

Análise EOF da Confluência Brasil-Malvinas a partir de imagens AVHRR

MILTON KAMPEL¹
CARLOS LEANDRO DA SILVA JR.¹

¹INPE--Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515, 12201 Sao Jose dos Campos, SP, Brasil
milton@ltid.inpe.br

Abstract. It is here presented an EOF analysis of sea surface temperature (SST) variability in the Brazil-Malvinas Confluence region (30°S-52.5°S; 65°W-40°W), between 1989-1993. The study was based on the Multichannel Sea Surface Temperature (MCSST), weekly mean, 18Kmx18Km, gridded SST data. This data set is distributed by NODS/JPL, based on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data transmitted from NOAA satellite platforms. In this study it is calculated 30 seasonal means (3 months average) images. This images were statistically analyzed, by expansion in Empirical Orthogonal Function (EOF) image eigenvectors, and through Maximum Entropy Spectral Analysis (MEM) of the corresponding Principal Components time series. The first three EOF's accounted for 96.9% of the total variance, which was shown to be dominated by the annual cycle that alone accounted for 68% of the total variance, followed by semiannual (6 months) and interannual (4,26 years) signals. The results of this study were compared with previous analysis published in the literature.

Keywords: SST, Brazil-Malvinas Confluence.

1 Introdução

O limite hidrográfico entre o giro subtropical do Atlântico Sul e a Corrente Circumpolar Antártica é conhecido como Convergência Subtropical (C.S.)

A Corrente do Brasil (C.B.) flui para sul ao longo da margem continental brasileira como parte da corrente de contorno oeste do giro subtropical do Atlântico Sul. A Corrente das Malvinas (C.M.), também conhecida como *Falklands*, flui na direção nordeste ao longo da costa argentina desde sua origem como um ramo da Corrente Circumpolar Antártica.

A região do Atlântico Sudoeste onde a quente e salina C.B. encontra-se com a menos densa C.M. é denominada região da Confluência Brasil-Malvinas. esta região está localizada ao largo das costas argentina e uruguaia, entre 30°S-52.5°S e 65°W-40°W, e é caracterizada por um forte contraste termohalino (frente Brasil-Malvinas) (Olson et al., 1988) e intensa atividade em meso-escala (Gordon, 1989).

O posicionamento da região de convergência, através da utilização de dados hidrográficos tradicionalmente usados em oceanografia não é a maneira ideal de realizar esta tarefa. Devido à grande intensidade dos gradientes térmicos, a melhor maneira de observar as variações espaciais e temporais da C.S. é através de técnicas de Sensoriamento Remoto.

Medições de características sinópticas e multi-temporais obtidas por sensores orbitais permitem uma avaliação espacial e temporal da variabilidade dos campos de temperatura da superfície do mar (TSM), historicamente sub-amostrados por plataformas convencionais como navios e bóias oceanográficas.

Olson et al. (1988), Podestá et al. (1991) e Provost et al. (1992) utilizaram imagens do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) para analisar as variações temporais das TSM's na região da Confluência Brasil-Malvinas.

O objetivo deste trabalho é analisar estatisticamente, pelo método das Funções Ortogonais Empíricas (EOF's) uma série temporal de imagens AVHRR da região da Confluência Brasil-Malvinas, em escalas de tempo de 3 meses (trimestre) a 5 anos, para caracterizar a variabilidade dos campos de TSM na área de estudo.

2 Base de Dados e Metodologia

Foram utilizadas 260 imagens de TSM médias semanais, com resolução espacial de 18x18Km, referentes ao período entre janeiro de 1989 e dezembro de 1993, distribuídas pelo NODS/JPL. Os dados de TSM são derivados de imagens diurnas do AVHRR, processadas pelo algoritmo Multichannel Sea Surface Temperature (MCSST) da universidade de Miami. Os

valores MCSST são armazenados na forma de uma base global de 2048x1024 pixels.

