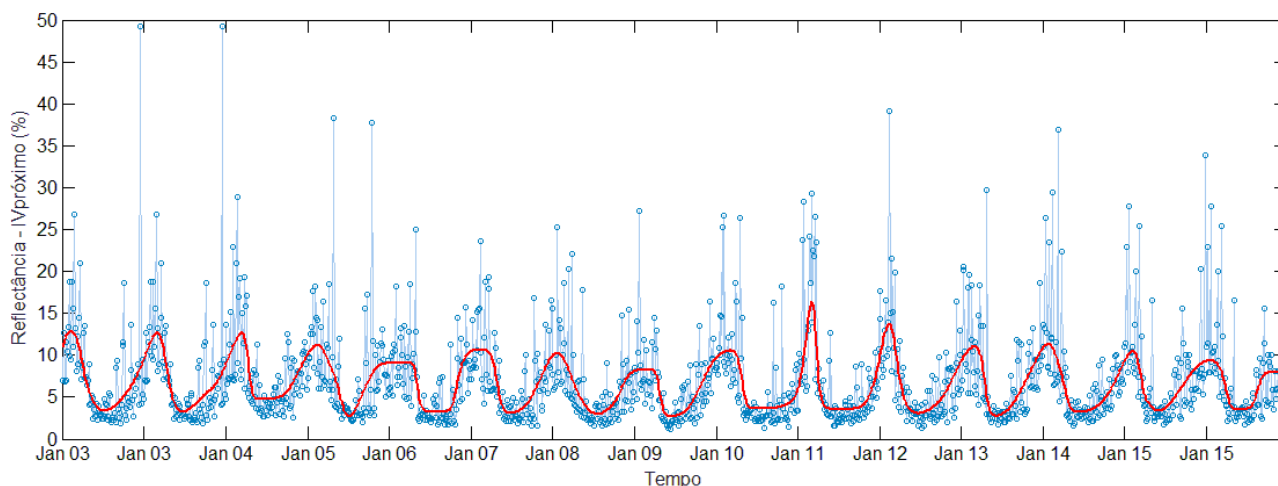


Figura 1. Reflectância na faixa do infravermelho no rio Amazonas entre 2003 e 2015. Em azul o valor do pixel bruto e em vermelho o valor após o ajuste.

Os rios e os lagos foram isolados em cada imagem a partir de uma máscara de água criada com a eliminação das regiões em que: i) A razão da reflectância no vermelho pela reflectância no infravermelho (verm/infrav) é menor que 50% ao mesmo tempo que a reflectância no infravermelho é maior que 10%, e ii) A reflectância no infravermelho é maior que 20%. Esses critérios estão embasados na análise do comportamento espectral da água, da vegetação e do solo. A vegetação, o solo e os rios com baixa concentração de sedimento possuem valores baixos da razão verm/infrav (menor que 50%), no entanto, nesses rios, a reflectância no infravermelho é muito pequena (menor que 10%). Assim, o primeiro critério estabelecido elimina regiões de vegetação e solo, mas não elimina regiões de água com baixa concentração de sedimentos. O segundo critério elimina algumas regiões remanescente “não-água” com razão verm/infrav maior que 50%.

Dados de concentração de sólidos em suspensão (CSS) nos rios Madeira (Est. Fazenda Vista Alegre), Solimões (Est. Manacapuru) e Negro (Est. Serrinha) foram correlacionados com a reflectância para exemplificar a relação dessa com a CSS. Também avaliou-se a reflectância média ao longo do ano em dois lagos, Lago Grande de Curuai e Lago Coari. A reflectância utilizada em cada imagem corresponde à uma média de 10 pixels no local de interesse. Para auxiliar a análise, dados de nível da água dessas estações também foram utilizadas. Todos os dados utilizados são de estações de monitoramento operadas pelo HYBAM (<http://www.ore-hybam.org/>).

RESULTADOS

Rios

O coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de correlação de postos de Spearman (p , ou *rank correlation*) da reflectância no vermelho e no infravermelho com a CSS (ou com o logaritmo da CSS) nas estações localizadas nos rios Madeira, Solimões e Negro são apresentados na Tabela 1.

As correlações são altas para os rios de água branca (Madeira e Solimões), sendo que no rio Madeira a reflectância no infravermelho tem maior correlação do que com a reflectância do vermelho. A Figura 2b exemplifica a reflectância e a CSS ao longo do tempo nesse rio. O rio Solimões possui correlação praticamente igual entre a faixa do vermelho e do infravermelho. Já o rio Negro não possui correlação significativa pois a concentração é muito baixa (média de 6mg/l) e outros componentes presentes na água podem estar atrapalhando a correlação.

