

## COMPORTAMENTO DA DISPERSÃO SEDIMENTAR NO ALTO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS ATRAVÉS DE DADOS MULTIESPECTRAIS

Alvaro José Reis Ramos<sup>1</sup>, Jessyca Fernanda dos Santos Duarte<sup>2</sup>, Juliana Costi<sup>3</sup>

<sup>1,3,4</sup>Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Av. Itália km 8 – Campus Carreiros, Rio Grande - RS – Brasil, alvaroramos85@hotmail.com, ju.costi@gmail.com; <sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos – SP – Brasil, duarte.jessyca@gmail.com

### RESUMO

Plumas continentais são massas de água de baixa densidade formadas por componentes sólidos no meio aquático. Sua variação e composição diferem em função das características presentes no complexo o qual pertencem. O presente estudo objetivou analisar a concentração total de sólidos em suspensão na região da Lagoa dos Patos através da avaliação de reflectância nas plumas costeiras apoiado em algoritmos logarítmicos de transformação. Foi possível observar variações estacionais na concentração de sólidos totais, assim como diferenças estatisticamente significativas entre as médias para as amostras de pixels analisadas, na ordem de  $F = 5,66$ . A correlação de Pearson entre concentração de sólidos e pluviosidade total foi de 0,6784, indicando relação moderada entre as variáveis. As informações obtidas satisfazem o padrão encontrado em estudos relacionados ao tema para o local, qualificando a metodologia de aplicações numéricas de modelos de transformação como importante fonte de dados para avaliação de fatores abióticos em ambientes costeiros.

**Palavras-chave** — Sensoriamento remoto, plumas, algoritmo logarítmico, hidrossedimentologia.

### ABSTRACT

*Continental plumes are low density water masses formed by solid components in the aquatic environment. Their variation and composition differ in function of characteristics present in the complex in which it belongs. The present study aimed to analyze the total concentration of suspended solids at Lagoa dos Patos-RS through the evaluation of reflectance in the coastal plumes supported by transformation logarithmic algorithms. It was possible to observe seasonal variations in the concentration of total solids, as well as statistically significant differences between the means for the analyzed pixel samples ( $F = 5.66$ ). The Pearson correlation between solids concentration and total rainfall was 0.6778, indicating a moderate relation between the variables. The information obtained satisfies the pattern found in studies related to the theme for the region, qualifying the methodology of numerical applications of transformation models as an important data source for the evaluation of abiotic factors in coastal environments.*

**Key words** — Remote sensing, plumes, logarithmic algorithm, hydrosedimentology.

### 1. INTRODUÇÃO

As plumas costeiras podem ser classificadas como fluviais e estuarinas. Nas fluviais existe domínio da descarga do rio sobre os efeitos de marés resultando em uma liberação direta de água doce continental em direção ao mar. No outro caso, os efeitos das marés no estuário promovem misturas da maior parte da água e sedimentos provindos da drenagem continental [1]. Os dois tipos de plumas poderão ocorrer associados a um estuário devido às variações de descarga e amplitudes de maré.

A composição dos sedimentos que resultam na formação de plumas em estuários varia notadamente de acordo com a cobertura e uso do solo na bacia de drenagem e as condições físico-químicas do complexo, como pH e salinidade, e atividades realizadas, como pesca e navegação. Existe uma grande variedade de matéria orgânica, nutrientes para diversos organismos, sólidos inorgânicos, além de possíveis poluentes, como metais pesados adsorvidos [2].

A interação da água doce com os processos costeiros e o aporte de materiais podem contribuir para a manutenção de ambientes favoráveis à reprodução e desenvolvimento de espécies, sustentando padrões de transporte ou deposição de materiais. Muitos estudos apresentaram evidências da influência da descarga provenientes dos rios na intensificação das atividades biológicas e manutenção dos estoques pesqueiros em estuários e zonas costeiras [3].

