

Variação espaço-temporal da clorofila-a e temperatura superficial do mar na Bacia de Campos (RJ)

Fernanda da Silva Telles¹
Flavia Tavares Delcourt¹

¹Universidade Federal do Rio Grande – FURG
Caixa Postal 474 – 96201-900 – Rio Grande – RS, Brasil
{oc.fstelles,flaviadelcourt}@gmail.com

Abstract. In this work we describe the modes of variability of chlorophyll-a and sea surface temperature in the Campos Basin (RJ) between Cabo Frio (23°S) and Cabo São Tomé (22°S) region. We used two sets of remote sensing data from MODIS/AQUA satellite: chlorophyll-a and sea surface temperature imaged at night (NSST). The treatment of the data removed bias of products, applying filters adapted from a pioneering study in the South Atlantic Ocean. The Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis was applied to extract the modes of spatial and temporal variability of each parameter. In order to complement the study we generate a Power Spectral Analysis using a Fast Fourier Transform to take the distribution of variance with respect to frequency contained in the signal. The modes of variability of the first EOFs were satisfactory for chlorophyll-a concentration and temperature showing, as expected, the annual cycle with these two parameters in phase. In order to better analyze possible mesoscale features, the anomaly was extracted from the original data. The highest variability associated to the coastal region was found in the chlorophyll products and the latitudinal variation of temperature was detected, as some features associated to the Brazilian current observation. Results reaffirm patterns of spatial and temporal distribution reported in the literature for the parameters analyzed.

Palavras-chave: remote sensing, variability analysis, empirical orthogonal function, fast Fourier transform, sensoriamento remoto, análise de variabilidade, função empírica ortogonal, transformada rápida de Fourier.

1. Introdução

A circulação oceânica ao longo da plataforma continental brasileira é dominada pelo escoamento da Corrente do Brasil (CB) que, em larga escala, representa o ramo oeste do Giro Subtropical do Oceano Atlântico Sul (Stramma e England, 1999). Esta corrente é originada aos 14,5°S de latitude em nível superficial (Soutelino, 2008), quando o ramo sul da Corrente Sul Equatorial (CSE) atinge a margem continental brasileira e bifurca-se em duas correntes que fluem em direção opostas: a CB em direção ao sul e a subcorrente Norte do Brasil (CNB) em direção ao norte (Stramma e England, 1999). Em seu caminho para o sul a CB espessa-se verticalmente devido a novos aportes provenientes da bifurcação da CSE em diferentes latitudes e níveis de profundidade (Silveira et al., 2000). Este espessamento vertical é marcado pela presença de diferentes massas de águas como, por exemplo, ocorrem nos primeiros 150 metros: encontra-se a Água Tropical (AT), uma massa de água quente e salina formada no Equador (Silveira, 2007).

A Bacia de Campos (RJ) é uma região importante na circulação oceânica da plataforma continental brasileira, pois compreende a área onde são desenvolvidos meandros e há emissão de vórtices da CB (Silveira, 2007). Há, além disso, a presença do sistema de ressurgência dos Cabos Frio e São Tomé (22°- 23°S), onde se esperam maiores concentrações de clorofila-a devido, principalmente, ao *input* de águas frias e ricas em nutrientes causado pelo afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) nas regiões mais costeiras, em resposta aos diversos mecanismos que controlam o sistema de ressurgência (Castelão e Barth, 2006); Calado et al., 2010). Nesta região, portanto, também são esperados que sejam apresentados os maiores gradientes de temperatura em relação às águas costeiras mais frias e águas mais quentes na região oceânica.

Os sensores remotos são importantes ferramentas para a quantificação dos parâmetros em águas superficiais. Com relação à concentração de clorofila-a os sensores, acoplados em satélites, fornecem uma ampla cobertura espacial da abundância do fitoplâncton. O método

consiste em mensurar a radiação refletida da superfície do mar no espectro visível (400-700 nm) e relacioná-la com a concentração de clorofila (Lalli e Parsons, 1997). A quantificação é feita através de mudanças de cor da água de azul para verde, visto que esta última representa o pigmento da clorofila.