Tabela 1. Concentração de sedimentos em suspensão e correlação com a reflectância nos rios Madeira, Solimões e Negro.

Rio (estação HYBAM)	CSS observada			CSS x Verm (ou *log CSS x Verm)				CSS x Infrav (ou *log CSS x Infrav)			
	μ (mg l ⁻¹)	σ (mg l ⁻¹)	n	r	p - Value	p	p - Value	r	p - Value	p	p - Value
Madeira (Faz. Vista Alegre)	176,18	155,16	255	0,67*	**	0,69	**	0,74	**	0,76	**
Solimões (Manacapuru)	107,47	63,41	242	0,63*	**	0,69	**	0,64*	**	0,64	**
Negro (Serrinha)	5,97	2,90	132	0,09*	0,31	0,02	0,84	0,10*	0,26	0,02	0,83

μ - média; σ - desvio padrão; n - número de dados; r - Coeficiente de correlação de Pearson; p - Coeficiente de correlação de postos de Spearman (ou *rank correlation*); p -Value - nível de significância.

Na Figura 2a observa-se o “encontro das águas” dos rios Negro, Solimões, Madeira e Amazonas. O rio Negro possui baixa concentração de sedimentos, alta concentração de matéria orgânica e, conseqüentemente, baixa reflectância no vermelho. Já nos rios de água branca, quanto maior a concentração de sedimentos maior a reflectância. Assim, nota-se na figura a maior reflectância (ou concentração de sedimentos) do rio Madeira em relação aos outros rios e a predominância dos tipos de água nas margens do rio Amazonas.

