

## Variabilidade espaço-temporal do material em suspensão na Baía de Santos e áreas adjacentes com auxílio de imagens de satélite

Maria Fernanda Coló Giannini<sup>1,2</sup>  
Áurea Maria Ciotti<sup>1</sup>  
Joseph Harari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Pça Infante Don Henrique, s/n – São Vicente – SP, Brasil  
fernandacgiannini@hotmail.com  
ciotti@clp.unesp.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande - FURG  
Av. Itália, km 8 – Rio Grande – RS, Brasil

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo – IOUSP  
Pça do Oceanográfico, 191 – São Paulo – SP, Brasil  
joharari@usp.br

**Abstract.** The remote sensing techniques are a potential method for studies of water bodies and their constituents. The aim of this work was to identify synoptically the spatial heterogeneity of Total Suspended Matter (TSM) in Santos Bay through the images of CCD sensor in CBERS-2 satellite, converted into maps of TSM concentration. In situ data of TSM were also obtained and related with meteorological and tidal conditions, to compare with image data. As far as we know, this is the first attempt of this kind of application for the CCD sensor. The images processing included the geographical and atmospheric correction, and analysis of spectral features of different image targets. An index to the TSM was generated from an algorithm available in the literature, based on physical theories of aquatic bio-optics, which generated equivalent values to the *in situ* data. The images obtained from the index were classified, discriminating areas in Santos Bay with different TSM concentrations. The spatial patterns of observed TSM were related to meteorological and tidal conditions, showing that it is possible to observe synoptically the space-time variations of TSM in the interior of Santos Bay through the CBERS-2 satellite images. These analyses have low cost and could be easily applied in environmental monitoring programs.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, Cor do Oceano, Material em Suspensão Total (MST), CBERS, Remote Sensing, Ocean Color, Total Suspended Matter (TSM), CBERS

### 1. Introdução

O manejo da qualidade da água em estuários é relacionado, muitas vezes, às propriedades óticas da água, que refletem a contribuição diferencial de material particulado orgânico e inorgânico, assim como matéria orgânica dissolvida (e.g., Amann et al., 1989). A quantificação do material em suspensão total (MST) torna-se importante, visto que esse material afeta as taxas de produtividade primária, o ciclo de nutrientes e pode carregar poluentes e outros materiais (Miller & McKee, 2004; Hakanson, 2006). Os chamados constituintes opticamente ativos na água interagem com a irradiação espectral. O material em suspensão espalha a luz eficientemente nas faixas do verde e vermelho (aproximadamente 550 e 650nm, respectivamente), assim, a reflectância da luz nessas bandas aumenta com o aumento do MST (Bukata et al., 1995).

A Baía de Santos, e o complexo estuarino adjacente, estão localizados na costa sul do Estado de São Paulo (23°30'5" S - 24°S; 46°05'W - 46°30'W) e abriga um importante pólo econômico, principalmente de atividades industriais e de recursos pesqueiros, além de ter grande valor turístico. De fato, o maior porto brasileiro (de Santos) e um complexo industrial altamente desenvolvido (em Cubatão) estão situados no canal estuarino principal (Abessa et al, 2001). Por isso, a Baía de Santos (Figura 1) recebe substâncias orgânicas e inorgânicas de

diferentes fontes, incluindo a descarga dos canais estuarinos, do emissário submarino e de águas costeiras adjacentes. A principal fonte externa relatada para o MST são os dois canais de Santos e São Vicente (Moser, 2002), durante períodos de alta descarga, mas com diferentes fluxos, devido ao maior tamanho do canal de Santos (Moser et al., 2005; Ancona, 2007). A ressuspensão de sedimentos locais também torna-se importante durante altas velocidades da corrente (e.g., Ferreira, 2005; Moser, 2002).

Um pouco mais complexo é o papel dos eventos meteorológicos na distribuição e ressuspensão do MST, como direção e velocidade do vento. O monitoramento de uma região dinâmica como a Baía de Santos, deve incluir amostragens *in situ* e modelos numéricos. O sensoriamento remoto pode complementar estes estudos, provendo informações sinópticas sobre o MST superficial em águas costeiras (e.g. Fischer & Doerffer, 1987; Doerffer et al, 1989; Dekker et al, 2001). Os principais conjuntos de dados utilizados nesta área são aqueles derivados dos sensores TM a bordo do satélite Landsat. Em 1999, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) iniciou o programa CBERS, com sensores apresentando resolução espectral e espacial similares ao TM do Landsat, contribuindo assim para os estudos do MST em ambientes costeiros.