Neste trabalho, serão considerados para as análises somente os primeiros metros da coluna d'água no domínio de escoamento da CB ao largo da Baía de Campos (RJ), dado que o alcance dos sinais de sensores remotos ocorre principalmente nos primeiros 50 metros de profundidade (Lalli e Parsons, 1997). Muitos autores utilizaram diferentes ferramentas para as análises da variabilidade da clorofila e temperatura superficial do mar com dados de sensoriamento remoto (Rivas, 1994, 2010; Lentini et al., 2000). Foram realizados estudos sobre a distribuição espacial da clorofila (Longhurst et al 1998; Saraceno et al 2005), assim como, sobre a regulação dos blooms fitoplanctônicos pela temperatura (Podestá et al. 1991; Provost et al. 1992). Tratando-se então de estudos multivariados em oceanografia, as Funções Empíricas Ortogonais (EOFs) permitem uma melhor análise do campo espacial através de componentes temporais.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho é descrever os padrões de variabilidade espacial e temporal de dois parâmetros na região da Baía de Campos (RJ): clorofila-a e temperatura da superfície do mar. Para tanto, serão utilizados os produtos do sensor MODIS/AQUA em uma série temporal de 12 anos de dados e de resolução espacial de 4 km. Espera-se que os modos de variabilidade destes parâmetros possam ser extraídos através da aplicação de Funções Ortogonais Empíricas (EOFs) e os períodos associados, através da aplicação da análise espectral por Fourier.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A Baía de Campos, representada pela Figura 1, compreende a região da margem continental brasileira entre o Alto de Vitória (20.5°S) e o Alto de Cabo Frio (24°S), com uma área total estimada em 100.000 km² (Viana et al., 1998). A região do estudo está compreendida entre as latitudes 22°- 23°S, onde está presente o sistema de ressurgência costeira dos Cabos Frio (23°S) e São Tomé (22°S).

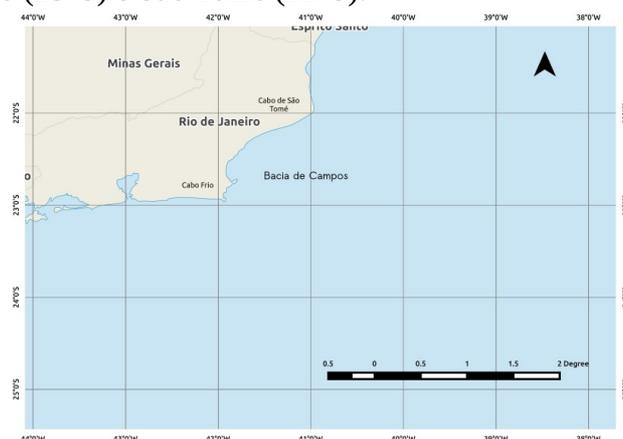


Figura 1 – Região representativa da Baía de Campos (RJ). Este mapa foi elaborado com o software livre Quantum GIS 2.2 Valmiera utilizado Datum WGS84 e Projeção UTM 22S.

2.2 Conjunto de Dados

O conjunto de dados a ser utilizado neste trabalho é composto por uma série temporal de 12 anos de dados médios mensais brutos (07/2002-07/2014) de temperatura da superfície do mar imageada à noite (NSST - *Night Sea Surface Temperature*) e de concentração de clorofila-a (Chl-a). Estes dados tem resolução espacial de 4 km e são provenientes do sensor

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) acoplado ao satélite AQUA da Agência Espacial Norte-Americana - NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), disponíveis em <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.

2.3 Tratamento dos Dados

O tratamento dos dados de satélite tem por objetivo remover erros associados a, principalmente, coberturas de nuvens na região de estudo. Para tanto, baseado no estudo proposto por Delcourt et al. (2012), foi utilizado um filtro que funciona como máscaras de interpolação aplicadas ao longo de todos os meses da série temporal da matriz de dados originais. O processo consiste em identificar os erros ao longo da série temporal que estão fora da escala típica de valores de cada parâmetro e atribuir a eles um valor mediano referente aos seis vizinhos mais próximos. Podestá et al. (1991) indica que o ciclo anual das séries pode mascarar variações de menor comprimento de onda. Assim, a partir dos dados filtrados, foi construída uma segunda matriz contendo a média climatológica correspondente ao período de 12 anos da série, a qual foi extraída dos dados originais, para a obtenção das anomalias de NSST e Chl-a.

