

Um estudo sobre a variabilidade espaço/temporal da frente interna da corrente do Brasil usando imagens AVHRR/NOAA

José Luiz Stech¹
João Antonio Lorenzetti¹
Wilson Lins de Mello Filho^{1,2}

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
{stech,loren,wilson}@itid.inpe.br

²Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - IEAPM
Rua Kioto, 253 – Praia dos Anjos - 28.930-000 – Arraial do Cabo, RJ
linsdemello@ieapm.mar.mil.br

Abstract. A data set of 199 maps of Sea Surface Temperature; derived from the sensor Advanced Very High Resolution Radiometer of the NOAA-12 -14 satellites was processed to derive the position of the internal frontal boundary of the Brazil Current in the SE Brazilian coastal and oceanic area. After the derivation of the position of the BC frontal zone for each image, their digital vectors were processed using the Algorithm of Frontal Density. This algorithm calculates for each cell in the domain an index which expresses the presence and persistence of the front in that area. It is also a measure of the probability of finding the front in the region. In the paper we present the results of the ADF formulation in order to get a better view of the space and time variability of the BC front in the region.

Palavras Chaves: Internal fronts of Brasil Current, AVHRR/NOAA images, front density algorithm, frente interna da Corrente do Brasil, imagens AVHRR/NOAA, algoritmo de densidade de frentes

1-Introdução

A corrente do Brasil (CB) é uma corrente de contorno oeste associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul. Origina-se nas imediações de 10°S, a partir da bifurcação do ramo mais setentrional da Corrente Sul Equatorial (CSE) formando também a Corrente Norte do Brasil (CNB), que segue em direção às Guianas (Silveira *et al.*, 1994). O transporte de água da CB é relativamente pequeno, inicialmente cerca de 4 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), quando comparada com outras correntes de contorno oeste (Peterson e Stramma, 1991). O eixo principal da corrente flui para sudoeste acompanhando a orientação do talude continental como uma corrente superficial rasa (Castro, 1996), onde cerca de metade do seu transporte ocorre sobre a plataforma em profundidades menores que 200m (Tomczak e Godfrey 2001).

Segundo Signorini (1978), embora a CB seja uma corrente relativamente fraca, estreita e de águas relativamente rasas, ela é comparável a Corrente do Golfo (CG) no tocante ao desenvolvimento de meandros e na geração de vórtices de mesoescala. Estes, observados na região frontal da CB, podem resultar de instabilidade baroclínica (associada à estratificação vertical da densidade), da interação com a batimetria local e da força do vento (Robinson, 1985). Em trabalho recente, Calado (2006) mostrou por meio de modelagem numérica que processos de instabilidade barotrópica, decorrentes do cisalhamento lateral existente entre a CB e as correntes sobre a plataforma, também contribuem, embora em menor grau, ao desenvolvimento de meandramentos e vórtices da CB. Estudos sobre a ocorrência dos vórtices de Vitória, Cabo Frio e Cabo de São Tomé e suas conseqüências ambientais e ecológicas demonstram a importância do conhecimento de um padrão para a ocorrência destes fenômenos e suas variabilidades (Schmid *et al.*, 1995; Gaeta *et al.*, 1999).

Com a mudança abrupta da orientação da linha de costa de NE-SW para E-W, imediatamente ao sul de Cabo Frio, a CB passa a girar ciclonicamente para oeste, aproximando-se novamente da quebra da plataforma nas proximidades do paralelo de 24°S, em decorrência da conservação da vorticidade potencial. Ao penetrar na plataforma continental, cruzando as isóbatas quase perpendicularmente, a CB gira anticiclonicamente para sudoeste, meandrando ao longo da margem interna do talude continental (Castro, 1996). A CB está diretamente ligada à dinâmica de superfície do mar ao longo da costa brasileira, principalmente nas regiões sudeste e sul. Garfield (1990) observa que a frente térmica da Corrente do Brasil está associada à quebra da plataforma e pode ter sua posição média indicada pela isóbata de 200 m.