A partir das imagens MCSST globais, foi selecionada a área de estudo referente à região da Confluência Brasil-Malvinas. As imagens obtidas foram georreferenciadas na projeção Mercator e classificadas pelo método do fatiamento (realçamento a pseudo-cor). Foram acrescentadas grades de referência geográfica e anotações às imagens temáticas.

Foram calculadas médias sazonais trimestrais para o período considerado (janeiro de 1989 a dezembro de 1993), com superposição de 1 mês para trimestres consecutivos. Esta superposição foi realizada para suavizar a nova série de imagens médias sazonais, uma vez que se pretende detectar variações interanuais mais do que intrasazonais. Desta forma, a série original de 260 imagens semanais foi reduzida a 30 imagens médias sazonais, ou seja, 6 imagens trimestrais por ano (janeiro-fevereiro-março; março-abril-maio; maio-junho-julho; julho-agosto-setembro; setembro-outubro-novembro e novembro-dezembro-janeiro).

A série temporal de 30 imagens médias sazonais foi submetida a dois métodos de análise estatística: análise das Funções Ortogonais Empíricas (EOF) e análise espectral das séries de Componentes Principais pelo método da Máxima Entropia (MEM).

Dados de satélite se caracterizam, em geral, por estarem mais densamente distribuídos no espaço do que no tempo. Portanto, as análises para interpretação dos mesmos requerem ferramentas que permitam analisar tanto as variações temporais como espaciais presentes nos dados. Ainda, tem-se tornado cada vez mais importante se encontrar meios de comprimir grandes conjuntos de dados ao mesmo tempo em que se extrai o máximo de informação possível.

A análise das EOF's é eficiente no sentido de que campos de dados altamente correlacionados podem ser adequadamente representados pelo menor número de funções ortogonais e seus coeficientes temporais correspondentes (Componentes Principais). Quanto maior a correlação entre os dados, menor o número de funções

As EOF's são ordenadas com os autovalores em ordem decrescente, sendo que a primeira EOF explica a maior fração da variância total. Este método de análise estatística já foi aplicado anteriormente a campos de TSM por diversos autores (Weare, 1977; Servain e Legler, 1986; Kampel, 1993, Vianna e Kampel, 1995). O algoritmo utilizado neste trabalho para aplicação do método está descrito em Murray et al. (1984). Foram geradas as três primeiras EOF's e suas respectivas séries temporais de Componentes Principais.

Os espectros de potência das séries de Componentes Principais das três primeiras EOF's foram estimadas pelo método MEM, devido a sua maior resolução espectral, principalmente em casos de séries curtas, e economia no tempo computacional, em relação a outros métodos espectrais. O espectro de máxima entropia de uma série temporal $x_i, i=1, \dots, N$ é o espectro teórico de um processo autoregressivo de ordem $p < N$ que se ajusta aos dados minimizando o erro quadrático (Ulrych e Bishop, 1975). Embora o MEM permita detectar periodicidades mais acuradamente que outros métodos espectrais, as amplitudes observadas nos picos espectrais por este método não são confiáveis (Kane e Trivedi, 1982). O cálculo dos espectros neste trabalho, foi baseado no MEM descrito em Press et al. (1986). Os dados foram destendenciados antes do cálculo do MEM, adotando-se a escala linear para o eixo das frequências.

3 Resultados e Discussão

As figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam as imagens temáticas produzidas a partir dos resultados obtidos pela análise das EOF's e as séries temporais das três primeiras Componentes Principais associadas a estas funções.

