



Distribuição espacial de sedimentos suspensos do baixo rio Madeira: experimento com dados Landsat 5/TM

Otávio Cristiano Montanher¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo²

¹ Universidade Estadual de Maringá – UEM/DTC
CEP - 87506-570 - Umuarama - PR, Brasil
otaviocmontanher@yahoo.com.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
evlyn@dsr.inpe.br

Abstract. This paper describes an experiment carried out to assess the suitability of remote sensing for mapping the spatial distribution of suspended sediment concentration (SSC) at the lower reach of the Madeira River. For that, we have applied a Landsat 5/TM database and an empirical model previously calibrated. The experiment consisted of processing a time series composed of 5 images distributed along the hydrological year of 2011, starting in the dry period of 2010 and ending in the dry period of 2011, representing key phases of the flood-pulse. The results showed that it was possible: a) to assess time changes in SSC at the lower Madeira River along the different phases of the hydrological year using the time series of Landsat-5/TM images. b) to map the spatial distribution of the SSC, provided that the following aspects are taking into account: i) presence of scan line noise related to the poor signal-to-noise ratio provided by TM sensor, mainly in phases of low SSC; ii) presence of artifacts related to cloud shading and coverage; iii) model application limited to aquatic systems characterized by optical properties controlled by suspended inorganic solids at certain phases of the hydrological year. c) Although the model used to map SSC distribution on floodplain lakes has been calibrated using water samples from the Madeira river channel, its application to floodplain lakes provided suitable results in those phases of hydrological year during which the water entering in the floodplain is dominated by inorganic particles.

Palavras-chave: remote sensing, empirical models, Amazon basin, sensoriamento remoto, modelos empíricos, bacia amazônica.

1. Introdução

O fluxo de sedimentos suspensos faz parte da dinâmica fluvial dos rios amazônicos, sendo um importante para a compreensão dos processos biogeoquímicos, geomorfológicos e hidrológicos das planícies de inundação (MEADE, 1985; MARTINELLI et al., 1989; FILIZOLA e GUYOT, 2009; 2011; MONTANHER et al., 2016). O rio Madeira é um importante afluente da margem direita do rio Amazonas, sendo fonte de cerca de metade de seu transporte anual de sedimentos (MEADE, 1994).

A estimativa do transporte de sedimentos depende de medidas de vazão e da concentração de sedimentos suspensos (CSS), as quais são de difícil obtenção em regiões de difícil acesso, como a Amazônia. Enquanto o monitoramento da vazão é feito diariamente por agências responsáveis por tal demanda (por exemplo: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM e Agência Nacional de Águas - ANA), a coleta e o processamento de amostras de água para determinação da CSS é feita com menos frequência, o que resulta, na bacia amazônica, na realização de, em média, três coletas por ano (MONTANHER et al., 2013).

Um método para lidar com tal limitação temporal de amostragem é o uso de estimativas feitas a partir de modelos previamente calibrados e séries temporais de imagens de sensoriamento remoto orbital. Isso já foi realizado com sucesso em diversos grandes rios do mundo, como no rio Amarelo, na China (WANG et al., 2009) e em rios da bacia amazônica (ESPINOZA VILLAR et al., 2012, 2013; MANGIAROTTI et al., 2013; MONTANHER et al., 2014; LOBO et al., 2014; PARK e LATRUBESSE, 2014).

Existem dois aspectos interessantes no uso de imagens de satélite para o monitoramento da CSS, o aumento da resolução temporal das séries, já mencionado, e a possibilidade de avaliação da distribuição espacial da carga de sedimentos. No segundo caso, essa análise foi feita na calha Solimões-Amazonas por Park e Latrubesse (2014), com uso de dados MODIS.

Este trabalho pretende apresentar um experimento de mapeamento da distribuição espacial da CSS para o baixo rio Madeira. Como base de dados de sensoriamento remoto, foram utilizados dados Landsat 5/TM, os quais permitem uma melhor resolução espacial em relação aos dados MODIS. O conjunto de modelos utilizados para a estimativa foi previamente calibrado e já foi utilizado para recuperação de séries temporais na bacia amazônica (MONTANHER et al., 2016). No entanto, o potencial desses modelos para espacialização da carga de sedimentos não foi avaliado ainda.

2. Metodologia de trabalho

A área selecionada para aplicação do modelo situa-se no Estado do Amazonas, no curso inferior do rio Madeira, aproximadamente a 100 km de sua confluência com o rio Amazonas (Figura 1).

