

Análise de imagens termais AVHRR utilizando transformada de Fourier para determinação de padrões em vórtices e meandros

Angelo Sartori Neto¹,
Vicente Paulo Soares²,
José Antônio M. Lima¹,
Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro²,
James Jackson Griffith²

¹ PETROBRAS - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello -
Cidade Universitária - Q. 7 - Ilha do Fundão - 21941-598 - Rio de Janeiro - RJ
{angelosartori, jamlima@petrobras.com.br}

² Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Florestal
36571-000 Viçosa - MG
{vicente, cribeiro, griffith@ufv.br}

Abstract – This work evaluates the spatial scales of the Brazil Current meanders, using the Fast Fourier Transform analysis. The thermal fronts of the Brazil Current were digitized on the Sea Surface Temperature (SST) AVHRR images, using 371 images between 1993 and 2001. The results of this analyses indicated that the main spatial scales were 200 and 400 kilometers.

Palavras-chave – **Correntes do Brasil**, imagens termais, análise de Fourier, oceanografia física, Brazil Current, Fourier analysis, thermal images

1. Introdução

As técnicas de análise de séries temporais vem sendo utilizadas com o intuito de determinação de padrões nas variáveis ambientais, na investigação de possíveis fenômenos periódicos e em estudos eventos de escala globais como o efeito estufa, El Niño e La Niña. Atualmente dispõe-se de uma gama variada de fonte de dados, provenientes de medições *in situ*, ou obtidas por sensoriamento remoto. As imagens de temperatura da superfície do mar (TSM) revelaram feições e estruturas de diferentes escalas, como frentes termais, vórtices e meandros, que por sua vez constituem a manifestação de fenômenos físicos importantes do oceano.

Neste trabalho, imagens de TSM serão usadas para identificação de anomalias de mesoescala que ocorrem ao longo da Corrente do Brasil, costa sudeste brasileira. Técnicas de análise de sinais serão empregadas para auxiliar na análise dessas feições. Os resultados podem servir de subsídio para outros estudos, como por exemplo na assimilação de dados ambientais em modelos numéricos de previsão da circulação oceânica. Por sua vez, esses modelos podem ser utilizados na modelagem matemática da dispersão de efluentes, simulação de vazamentos hipotéticos de óleo no mar

2. Objetivos

O presente estudo tem como principais objetivos:

- estimar as dimensões espaciais dos meandros da Corrente do Brasil (CB), a partir da sua frente térmica discretizada sobre as imagens de temperatura da superfície do mar (TSM);
- adaptar e utilizar o algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) para análise espectral, no domínio do espaço, das frentes térmicas discretizadas, estimando os comprimentos de ondas associados aos meandros da CB;

3. Corrente do Brasil

A Corrente do Brasil é considerada o limite oeste associada com o Giro Subtropical do Atlântico Sul, caracterizada por águas quentes, salinidade ($> 36_{\text{‰}}$) mais elevada e oligotrófica. A Corrente do Brasil origina-se como uma corrente superficial mais quente, na borda leste da Plataforma Continental da América do Sul, na altura da divergência da Corrente Sul Equatorial (aproximadamente 8° S). A CB flui para o Sul, ao longo da borda do Talude, até a divergência da Corrente das Malvinas, aproximadamente na latitude de 32° S.

Uma descrição das mudanças hidrográficas que ocorrem na Corrente do Brasil, à medida que ela flui para Sul, foi elaborada por Fisher (1964), citado por GARFIELD (1990). Utilizando várias fontes de dados, Fisher descreveu o processo de esfriamento e diminuição da salinidade à medida que o fluxo da CB atinge regiões de maiores latitudes. Em baixas latitudes ($10\text{-}15^{\circ}$ S), a média anual da temperatura de superfície é da ordem de $23,9^{\circ}\text{C}$ e salinidade de 36,5, transportando predominantemente Água Tropical (AT). Entre as latitudes de $30\text{-}35^{\circ}$ S, a temperatura superficial média cai para $18,4^{\circ}\text{C}$ e a salinidade para 35,53.