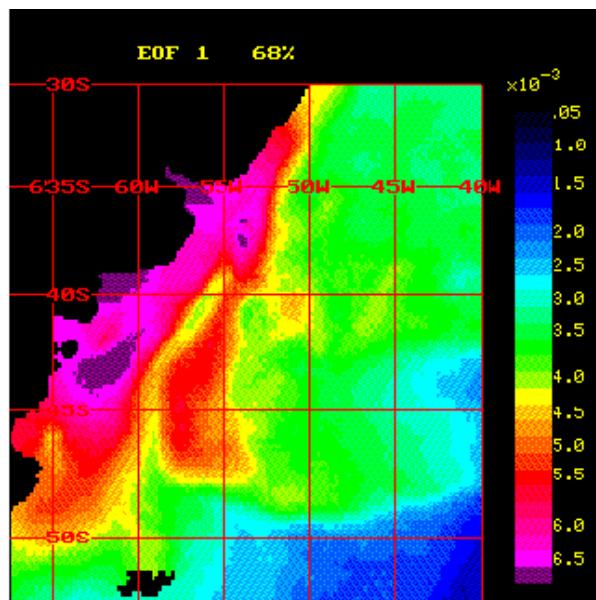


Figura 3.1 - Primeira EOF

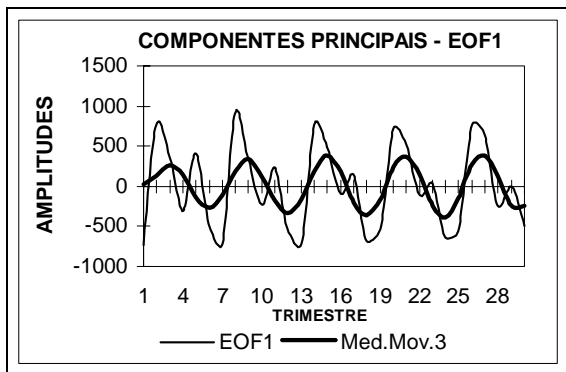


Figura 3.2 - Primeira Componente Principal

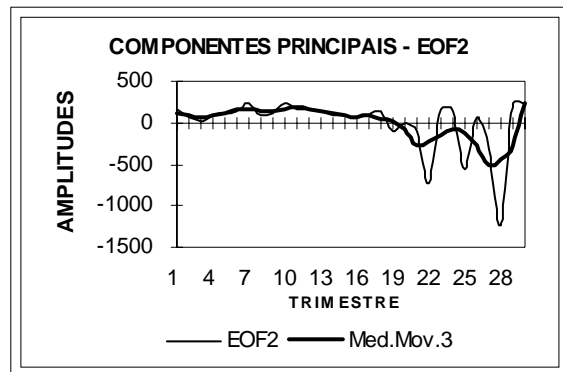


Figura 3.4 - Segunda Componente Principal

As porcentagens da variância explicada pelas três primeiras EOF's são mostradas na tabela 3.1.

Não existe, até o presente momento, nenhum método completamente eficaz para determinar o número de funções ortogonais empíricas realmente significativas. Neste trabalho, decidiu-se examinar somente as 3 primeiras EOF's, uma vez que estas funções explicam a maior parte da variância dos dados.

Tabela 3.1 - Porcentagens da variância explicada pelas 3 EOF's.

EOF	%	% cumulativa
1	68.0	68.0
2	24.0	92.0
3	4.9	96.9

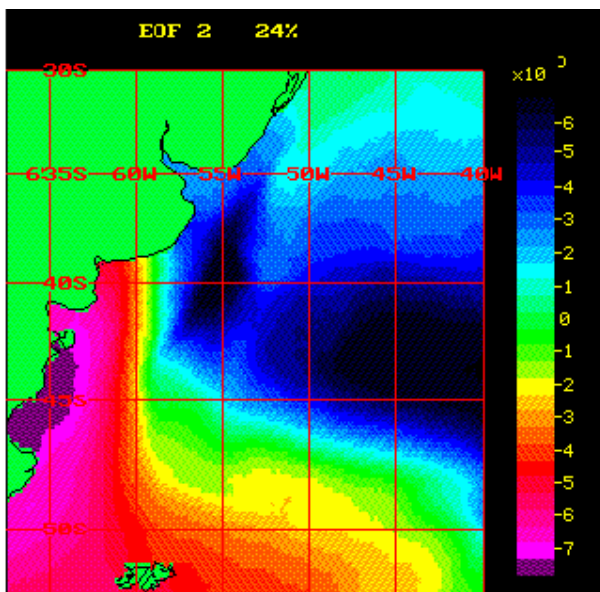


Figura 3.3 - Segunda EOF

Os valores apresentados na Tabela 3.1 são similares aos valores encontrados por Weare (1977), Servain e Legler (1986) e Kampel (1993).

