

Análise temporal dos campos de concentração da clorofila-a e temperatura da superfície do mar obtidos por satélites na Plataforma Continental Sudeste Brasileira

Caroline Leão¹
Milton Kampel²
João Antonio Lorenzetti²

¹ Synoptika Solutions Sistema de Informação Geográfica LTDA
CEP 29100-021 - N. 1019 - Sala 407 - Vila Velha - ES, Brasil
caroline@synoptikasolutions.com

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{milton, loren}@dsr.inpe.br

Abstract. The objective of this work was to analyze the temporal variability of the chlorophyll-*a* concentration (Chl) and the sea surface temperature (SST) in the Brazilian Southeast Continental Shelf (BSCS), between January 1998 and December 2006. Images from Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) were used for the extraction of the Chl and SST data respectively. Besides, Southeast Oscillation Index (SOI) time series for the same period were used. Weekly temporal series (average of 8 days) and normalized anomalies of Chl and SST were generated at five points located on the 100 meters isobath, in front of Cabo de São Tomé, Cabo Frio, Ubatuba, Cananéia and Cabo de Santa Marta. The methodology applied was based on temporal series analysis through wavelet transform (WT) and fast Fourier transform (FFT). The WT and FFT analysis of Chl and SST normalized anomalies showed that the main period of interannual variability were 2,4 years, in accordance with previous studies of SOI time series, suggesting a possible correlation with the *El Niño*-Southern Oscillation (ENSO) event.

Palavras-chave: remote sensing, oceanography, fast Fourier transform, wavelet transform, sensoriamento remoto, oceanografia, transformada rápida de Fourier, transformada em ondeletas.

1. Introdução

Grande parte das medidas científicas provenientes da observação e/ou simulação é registrada através de séries temporais. Usualmente, essas séries são caracterizadas por parâmetros descritivos e analisadas por meio de técnicas convencionais. Dentre as técnicas convencionais mais utilizadas destacam-se a correlação cruzada e análise da transformada de Fourier (TF). De acordo com Emery e Thomson (1997), estas análises são úteis quando o objetivo é determinar a eficiência dos sensores e caracterizar a variabilidade observada nas séries.

Entretanto, nas últimas três décadas, séries temporais passaram a ser analisadas dentro de um novo paradigma, isto é, com o desenvolvimento de novos instrumentos de medidas e dispositivos computacionais avançados, tornou-se possível obter estas séries em alta resolução e sensibilidade, para auxiliar na identificação de detalhes não considerados em análises anteriores. Devido às altas resoluções (temporal, espectral e espacial) das observações e dos experimentos numéricos, os cientistas passaram a analisar e modelar a variabilidade complexa que constitui toda a amostra ou sub-amostras das amplitudes que compõem a série. Portanto, novas ferramentas, a exemplo da transformada em ondeletas (TO), foram desenvolvidas e introduzidas na literatura com a finalidade de auxiliar a caracterização de padrões não-lineares possivelmente, associados à natureza da fonte responsável pela produção da variabilidade complexa observada (Barbosa, 2006).

A análise de ondeletas representa uma ferramenta matemática em rápido desenvolvimento, com aplicações em diversas áreas da ciência, como a oceanografia. A TO assemelha-se à análise de Fourier, pois ambas trabalham no domínio da frequência e permitem analisar o conteúdo do sinal, decompondo-o em diferentes escalas de tempo. A

diferença entre as técnicas é basicamente o modo como estas captam o comportamento das séries. Sinais de caráter não-estacionário com picos de energia em muitas frequências diferentes são mais bem estudados com a TO (Morettin, 1999).

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a variabilidade temporal dos campos de concentração da clorofila-*a* (Chl) e temperatura da superfície do mar (TSM) obtidos por satélites, a partir das análises da transformada em ondeletas (TO) e transformada rápida de Fourier (FFT).

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE), no oceano Atlântico Sudoeste. A PCSE é definida como a região da plataforma continental que se estende, ao longo da costa brasileira, desde o Cabo de São Tomé (22°S), no Rio de Janeiro, até o Cabo de Santa Marta (28°30'S), em Santa Catarina (Figura 1). A orientação geral da linha da costa é NE-SO, com exceção da região situada entre o Cabo Frio, RJ (23°S) e o extremo oeste da baía da Ilha Grande, RJ, onde a orientação é E-W (Castro et al., 2006).

