

Uso de imagens LANDSAT como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco

João Antonio Lorenzzetti¹
Eduardo Negri²
Bastiaan Knopers²
Paulo Ricardo Petter Medeiros³

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
CEP: 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
loren@dsr.inpe.br

² Universidade Federal Fluminense – UFF
Departamento de Geoquímica
Morro do Valonguinho s/n, 24040-150 Niterói-RJ, Brasil
negri@dsr.inpe.br; geoknop@geoq.uff.br

³ Universidade Federal de Alagoas – UFAL/IGDMA
Laboratórios Integrados de Ciências do Mar e Naturais-LABMAR
57090-090 Maceió-AL, Brasil
prpm@fapeal.br

Abstract. The construction of a sequence of water reservoirs along the lower São Francisco river basin has caused a severe change in the supply of water and sediments to the coastal zone. We present in this paper a first attempt to use Landsat data to estimate de Suspended Sediment Content (SSC) of the coastal plume. A simple log model proposed by Tassan (1987) was used to convert the reflectance Landsat images (after proper atmospheric correction using the radiative transfer model 6S) into SSC maps. A comparison of Landsat derived and *in situ* measured SSC values indicate a good potential of using such methodology to support sediment dynamic studies being carried out by other groups in that region. An analysis of the SSC maps clearly shows that the coastal turbidity plume is being sustained by wind, wave and tidal current induced material resuspension originating from relict sedimentary deposits off the river mouth, rather than from river supply itself.

Palavras-chave: Suspended Sediments, coastal plume, Landsat, dam impacts, São Francisco River, Brasil

1. Introdução

Os fluxos de material em suspensão e a composição de elementos biogênicos trazidos à zona costeira por descarga estuarina afetam a eficiência da ciclagem de matéria, a magnitude da produtividade primária e a composição das populações dos produtores primários. Assim, alterações, naturais ou antropogênicas, sobre o regime de descarga dos rios na região de sua foz tem conseqüências para o desenvolvimento da rede trófica e o recrutamento de peixes em estuários e na zona costeira adjacente (Ittekkot et al. 2000).

Com a construção de uma série de barragens no médio-baixo Rio São Francisco, que se inicia em Sobradinho, uma grande parte dos sedimentos que anteriormente chegava à zona estuarina e costeira, é retida nesses reservatórios. Além do mais, como essas barragens se localizam em ambiente climático semi-árido, ocorre apreciável perda de água dos reservatórios por evaporação. A reposição de água e materiais por tributários ao longo deste trecho até a foz é muita baixa (Medeiros, 2003). A perda de vazão e descarga de sedimentos

após a construção de barragens invariavelmente resulta em decaimento da produtividade primária, perda de recursos pesqueiros, desestabilização/erosão da costa, e intrusão de água marinha nos seus deltas (Knoppers et al, 2006).

No período de 1980 a 2000, a vazão do Rio São Francisco foi reduzida em 30 %. Com a construção da última barragem do Xingó em 1995, localizada à 180 km da Foz, a vazão foi regularizada, eliminando a variabilidade sazonal da descarga fluvial. Nos últimos 20 anos, as concentrações, cargas e as descargas específicas de matéria em suspensão foram reduzidas de 70 a 5 mg/l, de 7 a 0.3×10^6 t/ano e de 4.2 a 0.2 t/km²/ano, respectivamente, em função da retenção dos materiais pelas barragens (Medeiros, 2003).

A fim de se obter um melhor entendimento sobre a dinâmica da pluma costeira do rio São Francisco e sua relação com os forçantes físicos de energia externa (ventos, maré, ondas e descarga fluvial), pesquisas vem sendo realizadas com ênfase principal na análise de dados coletados *in situ* na região estuarina e costeira adjacente à foz. Com vistas a contribuir com esses esforços, começamos recentemente investigar o uso de imagens de satélite na caracterização espacial da pluma de sedimentos e na tentativa de estimar as concentrações de sedimentos presentes na região da pluma e zona costeira. Com a calibração de algoritmo de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e a disponibilidade de um grande banco de imagens Landsat no INPE que se inicia nos anos 70 será possível, em princípio se verificar como a construção das represas afetou a descarga de sedimentos na foz. Assim, o objetivo do presente trabalho é a apresentação dos resultados da primeira tentativa de calibração de algoritmo de estimação de CSS via imagens Landsat para essa região.