Como a CB é altamente dinâmica e sofre variações em escalas temporais sazonais e interanuais e escalas espaciais de km a dezenas de km, é importante dispor de ferramentas adequadas para estudá-la em todas estas escalas. As imagens termais dos satélites da série NOAA têm demonstrado ser uma ferramenta indicada para estudos da CB nessas diferentes escalas. Diferenças da temperatura da superfície do mar (TSM) entre a CB e as águas mais frias sobre a plataforma na costa SE/S possibilitam a demarcação da região frontal da CB.

Assim, o objetivo deste trabalho é estudar as variações temporais e espaciais da Frente Interna da Corrente do Brasil usando-se imagens de TSM, geradas a partir dos dados coletados pelos sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) dos satélites TIROS-N/NOAA.

2-Material e método

A área de estudo deste trabalho está compreendida entre os paralelos de 19°S e 30°S e os meridianos de 039°W e 050°W, ver Figura 1.

As imagens de TSM utilizadas foram geradas a partir dos dados coletados pelo sensor AVHRR/2 a bordo dos satélites NOAA-12 e NOAA-14 para os anos de 2000 a 2002. Devido

a grande cobertura de nuvens apresentada na região de estudo adotou-se o seguinte procedimento para a seleção das imagens utilizadas: para cada período de três dias escolheu-se a melhor imagem. Com este procedimento, e a cobertura de nuvens observada no período, foi possível a geração de 199 imagens.

Para caracterizar a variabilidade sazonal da frente da CB, os dados foram agrupados segundo as estações do ano: verão, meses de dezembro a fevereiro; outono, meses de março, a maio; inverno, meses de junho a agosto, e finalmente primavera, meses de setembro a novembro.

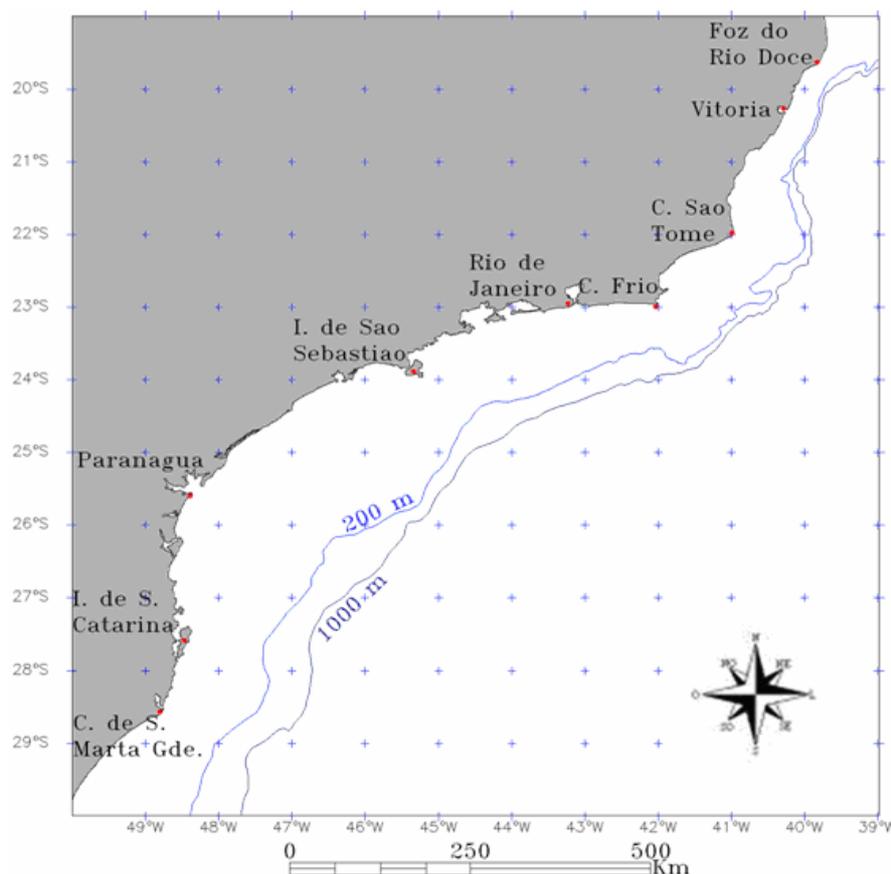


Figura 1. Área de estudo. Linhas contínuas em azul representam as isobatimétricas de 200 e 1000 m, e indicam a região do talude continental na região.