2.4 Análises dos Dados

Para análise da variação espacial e temporal tanto da Chl-a quanto da NSST no entorno da Baía de Campos (RJ) foram calculadas as Funções Empíricas Ortogonais - EOFs (*Empirical Orthogonal Functions*). Este tipo de análise apresenta-se como um método robusto para se obter uma descrição compacta da variabilidade espacial e temporal das séries de dados em termos de “modos” estatísticos (Emery e Thomsom, 2001). Tais modos são extraídos a partir de matrizes de covariância que irão definir as regiões com padrões de variabilidade espacial e temporal similares.

Os cálculos foram realizados em duas etapas, sendo que na primeira calcularam-se as EOFs partir da matriz de dados filtrados e na segunda etapa calculou-se a partir da anomalia das séries, onde esta última foi obtida pela remoção do ciclo sazonal (ano climatológico) da matriz de dados originais filtrados. A análise espectral de potência (Transformada Rápida de Fourier) foi aplicada sobre as amplitudes das EOFs dos dados originais e anomalias, tanto para a NSST como a Chl-a, com a intenção de observar os períodos de variabilidade dos eventos encontrados. Esta técnica consiste em simplesmente remover da série original de dados a média e a tendência de processos de mais larga escala (branqueamento da série) que representam na série uma maior potência de baixa frequência (Glover et al. 2011).

3. Resultado e Discussão

As EOFs foram aplicadas tanto na matriz de dados mensais filtrados de Chl-a e NSST quanto na matriz de anomalias destes parâmetros. Na Tabela 1 estão relacionadas às porcentagens associadas aos modos estatísticos de variabilidade explicada de cada parâmetro, obtidos na aplicação de EOFs na matriz de dados filtradas, onde os primeiros três modos explicam cerca de 82% da variância total para Chl-a e 75 % para a NSST.

Tabela 1 – Percentual da variância explicada representada pelos 3 primeiros modos de variabilidade espacial das EOFs aplicadas às séries de dados filtrados de Chl-a e de NSST.

Parâmetro	Chl-a (%)	NSST (%)
EOF 1	65,7596	66,1548
EOF 2	10,7696	7,2070
EOF 3	5,0361	1,4263

Na figura 2 são apresentadas as séries espaciais da primeira EOF tanto para clorofila-a (em Log10) quanto para temperatura superficial na Bacia de Campos (RJ). Nestas séries pode-se observar que somente o primeiro modo é responsável por explicar aproximadamente 66% da variabilidade dos dois parâmetros, associados ao ciclo anual. As duas séries estão em fase com resultados máximos de variabilidade nas regiões adjacentes à linha de costa para a clorofila enquanto na série de temperatura são estes sítios os de menor variabilidade. Na região costeira estão os ambientes mais abundantes em termos de nutrientes, devido ao afloramento do fitoplâncton em regiões de plataforma, assim como a influência de descargas costeiras (Piola et al., 2008; Gonzalez-Silvera et al., 2006; Moller et al., 2008).