A presente proposta visa identificar sinopticamente a heterogeneidade espacial do MST na Baía de Santos através de imagens do satélite CBERS-2 convertidas em mapas de concentração de sedimentos de superfície. Até onde sabemos, essa é uma aplicação ainda inédita para o sensor CCD. A viabilidade dessas medidas foi comparada com medidas *in situ* de MST em relação às condições meteorológicas e de maré, a fim de encontrar padrões de distribuição desse material na Baía de Santos.

## 2. Materiais e Métodos

Os dados *in situ* foram coletados em 19 estações indicadas pela figura 1. No total, foram obtidos 16 conjuntos de dados distribuídos em oito campanhas de coleta: Março e Agosto/Setembro de 2006 e 2007, incluindo uma coleta em quadratura e uma em sizígia a cada mês, separadas em superfície e fundo. Para tal amostragem, foram utilizadas duas embarcações, de modo a garantir uma maior simultaneidade dos dados em radiais perpendiculares à linha das praias. A concentração de MST e sua fração orgânica (%MO) foram analisadas através de métodos gravimétricos, de acordo com APHA (1985). Os dados foram analisados por ANOVA de 3-vias, onde os fatores usados para explicar a variável dependente foram a data da coleta, a condição de maré e a profundidade de coleta, a procura da existência de padrões de distribuição, ou uma interação entre estes fatores.

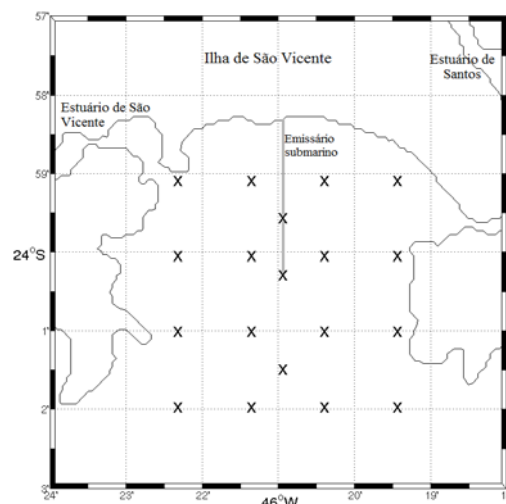


Figura 1. Desenho amostral – Baía de Santos, São Paulo – Brasil

Velocidade e direção do vento e taxas de precipitação, utilizados no trabalho, foram obtidos através dos resultados do modelo meteorológico global do NCEP/NCAR (disponibilizados na internet), cujas saídas foram centradas nas coordenadas 45°W e 22.5°S (este modelo tem resolução de 2.5° em latitude e longitude).

As imagens de satélite foram obtidas do sensor CCD a bordo do satélite CBERS-2 no site do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>), totalizando 14 imagens. Após um controle de qualidade (que considerou a cobertura de nuvens e a qualidade da composição BGR), o total foi reduzido a 7 imagens. Estas foram submetidas a correções atmosféricas (cortesia do Prof. Dr. Flavio Ponzoni), através do modelo 5S via SCORADIS (Zullo Jr., 1994), e georreferenciamento, acarretando na eliminação de 5 imagens, restando apenas 2 para análise espacial. O processamento e análise foram realizados com o software Spring 4.3.3 e seus pacotes.

Dekker et al. (2001) propuseram um algoritmo para estimar o MST utilizando as bandas 2 e 3 do Landsat, que correspondem às faixas do verde e vermelho. O modelo semi-analítico gerado é uma função exponencial, onde a média das bandas 2 e 3 é a variável independente. O satélite Landsat possui aplicações semelhantes ao CBERS e, considerando a área de estudo equivalente à apresentada por Dekker et al. (2001), utilizamos a média das bandas 2 e 3 do CBERS para gerar um índice logarítmico, através do módulo de programação do Spring denominado LEGAL (Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra). O índice foi utilizado para a geração de mapas de distribuição de sedimentos que foram submetidos à segmentação e classificação não-supervisionada. Esta diferencia porções de água do complexo estuarino e da Baía de Santos, apresentando cores diferentes para cada classe. As classes geradas são apenas comparações espaciais em cada imagem e não entre as imagens. O resultado da classificação foi descrito em uma tabela, indicando os grupos formados.

### 3. Resultados e discussão

Os dados meteorológicos mostraram uma situação relativamente estável para o período amostrado (tabela 1). Os valores representam médias incluindo os dias da coleta e 3 dias anteriores, com 4 medidas diárias, apresentando assim, altos desvios padrão e grandes variações num mesmo dia. Portanto, estes dados são usados apenas comparativamente.

