

## Uso de imagens Landsat para o monitoramento de partículas sólidas em suspensão em trechos de implantação das usinas hidroelétricas do rio Madeira

Lucas Cesar Figueiredo Hoepfner de Almeida<sup>1</sup>  
Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>2</sup>  
Aline Maria Alvarez de Moura<sup>2</sup>  
Rafael João Sampaio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/IGEO  
Caixa Postal 15001 - 12227-010 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
lucas.hoepfner@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE  
Caixa Postal 68501- 21941-972 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
otto@coc.ufrj.br, aline.alvarez@gmail.com, samprafael@gmail.com

**Abstract.** Environmental impacts due to the construction of a dam in a river stretch should be adequately assessed. Complementarily, the high sediment load of a river has a direct influence on its water flow and also on the corresponding sedimentological and morphological aspects of its evolution in the stretches before and after dams constructed with the purpose of generating hydroelectric energy power. Therefore, the understanding of the dynamics of the sediments that are displaced into the river associated with a contributing drainage basin is required to provide the necessary framework to evaluate the economic and energy potential of such investment with respect to hydroelectric power installed in this river. This study aims to evaluate the use of Geographic Information System tools - GIS and remotely sensed images for monitoring of suspended solids in the Madeira river basin. The focus is concentrated in this study only in the river patch. To reach the objective we conducted an analysis of the potential of NDWI (Normalized Difference Water Index) and also of a linear model, which evaluates the total suspended solids (TSS) based on the products obtained by the sensor Landsat OLI / TIRS, to estimate the TSS values. Later, field sediment concentration values collected spanning the years from 1987 to 2015 were correlated with scenes acquired for ten days along the referred time period. The best results achieved were obtained by NDWI calculated with the R and SWIR bands and with the linear model.

**Palavras-chave :** remote sensing, sediment, hydrology, sensoriamento remoto, sedimento, hidrologia

### 1. Introdução

O rio Madeira é o principal afluente da margem direita do rio Amazonas e um dos cinco rios mais volumosos do mundo. A sua bacia hidrográfica possui uma área de drenagem de 1.420.000 km<sup>2</sup>, que se estende da Cordilheira dos Andes à bacia amazônica brasileira. Esse valor corresponde a quase toda a área da bacia amazônica boliviana, abrangendo aproximadamente 66% do território da Bolívia (Carpio, 2001).

O rio Madeira possui grande número de quedas de águas no trecho a montante da cachoeira de Santo Antônio. Essas cachoeiras despertaram um interesse na região para exploração hidroenergética, que resultou na implantação do complexo hidrelétrico do rio Madeira. As usinas de Jirau e Santo Antônio, recém-inauguradas, foram as primeiras usinas desse complexo a serem construídas, possuindo uma capacidade instalada de 3.300 MW e 3.150 MW em Jirau e Santo Antônio, respectivamente (RIMA, Usinas Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau, 2015).

Uma característica marcante deste rio é sua elevada carga de sedimentos (Carpio, 2001). Estes são compostos por partículas pequenas, resultados de um processo de refinamento mais elaborado, bem como por partículas maiores, que não foram muito refinadas. Entre as principais razões dessa elevada carga, estão o relevo da bacia, o

regime hídrico do rio e a velocidade de escoamento. A planície de inundação da bacia, após passar por um processo de cheia, possui uma grande velocidade de escoamento que transporta os sedimentos.

No contexto de hidroelétricas, a presença da barragem faz com que os sedimentos tendam a se concentrar na área de passagem da água para a geração de energia (Miranda e Mauad, 2014). Como consequência, a velocidade de transporte de sedimentos diminui, fazendo com que as partículas se depositem mais rapidamente na área da barragem, concentrando-se no fundo e formando os ‘bancos de areia’. O acúmulo de sedimentos poderá aumentar os níveis de água, alagando lateralmente áreas mais próximas, como é o caso da usina hidroelétrica *Three Gorges Dam* (TGD), construída em 2003 no rio Yangtze, China. Estudos verificaram que a alteração dos fluxos de sedimentos à jusante da usina, através da redução do transporte e descarga de sedimentos, impactou toda a extensão do rio (1000 km) (Dai, 2013).