A primeira EOF (fig. 3.1) explicando 68.0% da variância total dos dados, está em fase em quase toda a região considerada neste estudo, e identifica o modo principal de variação dos dados, representando o ciclo anual.

A série temporal das Componentes Principais correspondentes a esta função (fig. 3.2) apresenta um comportamento estável, ocorrendo picos positivos durante o inverno austral e picos negativos durante o verão austral.

A análise espectral MEM determinou as frequências presentes. O pico de maior energia, cuja frequência é igual 0,1722, corresponde a um período de 11.62 meses e está associado ao ciclo anual. Um segundo pico bem definido, porém de menor energia, cuja frequência é de 0.3352, equivale a um período de 5.96 meses. Este período corresponde ao ciclo semi-anual.

A segunda EOF (fig. 3.3), explicando 24.0% da variância dos dados, e a terceira EOF (fig. 3.5), explicando 4.9%, apresentam um padrão de sinais opostos em relação à linha de autovetores com valores iguais a zero (0). Na segunda EOF, esta linha está disposta, aproximadamente, no sentido NO-SE, observando-se valores positivos na parte sudoeste da imagem e valores negativos na parte NE. Na terceira EOF, a parte negativa localiza-se a leste da imagem e a região mais próxima da costa apresenta sinais positivos.

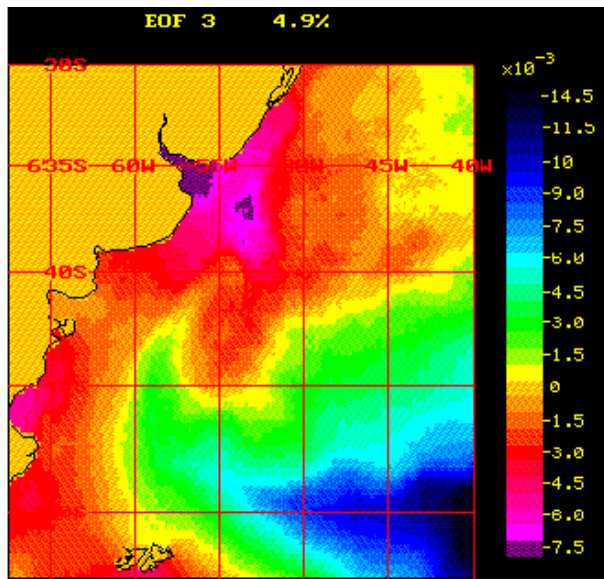


Figura 3.5 - Terceira EOF

A série de coeficientes temporais associada a segunda EOF (fig. 3.4), assim como a série associada a terceira EOF (fig. 3.6), apresentam um comportamento menos regular que a série referente à primeira EOF (fig. 3.2).

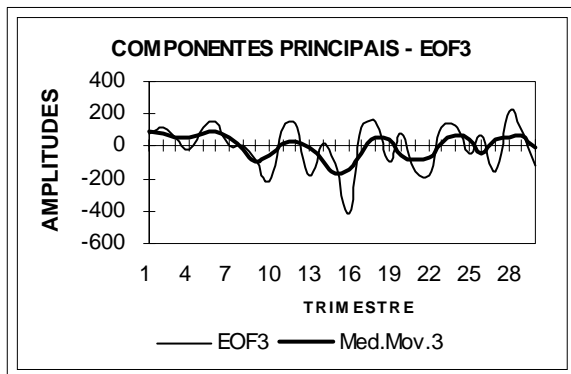


Figura 3.6 - Terceira Componente Principal

O espectro MEM relativo à segunda Componente Principal apresentou picos espectrais cujas frequências, em ordem decrescente de energia relativa, são: 4.0133×10^{-2} , 0.3144 e 0.1649. Estas frequências equivalem a períodos de 48.8 meses (4.15 anos), 5.7 meses e 11.5 meses, correspondentes aos ciclos interanual, semi-anual e anual, respectivamente.