A obtenção dos mapas de TSM a partir dos dados gerados pelo sensor AVHRR/NOAA no formato 1B foi realizada através do programa ENVI, usando-se suas ferramentas de cálculos de TSM e georeferenciamento. Para a correção atmosférica e derivação da TSM a partir das temperaturas de brilho, derivados dos canais termais 3, 4 e 5, aplicou-se um algoritmo multicanal (Multichannel Sea Surface Temperature Algorithm – MCSST).

A determinação da região frontal da CB foi realizada visualmente, a partir de realce digital aplicado à imagem TSM, em tons de cinza, de forma a tornar mais facilmente identificáveis as regiões de maior gradiente de temperatura, determinante da fronteira entre feições na superfície do oceano. Para cada imagem, a posição da frente foi extraída pela geração de vetores digitais, posicionados na região de gradiente máximo de TSM, armazenados para posterior análise. Para o estudo da variabilidade espacial da feição interna à CB utilizou-se o algoritmo de densidade de frentes (ADF). Para a geração do mapa de densidade de frentes, a região de interesse é dividida numa grade regular. Para cada elemento

da grade são determinados os segmentos dos vetores de frente ali presentes. Calcula-se a somatória dos comprimentos dos vetores no elemento (em km) e divide-se pela área do elemento (km^2), o que resulta num índice, dado por km/km^2 , ou km^{-1} . Locais onde o valor da densidade de frentes é maior estão relacionados à maior probabilidade de encontro da frente nessas posições. Este método foi aplicado inicialmente por Brown et al. (1986) para determinar a distribuição espacial dos vórtices formados pela corrente do Golfo. Garzoli et al. (1992) e Saraceno et al. (2004) utilizaram metodologia semelhante para estudar as feições termais na região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM).

3-Resultados e Discussão

O conjunto de feições digitalizadas correspondentes à FICB ao longo do período de 2000 a 2002 (Figura 2) constituiu a base de dados resultado da aplicação do ADF. Nessa e demais figuras de ADF, os maiores valores de ADF correspondem a níveis de cinza mais escuros. Uma primeira análise da Fig. 2 mostra a presença da FICB, em diferentes graus de ocorrência de frentes, praticamente em toda a região de estudo. No entanto, nas duas regiões extremas, norte e sul do domínio, a presença da FICB detectada nas imagens, é praticamente zero. Como já observado em inúmeros estudos anteriores, nota-se também nessa figura que os valores de ADF tendem a acompanhar a região de quebra da plataforma continental, marcada pela isobatimétricas de 200 e 1000m de profundidade. Garfield (1990) utilizando dados hidrográficos e uma série de temporal de imagens TSM da década de 1980 observou uma relação entre o posicionamento da FICB e a batimetria local. Este autor observou uma característica bimodal da posição da frente, ou seja, duas áreas principais de ocorrências, uma nas proximidades de Cabo de São Tomé e outra em Cabo Frio. Tal característica também pode ser observada nos valores ADF obtidos nesse trabalho. Sartori Neto (2004) utilizando um conjunto de imagens termais observou que os deslocamentos da FICB em relação a isobatimétrica de 200 m é crescente na medida que CB flui para sul. No presente estudo, nota-se que o maior espalhamento na posição da FICB está localizado a S/SW de Cabo Frio, onde a mudança brusca da orientação da linha da costa induz processos de meandramento e geração de vórtice na região. É interessante, entretanto, ser notada a tendência da CB em retornar à sua posição normal entre as isobatimétricas de 200 e 1000 m ainda no litoral do Rio de Janeiro, frente à Ilha Grande.