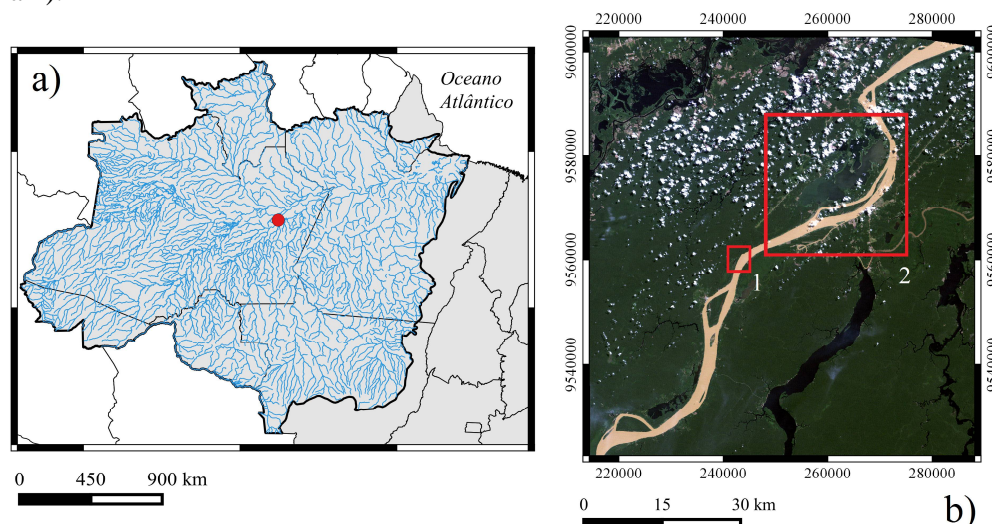


Figura 1. Localização da área de estudo no contexto da bacia amazônica em território brasileiro (a). Composição colorida natural da área de estudo em maior detalhe (b). Os quadrados vermelhos 1 e 2 indicam trechos avaliados com ênfase.

A área 1 (Figura 1) abrange um segmento do rio Madeira de aproximadamente 4 km, a seção é única e possui larguras que variam entre 1,2 e 1,7 km. Já a área 2 possui cerca de 37 km de extensão longitudinal, contendo uma grande ilha que divide localmente o rio em dois canais. Também são encontradas ilhas menores, barras de areia e afluentes de porte significativo. Na área 2 o canal único do rio Madeira possui larguras que variam entre 1,2 e 2 km.

Os modelos para estimativa da CSS em rios amazônicos com alta carga de sedimentos foram elaborados por Montanher et al. (2014), sendo que o modelo específico para o rio Madeira está representado na Equação 1. Os números de 1 a 5 referem-se a cada banda espectral do sensor TM (por exemplo, 1 = banda espectral do azul).

$$CSS = \left(-105,37 - 7,93\rho_1 + 6,79\rho_2 - 2,19\rho_5 + 179,46 \frac{\rho_3}{\rho_2} - 164,63 \frac{\rho_3}{\rho_1} + 91,07 \frac{\rho_2}{\rho_1} + 45,36 \frac{\rho_4}{\rho_3} \right)^2 \quad (1)$$

Em que:

ρ = reflectância no topo da atmosfera.

A estimativa da CSS foi feita a partir de imagens obtidas em diferentes fases do regime hidrológico do rio Madeira. Para caracterização do regime hidrossedimentar e consequente escolha das imagens, adquiriram-se dados da Agência Nacional de Águas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) da estação de Fazenda Vista Alegre, código 15860000. Essa estação situa-se aproximadamente 50 km a montante do trecho em estudo, mas estava com cobertura de nuvens nas imagens analisadas, justificando a escolha de um trecho a jusante. Adicionalmente, devido à dimensão do rio Madeira, a distância não é suficiente para grandes modificações do regime hidrossedimentar, visto que não há grandes afluentes entre as duas localidades. Além dos dados hidrológicos, séries históricas de CSS e de transporte de sedimentos suspensos para essa estação foram obtidas a partir do trabalho de Montanher (2016).

A variação anual de vazão rio Madeira na área de estudo é caracterizada por um regime monomodal, com um período de baixa nos meses de setembro e outubro. Portanto, entre dois períodos de águas baixas é definido o ano hidrológico. O ano de 2010/2011 foi selecionado devido à disponibilidade de imagens Landsat 5/TM livres de cobertura de nuvens em diferentes fases do regime (Tabela 1).