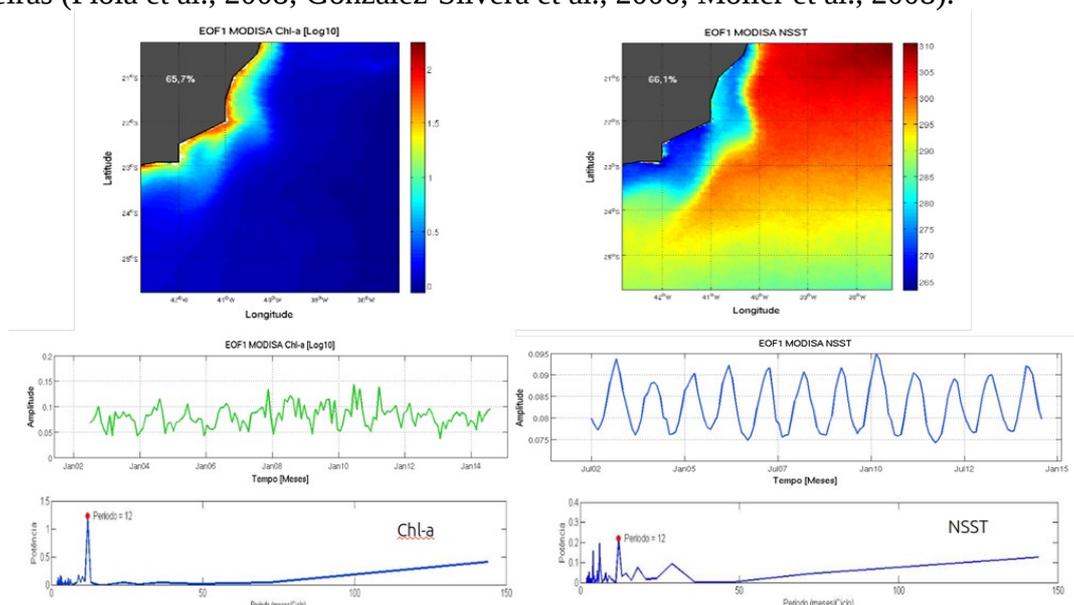


Figura 2 – Primeiro modo espacial de variabilidade da clorofila-a e da temperatura na região da Bacia de Campos (RJ); Séries temporais associadas à amplitude da EOF (acima); Espectro de potência calculado a partir dos dados filtrados dos dois parâmetros (abaixo).

No primeiro modo espacial a variabilidade da NSST ocorre de forma similar aos padrões de distribuição de temperatura nos oceanos, onde a variação da temperatura em função da latitude é evidente. Além disso, observa-se que existe uma maior variabilidade no domínio da CB apresentado na grade (20°S-26°S) comparado à região costeira devido à dinâmica da CB na região da Bacia de Campos (RJ), devido à formação de meandros ciclônicos instáveis se desenvolvem recorrentemente nos entornos do Cabo de São de Tomé (22°S) e de Cabo Frio (23°S) (Garfield, 1990).

A série temporal associada ao modo de variabilidade da NSST e da Chl-a, são apresentadas na Figura 2. O ciclo anual relativo ao primeiro modo é evidente, acusando picos de máximas durante o verão austral (NSST) e durante os períodos de outono e primavera austral (Chl-a). Outros estudos notaram a dominância do ciclo anual nas séries de clorofila (Longhurst, 1998; Garcia et al., 2004; Saraceno et al., 2005). Essa hipótese foi confirmada pela análise de Fourier, que acusou um período de 12 meses como a de maior frequência para ambas as variáveis (Figura 2). Os espectros de potência gerados a partir da aplicação de Fourier nas primeiras EOFs relacionadas aos dados originais de NSST e Chl-a sugerem a dominância do ciclo anual na região abrangente. Assim, os seguintes modos não são demonstrados, dado que a porcentagem de variância explicada encontrada é muito baixa. Essas variabilidades podem ser confundidas com ruído da série, sendo melhor analisadas nos campos de anomalias.

Na tabela 2 estão apresentados o cálculo de EOFs sobre as matrizes de anomalias de cada parâmetro, onde estão descritos os percentuais de variância explicada associados aos três

primeiros modos da anomalia da clorofila-a e da anomalia da temperatura.

Tabela 2 – Percentual da variância explicada representada pelos primeiros três modos de variabilidade espacial das EOFs aplicadas às séries de anomalias de Chl-a e de NSST.

Parâmetro	Anomalia Chl-a (%)	Anomalia NSST (%)
EOF 1	18,7361	15,4248
EOF 2	16,7736	5,2306
EOF 3	6,3689	4,5935

A aplicação de EOFs sobre matrizes de anomalias (Figura 3 e 4) para a Chl-a e NSST apresentaram como esperado menor variabilidade, visto que estas matrizes já representam os modos de variabilidade dos parâmetros. Os resultados dos dados de anomalia de Chl-a sugerem maior variabilidade sobre a plataforma continental, nas regiões próximas à costa. Observam-se regiões pontuais de maiores variações ao longo da costa, nos três modos analisados. Já os dados de anomalia de NSST apresentam padrões um pouco diferenciados, com algumas zonas de variabilidade localizadas *offshore*. Quando analisados juntamente com suas amplitudes temporais e o espectro, sugere a relação direta com a CB.