Tabela 1. Condições meteorológicas nos períodos das coletas de campo

Data/Maré	Velocidade (m/s) e direção do vento	Precipitação (mm/dia)
Março 2006 - Quadratura	1,6 – NE e NW	123,83
Março 2006 – Sízígia	2,25 – NE e SE	95,48
Agosto 2006 – Quadratura	1,9 – NE e NW	0,14
Agosto 2006 – Sízígia	2,41 – NE e SE	0,48
Março 2007 – Quadratura	1,32 – NE e NW	54,27
Março 2007 - Sízígia	1,6 – NW	113,43
Setembro 2007 – Quadratura	2,92 – NE e SE	2,21
Setembro 2007 – Sízígia	2,87 – NE e SE	0,14

Os dados *in situ* sugerem algumas interações entre os fatores. Para o MST houve uma interação entre a data de coleta e a maré, e esta com a profundidade, não havendo uma sazonalidade significativa, nem um padrão delimitado pela maré. Os maiores valores, no geral, foram encontrados na sízígia, porém com nível significativo apenas nas águas de fundo. Em relação à porcentagem de matéria orgânica, suas proporções foram significativamente maiores nas marés de quadratura o que, supostamente, se deve à ressuspensão de material inorgânico do fundo durante a sízígia, podendo ser observada uma relação inversa entre o

MST e sua fração orgânica quando agrupadas todas as amostras. Esta relação é mais robusta para os dados de superfície (figura 2a).

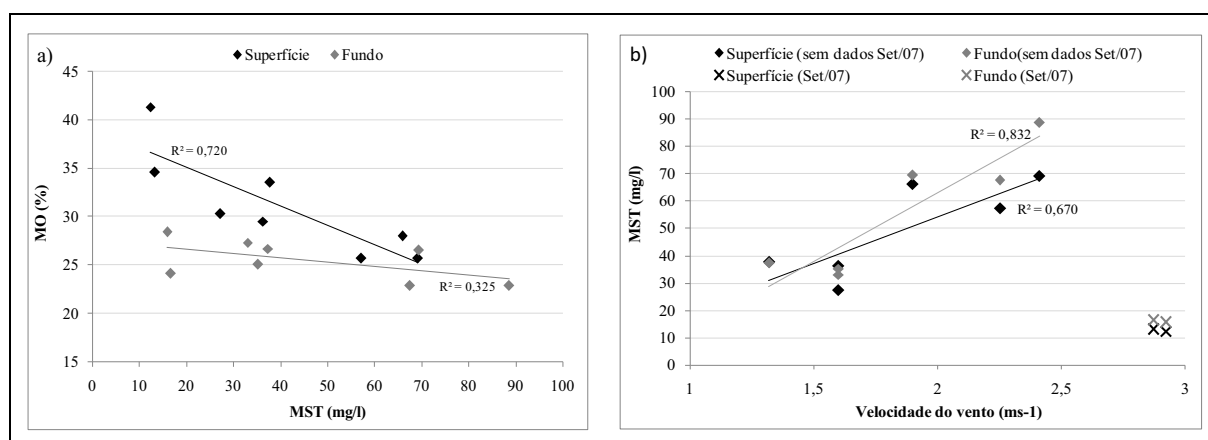


Figura 2. Relação entre o MST em todas as amostras e sua fração orgânica, em média (a), e relação entre o MST médio e a velocidade do vento (b). As linhas representam a tendência, quando excluimos os dados referentes a Setembro de 2007 (ver legenda).

Algumas relações foram encontradas entre MST e %MO com dados de vento (Figura 2a), sendo estes inversamente proporcionais, quando os valores de Setembro de 2007 são excluídos. Nesta campanha, a proporção média de MO é muito maior do que as outras, sugerindo um grande aporte de matéria orgânica em suspensão, como detrito ou fitoplâncton, exportados dos canais estuarinos. Já a precipitação não apresentou a relação esperada com a MO, indicando que o modelo não permite relações com a descarga dos canais estuarinos, fato já registrado anteriormente (Moser, 2002; Ancona, 2007).

A variabilidade do MST *in situ* mostrou padrões para as médias, porém, tanto a velocidade como a direção do vento, foram altamente variáveis ao longo de um único dia, ou seja, as campanhas apresentaram diferentes condições de vento para cada estação. Todavia, as condições médias da baía se relacionam com ventos de mesoescala (Figura 2b). Os dados de direção do vento não indicaram mudanças bruscas nos dias de coleta, nem a entrada de vento sul que causaria alguma turbulência e mistura. Assim, os dados de vento não parecem explicar os padrões encontrados.