Tabela 1. Datas das imagens Landsat 5/TM selecionadas para processamento e condições hidrológicas.

Data	Vazão (m ³ /s)	Condição
08/10/2010	5525	Seca
12/01/2011	23850	Enchente
17/03/2011	47790	Enchente
05/06/2011	31800	Vazante
23/07/2011	10480	Vazante

3. Resultados e Discussões

3.1 Dados hidrossedimentares

O período compreendido entre a última quinzena de agosto e a primeira de novembro de 2010 apresentou baixos valores de CSS, vazão e transporte de sedimentos, típicos do período de seca (Figura 2). A partir de novembro, as três variáveis tendem a aumentar, sendo que a CSS possui um pico por volta do final de janeiro e início de fevereiro, enquanto a vazão apresenta um pico na primeira semana de maio. Esse desajuste entre concentração e vazão faz com que o transporte de sedimentos tenha um máximo na primeira semana de março (Figura 2).

3.2 Mapeamento da concentração de sedimentos suspensos

O modelo do rio Madeira (Equação 1) foi aplicado em duas áreas (Figura 1), em que os resultados obtidos na área 1, livre da cobertura de nuvens, estão representados na Figura 3. Ruídos visíveis, provenientes das linhas de varredura do TM, podem ser observados nas estimativas de CSS para os períodos de menores concentrações, em outubro/2010 e julho/2011. Isso possivelmente deve-se ao fato de que, nessas condições de baixas concentrações, a radiância emergente do ambiente aquático é muito menor, fazendo com que o impacto da baixa razão sinal-ruído do sensor TM seja maior. Tal ruído leva a imprecisões na estimativa da reflectância e, posteriormente, nas estimativas da CSS.

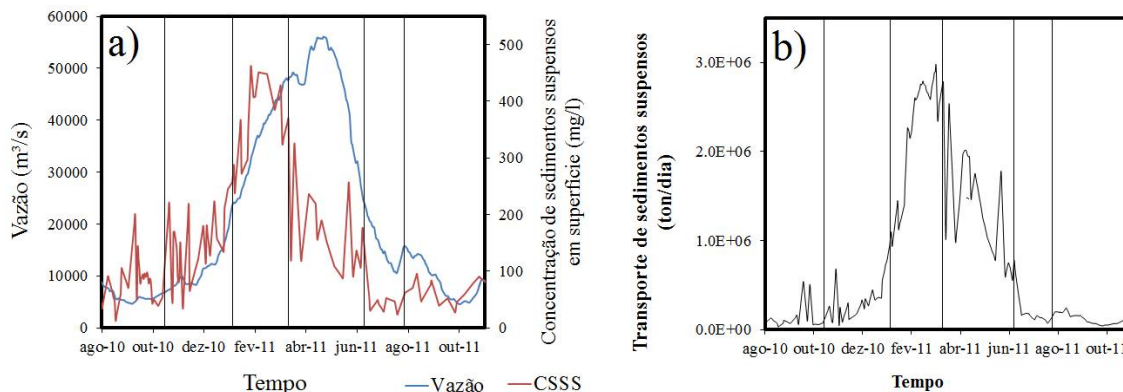


Figura 2. Séries de concentração de sedimentos suspensos (CSS) e vazão do ano hidrológico de 2010/2011 (a). Série de transporte de sedimentos (b). As linhas verticais pretas indicam as datas das imagens utilizadas.