A segunda EOF apresenta comportamentos similares entre os campos de anomalia de temperatura e clorofila. Tanto o campo de anomalia da Chl-a, como da NSST apresentam variabilidades positivas/negativas na zona costeira, de maior magnitude sobre as outras, que não sofrem uma estratificação sazonal (Rivas, 2010). As amplitudes temporais de ambas as séries apresentam dois picos por ano, provavelmente associados aos períodos de final do verão/princípio do outono e primavera austral.

O terceiro modo sugere uma relação com o fenômeno da ressurgência devido à detecção de variabilidades em pontos específicos da costa, propensos à aparição desses eventos, assim como a associação das amplitudes temporais com alguns picos representativos durante os períodos de ressurgência (outono/inverno e primavera austral).

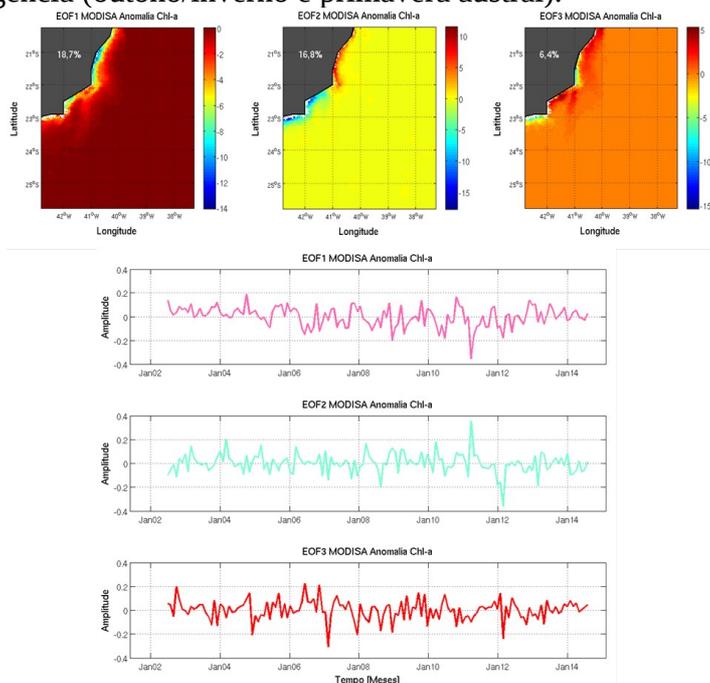


Figura 3 – Modos espaciais e amplitudes temporais de EOF da anomalia da clorofila-a na região da Baía de Campos (RJ).

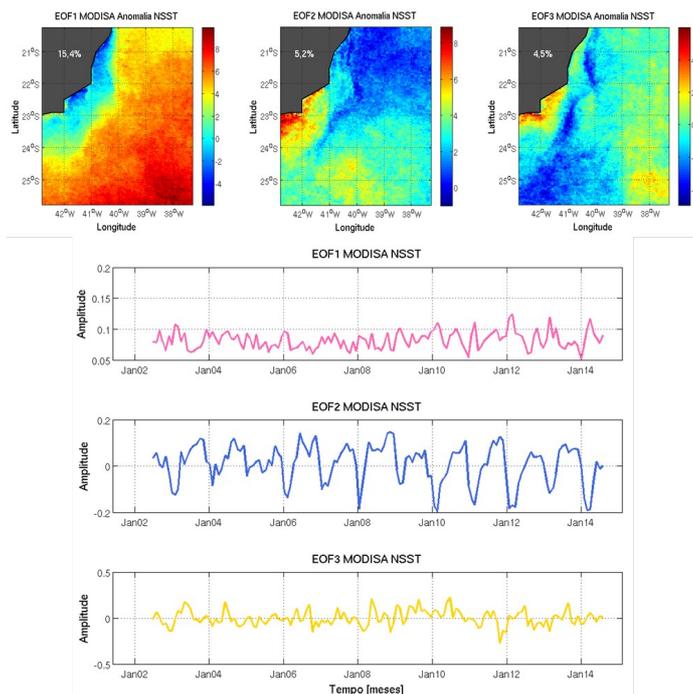


Figura 4 – Modos espaciais e amplitudes temporais de EOF da anomalia da temperatura na região da Baía de Campos (RJ).