Com relação ao espectro referente à terceira série de coeficientes temporais, as frequências determinadas são: -0.3562, 4.004×10^{-2} , 0.1666 e 0.4685. Estas frequências correspondem a períodos de 5.62 meses

(semi-anual), 4.16 anos (interanual), 12.0 meses (anual) e 4.26 meses (intersazonal).

A tabela 3.2 apresenta um resumo dos períodos detectados pela análise espectral das séries de Componentes Principais referentes às três primeiras EOF's mostradas neste trabalho.

Tabela 3.2 - Períodos espectrais referentes às 3 primeiras EOF's

EOF	Períodos
1	anual, semi-anual
2	interanual, semi-anual, anual
3	semi-anual, interanual, anual, intersazonal

Diversos autores já evidenciaram a importância do ciclo anual no Atlântico e na região da Convergência Subtropical. Apesar do ciclo anual ter explicado a maior parte da variância dos dados neste trabalho, pode-se observar que outros sinais (semi-anual, interanual) explicam outras perturbações dos campos de TSM.

Olson et al. (1988) avaliaram as variações temporais da Confluência Brasil-Malvinas, a partir de 3 anos (julho de 1984 a junho de 1987) de imagens AVHRR. A variabilidade temporal observada sugere excursões cíclicas das correntes marinhas ao longo da costa sul-americana, com períodos anual e semi-anual, embora ocorra considerável variação interanual no sinal.

Garzoli e Garrafo (1989) estudaram a dinâmica da região de Confluência Brasil-Malvinas, a partir de dados obtidos por 3 ecobatímetros invertidos instalados no Atlântico Sudoeste. Os resultados mostraram que a principal movimentação da frente termal localizada na área considerada era no sentido leste-oeste, com períodos de 12 meses, estando relacionada com a variabilidade da latitude máxima de penetração da C.M.

Podestá et al. (1991) estimaram o ciclo anual dos campos de TSM do Atlântico Sudoeste a partir de 4 anos (julho de 1984 a julho de 1988) de imagens AVHRR. O ciclo anual explicou a maior parte da variabilidade dos dados de TSM, ainda que o sinal semi-anual também tenha sido detectado. A existência de tendências interanuais foi investigada, mas sem resultados conclusivos.

Provost et al. (1992) analisou a variabilidade de séries temporais de TSM na região da Confluência

Brasil-Malvinas, utilizando dados AVHRR referentes ao período de julho de 1984 a julho de 1987. O sinal dominante apresentou período de 1 ano, ainda que o sinal semi-anual tenha sido detectado em quase toda a área considerada no estudo. Foram também observados períodos maiores que 1 ano, indicando variabilidade interanual, principalmente na região da frente Brasil-Malvinas.

Kampel (1993) descreveu os modos principais de variabilidade dos campos de TSM no Atlântico utilizando dados AVHRR, no período entre janeiro de 1989 e dezembro de 1991. O ciclo anual foi caracterizado como o sinal dominante, ainda que os sinais interanual, semianual e intrasazonais tenham sido detectados.

Vianna e Kampel (1995) avaliaram a dinâmica dos campos de TSM do Atlântico (45°N-45°S) através de análises estatísticas de cinco de anos de dados MCSST/AVHRR. Foi mostrado que a área sob influência da Corrente das Malvinas no Atlântico sudoeste apresenta um máximo de variabilidade com período interanual.

É interessante observar que em uma região de intensa atividade em meso-escala como a Confluência Brasil-Malvinas, as variações dos campos de TSM sejam dominadas por variações de baixa-frequência.