A ocorrência de instabilidades hidrodinâmicas de meso-escala, ao longo da Corrente do Brasil, tem sido observada nas proximidades de irregularidades topográficas. Estruturas com vórtices e meandros têm sido detectadas na região do talude, na região de Cabo Frio e cabo de São Tomé, com dimensões da ordem de 100 a 400 Km de diâmetro, os quais podem persistir por várias semanas. A Corrente do Brasil, ao fluir para Sul, apresenta a formação de grandes meandros que podem se fechar em estruturas ciclônicas (vórtices). A ocorrência dessas estruturas tem sido explicada com base em perturbações nas feições topográficas que, em função da mudança da orientação da linha de costa na altura de Cabo Frio, faria com que o fluxo da CB, centrado na isóbata de 1000 metros, deslocasse para regiões mais profundas. Esse deslocamento da CB causaria um estiramento da coluna d'água, adquirindo vorticidade ciclônica. Ao entrar na Baía de Santos, o fluxo da Corrente tenta se realinhar à isóbata de 1000 metros, retornando para regiões mais rasas, o que causaria uma compressão da coluna d'água e, novamente, por conservação de vorticidade, adquire vorticidade anticiclônica. Dessa forma, baseando-se no balanço de vorticidade, supõe-se que a CB forme meandros ciclônicos, dado origem as estruturas vorticais observadas em imagens de temperatura da superfície do mar (CALADO, 2001, GONÇALVES, 2000; SILVEIRA et al, 2000; CAMPOS et al, 1995).

Uma outra abordagem, na tentativa de explicar a formação das anomalias dinâmicas descritas anteriormente, baseia-se na indicação de uma instabilidade baroclínica na região da Baía de Campos. Essa instabilidade baroclínica surgiria em função de um aumento da intensidade de cisalhamento vertical entre duas massas d'água diferentes: a Corrente de Contorno Oeste Intermediária (CCI) e a Corrente do Brasil (CALADO, 2001).

4. Transformada de Fourier

A **análise de Fourier**, também denominada de análise harmônica, tem como objetivo aproximar uma combinação de séries de senos e co-senos (Séries de Fourier) e estimar os coeficientes associados às diferentes frequências. Uma série de Fourier representa uma soma de senos e co-senos, de acordo com a seguinte equação:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum [a_n \cos(2\pi nt) + b_n \text{sen}(2\pi nt)] \quad (1)$$

em que,

a_n e b_n representam os coeficientes dos harmônicos ajustados.

O valor médio quadrático (VMQ), obtido de uma série de dados, é definido pela equação 2, e o respectivo espectro de potência – $G(f)$ – está representado pela equação 3. O VMQ, do ponto de vista físico, está associado com a energia existente na série temporal analisada. Ou seja, aplicando uma análise espectral, no domínio da frequência, na série temporal, pode-se definir como a variância desse sinal está distribuída por faixas de frequências (JENKINS & WATTS, 1968; MELO FILHO, 1982).

$$\psi_x^2(f, \Delta f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t, f, \Delta f) dt \quad (2)$$

$$G(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\psi^2(f, \Delta f)}{\Delta f} = \lim \frac{1}{T * \Delta f} \left[\int_{-T/2}^{T/2} x^2(t, f, \Delta f) dt \right] \quad (3)$$

5. Material e Métodos

A área de estudo compreende a região da costa sul-sudeste brasileira entre as latitudes de 20° S e 28° S e longitudes entre 39° W e 48° W, conforme figura 1.

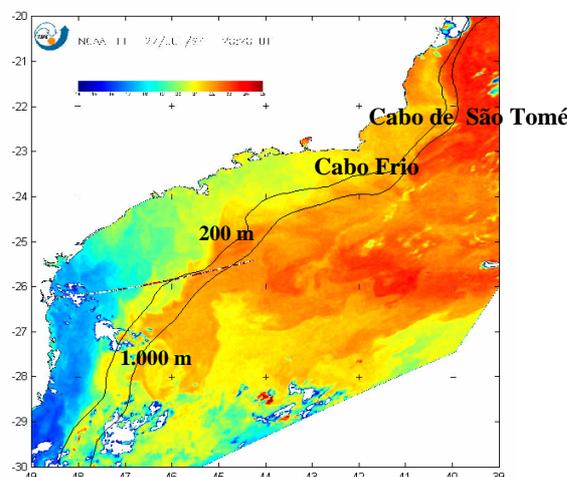


Figura 1 – Área de estudo, mostrando isóbatas de 200 m e 1000 m.