A análise de Fourier foi aplicada às amplitudes temporais dos três primeiros modos de oscilação das EOFs de ambos os parâmetros, com a finalidade de determinar o período das variabilidades encontradas. A partir destes resultados, sugere-se identificar alguns fenômenos de influência na região. Os resultados desta análise tanto para os dados de anomalia da concentração de clorofila, como da temperatura de superfície, foram similares em todos os modos de oscilação da EOF.

A periodicidade anual encontrada (Figura 5) sugere que o ciclo anual não tenha sido totalmente removido pela extração da série climatológica dos dados originais. Wang et al. (2009), mostraram que isso pode ocorrer no cálculo de anomalia para análises multivariadas. Os ciclos menores de 4 meses encontrados no espectro da segunda EOF podem estar associados a eventos sazonais da região como a ressurgência e deságues dos sistemas hídricos da região, associados às precipitações locais. Os resultados espectrais da terceira EOF provavelmente sugerem a relação com o fenômeno da ressurgência, com uma periodicidade de aproximadamente 2 meses.

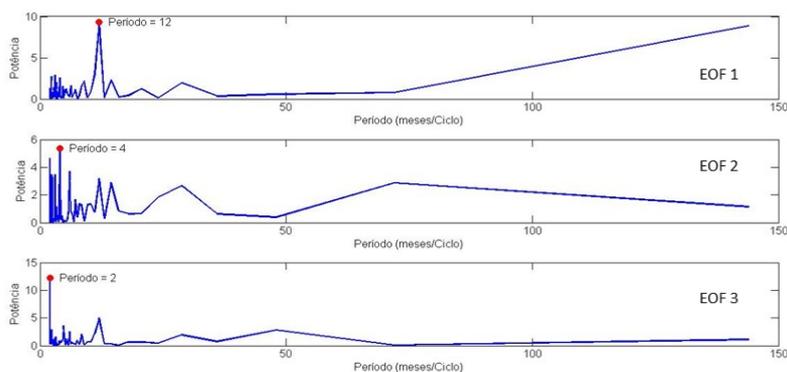


Figura 5 – Espectro de Potência dos primeiros modos de EOF da anomalia da clorofila-a e NSST na região da Baía de Campos (RJ).

4. Conclusões

Neste trabalho foram descritos os padrões de variação espacial e temporal da clorofila-a e da temperatura da superfície do mar imageada à noite (NSST) na região da Bacia de Campos (RJ), ambos, produtos do sensor MODIS acoplado ao satélite AQUA da NASA. Foram aplicadas ao conjunto de dados mensais filtrados e de anomalias as Funções Ortogonais Empíricas (EOFs) e gerados espectros de frequência a partir dos dados originais e anomalias mensais destes parâmetros.

As variabilidades espacial e temporal foram representadas nos primeiros modos das EOFs. Como esperado, as maiores variabilidades associada à clorofila-a foram representadas em regiões mais costeiras enquanto que para a temperatura a variação foi evidenciada em relação ao padrão latitudinal e no domínio da Corrente do Brasil ao longo da grade (20°S-26°S). A análise espectral acusou períodos de 12, 4 e 2 meses, provavelmente associados aos fenômenos oceanográficos presentes na região.

Mudanças sazonais nas descargas costeiras podem influenciar mudanças significativas nas taxas de clorofila e temperatura na região (Garcia e Garcia, 2008), assim, a diferença entre as características dos parâmetros de circulação, assim como os sistemas hídricos costeiros podem influenciar nos processos físicos encontrados no OAS (eventos de ressurgência, sistemas de giros e vórtices, assim como as descargas).

Agradecimentos

Os dados do sensor remoto MODIS/AQUA são fornecidos pela NASA em <http://www.modis.gsfc.nasa.gov/>. Bolsa de estudos do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH-27-ANP), convênio FURG/PRH-ANP/MME/MCT (matrícula 2010.4066-7).