As duas imagens processadas e utilizadas para a análise espacial são de 27/07/04 e 26/07/05, ambas portanto de inverno, e as alturas da maré nestas datas são apresentadas na tabela 2. O horário indicado na tabela refere-se ao horário local.

Tabela 2. Tabela de maré no dia das imagens

Data	Horário passagem	Maré	Altura (m)
27/07/04	10:14h	Quadratura	01:06h – 1,0
			05:53h – 0,4
			12:23h – 1,2
			20:58h – 0,6
26/07/05	10:12h	Sizígia	04:36h – 1,1
			12:51h – 0,2
			17:54h – 1,1
			23:51h – 0,6

Após o processamento das imagens a partir do índice escolhido  $(\ln(b_2 + b_3)/2)$  para destacar o material em suspensão, estas foram visualizadas no modo monocromático e são apresentadas na figura 3. Os valores médios de reflectância entre as bandas usadas no índice

variaram entre 0,033 e 0,057 dentro da baía para a imagem de 2004, e entre 0,041 e 0,063 para a de 2005. Com o algoritmo de Dekker et al (2001), obtivemos valores de MST entre 5,91 e 36,26 mg/l, os quais são da mesma ordem de magnitude dos dados observados *in situ*.

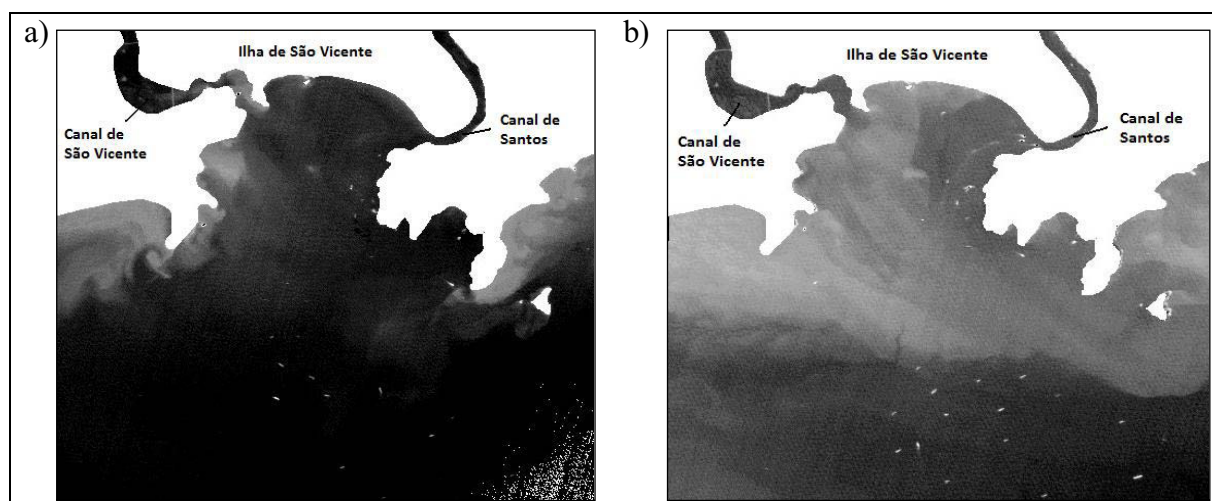


Figura 3. Imagens geradas a partir do processamento com uso do índice logarítmico proposto por Dekker et al (2001), para 27/07/04 (a) e 26/07/05 (b).

A heterogeneidade no interior da Baía de Santos foi claramente demonstrada em ambas as imagens de satélite classificadas. A tabela 3 mostra a relação entre os padrões observados na classificação e as condições ambientais no momento da passagem do satélite.