2. Material e Métodos

2.1 Dados *in situ* e imagens Landsat

Os dados *in situ* de CSS foram obtidos por meio de campanhas de campo com coleta de amostras de água superficiais com coletor Tipo Van Dorn e armazenadas sob gelo à bordo até posterior filtragem através de filtros de fibra de vidro Tipo Whatman GF/F (diâmetro 47 mm). As determinações gravimétricas foram de acordo com Strickland e Parsons (1972). A comparação dos dados de CSS *in situ* com os dados gerados a partir das imagens Landsat foi realizada para as seguintes datas de coletas indicadas na Tabela 1. Nessa tabela estão indicadas as imagens Landsat utilizadas na comparação. Na ausência de imagem coincidente com data das coletas de campo, buscou-se a imagem mais próxima.

Tabela 1: Datas das coletas em campo e respectivas imagens Landsat encontradas

Data da coleta de campo	Data da imagem mais próxima*	Sensor orbital	Hora da Passagem (GMT)	Centro da Imagem	Órbita
10/02/2001	17/02/2001	TM Landsat 5	12:09:36	10.11S 035.89W	90241 D
19/09/2001	05/09/2001	ETM+ Landsat 7	12:18:09	10.12S 035.86W	12726 D
12/11/2000	31/12/2000	TM Landsat 5	12:09:16	10.11S 035.91W	89542 D

2.2 O processamento digital das imagens Landsat

a) Processamento digital padrão

Inicialmente entrou-se com o modelo de projeção indicado nos arquivos GeoTiff associados às imagens (UTM/SAD69). Em seguida as imagens foram registradas utilizando-se como referência a Carta Náutica No. 1000, Brasil Costa Leste de Maceió ao Rio Itariri, da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira, na escala 1 : 311.492. Para gerar as cartas usadas, as imagens foram recortadas de tal forma que a região extraída foi definida pelas coordenadas: latitude 10° 15' S/ 10° 45' S e longitude 36° 8' W/ 36° 45' W. Para se inserir sobre cada uma das imagens os vetores correspondentes às isolinhas de batimetria de 10, 20, 50 e 200 metros, a carta náutica foi digitalizada e registrada. Com o arquivo digital registrado desta carta, os vetores isobatimétricos foram gerados através do módulo de Edição Vetorial do software ENVI/IDL. Por último, foram inseridas sobre a carta digital as anotações descritivas da imagem, as isolinhas batimétricas e uma grade geográfica.

b) Conversão dos níveis digitais em radiância e correção atmosférica

Na faixa do visível, grande parte da radiação coletada pelo satélite sobre cenas oceânicas é luz espalhada na atmosfera. Evidentemente, esta radiação difusa não contém informação sobre a água, sendo portanto ruído que deve ser minimizado. Para eliminar ou minimizar os efeitos atmosféricos, as imagens foram submetidas ao modelo de correção atmosférica 6S (Vermote et al., 1997). A fim de calcular o campo de luz espalhada pela atmosfera mais provável para a imagem sendo processada, o modelo 6S requer a entrada de um conjunto de parâmetros que identifiquem o horário da aquisição da imagem, o sensor e banda espectral utilizados, modelo atmosférico mais adaptado às condições da cena, entre outros. A partir destes cálculos, o 6S gera uma imagem “corrigida” dos efeitos atmosféricos, onde o campo de luz difusa calculado para cada canal do satélite é subtraído do sinal observado. A acurácia da correção realizada depende, entretanto, da validade do modelo atmosférico escolhido em relação àquele presente na região durante a aquisição da cena.

A distribuição de níveis de cinza presentes na cena é bastante ampla em decorrência de nuvens, com valores bastante altos de nível digital e pixels de terra ou água, com valores geralmente mais baixos. A fim de se obter um melhor contraste sobre o oceano é necessário que se faça um ajuste no histograma de cada banda. Para se obter uma representação mais próxima das cores naturais observadas, para cada imagem foi gerada uma composição colorida RGB (Red-Green-Blue) com as bandas 3, 2 e 1, respectivamente. Um exemplo dessa composição RGB é mostrado na figura 1.