A partir do que foi exposto, e da ampla cobertura da costa brasileira, se destaca particularmente o sensoriamento remoto como ferramenta que passou a adquirir, nas últimas décadas, grande aceitação no meio acadêmico em função do acesso a hardwares, software e produtos gratuitos como as imagens de satélites, aspectos interferométricos, entre outros, complementando as análises e aplicações, principalmente em estudos que requerem elevadas demandas espaciais [4].

Inúmeros autores determinaram a concentração total de sólidos em suspensão, utilizando bandas espectrais do sensor TM [5]; do Landsat e do MODIS-AQUA [6-7], ou ainda mais de uma banda utilizando aritmética de bandas, por exemplo, razão e somatório de bandas, [8-9] encontrando correlações satisfatórias. Segundo Novo [10] a

faixa do vermelho é mais comumente utilizada já que as partículas em suspensão provocam um aumento da refletância da água com o aumento da concentração o máximo de reflectância ocorre em 500 e 700 nm.

Sendo assim, o presente estudo busca avaliar os padrões de variação na concentração de sedimentos suspensos (CSS) ao longo da lagoa dos Patos e sua relação com a formação das plumas localizadas na plataforma continental do Sul do Brasil (SBS).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

Uma das maiores lagoas costeiras do mundo, a Lagoa dos Patos é uma laguna estrangulada, localizada na costa sul do Brasil entre 30° S e 32° S. A lagoa possui orientação NE - SO com uma extensão de aproximadamente 250 km e uma largura média de 40 km, apresentando uma área de aproximadamente 10.360 km<sup>2</sup> [11].

### 2.2. Aquisição de dados espaciais

A análise espacial foi realizada a partir de imagens LANDSAT, sensor ETM+, com resoluções geométricas de 30 metros, órbita ponto 221 82 e datas de aquisições entre os anos de 2014 a 2018. No estudo se priorizou a obtenção de imagens de com boa resolução de forma gratuita. Todas as imagens selecionadas apresentavam boa visibilidade e baixa incidência de nuvens, porém, houve a necessidade de se realizar correção atmosférica com a intenção de efetuar a retirada do efeito de dispersão da energia eletromagnética nas partículas de água suspensas na atmosfera. Ocorreram ajustes de projeção das imagens para o Sistema de Coordenadas Planas UTM de acordo com sua localização.

### 2.3. Processamento e métodos numéricos

#### 2.3.1 Calibração radiométrica

A calibração radiométrica foi realizada no Envi 4.5, onde os valores digitais (ND) da imagem foram convertidos em valores de radiância, através da equação (1).

$$(1) L = L_{min} + (L_{max} - L_{min}) \cdot Q_{cal} / Q_{calmax}$$

Onde: L = radiância espectral; L<sub>min</sub> = radiância espectral correspondente ao Q<sub>cal</sub> = 0; L<sub>max</sub> = radiância espectral correspondente ao Q<sub>cal</sub> = 255; Q<sub>cal</sub> = radiância calibrada e reescalada para o intervalo 0 a 255, em unidades de número digital e Q<sub>calmax</sub> = valor máximo de radiância, reescalada para número digital.

#### 2.3.2 Correção atmosférica

A correção atmosférica foi feita pela ferramenta FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), onde os valores de radiância foram

convertidos para valores de reflectância, assim, podendo-se amenizar os efeitos atmosféricos, principalmente as nuvens, que agem como barreiras para a radiação solar, ocasionando o chamado espalhamento atmosférico. Visto que as nuvens são obstáculos para a radiação solar, as imagens usadas foram recolhidas de acordo com a estação do ano, uma para cada período, com menor cobertura de nuvens na região.

#### 2.3.3 Aplicação do NDWI (Normalized Difference Water Index)

O índice de diferença normalizada da água tem como objetivo neste estudo delinear ambientes de águas abertas, passando a determinar o limiar presente entre água e terra (vegetação aparente no ambiente terrestre e solos), permitindo deste modo realizar a maximização da reflectância comum da água utilizando o comprimento de onda do verde, tentar diminuir a baixa reflectância dos corpos de água no infravermelho próximo e realçar o contraste entre a água e a cobertura vegetal, proporcionada pelo infravermelho próximo. O índice geral de NDWI é obtido segundo a equação (2).

$$(2) NDWI = (YV2 - YIV4) / (YV2 + YIV4)$$

Onde: YV2 corresponde ao comprimento de onda do verde, e YIV4 ao infravermelho próximo, na equação representada pelas bandas 02 e 04 do sensor utilizado.