Tabela 3. Grupos classificados e as condições ambientais próximo à passagem do satélite

Data	Precipitação	Vento	Maré	Classes formadas
27/07/04	Baixa precipitação nos dias antes da passagem	Direção predominante: S-SE. Velocidade moderada nos dias próximos à passagem	Quadratura (enchente)	- ressuspensão de sedimento e reflectância do fundo - reflectância intermediária (Baía de São Vicente e pluma do emissário) - Baía de Santos e água costeira adjacente
26/07/05	Precipitação relativamente alta um dia antes da passagem, mas apenas próximo ao meio dia	Direção predominante: N-NE e E-NE até 25/07/05. Entrada de ventos S-SW com velocidade moderada	Sizígia (vazante)	- Baía de Santos- água costeira adjacente - reflectância intermediária (frente e pluma estuarina) - Baía de São Vicente

Um padrão consistente com baixa turbulência foi observado em 27/07/04, visto que as águas da baía e águas costeiras adjacentes foram agrupadas na mesma classe, sugerindo alta transparência da água da baía no momento da passagem. Geralmente, são esperadas menores correntes e menos ressuspensão de sedimentos do fundo em marés de quadratura (Moser, 2002; Giannini et al., 2006). A ausência de ventos fortes, que promovem mistura vertical, ou chuvas significativas, que geram uma pluma do estuário para a baía, reforçam este padrão

para o MST superficial. As condições ambientais neste momento levam a uma situação não diferente do obtido na imagem CBERS.

As regiões mais próximas à costa apresentaram maior reflectância (ressuspensão e reflectância do fundo). Águas com reflectância intermediária indicam um decréscimo da concentração de MST em direção à água costeira adjacente. Nesta classe, notam-se dois pontos interessantes. Um deles é a entrada de água de mesma categoria através de um lado da Baía de São Vicente, em direção ao estuário; este fenômeno ocorre diariamente, em maré enchente, dividindo nitidamente esta região e gerando uma frente que atravessa esta pequena baía. O outro ponto é a pluma formada sobre a saída do emissário submarino, onde o efluente lançado chega à superfície. Os dados *in situ* também mostraram altas concentrações de MST na superfície das estações situadas próximo ao emissário, e a maior parte deste material é orgânico. Quanto ao decréscimo do MST em direção ao mar aberto, não é apenas um processo de diluição, mas varia também o tamanho das partículas e sua composição química, levando a mudanças nas propriedades ópticas do material (e.g., Oubelkheir et al, 2006).

As classes de MST em 26/07/05 são distintas da imagem anterior, mas são consistentes com as características meteorológicas e condições de maré. A chegada de fortes ventos Sul-sudeste pode ser a causa de maior turbulência na baía, devido à sua direção voltada para o sul, de modo que ventos nesta direção podem empilhar a água na costa e facilitar a entrada na baía. Assim, uma distinção entre a zona costeira e o centro da baía não foi registrada. Além disso, em sizígia são esperadas maior turbulência e ressuspensão do sedimento do fundo, o que também foi observado nos dados de campo. A influência do vento na distribuição do MST detectado por satélite foi registrada em vários trabalhos (e.g., Forget e Ouillon, 1998; Sipelgas et al, 2006).

A combinação da maré vazante no momento da passagem do satélite e a chuva um dia antes da imagem sugere que a classe formada pela água de reflectância intermediária encontrada na baía é provavelmente originada da descarga do canal estuarino de Santos. As águas de baixa reflectância encontradas no interior da baía de São Vicente indicam algum componente com propriedades ópticas diferentes e, devido à precipitação e descarga continental, trata-se provavelmente de matéria orgânica dissolvida e particulada, originada de efluentes domésticos das margens do canal (Ferreira, 2005). No canal de Santos, o tipo de material exportado para os rios é diferente do exportado pelo Canal de São Vicente, sendo composto predominantemente por efluentes industriais (Lamparelli et al., 2001), e assim pode apresentar respostas espectrais distintas.

As imagens de satélite, no geral, proveram uma boa relação da distribuição de MST na Baía de Santos com dados meteorológicos e condições de maré, como esperado. Os padrões encontrados não diferem daqueles na literatura, o que torna mais plausível o uso do sensoriamento remoto no monitoramento das águas da região.

#### **4. Conclusão**

Há uma clara heterogeneidade espacial e temporal do material em suspensão total na Baía de Santos. Visualmente e espectralmente, nas imagens CBERS, a variação do MST na baía de Santos responde fortemente às condições meteorológicas atuantes na região, como ventos e chuvas, além do ciclo da maré.

Existe a necessidade de criação de algoritmos específicos para a área de estudo, visto que esta sofre influência de vários fatores ambientais, principalmente devido à presença de um importante complexo estuarino adjacente. Entretanto, o índice utilizado neste trabalho para evidenciar o material em suspensão na baía parece válido, possibilitando distinguir regiões de maior ou menor concentração em magnitudes similares às reportadas *in situ*.