Diversos trabalhos utilizam o sensoriamento remoto para estudar o comportamento de sedimentos em corpos de água. Uma parte utiliza dados vetoriais para analisar a dinâmica das margens e dos bancos de areia (Teixeira *et al.*, 2009; Ataíde e Baptista, 2015), outras utilizam a resposta espectrais para estimação do total de sólidos em suspensão – TSS (Doxaran *et al.*, 2003; Min *et al.*, 2012; Long e Pavesky, 2013; e Mohanty *et al.*, 2016). Dentro desse segundo grupo, Martinez *et al.* (2009) estudou TSS para o rio Amazonas com imagens MODIS, enquanto Villar *et al.* (2012), também com imagens MODIS, analisou o rio Madeira.

Perante esse contexto, o presente trabalho propõe-se a estudar o uso de imagens Landsat para monitorar a pluma de TSS no rio Madeira mediante o emprego do índice de água - NDWI e de uma função logarítmica com dados coletados em campo.

## 2. Metodologia de Trabalho

As imagens espectrais utilizadas, livres de contaminação por nuvem, foram obtidas em datas próximas aos dias de coleta do posto Fazenda Vista Alegre (Latitude: -4° 53’ 50’’; Longitude -60° 01’ 31’’) da Agência Nacional das Águas (ANA). As imagens do Landsat foram obtidas no endereço virtual do Serviço Geológico Americano (USGS) (*earthexplorer.usgs.gov*), e os dados da ANA foram obtidos na plataforma *hidroweb*. A Tabela 1 resume os dados utilizados no trabalho.

**Tabela 1:** Descrição dos produtos utilizados

| Plataforma | Sensor   | Órbita/Ponto | Data de Aquisição | Data de medição em campo |
|------------|----------|--------------|-------------------|--------------------------|
| LANDSAT 5  | TM       | 230/063      | 06/08/1987        | 16/07/1987               |
| LANDSAT 5  | TM       | 230/063      | 23/07/1988        | 03/08/1988               |
| LANDSAT 5  | TM       | 230/063      | 12/09/1989        | 07/08/1989               |
| LANDSAT 5  | TM       | 230/063      | 25/08/2000        | 15/07/2000               |
| LANDSAT 7  | ETM+     | 230/063      | 04/08/2001        | 13/07/2001               |
| LANDSAT 7  | ETM+     | 230/063      | 06/07/2002        | 13/07/2002               |
| LANDSAT 8  | OLI/TIRS | 230/064      | 29/08/2013        | 04/06/2013               |
| LANDSAT 8  | OLI/TIRS | 230/064      | 16/08/2014        | 23/08/2014               |
| LANDSAT 8  | OLI/TIRS | 230/064      | 03/08/2015        | 03/05/2015               |

### 2.1 Processamento das imagens

O processamento das imagens Landsat seguiu os seguintes passos para obtenção dos produtos finais:

- a) aquisição das imagens;

- b) georreferenciamento e tratamento inicial;
- c) conversão do número digital em reflectância espectral;
- d) obtenção do NDWI e estimativa da concentração de sedimentos suspensos (S) a partir da reflectância;
- e) recorte das áreas de interesse;
- f) extração dos dados.

## 2.2 Índice de água normalizado - NDWI

O índice de água normalizado utiliza duas bandas espectrais, uma com comprimento de onda com centro em  $0,86 \mu\text{m}$  (NIR) e outra com centro em  $1,24 \mu\text{m}$  (SWIR). A relação algébrica do índice está representada pela Eq 1.

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (1)$$

onde  $\rho_{NIR}$  é a reflectância do infravermelho próximo, e  $\rho_{SWIR}$  é a reflectância no infravermelho distante.

Para o cálculo do NDWI, este trabalho utilizou, como banda de  $\rho_{SWIR}$ , o infravermelho afastado (*far infrared*) da plataforma Landsat (banda 5 no TM e ETM+ e banda 6 no OLI) e as bandas do vermelho (R) e do infravermelho próxima (bandas 3 e 4 no TM e ETM+ e bandas 4 e 5 no OLI, respectivamente), da mesma plataforma, como  $\rho_{NIR}$ . Os resultados obtidos foram comparados em todas as imagens, buscando-se o melhor resultado.