O estudo utilizou as definições de Gao [12], no qual se estabeleceu que os valores de NDWI variam de -1 a 1 e o número 0 como limiar, sendo assim, a cobertura encontrada é considerada água se NDWI se apresentar em intervalos inferiores a zero, para valores de índice superiores ao limiar zero, a respectiva cobertura não é considerada água.

#### 2.4 Transformação de valores de reflectância em concentração de sedimentos

Diferentes estudos que tinham por objetivo derivar algoritmos para criação de estimativas da concentração de sedimentos em suspensão na água, se partindo de informações de refletância, tiveram início principalmente a partir da década de 70, sendo notórias as pesquisas realizadas por Ritchie *et al.* [13] e Holyer [14]. Inúmeros outros trabalhos surgem posteriormente, nas décadas de 80 e 90, e passam a mostrar a alta complexidade nos processos de interação (reflexão, refração, absorção e espalhamento) da luz com superfície da água.

Para Novo *et al.* [15], as estimativas de sólidos em suspensão total através de medidas sensores remotos dependem da correlação existente entre esta variável e a refletância da água. Indicando assim, a relação presente na equação (3).

$$(3) \log(S) = a + b \log(R(570 \mu m))$$

Embora diferentes algoritmos venham sendo propostos, no presente estudo foi implementado o algoritmo logarítmico utilizado por Tassan [16], em experimentos realizados no mar adriático fornecendo a equação (4), que utiliza a reflectância medida em sensor TM.

$$(4) \log(S) = (3.08 \pm 0.27) + (1.70 \pm 0.14) \log(R(570))$$

Após a geração dos modelos de transformação de reflectâncias, foram aplicados testes estatísticos em ambiente R, com a coleta de diferentes classes de pixels correspondentes dentro da imagem, para avaliação e delimitação das informações.

### 3. RESULTADOS

No período estudado foi possível avaliar 17 imagens, coletadas entre os anos de 2014 e 2018, sendo selecionadas 04 imagens para cada ano, exceção do ano de 2018, onde apenas uma imagem apresentava padrões aceitáveis para aplicação das transformações com incidência de nuvens abaixo de 10%. O índice de diferença normalizada da água se mostrou bastante satisfatório para discriminação nas frações de plumas superficiais na região (figura 01), assim como obtenção da área molhada total máxima dentro do complexo da lagoa dos Patos.

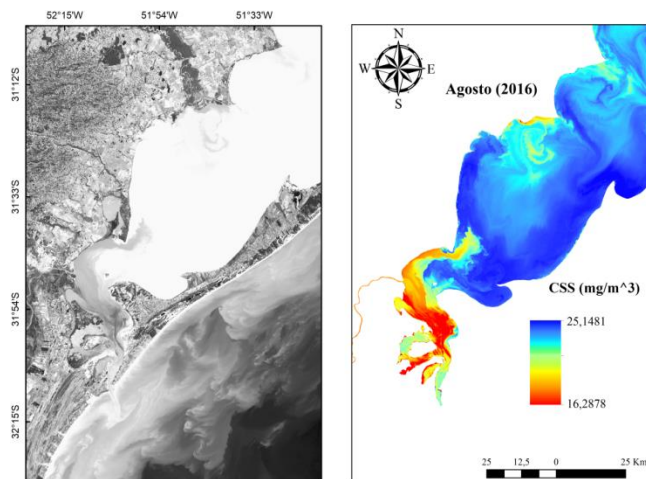


Figura 01. Máscara de CSS a partir do NDWI para 22 de Agosto de 2016.