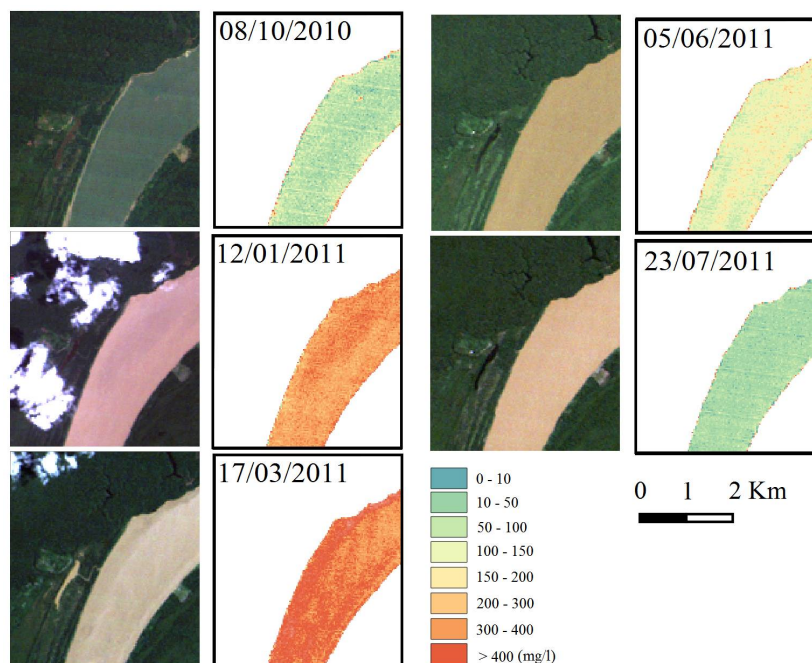


Figura 3. Composições coloridas TM1 (B), TM2(G) e TM3 (R) e estimativas da concentração de sedimentos suspensos em cinco diferentes fases da hidrógrafa, na área 1 (a localização desse trecho do rio Madeira está representada na Figura 1).

Em relação à dinâmica hidrossedimentar, novamente observa-se o padrão sazonal da CSS, com baixos valores (< 50 mg/l) durante as águas baixas, em outubro/2010 e julho/2011, e altos valores em janeiro/2011 e março/2011, confirmando a curvas apresentada na Figura 2. Além da variação temporal, nota-se que há diferentes padrões espaciais no decorrer do ano hidrológico. Nos períodos de maior transporte sedimentar, o canal apresenta uma maior variabilidade transversal e longitudinal de concentrações. Esse padrão é facilmente perceptível nas datas de 12/01/2011 e 17/03/2011, sendo também observável na imagem de 05/06/2011, mas em menor proporção. Tais variações não são provenientes do mecanismo de varredura *whiskbroom* do sensor TM, e devem estar relacionadas com variações na intensidade do fluxo no interior do canal.

A velocidade do fluxo pode interferir na concentração de sedimentos na superfície da água porque as partículas sólidas tendem a permanecer em partes mais próximas ao leito por atração gravitacional. Portanto, locais com maior velocidade mantêm os sedimentos suspensos mais próximos à superfície d'água, ao passo que menores velocidades de fluxo fazem com que as partículas se aprofundem mais na coluna de água. Esses padrões também podem ser observados em trechos mais extensos do rio, nas mesmas datas (Figura 4). A Figura 4 representa a área 2 (Figura 1), um trecho maior do canal do que a área 1, representada na Figura 3, mostrando que existem padrões de maior escala nas variações de CSS, tanto ao longo de transectos, como ao longo do perfil longitudinal do canal.

Nota-se a importante interferência das nuvens sobre as estimativas, tanto de nuvens espessas (*cumulus*), quanto nuvens mais finas, as quais são mostradas em maior detalhe nas Figuras 5 e 6. Aparentemente, o tipo da nuvem relaciona-se com o tipo de interferência produzida sobre as estimativas. Na Figura 5 podem ser observadas nuvens finas, que ainda permitem a identificação do alvo em superfície, nesse caso, ocorre a superestimação da CSS. Já nuvens mais espessas levam a subestimação (Figura 6).

A Figura 4 apresenta, além do canal fluvial do rio Madeira, um conjunto lacustre formado pelos lagos Sampaio e Bonfim, nas proximidades de Nova Olinda do Norte (AM). Embora o modelo não tenha sido elaborado para aplicação em águas de planícies de inundação, pretende-se avaliar suas estimativas de forma experimental.

Durante as águas baixas, no início do ano hidrológico (08/10/2010), os valores de CSS nos lagos encontram-se muito próximos aos do rio (Figura 4), com maiores valores ocorrendo próximos às margens. Esse padrão pode ser explicado pelo possível efeito de ressuspensão em águas rasas. Já em 12/01/2011, os valores de CSS do lago e do rio são semelhantes. Essa hipótese faz sentido quando se observa a situação hidrológica relativa ao período de enchente (Figura 2). Nesse caso ocorre um gradiente no sentido rio-planície, que propicia a entrada de água para a planície contendo valores elevados de CSS (200 – 400 mg/l).