Fig. 1. Sub-cena imagem TM LANDSAT, órbita ponto 214/67 da Foz do Rio São Francisco. Data: 05 de setembro de 2001. Horário: 12:18:09 GMT. Composição colorida RGB (TM 3,2,1). Linhas sobre a água representam as isobatimétricas de 10, 20, 50 e 200 m.

e) Conversão da radiância em refletância

A partir das imagens LANDSAT, convertidas em valores de radiância por canal e corrigidas dos efeitos atmosféricos de absorção e espalhamento pelo modelo 6S, foram geradas imagens de refletância para serem utilizadas nos algoritmos de concentração de sedimentos. Esta conversão para refletância foi realizada através do módulo BandMath do software ENVI/IDL. Um exemplo desta conversão é mostrado na **Figura 2**, para a banda TM 2 da imagem de 05/09/2001.

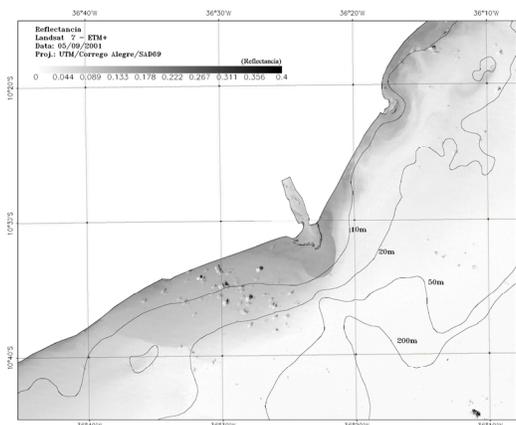


Figura 2. Imagem de refletância derivada a partir dos dados TM2 para 05/09/2001. Valores entre 0 e 0.4.

d) Conversão da refletância em concentração de sedimento em suspensão

Os primeiros estudos com o objetivo de derivar algoritmos para se estimar a concentração de sedimentos em suspensão (S) na água a partir de dados de refletância obtida remotamente começaram a ser realizados na década de 70 (p. ex. Ritchie et al., 1976, Holyer, 1978, Amos and Alfoldi, 1979). Inúmeros outros trabalhos aparecem nas décadas de 80 e 90, mostrando a complexidade dos processos de interação (reflexão, refração, absorção e espalhamento) da luz com superfície líquida, com a água pura, com os sedimentos em suspensão e substâncias dissolvidas mais os pigmentos clorofilados e a necessária correção para os efeitos atmosféricos (p. ex. Khorran, 1981, Tassan, 1987, Mertes et al., 1993).

A estimativa de S através de medidas remotas depende da correlação entre esta variável e a refletância da água (Novo et al. ,1989, a, b). Vários trabalhos indicam a seguinte relação funcional entre S e a refletância

$$\log (S) = a + b \log (R(.570 \mu\text{m})) \quad (1)$$

Por exemplo, como descrito por Tassan (1987), experimentos realizados no mar Adriático, forneceram a seguinte equação, que faz uso da refletância medida na banda TM-2

$$\log (S) = (3.08 \pm 0.27) + (1.70 \pm 0.14) \log (R(.570)) \quad (2)$$

O uso da banda 3 LANDSAT, resulta segundo Tassan (op. cit.) na seguinte relação

$$\log (S) = (2.70 \pm 0.08) + (1.06 \pm 0.05) \log (R(.660)) \quad (3)$$

Embora diversos outros algoritmos venham sendo propostos, no presente trabalho analisamos os resultados da aplicação dos algoritmos (2) e (3), com as constantes indicadas. Estamos no momento trabalhando com medidas de campo radiométricas e de S para a calibração de um algoritmo regional.

3. Resultados e Conclusões

Um exemplo de imagem de S, gerada por aplicação do algoritmo logarítmico (2) é mostrada na **Figura 3** para a data de 05/09/2001.