O presente trabalho baseou-se na interpretação de imagens orbitais NOAA/AVHRR, com informações sobre a temperatura da superfície do mar (TSM). Portanto, o principal material utilizado foi composto por um conjunto de imagens em formato digital.

Foram utilizadas 371 imagens, compreendendo os anos de 1993 a 2001, as quais encontravam-se no formato .TIF ou .JPG.

Utilizou-se também um arquivo, em ASCII, com pontos cotados de batimetria da área de interesse.

As principais etapas para análise das imagens e digitalização da frente térmica da Corrente do Brasil são descritas a seguir.

1) – Seleção das Imagens AVHRR com base nos seguintes critérios: integridade da frente no trecho de interesse, cobertura de nuvens, gradiente térmico bem definido na imagem.

A frente térmica deveria estar visível, no mínimo, entre as latitudes de 20° S e 25° S, com total ausência de nuvens. Imagens com contaminação ou obstrução por nuvens que impossibilitassem o cumprimento desse critério foram descartadas. Na figura 16 são apresentados dois exemplos de imagens descartas pelo critério da ocorrência de nuvens sobre a frente térmica.

O gradiente térmico entre as águas da Corrente do Brasil e a água de plataforma deveria estar bem definido, de forma que sua localização sobre a imagem não fosse duvidosa. Algumas imagens foram descartadas por causa da imprecisão de se definir a frente da Corrente do Brasil, mesmo sem a obstrução por nuvens.

2) – Em seguida, procedeu-se à digitalização da frente térmica sobre as imagens selecionadas, a partir da latitude de 20° S, prosseguindo, no mínimo, até a latitude de 25°. No entanto, em imagens com visualização da frente térmica em latitudes maiores que o mínimo estabelecido, toda a extensão possível era aproveitada.

A frente térmica, identificada na imagem como um gradiente termal bem pronunciado entre a água quente da CB e a água mais fria da Plataforma Continental, indica a borda oeste da Corrente do Brasil, com base no exposto no item 3.2.2 (Corrente do Brasil) utilizando dados de perfis de CTD em uma radial na latitude de 22,5° S.

3) – Para cada ponto discretizado sobre a frente térmica, calculou-se a distância Euclidiana entre este ponto e aquele mais próximo sobre a isóbata de 200 m e de 1000 m.

As frentes discretizadas foram armazenadas em arquivos no formato ASCII, contendo as coordenadas geográficas dos pontos de digitalização da frente, a extensão da frente e as respectivas distâncias às isóbatas, em graus decimais. Esta fase do trabalho foi efetuada utilizando o programa PlotAVHRR3.m, desenvolvido em linguagem Matlab.

Definiu-se uma nomenclatura para identificação de todos os arquivos gerados nas análises e sua associação com as imagens. Os arquivos foram identificados da seguinte maneira: aaaammddhh. Isto é, o ano com quatro dígitos, seguido do mês e do dia, juntamente com a hora ao final do arquivo.

Os arquivos das frentes digitalizadas foram interpolados em intervalos constantes de x , denominado de Δx . Deve-se ressaltar que a análise espectral empregada nesse estudo foi efetuada no domínio do espaço, em detrimento da análise usual no domínio da frequência ou do tempo. Considerando que um dos objetivos refere-se à identificação dos padrões espaciais dos meandros da Corrente do Brasil, adaptou-se a FFT para identificação dos números de onda (K) associados aos picos espectrais mais significativos.

6. Resultados e Discussão

Do universo de imagens disponíveis para análise e com base nos critérios de seleção definidos no item 5, foram discretizadas 105 frentes, com um aproveitamento de 28% das imagens. A abrangência temporal das imagens compreende os anos de 1993 e 2001. Na tabela 1 encontra-se a distribuição das imagens selecionadas por estação do ano, onde se percebe a influência da cobertura de nuvens durante o período de verão. O total de imagens no período de verão era de 111, que ao final do processo de seleção obteve-se um percentual de aproveitamento de 23%. No inverno, esse total era de 92 imagens, porém o aproveitamento foi de 43%, visto que foram usadas 39 imagens para digitalizar a frente térmica.