Em 17/03/2011, ainda em situação de enchente, mas em momento mais próximo do pico de cheia (vazão máxima) (Figura 2), o rio Madeira continua a apresentar altos valores de CSS, mas os níveis de concentração no lago diminuem consideravelmente. A redução da concentração pode estar associada à decantação dos sedimentos que já adentraram a planície em momento anterior. Os próximos registros, em 05/06/2011 e 23/07/2011 mostram uma diminuição progressiva das concentrações, tanto no rio Madeira quanto na planície. Devido à diminuição do transporte e rebaixamento do nível d'água do rio Madeira, entende-se que a entrada de sedimentos para a planície tende a diminuir conjuntamente.

Assim como as nuvens, aparentemente as águas opticamente diferentes em relação às águas cujas feições espectrais são dominadas por sedimentos suspensos também levam a erros de estimativa. Isso pode ser observado na Figura 6, em que, há a ocorrência de floração de algas (*bloom*) em uma região do lago. As estimativas nessa área mostram valores elevados, ao passo que no restante do lago ocorrem valores menores. Pequenos valores de CSS para o lago nessa época são esperados, porque o período de entrada de água para a planície já passou, e o ambiente encontra-se em estado lântico, favorecendo a deposição dos sólidos suspensos.

Os erros de estimativas em locais cobertos por nuvens e no caso em que há a ocorrência de *florações* são esperados, visto que as características espectrais desses alvos diferem em relação às amostras utilizadas para geração dos modelos empíricos, alterando os valores de reflectância e das razões entre bandas. Portanto, entende-se que o uso adequado dos modelos parte da aplicação apenas em áreas livres da cobertura de nuvens e em águas cujas propriedades espectrais assemelham-se com as que foram utilizadas durante a modelagem.

Como os modelos foram calibrados a partir de amostras obtidas nos canais fluviais, onde a turbulência limita a formação de florações (REYNOLDS, 2006) entende-se que sua aplicação é adequada aos rios em todas as épocas do ano. Já sua aplicação a lagos perenes e

temporários em planícies de inundação pode gerar bons resultados apenas em condições de predomínio espectral da carga de sólidos suspensos.