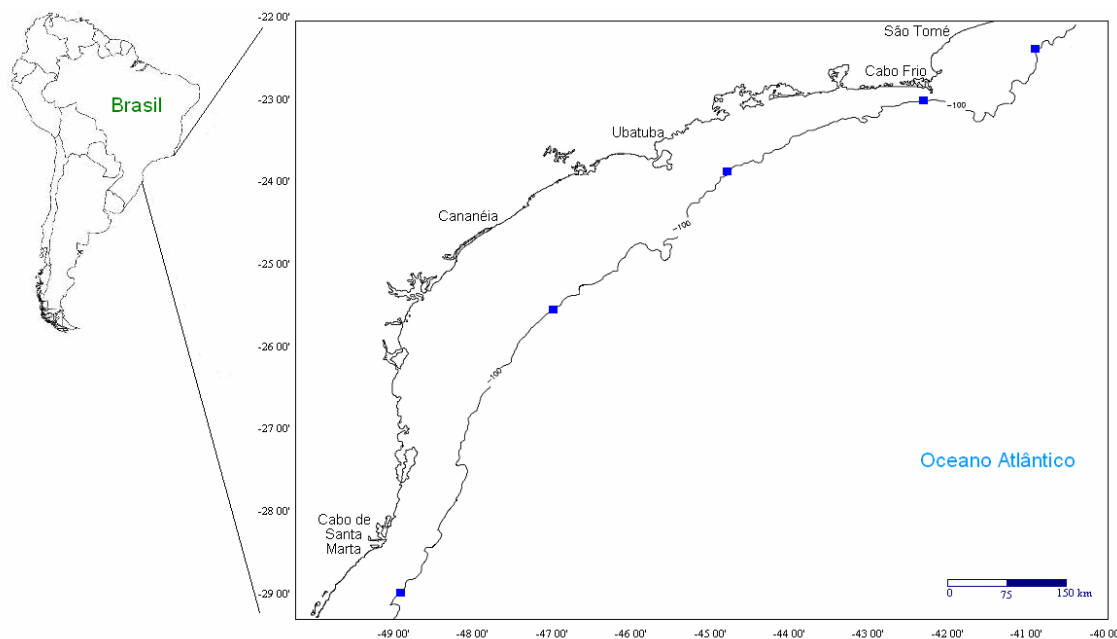


Figura 1. Mapa da região correspondente à Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE), com a isóbata de 100 metros. Em azul, os cinco pontos estudados.

Entre os vários fenômenos em diferentes escalas temporais e espaciais que concorrem para compor as correntes e as propriedades físicas da PCSE pode-se citar: (i) as ressurgências costeiras e de quebra de plataforma com o afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) no verão (Aidar et al., 1993; Kampel et al., 1997); (ii) a intrusão superficial de águas frias e ricas vindas do sul no inverno em escala de tempo sazonal (Campos et al., 1999); (iii) a presença da Corrente do Brasil (CB) e a penetração sobre a plataforma continental de seus meandros e vórtices frontais em mesoescala (Kampel et al., 1997); (iv) a passagem de sistemas atmosféricos frontais que influem no vento e na circulação local em escala sinótica (Castro, 1985; Stech e Lorenzetti, 1992) e, (v) marés com escalas de tempo diurnas e semidiurnas (Pereira e Castro, 2007).

2.2 Método

Imagens semanais (médias de 8 dias) de Chl e TSM, obtidas de dados coletados pelos sensores *Sea-viewing Wide Fidel-of-view Sensor* (SeaWiFS) e *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), respectivamente, foram processadas digitalmente no programa *SeaWiFS Data Analysis System* (SeaDAS) versão 5.0.5, para gerar séries temporais referentes ao período de janeiro de 1998 a dezembro de 2006, num total de 414 imagens. As imagens do SeaWiFS são disponibilizadas no endereço eletrônico da *National Aeronautical and Space Administration* (NASA): <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ftp.html> e, as imagens do AVHRR no endereço eletrônico do projeto *Pathfinder National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA): <ftp://data.nodc.noaa.gov/pub/data.nodc/pathfinder>.