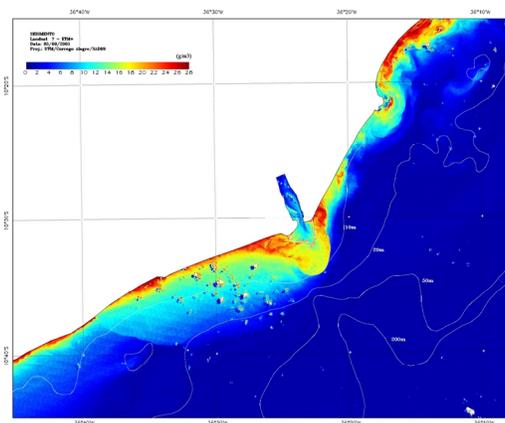


Figura 3. Concentração de sedimentos em suspensão no mar (g m^{-3}) obtida a partir dos dados TM2 Landsat para 05/09/2001 e algoritmo logarítmico (2).

A aferição dos dois algoritmos logarítmicos (eqs. 2 e 3) propostos por Tassan (1987) foi realizada comparando-se para três datas as estatísticas, média e desvio padrão das concentrações de sedimentos em suspensão, observadas *in situ*, contra valores retirados de diversas caixas, 10x10 pixels, escolhidas nas imagens processadas na mesma região amostrada em campo. É importante ser ressaltado, entretanto, que estas comparações não são absolutas, uma vez que as datas de coleta em campo diferem por alguns dias com as imagens. Estamos, assim assumindo que pouca variação nos padrões de sedimentos tenha ocorrido na escala temporal de dias. A comparação realizada serve, no entanto, como um indicativo da acurácia do procedimento de sensoriamento remoto na estimativa da concentração de

sedimentos. O algoritmo (2) foi aquele com melhor performance. A **Tabela 2** mostra os resultados das comparações com o uso deste algoritmo.

Tabela 2. Comparação dos valores de CSS medidos *in situ* versus valores obtidos por satélite através da equação (2).

Data da coleta <i>in situ</i>	CSS médio	Desvio Padrão	Data da imagem	CSS médio Imagem	Desv. Padr. Imagem
12/11/2000	10.05385	5.606695	31/12/2000	7.738374	4.411962
10/2/2001	7.59	6.368871	17/2/2001	8.0994	4.9436
19/9/2001	14.6432	9.504689	5/9/2001	12.60426	6.046186

A análise das imagens disponíveis mostra que, de maneira geral, as maiores concentrações de sedimentos em suspensão são encontradas numa faixa contínua próxima da costa e em águas com profundidades inferiores a 10m. Com exceção da imagem de setembro de 2001, o padrão dos sedimentos observado na região foi difuso e, não em forma de pluma na desembocadura, sem a presença marcante de frente de sedimentos. É interessante notar as baixas concentrações de sedimentos presentes no interior do rio São Francisco nas proximidades da desembocadura (**Figura 3**). A presença de maiores concentrações de sedimentos em regiões afastadas da desembocadura, tal como, por exemplo observado na imagem de setembro de 2001, sugere que as concentrações de sedimentos na região da foz e zona costeira adjacente não são diretamente determinadas pela descarga na foz do rio, sendo resultado de um processo de re-suspensão de sedimentos de fundo produzido por efeito de turbulência causada por vento, correntes de marés e ondas na zona de baixas profundidades próxima à costa.

Para o conjunto de imagens analisado, a data de 05 de setembro de 2001 foi o único caso observado de uma pluma de sedimentos em suspensão, bem caracterizada na desembocadura do rio. Somente nesta data, se observou uma forte frente de sedimentos, perfeitamente delimitada e separando a pluma de sedimentos da água oceânica azul adjacente. A análise da maré local mostrou que esta imagem corresponde a uma situação de maré vazante e de sizígia, com correntes de vazante próximas de seu máximo. Assim, é possível que a imagem tenha sido tomada logo após uma forte drenagem dos sedimentos presentes no interior da desembocadura ou nas regiões rasas próximas à foz por efeito da turbulência causada pelas fortes correntes. A posição mais afastada da frente de sedimentos se apresenta à frente da desembocadura, ultrapassando um pouco a isobatimétrica de 10 m. Na região da frente de sedimentos, pode-se observar a concentração de sedimentos variar de aproximadamente 18 g m^{-3} para 2 g m^{-3} em algumas dezenas de metros. Uma outra frente de sedimentos, menos intensa que a anterior, é visível na parte mais a oeste desta região. Uma razoável concentração de sedimentos em suspensão é vista na zona costeira ao norte da desembocadura até uns 15 m de profundidade.