A descrição do ciclo anual das TSM's tem grande importância em estudos de interação oceano-atmosfera e climáticos. Ainda, a remoção do sinal sazonal dominante beneficia a realização de estudos no âmbito das mudanças climáticas.

4 Conclusão

Este trabalho mostra que a análise pelo método das EOF's constitui uma importante ferramenta para caracterizar a variabilidade dos campos de TSM na região da Confluência Brasil-Malvinas.

As 3 primeiras EOF's explicaram 96.9% da variância total dos dados.

A análise espectral pelo MEM aplicada às séries de Componente Principais associadas às EOF's analisadas, detectou frequências correspondentes aos ciclos anual, semi-anual e interanual.

O ciclo anual foi identificado como o modo principal de variação dos dados.

A utilização de médias sazonais trimestrais mascarou a identificação de variações intrasazonais detectadas por outros autores.

Ainda que as informações orbitais utilizadas neste trabalho por si só não bastem para se fazer uma caracterização oceanográfica da região estudada, já que

não se contam com os valores de outros parâmetros fundamentais, como a salinidade e/ou perfis verticais, elas servem de apoio a estudos oceanográficos mais completos, fundamentalmente devido à sua cobertura sinóptica e sistemática da região considerada, o que permite a realização de um estudo multi-temporal e de ampla cobertura espacial.

Sugere-se que um novo estudo seja realizado, com a remoção do ciclo anual da base de dados, para aperfeiçoar o entendimento da variabilidade dos campos de TSM na região da Confluência Brasil-Malvinas.

Referências

- Garzoli, S.L.; Garrafo, Z. Transports, frontal motions and eddies at the Brazil-Malvinas currents confluence. *Deep-Sea Research*, 36(5):681-703, 1989.
- Gordon, A.L. Brazil-Malvinas confluence - 1984. *Deep-Sea Research*, 36(3):359-384, 1989.
- Kampel, M. *Caracterização dos modos principais de variabilidade dos campos de TSM no Atlântico utilizando dados AVHRR* (Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993, 111p. (INPE-5535-TDI/523).
- Kane, R.P.; Trivedi, N.B. Comparison of maximum entropy spectral analysis (MESA) and least-squares linear prediction (LSLP) methods for some artificial samples. *Geophysics*, 4(12):1731-1736, 1982.
- Murray, C.W.; Mueller, J.L.; Zwally, H.J. Matrix partitioning and EOF/Principal Components analysis of Antarctic sea ice brightness temperatures. Greenbelt, MD, NASA/Center for Aerospace Information, 1984. 86p. (NASA Technical Memorandum 83916).
- Olson, B.D.; Podestá, G.P.; Evans, R.H.; Brown, O.B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. *Deep-Sea Research*, 35(12):1971-1990, Dec. 1988.
- Podestá, G.P.; Brown, O.B.; Evans, R.H. The annual cycle of satellite derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic ocean. *Journal of Climate*, 4:457-466, Abr. 1991.
- Press, W.H.; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T. Fourier transform spectral methods. In: *Numerical Recipes - the art of scientific computing*. Cambridge University Press, 1988. cap. 12, p. 381-453.
- 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, Nov. 1992.

Servain, J.; Legler, D.M. Empirical orthogonal function analysis of tropical Atlantic sea surface temperature and wind stress: 1964-1979. *Journal of Geophysical Research*, 92(12):14181-14151, Dec. 1986.

Ulrych, T.J.; Bishop, T.N. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13(1):183-200, 1975.

Vianna, M.L.; Kampel, M. A high resolution study of the dynamics of Atlantic SST fields. In: International Scientific Conference on Tropical Oceans Global Atmosphere, Melbourne, Australia, april 2-7, 1995. *Proceedings*, in press.

Weare, B.C. Empirical orthogonal analysis of Atlantic ocean surface temperatures. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 103:467-478, 1977.