As séries temporais de Chl e TSM foram geradas para 5 pontos localizados sobre a isóbata de 100 m (Figura 1), denominados como: São Tomé (22°26'S 40°43'W); Cabo Frio (23°07'S 42°10'W); Ubatuba (24°03'S 44°36'W); Cananéia (25°40'S 46°45'W); e Santa Marta (29°07'S 48°35'W). Na medida em que foram sendo geradas, as séries de Chl apresentaram alguns valores de *flags* indicando a presença de nuvens. Para que as séries fossem contínuas, optou-se pela interpolação linear. Como o sinal anual foi dominante para ambos os parâmetros estudados na região de estudo (Leão et al., 2008), optou-se por analisar as respectivas anomalias normalizadas com a finalidade de observar outros sinais existentes. A partir das séries temporais dos parâmetros, foram calculadas as respectivas anomalias normalizadas (diferença entre o valor semanal e a média climatológica da semana correspondente, dividida pelo desvio-padrão semanal) e realizadas análises espectrais pela transformada em ondeletas (TO), sendo utilizada a ondeleta Morlet, e pela transformada rápida de Fourier (FFT).

As análises espectrais foram realizadas no programa IDL 6.2, através de uma rotina específica cedida pelo Dr. Nelson Jesus Ferreira e adaptada para os dados deste trabalho.

A partir da série mensal de dados do Índice de Oscilação Sul (IOS) obtidos no endereço eletrônico <http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/soi.html> foi possível realizar uma análise espectral pela FFT. Essa análise foi realizada para encontrar os principais períodos de variabilidade do IOS durante o período estudado (janeiro de 1998 a dezembro de 2006) e compará-los com os resultados encontrados pela análise espectral dos parâmetros Chl e TSM, pois um dos principais fenômenos que afetam a região de estudo em escala planetária é o *El Niño-Oscilação Sul* (ENOS), sendo esse evento representado pelo IOS, que indica sua intensidade e fase (CGD, 2007).

3. Resultados e Discussão

Nos espectros de ondeletas (Figura 2) o período é dado em semanas e está representado em escala logarítmica. A barra de cores representa a potência e é adimensional. A linha amarela mais fina representa o escalograma da frequência, que é a ondeleta global. A linha amarela mais grossa representa o cone de influência e os valores acima desta não são considerados porque são suscetíveis a erros causados pelo fato das séries serem truncadas nas extremidades, ou seja, são séries finitas. Os valores são significativos ao nível de significância de 5%.

Os espectros das séries de anomalia da Chl se encontram na Figura 2 (à esquerda), e evidenciaram um sinal em torno de 110 semanas (2,4 anos) que ocorre em todos os espectros. Um outro sinal, em torno de 60 semanas (1,3 anos) apareceu fraco em Santa Marta e Cabo Frio, e mais forte em Ubatuba.

Nos pontos em Cabo Frio, São Tomé e Ubatuba, além dos sinais já comentados, existe outro, em torno de 40 semanas (0,9 anos) mais localizado entre os anos de 2004 e 2006. Por fim, existe um sinal em torno de 20 semanas (0,4 anos) ocorrendo em praticamente todos os pontos, porém bem localizado e com fraca energia, além de outros de menor intensidade.