A variação sazonal na concentração de sedimentos no delta salobro localizado no canal São Gonçalo ficou evidente após a aplicação do algoritmo (figura 02). É possível observar, após a coleta de pixels amostrais e aplicação de testes estatísticos, diferenças notórias dentro de um mesmo mês para anos intercalados. A média total de concentração de sólidos em suspensão na região durante o período analisado foi 19,28 (mg/m<sup>3</sup>), variando estacionalmente possivelmente em função de diferentes fenômenos atmosféricos no atlântico sul, que resultam em diferenças de padrões de ventos e consequentemente na vazão dos rios que compõem o complexo.

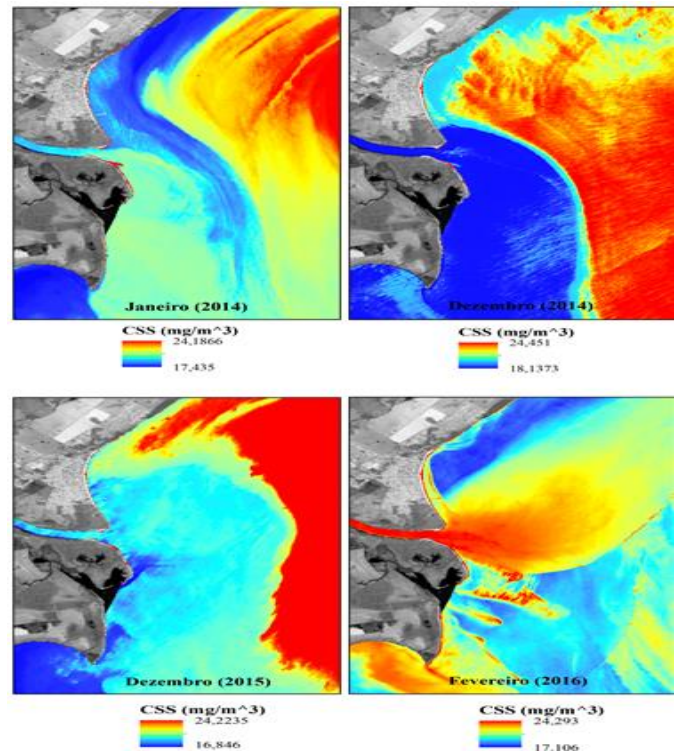


Figura 1. Variação na concentração de CSS no canal São Gonçalo.

As variações nas médias de CSS estão intimamente relacionadas com as taxas de vazão dos rios localizados no complexo, assim como a formação e moldes das plumas da região. De maneira geral, os resultados obedecem aos padrões comumente encontrados na área de estudo, corroborando com informações descritas por Costi *et al.*[17] em seu estudo que buscava avaliar a mudança nas concentrações de sólidos suspensos na lagoa dos Patos e elaboração de um algoritmo regional, evidenciou que as maiores áreas e concentrações de sólidos totais foram encontradas durante o período do inverno na plataforma sul, e que estes efeitos variam concomitantemente com a maior vazão dos rios. Desta forma a concentração de sólidos para a formação de plumas apresenta um caráter oscilante anualmente, conforme descrito por Soares & Mooler[18], em estudo que buscava verificar a variação de plumas na plataforma continental sul, identificaram que existem um alto fluxo de água doce proveniente da lagoa dos Patos em direção à plataforma que culmina em formação de plumas densas, principalmente no período do inverno e primavera, pelo alto fluxo de massas e correntes, ressaltando a variabilidade interanual na concentração sedimentar.

### 4. DISCUSSÃO

Diferentes estudos evidenciam de maneira clara e objetiva a concentração média de sólidos em suspensão em ambientes continentais, é notória a importância do levantamento de dados *in situ* para esta finalidade elaborando, através de

algoritmos regionais, resultados condizentes com a realidade. Diante da dificuldade na busca por informações em campo, os usos de dados provenientes de sensores multiespectro se mostram bastante eficientes e adequados à realidade acadêmica atual, apoiadas em pesquisas que permeiam processos computacionais de numerosa escala de dados. Em ambientes marinhos e oceânicos, por conta da elevada escala espacial, o uso de dados de baixa resolução espacial e elevada resolução espectral como bases de informação para condições iniciais de contorno possuem relativa importância. No presente estudo, a partir destas fontes de informação ficou evidente o papel desempenhado pelos agentes abióticos influenciando sobremaneira na formação de plumas continentais na lagoa dos patos.