Tabela 1 – Distribuição das imagens AVHRR utilizadas na digitalização das frentes térmicas - Estação do Ano

Estação do Ano	Total de Imagens	Frentes Digitalizadas
Inverno	92	39
Outono	76	20
Primavera	89	22
Verão	111	24

As imagens selecionadas foram importadas para o Matlab e georreferenciadas, procedendo-se a digitalização das frentes. Na figura 2 mostra-se um exemplo de frente discretizada e a plotagem da distância às isóbatas, em graus decimais e comprimento da frente discretizada a partir da latitude de 20° s. As coordenadas da frente digitalizada foram armazenadas, juntamente com as distâncias calculadas às isóbatas de 200 m e 1000 m, e o comprimento da frente.

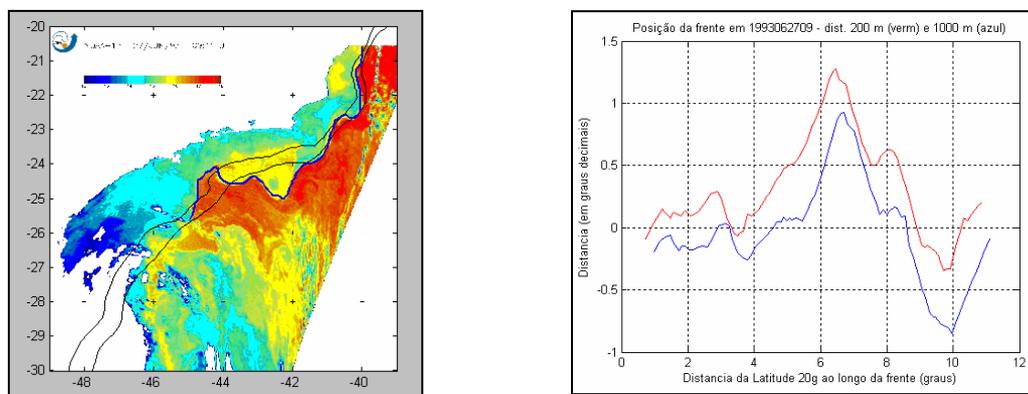


Figura 2 – Discretização da frente térmica sobre imagem AVHRR e gráfico com cálculo da distância às isóbatas de 200 m e 1000 m.

Na figura 3 encontra-se uma série de frentes interpoladas, indicando a localização de alguns pontos notáveis da costa Brasileira: Cabo de São Tomé (linha magenta), Macaé

(linha verde) e Cabo Frio (linha preta). Pode-se observar o truncamento ao final da série, com zeros, para extensão da frente até 1445 Km, objetivando-se melhorar a resolução espectral, conforme exposto no item 4.4.3. As imagens entre 1993 e 1997 possibilitaram definir frentes um pouco mais extensas, evitando truncamentos muito grandes ao final da série (figura 4). As frentes interpoladas foram armazenadas em arquivos ASCII .

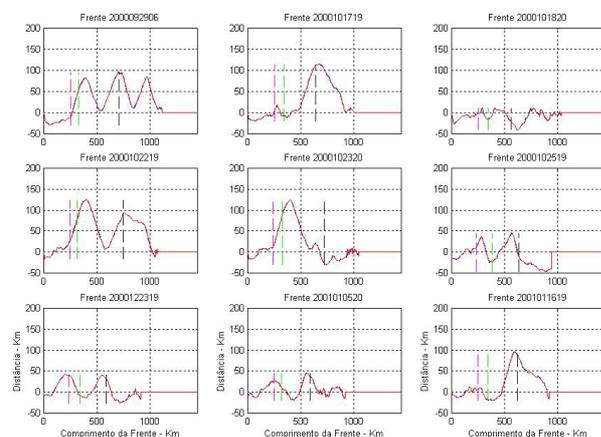


Figura 3 – Conjuntos de frentes interpoladas, com indicação no gráfico de pontos notáveis da costa brasileira.

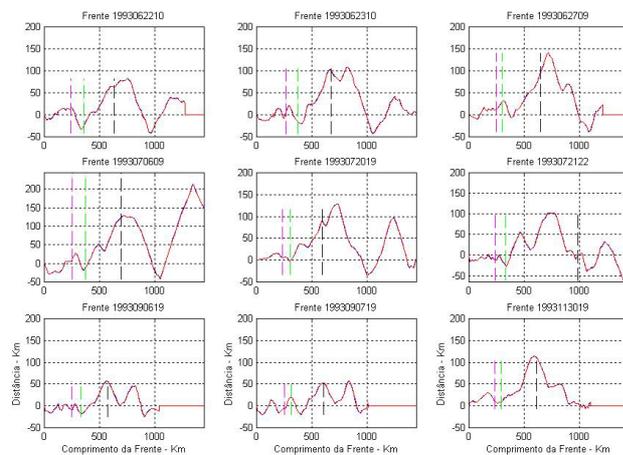


Figura 4 – Conjuntos de frentes interpoladas, com indicação no gráfico de pontos notáveis da costa brasileira.