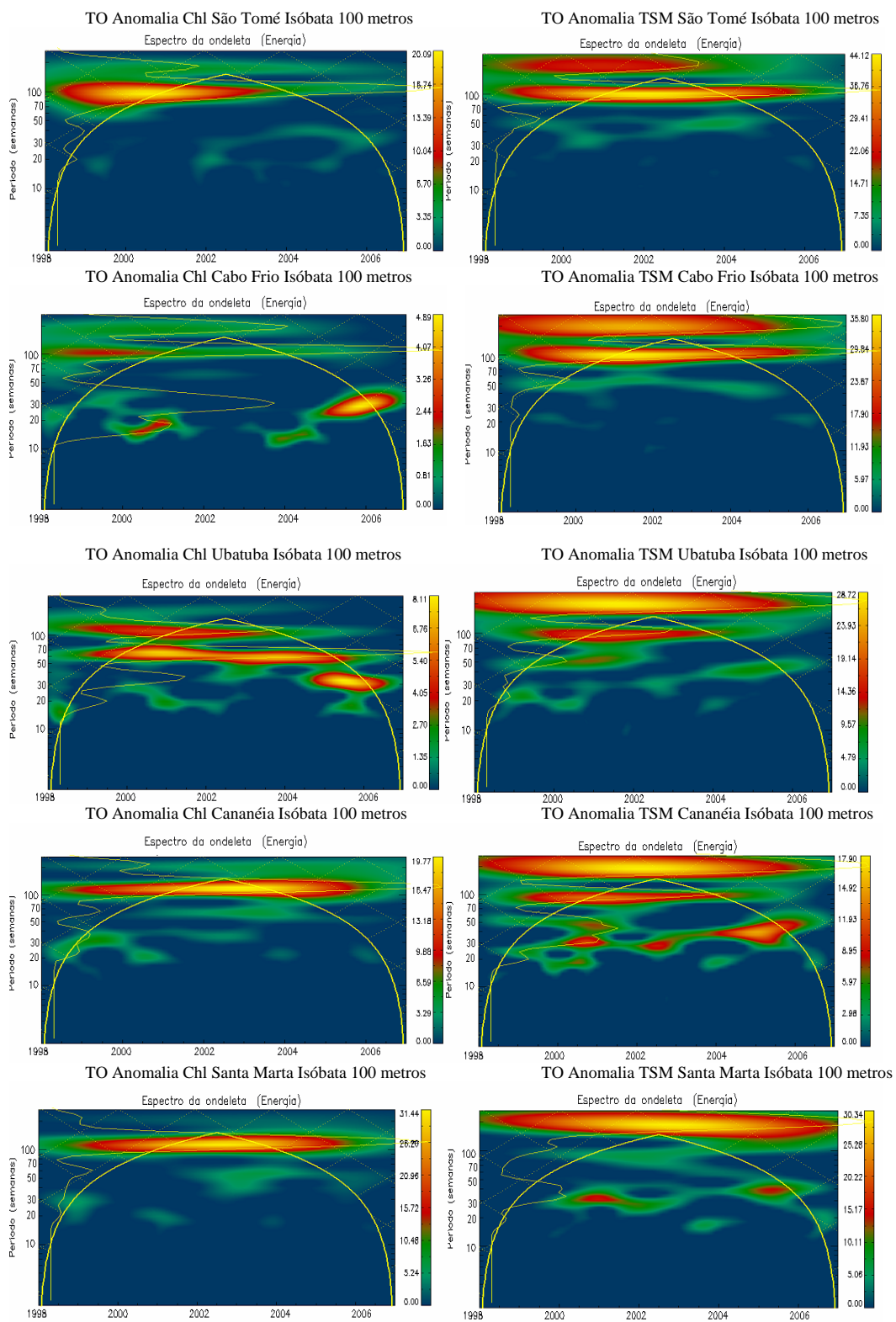


Figura 2. Espectros da TO para as anomalias normalizadas de Chl (esquerda) e TSM (direita), nos 5 pontos estudados.

A partir dos espectros das séries de anomalia da TSM (Figura 2, à direita) notou-se que as maiores amplitudes ocorreram no período em torno de 110 semanas (2,4 anos), com exceção

para o ponto em Santa Marta. Neste, ocorreu somente um sinal dentro do cone de influência, em torno de 35 semanas (0,8 anos), e também em Cananéia, com maior energia nos anos de 2001 e 2005.

Como o cálculo da anomalia não retira totalmente o sinal anual quando este é muito intenso, como foi o caso da TSM nos pontos de estudo, o mesmo pôde ser observado em São Tomé, Cabo Frio, Ubatuba e em Cananéia, com um sinal em torno de 50 semanas. Vale ressaltar que como os dados de Chl e TSM são médias de 8 dias, ou seja, cada semana tem 8 dias, o ano possui 46 semanas.