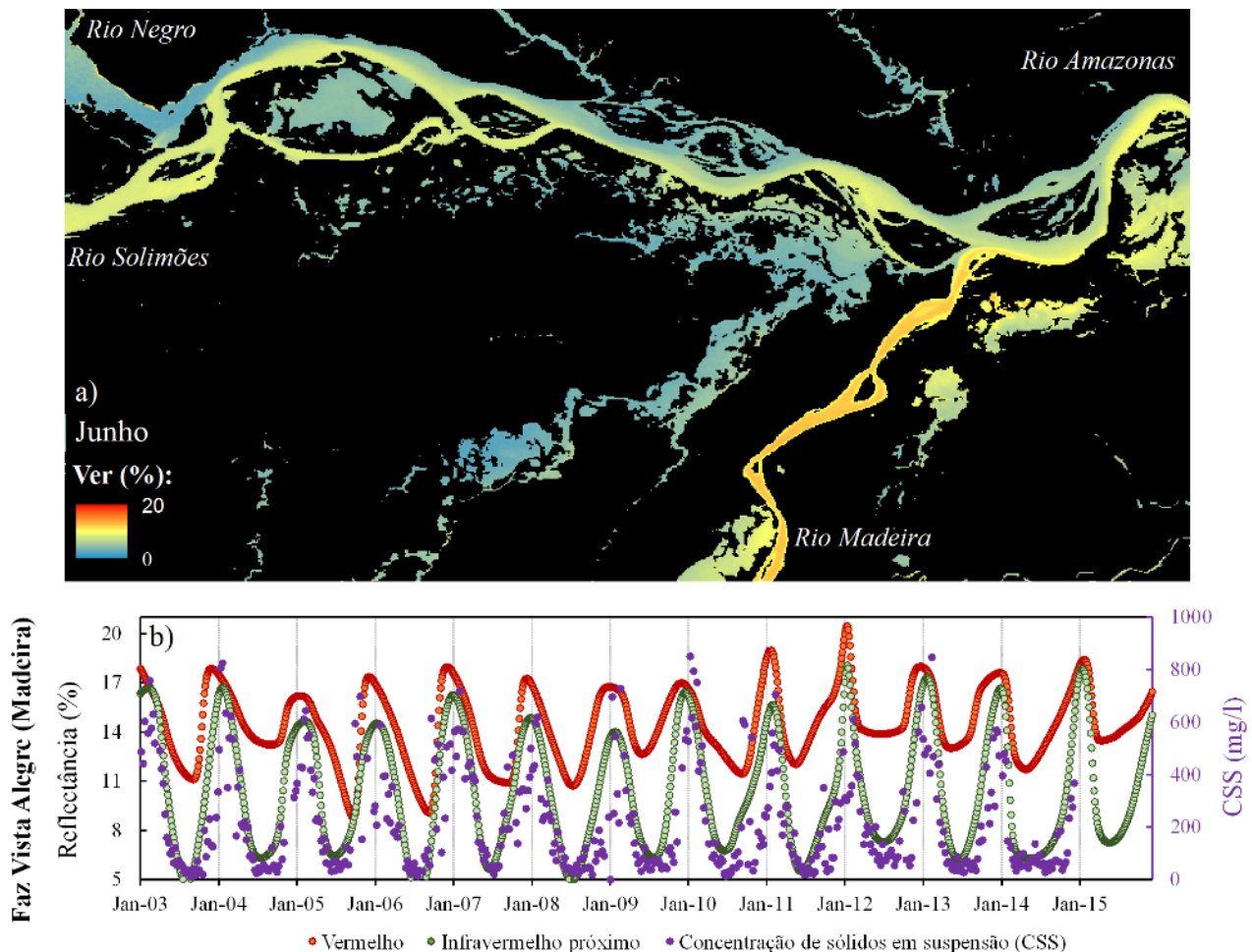


Figura 2. a) Região de encontro das águas dos rios Solimões, Negro, Madeira e Amazonas; b) Reflectância no vermelho e no infravermelho próximo na estação Fazenda Vista Alegre (rio Madeira).

Lagos

As Figuras 3 e 4 apresentam a reflectância média ao longo do ano, a reflectância média versus o nível médio e as imagens da reflectância localizadas no Lago Grande de Curuai, no rio Amazonas (Fig. 3), no rio Solimões e no Lago Coari (Fig. 4).

Diferente do padrão observado no rio Amazonas (Óbidos), a reflectância no Lago Grande de Curuai, localizado em uma planície de inundação, possui um aumento exponencial de agosto até novembro, durante a vazante (Fig. 3cd). No lago, a reflectância no infravermelho em novembro é da ordem de 15% em comparação com valores de ~7% no rio na mesma data. Isto sugere uma concentração de sedimentos muito maior no lago do que no rio. De fato, devido as características de circulação desse lago raso (classificado como lago de depressão), a redução do nível na vazante e a ação do vento favorece a ressuspensão de sedimentos (Junk *et al.*, 2012, Maurice-Bourgoin *et al.*, 2007). Maurice-Bourgoin *et al.* (2007) observaram valores de até 1.600 mg/l no Lago Grande de Curuai em outubro (concentração seis vezes superior à concentração máxima observada no rio Amazonas). Assim, as maiores intensidades do infravermelho em novembro (Fig. 3e) indicam onde a ressuspensão deve ser maior e contrasta com os menores valores no rio. Nota-se, por exemplo, que a intensidade é maior na região ocidental do Lago Grande de Curuai do que na região oriental, na boca do lago.

Em meados de novembro, início da enchente, o Lago Grande de Curuai recebe água direto do rio por canais orientais (Rudorff *et al.*, 2014) e a reflectância começa a diminuir no lago, sugerindo que a ressuspensão é limitada pela entrada de água. Durante a enchente, o fluxo da água na região desses lagos passa a ser preferencialmente por extravasamento da calha (*overbank flow*), como observado em tons de amarelo (linhas de fluxo) em junho na Figura 3f. Nas Figuras 3ef observa-se também que o processo de ressuspensão de sedimentos (em novembro) e o *overbank flow* (em junho) ocorrem em todos os lagos de depressão dessa região.