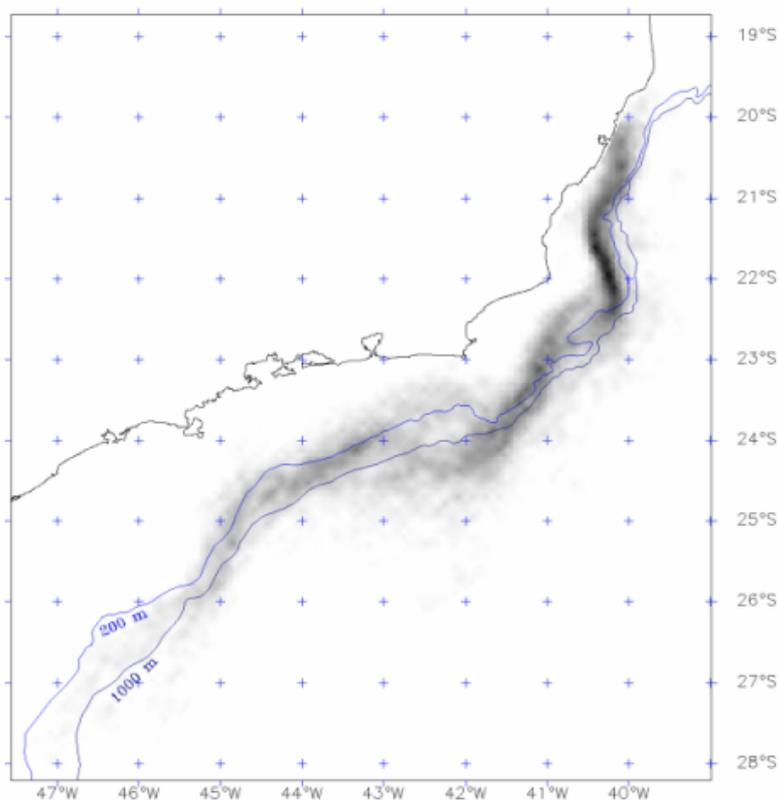


Figura 2. Densidade de frentes para o período 2000 a 2002, obtida por meio da aplicação do ADF sobre as feições da CB digitalizadas.

Vê-se também pela Figura 2 que os maiores valores ADF estão situados entre as latitudes de 20 e 22,5°S, na porção norte de nossa região, e sobre a plataforma continental. Os máximos valores ADF são encontrados na região da plataforma externa frente ao Cabo de São Tomé, entre os paralelos 21,5 e 22,5°S, cerca de 20 km da isobatimétrica de 200m. Entre os meridianos 042°30'W e 043°W e na altura do paralelo 24°S os valores ADF adquirem um maior espalhamento, decorrente da intensa incidência de meandros e vórtices característicos desta região. Tais meandros e vórtices foram observados por outros autores, tais como Stech et al. (1996).

Para uma avaliação das variações sazonais dos valores ADF, as imagens foram agrupadas e processadas por estação do ano. Na Figura 3 é mostrada a variabilidade sazonal da FICB obtida pela aplicação do ADF.