## 2.3 Estimativa da concentração de sedimentos suspensos

Vários estudos estimaram a concentração de sedimentos suspensos (S) a partir da reflectância da água (Mertes, 1993; Lorenzetti, 2007; Min, 2012;). Os estudos apontam a seguinte relação entre S (g/l) e a reflectância:

$$\log(S) = a + b \log(R(0,57 \mu\text{m})) \quad (2)$$

onde 'a' e 'b' são parâmetros do modelo obtido empiricamente por meio de dados coletados em campo, e R é a banda com comprimento de onda  $0,57 \mu\text{m}$ . Para este estudo, utilizaram-se os parâmetros encontrados por Tarssan (1987).

$$\log(S) = (3,08 \pm 0,27) + (1,07 \pm 0,14) \log(R(0,57 \mu\text{m})) \quad (3)$$

Como variável de entrada, foi adotada a banda verde da plataforma Landsat, que corresponde à banda 2 no sensor TM e ETM+ e à banda 3 no sensor OLI.

## 2.4 Delineamento experimental.

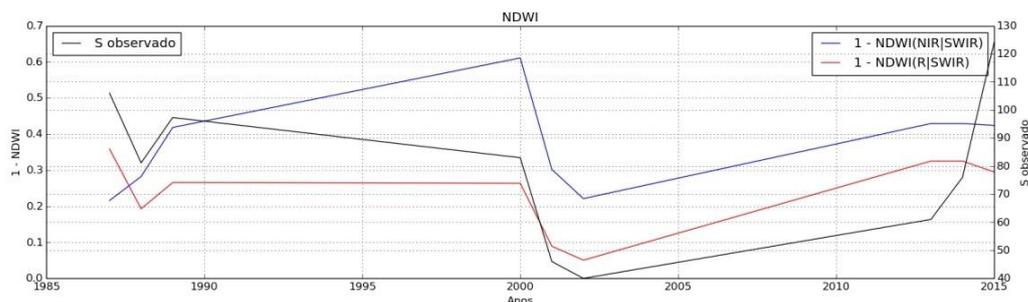
Estabeleceram-se 3 tratamentos: o primeiro corresponde ao NDWI calculado com as bandas do vermelho e do infravermelho afastado; o segundo diz respeito ao NDWI calculado com as bandas do infravermelho próximo e do infravermelho distante; e um terceiro está relacionado com S estimado pelo algoritmo logarítmico. Procedeu-se, então, traçando um transecto nas respectivas cenas, com 20 pontos, onde o primeiro está

na coordenada do ponto de coleta e o último na margem oposta do rio. Para cada ponto, extraiu-se o valor da variável registrada no píxel. A média desses valores representou a variável para toda a imagem.

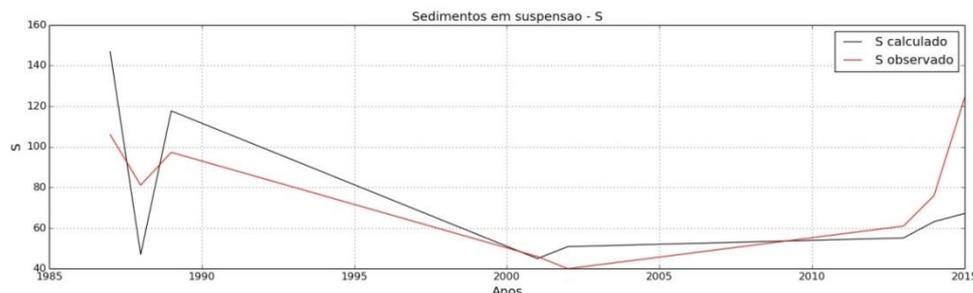
Na sequência, analisou-se a correlação dos valores obtidos para cada tratamento e o valor das variáveis estimadas mediante os dados obtidos em campo. Para tanto foram utilizados os procedimentos de Pearson, Kendall e Spearman.

### 3. Resultados e Discussão

As Figuras 1 e 2 apresentam a distribuição dos tratamentos em relação a concentrações de sedimentos obtidas em campo.



**Figura 1:** Distribuição do valor de NDWI para ambos os valores de índice de água, comparados ao S obtido em campo.



**Figura 2:** Valores de S obtidos para o modelo proposto em relação ao S coletado em campo.

O NDWI é sensível à cristalinidade da lâmina de água, de forma que, quanto maior a penetração da luz na água, maior será o valor do índice. Assim, a turbidez consequente do aumento da concentração de sedimentos é inversa ao valor de NDWI devido a menor cristalinidade da água. Dessa forma, para se correlacionar com os valores de S medidos e considerando que o NDWI varia de -1 a 1, extraiu-se os valores do complemento de NDWI, ou seja, operou-se com o cálculo  $1 - NDWI$ .