Referências Bibliográficas

- Calado, L.; Silveira, I.C.A.; Gangopadhyay, A.; Castro, B.M. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 30, p. 1181–1188, 2010.
- Castelão, R.M; Barth, J.A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L03602, 2006.
- Glover, D.M.; Jenkins, W.J.; Doney, S.C. **Modeling Method for Marine Science**. Massachusetts, Cambridge University Press, 588p., 2011
- Delcourt, F.T. **Use of satellite data to study the temporal evolution of the marine ecological response to oceanographic change in the South Atlantic**. 2012. 154 p. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia do Meio Ambiente) - Universidad de Cádiz, UCA, Espanha. 2012.
- Emery, W.J.; Thomsom, R.E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. USA: Elsevier Science, 2001, 654 p.
- Garcia, C.A.E., Sarma, Y.V.B., Mata, M.M., Garcia, V.M.T. Chlorophyll Variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region. **Deep-Sea Research Part II- Topical Studies in Oceanography** 51, 159-172 p. 2004.
- Garcia, C.A.E.; Garcia, V.M.T. Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. **Continental Shelf Research** 28 1568-1578, 2008.
- Garfield, N. **The Brazil Current at subtropical latitudes**. 121p. 1990. Tese (Doutorado) - University of Rhode Island, Rhode Island. 1990.
- Gonzalez-Silvera, A.; Santamaria-Del-Angel, E.; Millan-Nunez, R.. Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWiFS and AVHRR Imagery. **Journal of Geophysical Research** – Oceans 111, 2006.

- Lalli, C.; Parsons, T.R. **Biological Oceanography: An Introduction**. USA: Butterworth-Heinemann, 320 p., 1997.
- Lentini, C.A.D.; Campos, E.J.D.; Podestá, G.P. The annual cycle of satellite derived sea surface temperature on the western South Atlantic shelf. **Brazilian Journal of Oceanography** 48(2), 93–105. 2000.
- Longhurst, A. **Ecological Geography of the Sea**. Academic, San Diego, California, 1998.
- Piola, A.R.; Romero, S.I., Zajaczkovski, U. Space-time variability of the La Plata plume inferred from ocean color. **Continental Shelf Research**, this issue. 2008.
- Moller, O.O.; Piola, A.R.; Fretas, A.C.; Campos, E.J.D. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf of the southeastern South America. **Continental Shelf Research**. 2008.
- Podestá, G.P.; Brown, O.B.; Evans, R.H. The Annual Cycle of Satellite-derived Sea Surface Temperature in the Southwestern Atlantic Ocean. American Meteorological Society. **Journal of Climate**. 457-467, 1991.
- Provost, C., Garcia, O; Garçon, V. Analysis of satellite sea surface temperature time series in the Brazil-Malvinas current confluence region: dominance of the annual and semiannual periods. **Journal of Geophysical Research**, 97(11):17841-17858, 1992.
- Rivas, A.L. Spatial variation of the annual cycle of temperature in the Patagonian shelf between 40 and 50 of south latitude. **Continental Shelf Research** 14(13/14), 1539–1554, 1994.
- Rivas, A.L. Spatial and temporal variability of the satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean. **Continental Shelf Research**, 30, 752-760. 2010.
- Saraceno, M.; Provost, C.; Piola, A.R. On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. **Journal of Geophysical Research – Oceans**, 110, 2005.
- Silveira, I.C.A.; Schmidt, A.C.K.; Campos, E.J.D.; Godoi, S.S.; Ikeda, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**. v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000.
- Silveira, I.C.A. **O Sistema Corrente do Brasil na Bacia de Campos, RJ**. 2007. 160 p. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.
- Silveira, I.C.A.; Lima, J.A.M.; Schmidt, A.C.K.; Ceccopieri, W.; Sartori, A.; Francisco, C.P.F.; Fontes, R.F.C. Is the meander growth of the Brazil Current System off southwest Brazil due to baroclinic instability? **Dynamic Atmosphere Oceans**, v. 31, n. 45, p. 3–4, 2008.
- Soutelino, R.G. **A origem da Corrente do Brasil**. 2008. 120p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- Stramma, L; England, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, p. 20.863–20.883, 1999.
- Viana, A.R.; Faugères J.C.; Kowmann, R.O.; Lima, J.A.M.; Caddah, L.F.G.; Rizzo, J.G. Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. **Sement. Geol.**, v. 115, p. 133–157, 1998.