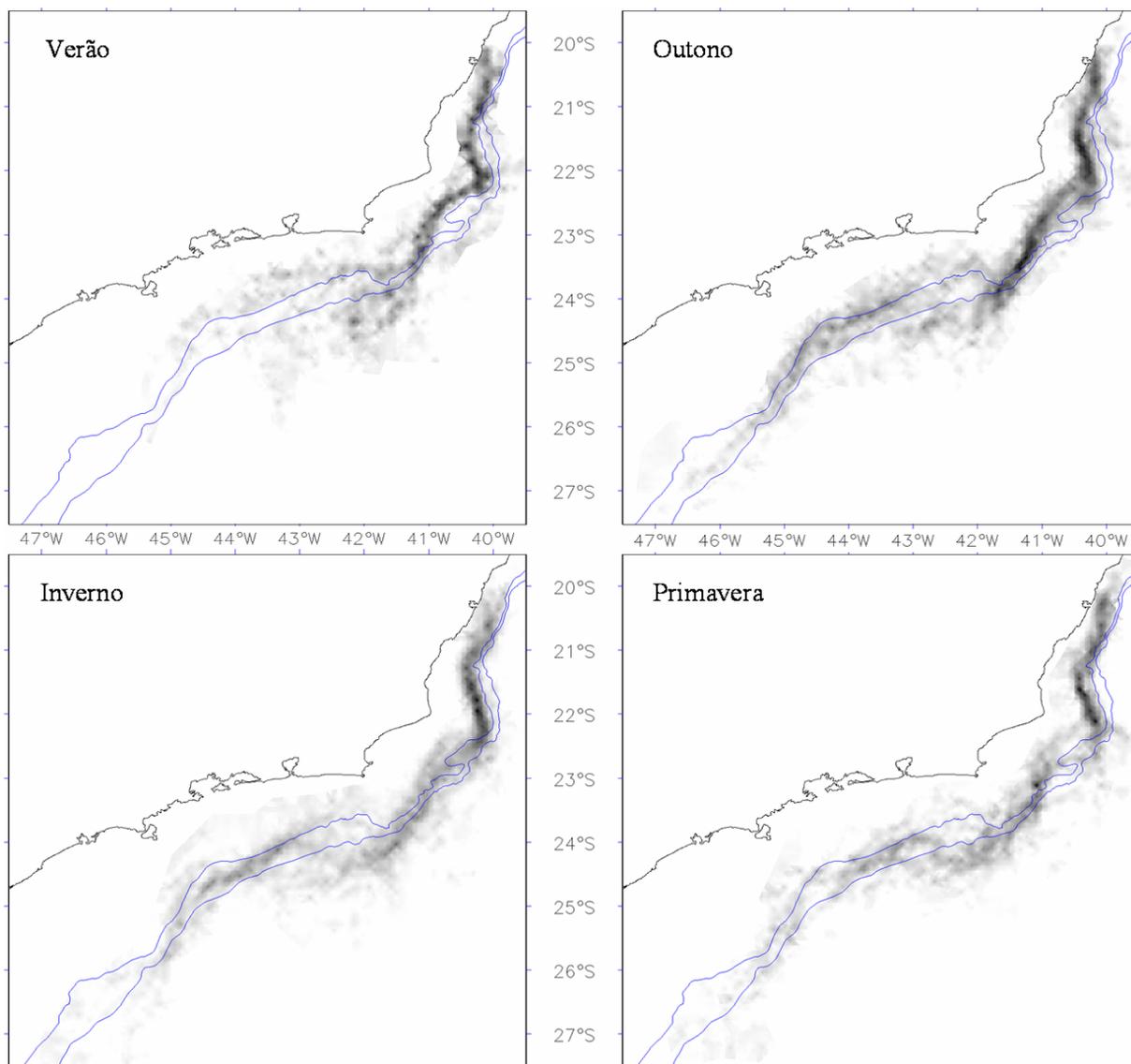


Figura 3. Variabilidade sazonal da FICB obtida pela aplicação do ADF, período 2000 a 2002.

Para todas as estações do ano, mas em menor grau para o inverno, observa-se na região norte da área de estudo uma aproximação da FICB da costa. Embora vários autores, tais como Schmid et al. (1995) e Gaeta et al. (1999), tenham observado feições vorticiais nesta região, neste trabalho não foi possível observá-las via o índice ADF. Em direção a sul, na região da Baía de Campos, todas as médias sazonais ADF se aproximam da isobatimétrica de 200 m. Durante o inverno a distancia chega a cerca de 10 km e para as demais estações as mesmas são de aproximadamente 40 km.

Na região a sudeste de Cabo Frio, os maiores índices de densidade de frentes estão situados sobre as isobatimétricas de 200 e 1000 m. Verifica-se também um aumento sensível no espalhamento das frentes, particularmente para as estações de outono e inverno. Este espalhamento está ligado à formação de vórtices e meandros nesta região.