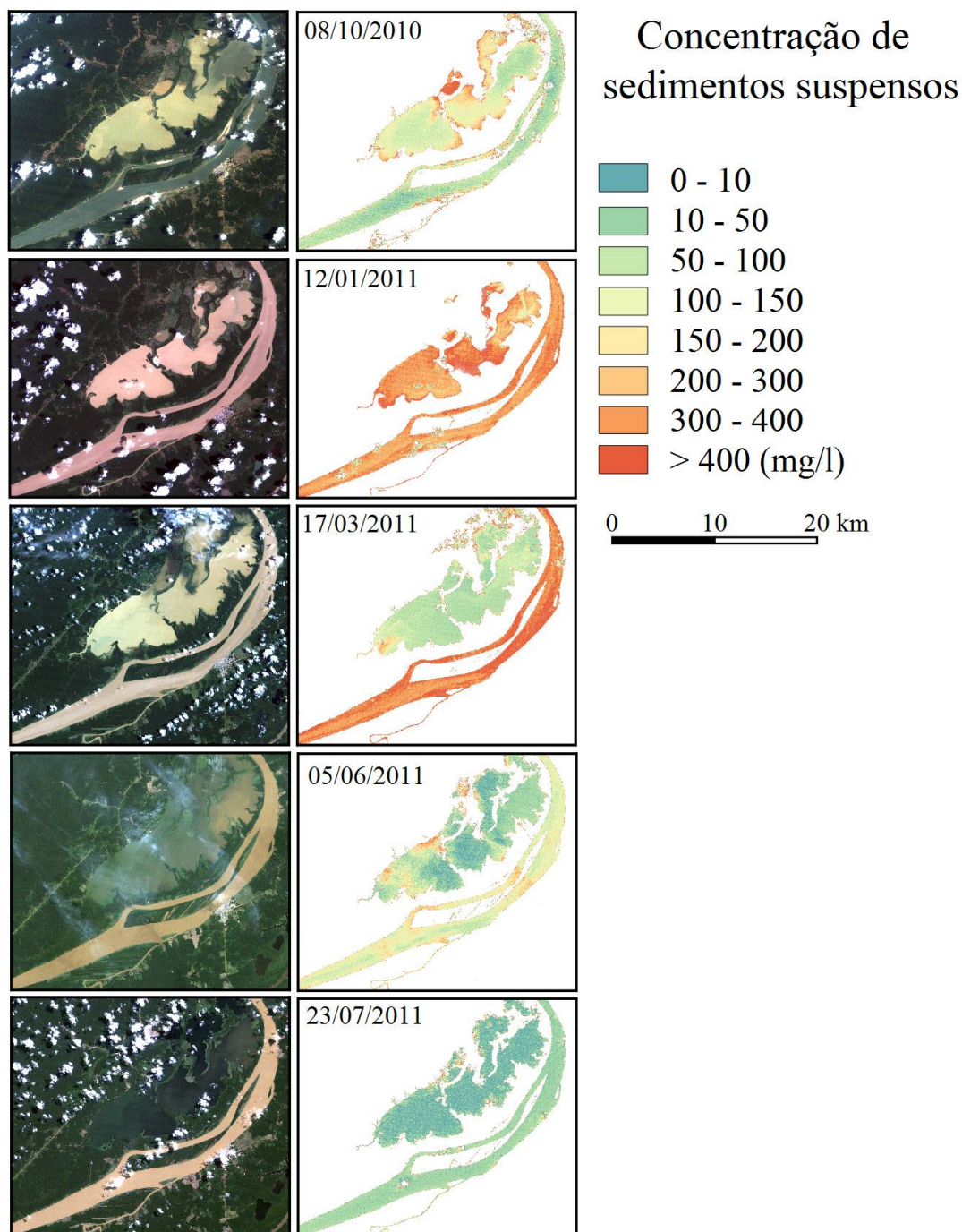


Figura 4. Composições coloridas TM1 (B), TM2(G) e TM3 (R) e estimativas da concentração de sedimentos suspensos em cinco diferentes fases do regime hidrológico na área 2 (a localização desse trecho do rio Madeira está representada na Figura 1).

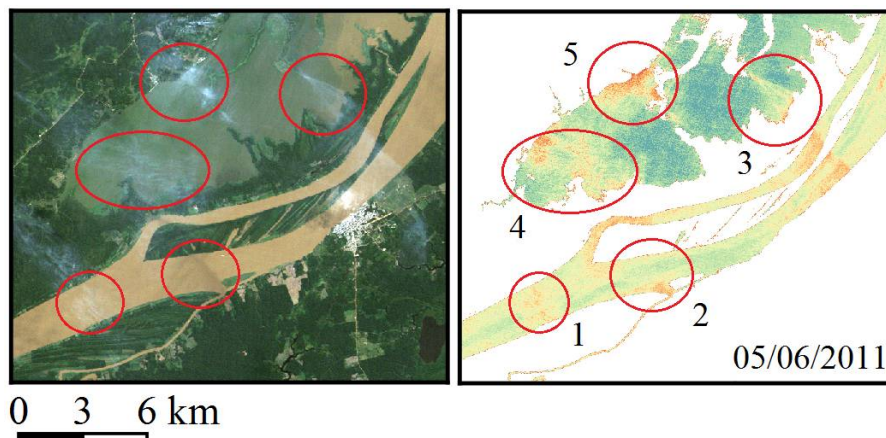


Figura 5. Composição colorida TM1 (B), TM2(G) e TM3 (R) e estimativa da concentração de sedimentos suspensos para a data de 05/06/2011. Observar o efeito de superestimação da CSS em lugares com cobertura de nuvens finas em 1, 3, 4 e 5 e um menor efeito, mas ainda visível em uma área sombreada por nuvens, em 2.