Pela Figura 1, nota-se que os valores de NDWI, para ambos os tratamentos, foram sensíveis a certas variações de S, representando bem o pico de decréscimo ocorrido no último quartil da década de 80 do século passado, bem como o decréscimo e o subsequente aumento de S evidenciados na primeira década de 2000. No entanto, o mesmo não foi observado no suave decréscimo de S ocorridos na década de 90 do século XX.

Na Figura 2, observa-se que o modelo logarítmico acompanhou as tendências de aumento e decréscimo de S na série temporal, inclusive para os anos 90, ao contrário do NDWI. Todavia o modelo subestimou os valores para o final da década de 80 e para o

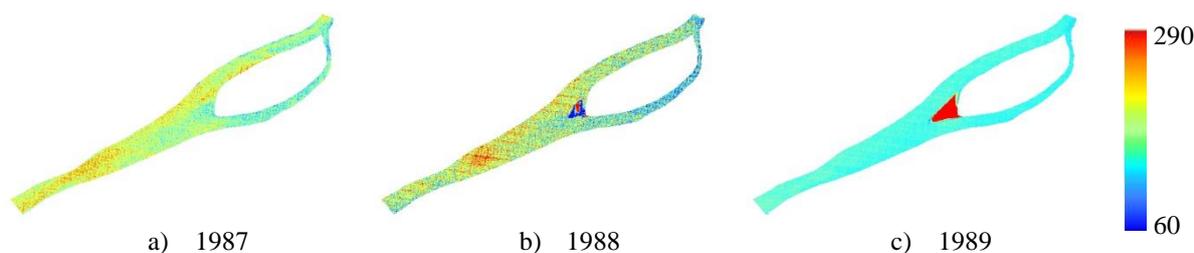
ano de 2015, assim como superestimou para o início dos anos 90 e para o primeiro quartil dos anos 00.

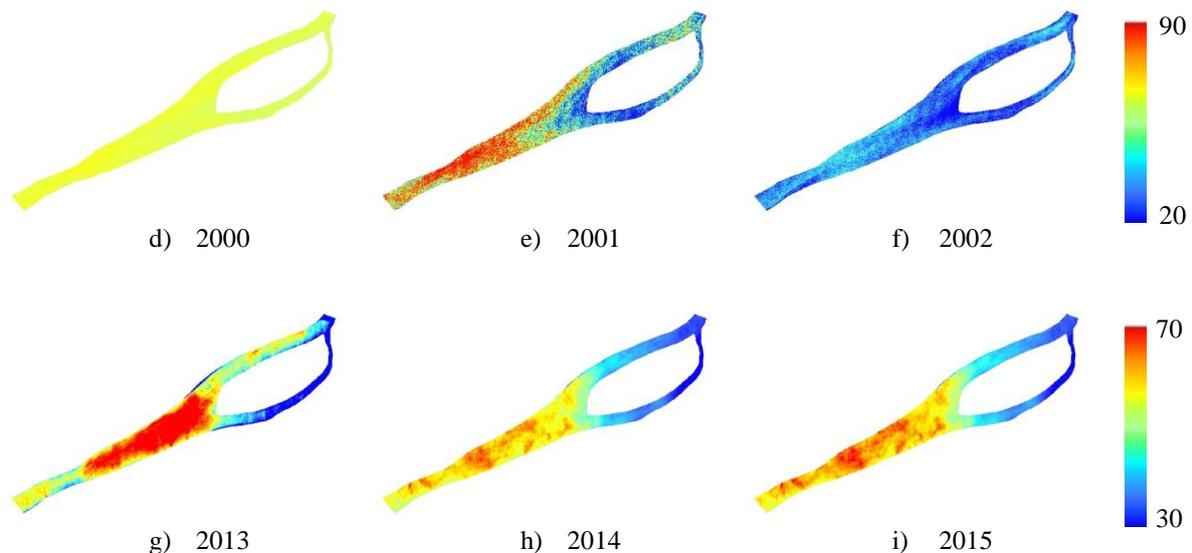
**Tabela 2:** Análise estatística dos resultados

| Metodologias      | Teste t | p-valor | R    | $\tau$ | $\rho$ |
|-------------------|---------|---------|------|--------|--------|
| NDWI (NIR - SWIR) | 0,65    | 0.53    | 0,24 | -0,06  | -0,1   |
| NDWI (R - SWIR)   | 2,61    | 0.03    | 0,70 | 0,28   | 0,37   |
| A. Logarítmico    | 1,84    | 0,12    | 0,60 | 0,57   | 0,74   |