Dentre todas as estações, durante a primavera pode-se notar uma tendência da frente em afastar-se da costa, com máxima distância de cerca de 160 km, à altura de Saquarema - RJ. Na área a sudoeste do Rio de Janeiro - RJ, em todas as estações exceto o verão, os maiores valores de densidades de frentes acompanham as isobatimétricas de 200 e 1000 m, situando-

se na maior parte entre elas. Para essa região, a maior aproximação da frente da CB em relação à costa se dá no verão.

A fim de avaliar possível variabilidade entre os índices ADF para os três anos analisados, agruparam-se todas as frentes observadas em cada ano para análise em separado. Na Figura 4 é mostrada a densidade da frente para cada ano estudado. Particularmente para a região entre 20 e 24° S, pode-se notar grande similaridade da posição de máximo ADF nos três anos. A maior diferença foi apresentada na região do talude entre Ilha de São Sebastião e Ilha Grande, com a posição da frente da CB bastante persistente na região do talude no ano de 2000. A região de forte presença de vórtices a SE de Cabo Frio é perfeitamente visível nos três anos.

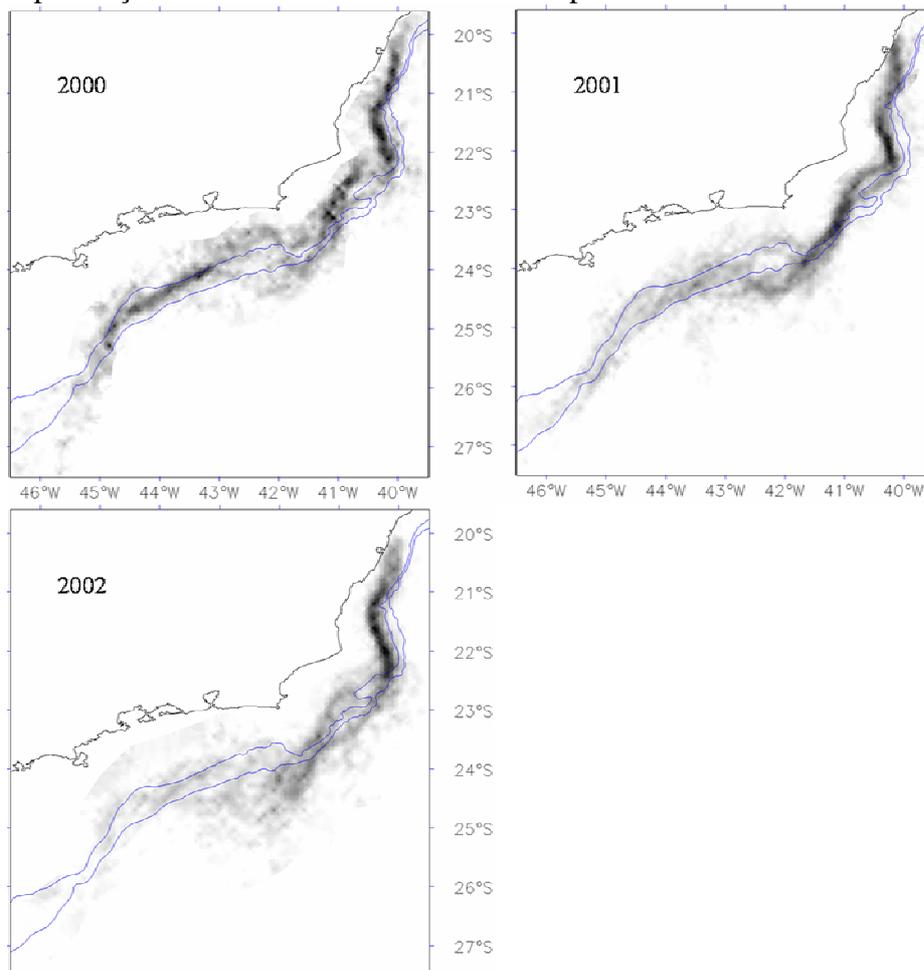


Figura 3. Campos de densidade de frentes da CB em 2000(a), 2001(b) e 2002(c)