## 5. CONCLUSÕES

Existem variações estacionais dentro da região, e mesmo dentro de uma mesma estação em diferentes períodos ao longo do ano, porém é nítida a diferença de concentração entre os sedimentos transportados no período do inverno se comparado às outras estações, onde diferentes fatores podem ser responsáveis por esta variação. Dentre os fatores que podem influenciar nas mudanças de concentração dos sólidos suspensos estão o regime de vazão no ambiente, oscilações de ventos e correntes, variação de marés, além dos fenômenos atmosféricos resultantes dos ENOS influenciando no atlântico sul. A pesquisa encontrou evidências satisfatórias e condizentes com informações descritas no estudo da arte para taxas médias de sólidos suspensos, porém vale ressaltar a realização de pesquisas mais aprofundadas que permeiam a utilização de distintas variáveis quantitativas e tempos de simulação relativamente maiores, para comprovação efetiva dos modelos de transformação dos rasters a partir do algoritmo logarítmico, tornando o estudo mais preciso.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Mann, K.H. & Lazier, J. R. N. Dynamics of marine ecosystems. 1° ed. Blackwell Scientific Publications, Boston, 466(pp.), 1991.
- [2] Esteves, F.A. Fundamentos de Limnologia. 2° ed. Rio de Janeiro: Interciência, 601 (pp.), 1998.
- [3] Mann, K.H. & Lazier, J.R.N. Dynamics of marine ecosystems, Biological-Physical Interactions in the Oceans. 3°ed. Blackwell Scientific Publications, Boston, 512 (pp.), 2010.
- [4] Lo, C.P. & Yeung, A.K.W. Concepts and Techniques of Geographic Information Systems 2° ed., Ph. Series in Geographic Information Science, Prentice-Hall, 544 (pp.), 2008.
- [5] Mendes, C.A.B.; Haertel, V.; Hartmann, C.; Centeno, J.A.S. Estimativa de parâmetros de qualidade de água através de técnicas de sensoriamento remoto e métodos de análise multivariada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 06. (SBSR), 1990, Manaus. Anais. São José dos Campos: INPE, 1990. p. 840-849.
- [6] Shi, W. & Wang, M. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008. *Geophysical research letters*, vol 36, n. 7, 05 (pp.), 2009.
- [7] Caroline, P. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, v. 30, n. 5, 379-392 (pp.), 2010.
- [8] Pavelsky, T.M. & Smith, L.C. Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada, *Water Resour. Res.*, vol 45, n.11, 16 (pp.), 2009.
- [9] Otávio, C.M. Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens Landsat 05. 2013,145 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.
- [10] Novo, E.M.L.M. Comportamento Espectral da Água. In: Meneses, P.R.; Madeira Netto, J.S. (Org.). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 203-222(pp.), 2001.
- [11] Kjerfve, B.C. Comparative oceanography of coastal lagoons. *Estuarine variability*. vol. 03, n.02, 63-81(pp.), 1986.
- [12] Gao, B. NDWI- a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, n.05, 257-266(pp.), 1996.
- [13] Ritchie, J.C.; Schiebe, F.R.; Mchenry, J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 08, 85-102(pp.), 1976.
- [14] Holyer, R.J. Towards universal multispectral suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, vol. 7, n. 08, 323-338(pp.), 1978.
- [15] Novo, E.M.M.; Hanson, J.D.; Curran, P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 10, n.07, 1283-1289(pp.), 1989.
- [16] Tassan, S. Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for marine application. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 08, 1455-1478(pp.), 1987.
- [17] Costi, J.; Moraes, B.C.; Marques, W.C. A regional algorithm for investigating the Patos Lagoon coastal plume using Aqua/MODIS and oceanographic data. *Marine Systems & Ocean Technology*. vol. 25-37(pp.), 2017.
- [18] Soares, I.; Moller, O.O. Low-frequency currents and water mass spatial distribution on the southern Brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, v. 21, n. 12, 1785-1814(pp.), 2001.