A Tabela 2 mostra o resultado da análise estatística. O valor da estatística t e do nível de significância (p-valor) foram obtidos pelo método de correlação de Pearson. O alto valor de p mostra que não há correlação entre o NDWI, calculado com a banda NIR, e os dados obtidos em campo. Resultados com similar interpretação também estão refletidos nos valores negativos de Tau para a correlação de Kendall e do valor de Rho para correlação de Spearman. Para os demais tratamentos, os valores t e p-valor apontaram uma correlação mais robusta. A intensidade dessa relação, para o NDWI obtido com a banda do vermelho, foi a maior no teste Pearson, considerável no teste de Kendall e moderada no teste Spearman. Trabalhos como Hellweger (2004) identificam que a banda R tem uma alta correlação com a concentração de sedimentos suspensos. O modelo logarítmico apresentou uma correlação menor que o NDWI para a banda R na análise de Pearson, entretanto obteve os maiores valores de  $\tau$  e  $\rho$ , caracterizando uma forte correlação.

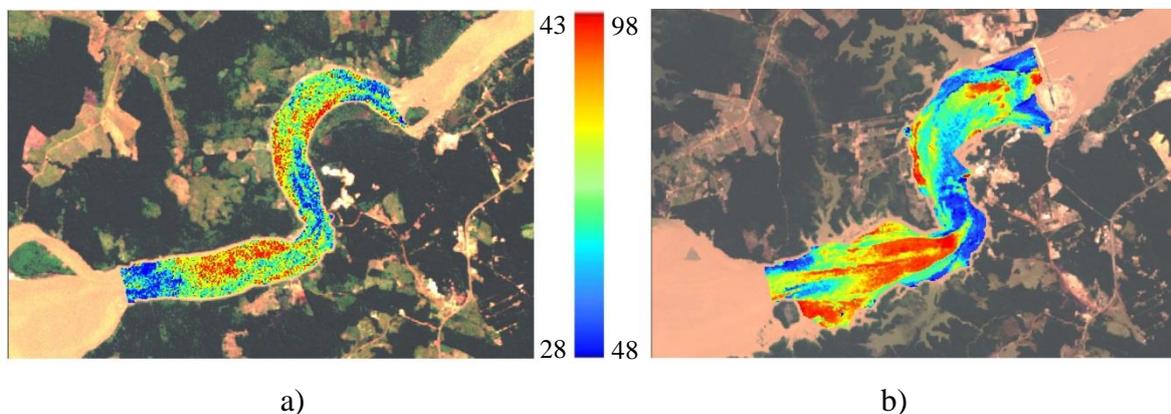
A partir de uma boa acurácia dos modelos de estimação das quantidades de sedimentos, é possível analisar o comportamento espacial das nuvens de partículas. Como exemplo, a Figura 3 apresenta as imagens obtidas a partir do modelo logarítmico aplicado à banda espectral verde para os anos analisados no estudo. O trecho apresenta a região da Fazenda Vista Alegre, local onde foram coletados os dados de campo. Na seqüência, é possível observar a movimentação das plumas de sedimentos no decorrer do tempo, podendo identificar pontos mais passíveis ao acúmulo ou a erosão de sedimentos. Na seqüência de imagens, coletadas nos anos 80 (Figura 2 – a, b e c), ao centro, pode-se acompanhar a formação de um banco de areia. Esse processo acontece em um intervalo de tempo relativamente curto, comprovando o que apresenta Teixeira (2009) ao estudar a movimentação das margens do rio Madeira. O autor escreve que a compreensão desses processos é de suma importância, entre outras coisas, por conta das comunidades ribeirinhas que existem na região e pela importância da hidrovia que opera no rio.





**Figura 3:** Concentração de sedimentos em suspensão no rio Madeira (escala em  $\text{g/m}^3$ ) para os anos de estudo.

A Figura 4 exemplifica a aplicação do modelo logarítmico para região da usina hidrelétrica de Santo Antônio. Pode-se notar a variação no movimento natural das plumas antes e depois da instalação da usina. Outro ponto pertinente é a resolução do sensor. A imagem da Figura 4 - a foi obtida a partir do sensor TM (Landsat 5), enquanto a Figura 4: b foi obtido do sensor OLI/TIRS (Landsat 8). Uma análise visual evidencia que a segunda apresenta uma maior suavidade das plumas. Essa constatação é consequência da melhor resolução radiométrica do Landsat 8 (16 bits) em relação ao Landsat 5 (8 bits).