4-Conclusões

Utilizando-se 199 imagens AVHRR/NOAA para os anos de 2000 a 2001 e o algoritmo de densidade de frentes (ADF) foi possível se observar as variabilidades espacial e temporal da frente interna da Corrente do Brasil (FICB) para a costa SE brasileira. A localização média da FICB para o período de 2000 a 2002 e as variações sazonais puderam ser determinadas com razoável precisão. Os valores de ADF permitem se observar as regiões onde vórtices e meandros da CB têm alta probabilidade de ocorrência. Os resultados obtidos pela técnica ADF foram bastante coerentes quando comparados com trabalhos apresentados na literatura e que utilizaram outras fontes de dados e outras metodologias.

5-Referencias Bibliográficas

- Brown, O. B.; Cornillon, P. C.; Emmerson, S. R. Carle, H. M. Gulf Stream warm rings: a study of their behavior. **Deep Sea Research**, v. 33, n. 11/12, p. 1459-1473, 1986.
- Castro Filho, B. M. **Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo**. São Paulo, 248p. Tese (Livre Docência) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1996.
- Calado, L.; Dinâmica da interação da atividade de meso-escala da Corrente do Brasil com o fenômeno da ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ. 159 p Tese de doutorado – Instituto Oceanográfico, USP. 2006.
- Castro Filho, B. M.; Miranda, L. B. Physical oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°N and 34°S coastal segment (4,W). In: Robinson, A. R., Brink, K. H. (eds). **The Sea**, Volume 11. John Wiley & Sons: 1998. Cap. 8, p. 209-251.
- Gaeta, S. A.; Lorenzetti, J. A.; Miranda, L. B.; Susini-Ribeiro, S. M. M.; Pompeu, M.; Araújo, C.E.S. The Vitória Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during the austral fall of 1995. **Archive of Fishery and Marine Research**, v. 47, n. 2/3, p. 253-270, June 1999.
- Garfield, N. III. **The Brazil Current at subtropical latitudes**. 1990. 122p. Tese (Doctor of Philosophy in Oceanography) - University of Rhode Island, USA. 1990.
- Garzoli, S. L.; Garrafo, Z.; Podestá, G.; Brown, O. Analysis of a general circulation model product 1. Frontal systems in the Brazil/Malvinas and Kuroshio/Oyashio regions. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. C12, p. 20117-20138, Dec. 1992.
- Peterson, R. G.; Stramma, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1-73, Feb. 1991.
- Robinson, I. S. **Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists**. West Sussex: England, 1985. 455p.
- Saraceno, M.; Provost, C.; Piola, A. R.; Bava, J.; Gagliardini, A. Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, C05027, 14p., 2004.
- Sartori Neto, A. **Análise de imagens termais AVHRR utilizando transformada de Fourier e ondaletas para a determinação de padrões em vórtices e meandros**. 2004. 90p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, MinasGerais, Brasil. 2004.
- Schmid, C.; Schäfer, H.; Podestá, G.; Zenk, W. The Vitória eddy and its relation to the Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 25, n. 11, p.2532-2546, Nov. 1995.
- Silveira, I. C. A. da; Miranda, L. B.; Brown, W. S. On the origins of the North Brazil Current. **J. Geophys. Res.**, v99, n.11, p.22501-22512, 1994.
- Signorini, S. R. On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. **Deep-Sea Research**, v. 25, n. 5, p. 481-490, May 1978.
- Stech, J. L.; Lorenzetti, J. A.; Souza, J. M. C.; Araújo, C. E. S. A mesoscale Brazil Current Frontal Eddy observed through AVHRR images and current meter moorings. **In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXI, part B7, 1996, Vienna, p. 650-654.
- Tomczak, M.; Godfrey, J. S. Regional Oceanography: an introduction, Dec, 2001.
<www.lei.furg.br/ocfis/mattom/regoc/pdfversion.html> Dez. 2003.