Pelos gráficos de FFT (Figura 3), vê-se que nas séries de anomalias da Chl existem dois períodos principais de variabilidade, sendo um forte sinal em torno de 110 semanas (2,4 anos) além de um sinal em torno de 60 semanas (1,3 anos), visível em todos os pontos, principalmente em Ubatuba. No caso das anomalias da TSM, o sinal predominante em praticamente todos os pontos é de 110 semanas (2,4 anos), porém existem outros sinais, como o de 210 semanas (4,6 anos) e o próprio sinal anual, em torno de 50 semanas (1,1 anos), além de outros de menor intensidade.

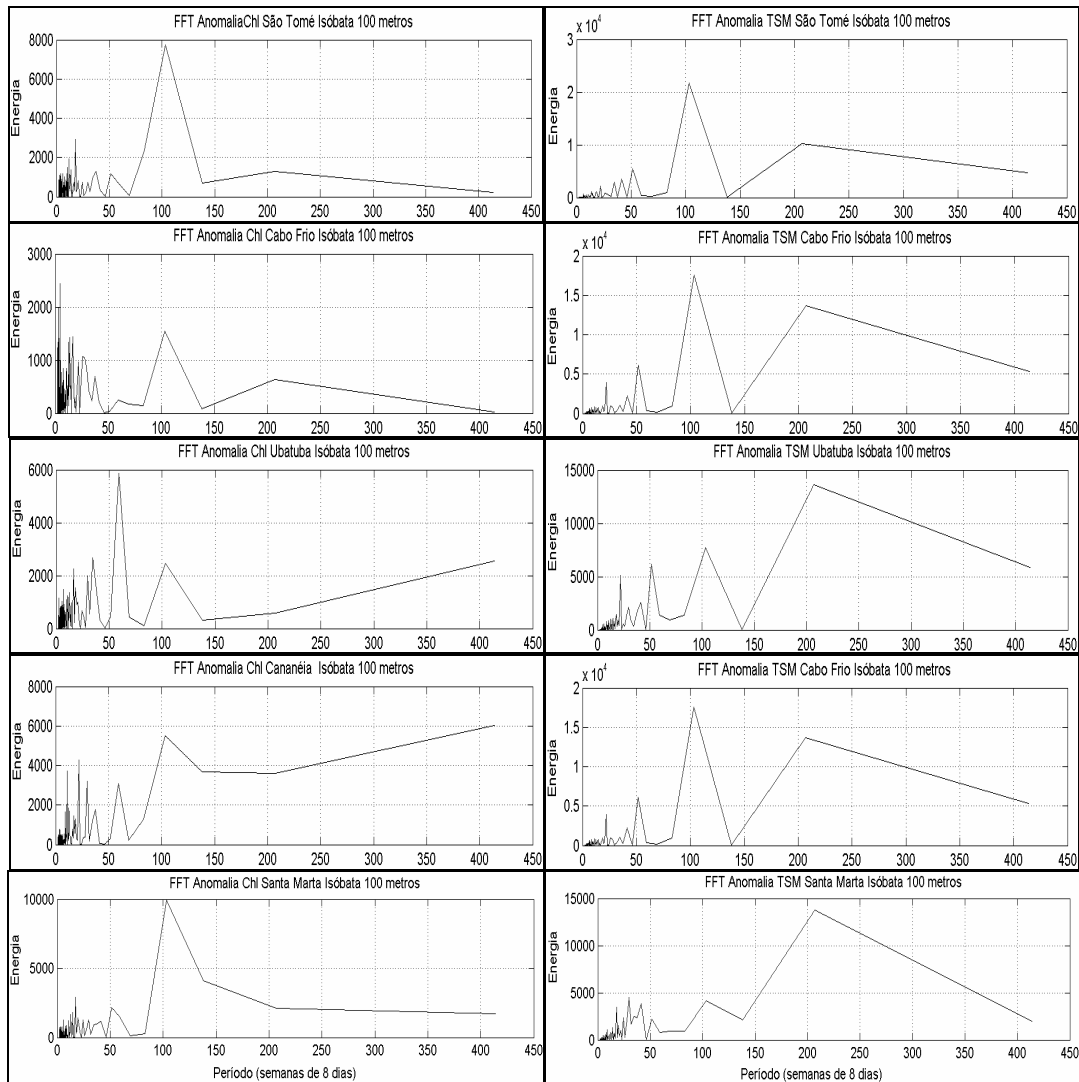


Figura 3. Gráficos de FFT para as anomalias normalizadas de Chl (esquerda) e TSM (direita), nos 5 pontos estudados.