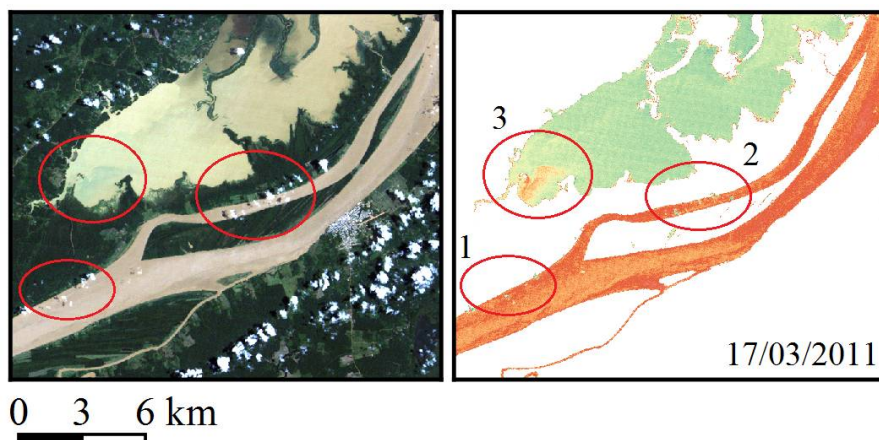


Figura 6. Composição colorida natural e estimativa da concentração de sedimentos suspensos para a data de 17/03/2011. Observar o efeito de subestimação da CSS em lugares com cobertura de nuvens espessas em 1 e 2. Observar um possível efeito de superestimação da CSS devido à maior concentração de fitoplâncton em 3.

4. Conclusões

Este trabalho permite concluir que:

- É possível avaliar a variação temporal da CSS do baixo rio Madeira a partir de imagens Landsat 5/TM, conforme as diferentes fases do regime hidrológico;

- É possível avaliar a distribuição espacial da CSS, sendo importante fazer algumas ressalvas: i) aos efeitos de ruídos provocados pelas das linhas de varredura do sensor TM; ii) os efeitos relativos à cobertura e sombreamento por nuvens e iii) à limitação da aplicação do modelos em sistemas aquáticos cujo comportamento espectral não seja dominado pelos sólidos inorgânicos em suspensão em algumas fases da hidrógrafa, como é o caso dos lagos de várzea;

- Embora o modelo para estimativa da CSS do rio Madeira tenha sido elaborado apenas com amostras de água coletadas no interior do canal do mesmo rio, sua aplicação em área de planície de inundação gerou resultados coerentes com o regime hidrológico, em algumas fases da hidrógrafa.

Referências bibliográficas

Espinoza Villar, R.; Martinez, J. M.; Guyot, J. L.; Fraizy, P.; Armijos, E.; Crave, A.; Bazán, H.; Vauchel, P.; Lavado, W. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. **Journal of Hydrology**, v. 444, p. 221–228, 2012.

Espinoza Villar, R.; Martinez, J. M.; Texier, M. L.; Guyot, J. L.; Fraizy, P.; Meneses, P. R.; Oliveira, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45 – 54, 2013.

Filizola N.; Guyot J. L. Suspended Sediment Yield in the Amazon Basin: an Assessment Using Brazilian National Data Set. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 22, p. 3207 - 3215, 2009.

Filizola, N.; Guyot, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 41, n. 4, p. 566 – 576, 2011.

Lobo, F. L.; Costa, M. P. F.; Novo, E. M. L. M. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian Waters impacted by gold mining activities. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 57 – 71, 2014.

Mangiarotti, S.; Martinez, J. M.; Bonnet, M. P.; Buarque, D. C.; Filizola, N.; Mazzega, P. 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**, v. 21, p. 341-355, 2013.

Martinelli, L. A.; Victoria, R. L. ; Devol, A. H. ; Fosberg, B. R. Suspended load in the Amazon Basin : An Overview. **GeoJournal**, v. 19, n. 4, p. 381 – 389, 1989.

Meade R. H. **Suspended sediment in the Amazon River and its tributaries in Brazil, during 1982-1984**. Denver: U.S Geological Survey Open file Report, 39 p. 1985.

Meade, R. H. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. **Quaternary International**, v. 21, p. 29 – 39, 1994.

Montanher, O. C. **Padrões espaço-temporais do transporte de sedimentos suspensos dos rios amazônicos de águas brancas: relações com o clima e mudanças na cobertura da terra**. 2016. 305 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2016.

Montanher, O. C.; Barbosa, C. C. F.; Novo, E. M. L. M. Integração de dados TM/LANDSAT e medidas in situ para estimativa de sedimentos em suspensão em rios amazônicos: um estudo de viabilidade. **Geografia (Rio Claro)**, v. 38, n.1, p. 175-188, 2013.

Montanher, O. C.; Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C. C. F.; Renno, C. D.; Silva, T. S. F. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat/TM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 29, p. 67-77, 2014.

Park, E.; Latrubesse, E. M. Modeling suspended sediment patterns of the Amazon river using MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 232-242, 2014.

Reynolds, C. S. **The ecology of phytoplankton**. Cambridge University Press, 535 p. 2006.

Wang, J. J.; Lu, X. X.; Liew, S. C. ; Zhou, Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1082–1092, 2009.