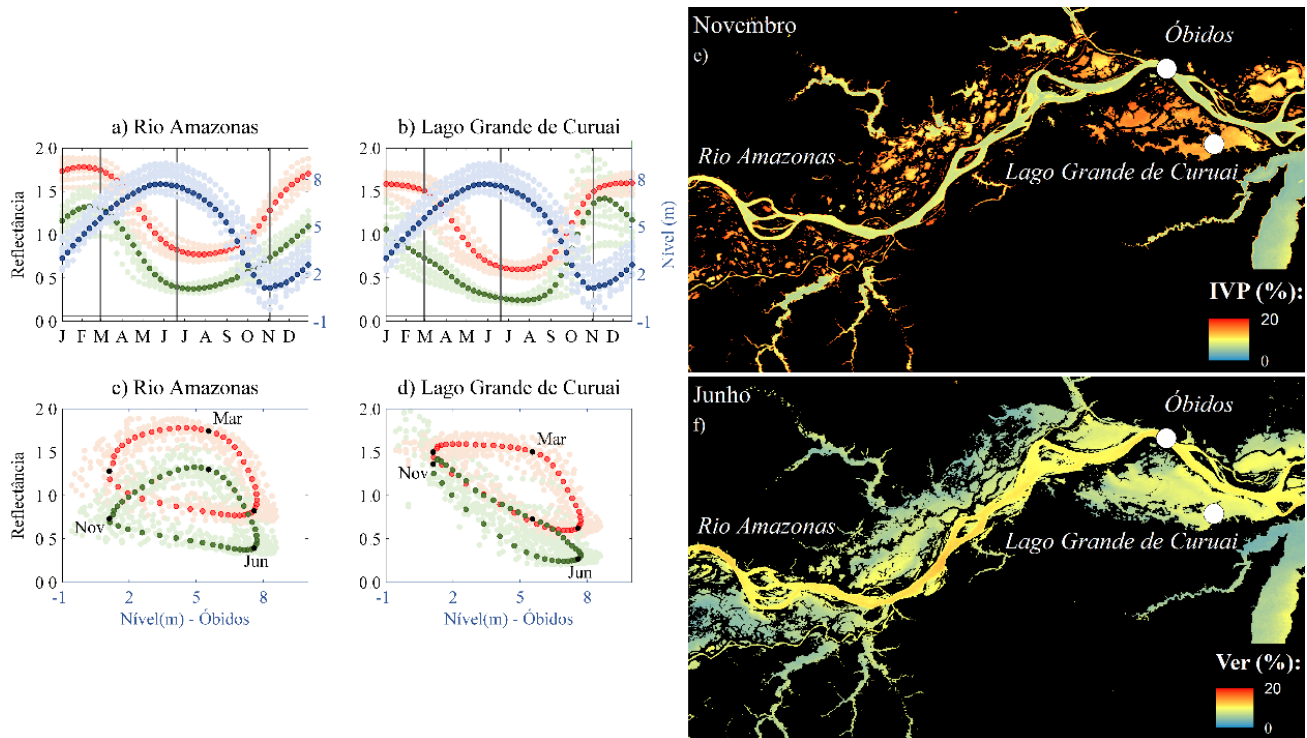


Figura 3. Rio Amazonas e Lago Grande de Curuai. a) e b) Reflectância média ao longo do ano; c) e d) reflectância média versus o nível médio; E e) e f) Mapa de reflectância em novembro e junho.

A reflectância no Lago Coari (Fig. 4d) não aumenta exponencialmente na vazante como no Lago Grande de Curuai, ou seja, não há indícios de ressuspensão de sedimentos. Este lago é do tipo “*Ria*”, caracterizados por vales afogados de afluentes com maior profundidade e circulação reduzida por estarem protegidos contra turbulências induzidas pelo vento (Junk *et al.*, 2012). Nesse lago, a reflectância é baixa (<5%), tanto no vermelho quanto no infravermelho, e possui um padrão diferente do rio Solimões (infravermelho maior que o vermelho) de março a outubro (Fig. 4b). Esse padrão sugere a predominância de água com baixa concentração de sedimentos no período de água-alta do rio Solimões. Assim, ao contrário dos lagos de depressão, onde há um fluxo do rio para a planície na enchente do rio, o padrão da reflectância no Lago Coari sugere que o fluxo é do lago para o rio nesse período. Lesack e Melack (1995) computaram o balanço hídrico no Lago Calado (*ria lake*, próximo a Manacapuru e conectado ao rio Solimões) e mostraram que o escoamento superficial e a chuva local são suficientes para impedir que a água do rio Solimões entre no lago durante a enchente. Além disso, observaram um fluxo constante de água do lago para o rio em meados de março até novembro (1983-1984), a partir do qual ocorreu uma inversão de fluxo. Está data parece coincidente com o período que a água com baixa concentração de sedimentos predomina no Lago Coari (mar-out). Assim, é muito provável que o lago tenha um comportamento semelhante ao do Lago Calado, onde o escoamento e a chuva local são suficientes para impedir a entrada de água do rio Solimões durante a

enchente. A Figura 4f mostra que outros lagos do tipo “Ria” da região possuem reflectância baixa durante o período de enchente do rio Solimões, sendo esperado o mesmo comportamento observado no Lago Coari.

A partir de outubro, a reflectância no vermelho no Lago Coari aumenta e permanece com esse padrão até o início da enchente (Fig. 4bd), sugerindo entrada de água com maior concentração de sedimentos. Assim, esse lago no período de água-baixa e início da enchente do rio parece receber água com maior concentração de sedimentos proveniente ou do rio Solimões ou do rio Coari Grande (localizado a montante do Lago Coari). A Figura 4e exemplifica a maior reflectância nos lagos do tipo “Ria” em novembro em relação a junho.