Pela análise espectral da FFT para a série de IOS durante o período estudado, foram observados três períodos de maior energia: em torno de 27 meses (2,3 anos), 14 meses (1,2 anos) e 8 meses (0,7 anos) (Figura 4).

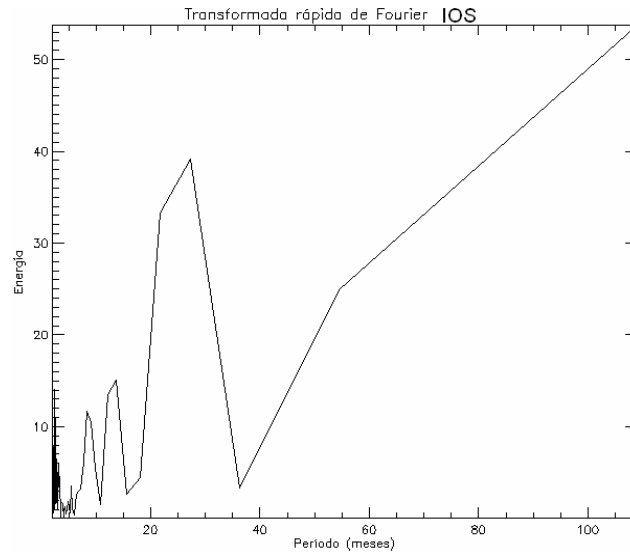


Figura 4. Gráfico de FFT dos dados do IOS.

Tanto pela análise da TO quanto pela FFT das anomalias normalizadas de Chl e TSM, o sinal predominante foi o de 110 semanas (2,4 anos). Foram encontrados também outros sinais com maior energia nos diferentes pontos, como o de 60 semanas (1,3 anos) e o de 210 semanas (4,6 anos), além do próprio sinal anual, em torno de 50 semanas (1,1 anos). No caso do sinal de 210 semanas, ele foi considerado somente pela análise de FFT, pois mesmo aparecendo nos espectros da TO, não estava dentro do cone de influência dos mesmos.

Reboita (2004) aplicou a TO em dados do IOS no período de janeiro de 1982 a abril de 2003, e detectou cinco oscilações (2,6 e 8 meses e 2,3, 3,5 e 5,3 anos) sendo que uma delas com período correspondente a 2,3 anos. Além disso, pela FFT dos dados de IOS (Figura 4), foram encontrados três períodos de maior energia (0,7, 1,2 e 2,3 anos), sendo que o pico de maior energia foi no período de 2,3 anos, muito próximo do principal período encontrado pelos parâmetros, sugerindo uma correlação com o ENOS.

Campos et al. (1999) compararam anomalias da TSM durante o período de 1982 a 1994 em um local específico da PCSE (26°15'S - 47°43'O) com médias mensais do IOS para o mesmo período. Os autores encontraram dois picos de alta coerência entre as anomalias de TSM e as séries de IOS nos períodos de 0,7 e 1,5 anos, valores esses muito próximos aos encontrados na análise da FFT dos dados de IOS para o período estudado (0,7 e 1,2 anos). Ainda segundo esses autores, a variação interanual da intrusão superficial de águas frias provenientes do sul em escala sazonal ao longo da PCSE parece também estar relacionada com os eventos ENOS.

Conforme observado, os resultados da TO e FFT foram muito parecidos, porém sinais com picos de energia em muitas frequências diferentes foram mais bem observados com a TO, corroborando com Morettin (1999), principalmente por permitir a localização no tempo da ocorrência dos mesmos.