Como continuidade aos trabalhos iniciais reportados nesse artigo, pretendemos calibrar modelos para a estimativa de CSS para maiores concentrações, tais quais presentes na região da foz do São Francisco antes do fechamento das barragens a partir dos anos 80. Para grandes concentrações de sedimentos, alguns trabalhos como o de Doxaran et al. (2003) mostram a necessidade de se incluir bandas espectrais de ondas longas, até o infravermelho próximo. O algoritmo sugerido nesses casos é do tipo $\text{CSS} = a \cdot \exp(bx)$, onde x é agora uma razão de

refletâncias nas faixas de 855 nm(TM4) e 555nm(TM2). A determinação dos valores das constantes a e b nesse algoritmo deverá ser realizada por levantamento radiométrico *in situ*, feito em conjunto a coleta em campo e em laboratório, com a simulação de grandes concentrações de sedimentos em tanque adequado.

Com a implementação desse novo algoritmo, pretendemos processar uma seqüência de imagens Landsat da região da foz do São Francisco, parte do acervo de imagens do INPE, começando em meados dos anos 70. Esperamos que a análise dos resultados desse processamento possa contribuir para um melhor entendimento do processo de alteração no balanço de sedimentos da região com a construção das barragens.

Agradecimentos: Agradecemos o apoio financeiro ao Projeto do Milênio Estuários- CNPq Processo 420050/2005-1.

Referências bibliográficas

Amos, C.L. and Alfoldi, T.T. The determination of suspended sediment concentration in a macrotidal system using LANDSAT data. **J. Sedim. Petrol.**, vol. 49, p. 159, 1979.

Holyer, R.J. Towards universal multispectral suspended sediment algorithms. **Remote Sensing of Environment**, vol. 7, p. 323-338, 1978.

Ittekkot, V.; Humborg, C. e Schäffer, P. Hydrological alterations and marine biogeochemistry: A silicate issue? **Bioscience**, vol. 50, p. 776-782, 2000.

Khorrán, S. Water quality mapping from Landsat digital data. **Int. J. Remote Sens.**, vol. 2, p. 145-154, 1981.

Knoppers, B. ; Medeiros, P.R.P. ; Souza, W.F.L. de ; Jennerjahn, T. The São Francisco Estuary, Brazil. In : **Handbook of Environmental Chemistry**, Vol.5 -H, p. 51-70, 2006.

Medeiros, P.R.P. Aporte fluvial, transformação e dispersão da matéria em suspensão e nutrientes no estuário do Rio São Francisco, após a construção da Usina Hidroelétrica do Xingó, AL/SE. **Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Geociências (Geoquímica), Universidade Federal Fluminense**, pp. 163, 2003.

Mertes, L.A.K.; Smith, M.O. and Adans, J.B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon river wetlands from Landsat images. **Remote Sens. Environ.**, vol. 43, p. 281-301, 1993.

Novo, E.M.M.; Hanson, J.D. and Curran, P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **Int. J. Remote Sens.**, vol. 10(7), p. 1283-1289, 1989a.

Novo, E.M.M.; Hanson, J.D. and Curran, P.J. The effect of viewing geometry on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **Int. J. Remote Sens.**, vol. 10(8), p. 1357-1372, 1989b.

Ritchie, J.C.; Schiebe, F.R. and McHenry, J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 8, p. 85-102, 1976.

Strickland, J.D.H and Parsons, T.R. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bull. **Fish. Res. Brd. Canada**, vol. 167, 2nd Ed., 1972.

Tassan, S. Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for marine application. **Int. J. Remote Sensing**, vol. 8(10), p. 1455-1478, 1987.

Vermote, E.F.; Tanre, D.; Deuzé, J.L.; Herman, M.; and Morcrette, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview., **IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.** vol. 35(3), p. 675-686, 1997.