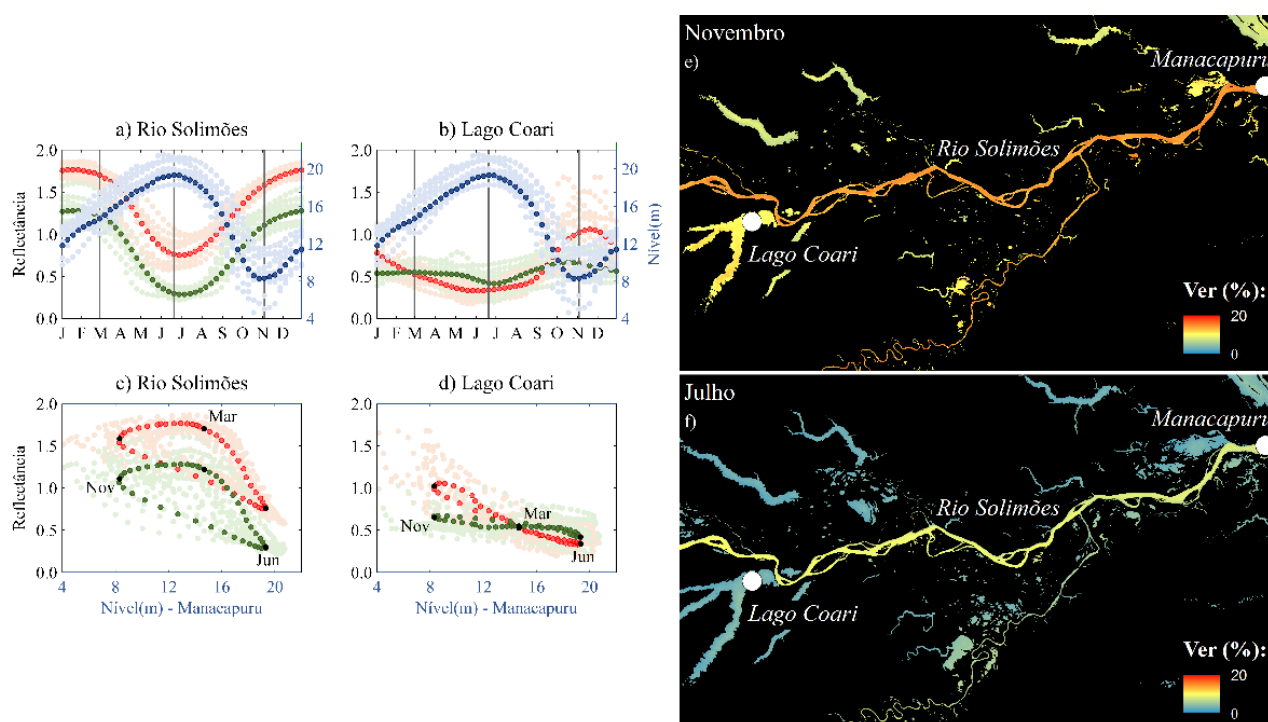


Figura 4. Rio Solimões e Lago Coari. a) e b) Reflectância média ao longo do ano; c) e d) reflectância média versus o nível médio; E e) e f) Mapa de reflectância em novembro e junho.

CONCLUSÕES

A reflectância na faixa do vermelho e do infravermelho próximo do sensor MODIS foi analisada como proxy da concentração de sedimentos, possibilitando observar a dinâmica espaço temporal de sedimentos e compreender os processos que provocam a variação de sedimentos em rios e lagos da região central da bacia Amazônica.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; LORENZZETTI, J.; BARBOSA, C. (2008). The turbidity behavior in an Amazon floodplain: a spatiotemporal approach. *Sensors*, 8(2).
- 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.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; COHN-HAFT, M.; ADENEY, J. M.; WITTMANN, F. (2011). A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. *Wetlands*, 31(4), 623-640.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F. (2012). A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). *Wetlands Ecology and Management*, 20(6), 461-475.

KIRK, J. T. O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 662 p.

LESACK, L. F.; MELACK, J. M. (1995). Flooding hydrology and mixture dynamics of lake water derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake. *Water Resources Research*, 31(2), 329-345.

MAURICE-BOURGOIN, L.; BONNET, M. P.; MARTINEZ, J. M.; KOSUTH, P.; COCHONNEAU, G.; MOREIRA-TURCQ, P. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuai floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 335, 140–156.

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*, 43(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.; 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. (2013). A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 45–54.