4. Conclusões

Através do estudo observou-se que o principal período de variabilidade interanual detectado para os parâmetros correspondeu a 110 semanas (2,4 anos) para a grande maioria dos pontos, especialmente para as anomalias da TSM. Um período bem próximo (2,3 anos) foi encontrado nos dados do IOS, sugerindo uma possível correlação com o ENOS.

Observou-se também que o sinal anual de ambos os parâmetros foi muito forte na região de estudo, pois apesar das análises espectrais terem se baseado nas anomalias normalizadas dos mesmos, pôde-se ainda observar o sinal anual, principalmente nos dados de TSM.

Comparando os resultados obtidos pela TO e FFT, verificou-se que os resultados foram muito parecidos, porém, a utilização da TO permitiu, além de identificar a variabilidade temporal contida nos dados das anomalias normalizadas de Chl e TSM, determinar a época em que esta ocorre.

Agradecimentos

Ao Dr. Nelson Jesus Ferreira por ter cedido a rotina das análises espectrais da TO e FFT. Ao OGBP NASA pelos dados de Chl e pelo software SeaDAS, utilizado no processamento. Ao Pathfinder pelos dados de TSM. Leão, C. foi bolsista CNPq (n. 135596/2006-8).

Referências Bibliográficas

Aidar, E.; Gaeta, S. A.; Giancesella-Galvão, S. M. F.; Kutner, M. B. B. & Teixeira, C. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-a e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. **Publicação Especial do Instituto Oceanográfico**, v.10, p. 9-43. 1993.

Barbosa, E. B. M. **Estudos da variabilidade de séries temporais ambientais através de espectros de assimetria implementados em software científico livre**. 2006. 107 p. (INPE-14670-TDI/1223). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

Campos, E.J.D., Lentini, C.A.D., Miller, J.L., Piola, A.R., 1999. Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazil Bight. **Geophysical Research Letters**, v. 26, p. 2061-2064.

Castro, B. M.; Lorenzetti, J. A.; Silveira, I. C. A.; Miranda, L. B. Araujo, C.E.S.; Kampel, M. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: Rossi-Wongtschowski, C. L. D. B.; Madureira, L. S-P. **O ambiente oceanográfico da plataforma continental e talude na região sudeste-sul do Brasil**. São Paulo: Edusp, 2006, cap. p. 472- .

Castro, B. M. **Subtidal response to wind forcing in the South Brazil bight during winter**. 1985. 211 p. Ph.D. dissertation - University of Miami, Miami. 1985.

Climate and Global Dynamics (CGD). **Climate indices**: Southern Oscillation Index (SOI). Disponível em: <<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/soi.html>>. Acesso em: 12 out. 2007.

Emery, W. J.; R. E. Thomson. **Data analysis methods in physical oceanography**. 1 ed. Oxford: Pergamon Press, 1997. cap. 5, p. 371-564.

Kampel, M.; Lorenzetti, J. A.; Silva Junior, C. L. Observação por satélite de ressurgências na costa Sul-Sudeste brasileira. In: Congresso Latino-Americano Sobre Ciências do Mar (ALICMAR), 7., 1997, Santos. **Anais...** Santos. p. 38-40.

Leão, C.; Kampel, M.; Lorenzetti, J. A. Análise preliminar da variabilidade da concentração de clorofila e temperatura da superfície do mar estimados por satélites na Margem Continental Sudeste Brasileira. In: Congresso Brasileiro de Oceanografia (CBO), 3., 2008, Fortaleza. Livro de resumos... Fortaleza.

Morettin, P. A. **Ondas e ondaletas**: da análise de Fourier à análise de ondaletas. 1 ed. São Paulo: Edusp, 1999. 276 p.

Pereira, A. F.; Castro, B. M. Internal tides in the Southwestern Atlantic off Brazil: Observations and numerical modeling. **Journal Geophysics Research**, v. 37, n. 6, p. 1512-1526. 2007

Reboita, M. S. **Elementos da variabilidade climática no extremo Sul do Brasil no período de 1990 a 2001**. 2004. 211 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2004.

Stech, J. L.; Lorenzetti, J.A. Response of the South Brazil Bight to the Passage of Wintertime Cold Fronts. **Journal Geophysics Research**, v. 97, n. C6, p. 9507-9520.1992.