**Figura 4:** Concentração de sedimentos em suspensão no rio Madeira ( $\text{g/m}^3$ ) para o trecho correspondente à usina hidrelétrica de Santo Antônio, sendo azul para os menores valores de S e vermelho para os maiores valores de S - a) ano 2000 b) ano 2015.

#### 4. Considerações finais

O presente trabalho utilizou imagens Landsat para analisar a relação do NDWI e de uma equação logarítmica aplicada à banda espectral verde com dados de sedimentos em suspensão coletados em campo. O resultado caracterizou o bom potencial do uso de sensoriamento remoto para quantificar a concentração de sedimentos suspensos no rio Madeira. Entretanto mais estudos devem ser desenvolvidos sequencialmente a este.

A boa correlação logarítmica com os resultados ilustra um potencial que pode ser explorado oportunamente com um maior número de coletas de dados *in situ*, buscando o ajuste da equação para o próprio rio Madeira. No mesmo contexto, uso de modelos mais complexos, que busquem contemplar toda a dinâmica fluvial do rio, podem ser uma alternativa. Esses caminhos serão analisados na continuidade deste estudo.

Por fim, esta pesquisa constatou a utilidade e a robustez do sensoriamento remoto para monitorar o transporte de sedimentos no rio Madeira. Essa ferramenta é um importante instrumento para entender o comportamento dos sedimentos no rio e, conseqüentemente, para contribuir na compreensão de alterações causadas na dinâmica fluvial como um todo. Assim sendo, ela pode se tornar um valioso instrumento de amparo a tomadas de decisões relacionadas, por exemplo, a grandes empreendimentos no rio Madeira, como as duas grandes usinas hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio, seja na estimativa do aporte de sedimentos, seja na estimativa da erosão a jusante das barragens.

### Agradecimento

Os autores agradecem, inicialmente, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de estudos ofertadas aos autores. Adicionalmente, é reconhecido o apoio da Agência Nacional de Águas e do Serviço Geológico Americano (USGS) pela disponibilização dos dados.

### Referências Bibliográficas

- Carpio, M. Hidrologia e sedimentos. In: **Águas Turvas Alertas sobre as Conseqüências Barrar o Maior Afluente do Amaz.** 2001. p. 51–69.
- Dai, Z.; Liu, J. T. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). **J. Hydrol.** v. 480, p. 10–18, 2013.
- D. Doxaran, J. Froidefond, and P. Castaing, "Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios," **Appl. Opt.** 42, 2623-2634 (2003).
- Espinoza, Villar, R.; Martinez, J.-M.; Le Texier, M.; Guyot, J.-L.; Fraizy, P.; Meneses, P. R.; De Oliveira, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **J. South Am. Earth Sci.**, v. 44, p. 45–54, 2013.
- Furnas, Orderbretch, **Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) das Usinas Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau** p.14, 2005
- Hellweger, F. L.; Sschlosser, P.; Lall, U.; Weissell, J. K. Use of satellite imagery for water quality studies in **New York Harbor**. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, v. 61, n. 3, p. 437–448, 2004
- Long, C. M.; Pavelsky, T. M. Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. **Remote Sens. Environ.**, v. 129, p. 197–209, 2013.
- Lorenzetti, J. A.; Negri, E.; Knopers, B.; Medeiros, P. R. P. Uso de imagens Landsat como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do Rio São Francisco. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 13. (SBSR).**, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3429-3436. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-16422-PRE/11000). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.18>> Acesso em: 09 nov. 2016.
- Mertes, L.; Smith, M.; Adams, J. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. **Remote Sens. Environ.**, v. 43, n. 3, p. 281–301, 1993.

Min, J.-E.; Ryu, J.-H.; Lee, S.; Son, S. Monitoring of suspended sediment variation using Landsat and MODIS in the Saemangeum coastal area of Korea. **Mar. Pollut. Bull.**, v. 64, n. 2, p. 382–390, 2012.

Mngiarotti, S.; Martinez, J.-M.; Bonnet, M.-P.; Buarque, D.; 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). **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.**, v. 21, p. 341–355, 2013.

Mohanty, P. K.; Pal, S. R. IRS data utilisation for estimation of turbidity level in Chilka lagoon , east coast of India. In: **22° Asian Conference on Remote Sensing, Singapore**. 2001.