Concluindo, foi possível observar sinoticamente as variações espaço-temporais do MST na Baía de Santos através das imagens do satélite CBERS-2, as quais podem vir a ser ferramentas muito úteis em programas de monitoramento ambiental.

## Referências bibliográficas

- Abessa, D.M.S., Sousa, E.C.P.M., Rachid, B.R.F., Mastroti, R.R. Sediment toxicity in Santos estuary, SP-Brazil: preliminary results. **Ecotoxicology and Environmental Restoration**, v.4, n. 1, p. 6–9, 2001.
- Amann, V.; Doerffer, R., Helbig, H.; Kadri, T.M.; Van Der Piepen, H.; Van Der Piepen, J.S.; Soejoeti, Z. Remote sensing of water parameters in Madura Bay. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 23, n. 4, p. 473-482, 1989.
- Ancona, C.M. **Aspectos da variação espacial e temporal da biomassa e produção fitoplanctônica e parâmetros correlatos no estuário e baía de Santos**. 2007. 229 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.
- APHA (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, inc.). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 16th ed., Washington, D.C., 1985.
- Buikata, R.P.J.H.; Kondratyev, K.Y.; Pozdnyakov, D.V. **Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters**, Boca Raton, Florida, CRC Press, 1995, 362p.
- Dekker, A.G.; Vos, R.J.; Peters, S.W.M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter TSM in the southern Frisian lakes. **The Science of the Total Environment**, v. 268, p. 197-214, 2001.
- Doerffer, R.; Fischer J.; Stössel, M.; Brockmann, C.; Grassl, H. Analysis of Thematic Mapper Data for Studying the Suspended Matter Distribution in the Coastal Area of the German Bight (North Sea). **Remote Sensing of Environment**, v. 28, p. 61-73. 1989.
- Ferreira, A. **Análise da contribuição do fitoplâncton e do material particulado na absorção da luz na baía de Santos**. 2005. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bach. Biologia Marinha), Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental do Litoral Paulista, São Vicente, 2005.
- Fischer, J. e Doerffer, R. An inverse technique for remote detection of suspended matter, phytoplankton and yellow substance from CZCS measurements. **Advanced Space Research**, v. 7, n. 2, p. 21-26, 1987.
- Forget, P. e Ouillon, S. Surface suspended matter off the Rhone river mouth from visible satellite imagery. **Oceanologica acta**. v. 21, n. 6, p. 739-749, 1998.
- Giannini, M.F.C.; Barbosa, F.P.; Ciotti, A.M. Distribuição de clorofila-a na Baía de Santos (SP) e sua relação com as condições de maré. In: III Simpósio Brasileiro de Oceanografia, 2006, São Paulo. Oceanografia e Mudanças Globais. São Paulo : Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 2006. p. 13-20.
- Hakanson, L. The relationship between salinity, suspended particulate matter and water clarity in aquatic systems. **Ecological Research**. v. 21, n.1, p. 75-90, 2006.
- Lamparelli, M.L.; Costa, M.P.; Prosperi, V.A.; Bevilacqua, J.E.; Araujo, R.P.A.; Eysink, G.G.L. e Pompeia, S. Sistema estuarino de Santos e São Vicente. Relatório Técnico CETESB, São Paulo, 2001, 178 p.
- Miller, R.L. e McKee, B.A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 259–266, 2004.
- Moser, G.A.O. **Aspectos da eutrofização no sistema estuarino de Santos: distribuição espaço-temporal da biomassa e produtividade primária fitoplanctônica e transporte instantâneo de sal, clorofila-a, material em suspensão e nutrientes**. 2002. 410p. 2 vol. Tese (Doutorado em Oceanografia biológica), Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 2002.
- Moser, G.; Giancesella, S.M.F.; Alba, J.J.B.; Bérnago, A.L.; Corrêa, F.M.P.S.; Miranda, L.B.; Harari, J. Instantaneous transport of salt, nutrients, suspended matter and chlorophyll - a in the tropical estuarine system of Santos. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 53, n. 3/4, p. 115-127, 2005.
- Oubelkheir, K.; Clementson L.A.; Webster, I. T.; Ford, P.W. Dekker, A.G.; Radke, L.C.; Daniel, P. Using inherent optical properties to investigate biogeochemical dynamics in a tropical macrotidal coastal system. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-15, 2006.
- Sipelgas, L.; Raudsepp, U.; Kõuts, T. Operational monitoring of suspended matter distribution using MODIS images and numerical modelling. **Advances in Space Research**, v. 38, p. 2182-2188, 2006.
- Zullo Jr., J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994. 194 p. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 1994.