Os resultados da análise de Fourier foram aplicados sobre todos os arquivos de frentes interpoladas. Na figura 5 encontra-se um conjunto de espectros, mostrando os picos espectrais identificados pelo algoritmo, por faixas de comprimento de onda. As faixas estão demarcadas por linhas pontilhadas em magenta e se referem aos comprimentos de onda: 100 Km e 300 Km. Observa-se, em rápida análise desses espectros, que os comprimentos de onda em baixa frequência (números de onda muito pequenos) não foram identificados claramente pelo algoritmo. Esse aspecto parece indicar que o comprimento das frentes, e consequentemente a resolução espectral, influenciou na capacidade do algoritmo em detectar comprimentos de onda mais longos.

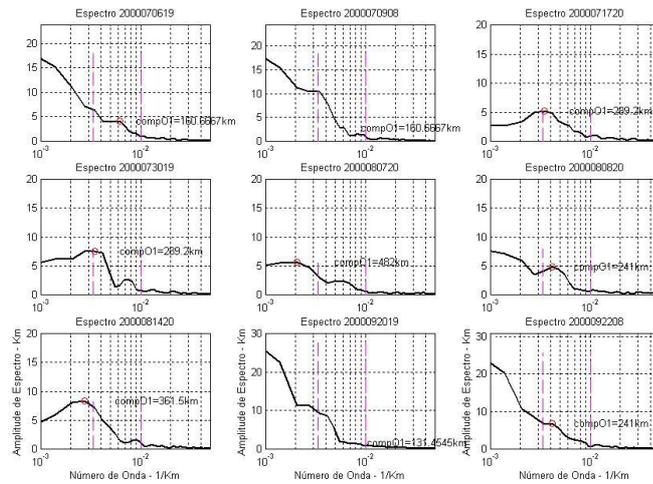


Figura 5 – Conjunto de espectros de frentes térmicas, com indicação dos picos significativos e dos intervalos de comprimento de onda.

A dispersão dos valores de comprimentos de onda estimados pela análise espectral está representada na Figura 6 e percebe-se uma concentração em torno dos valores de 200 e 400 quilômetros. Os valores estimados apresentam coerência com as teorias que explicam a formação dos meandros e vórtices na Corrente do Brasil. Esses resultados confirmam, em bases quantitativas, as principais escalas de meandros da Corrente do Brasil entre o Cabo de São Tomé e o Platô de São Paulo.

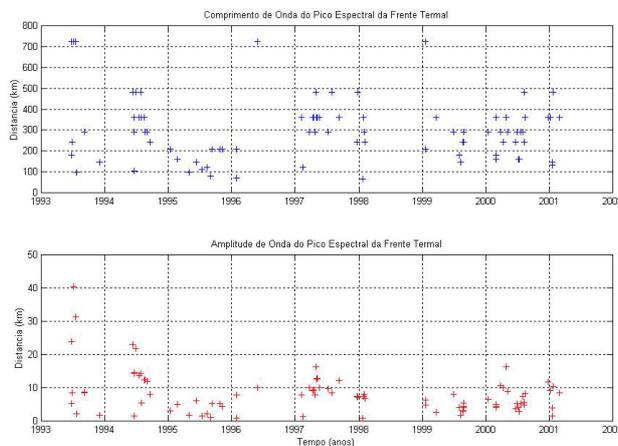


Figura 6 – Dispersão dos comprimentos de ondas e amplitudes estimados dos espectros das frentes.

8. Resumo e Conclusões

O presente trabalho teve como principais objetivos:

- o estudo da variabilidade espacial de meandros e vórtices observados na costa sudeste brasileira e associados à Corrente do Brasil;
- avaliar técnicas de análise de séries temporais, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), para estimar picos espectrais dos números de onda mais significativos.

O método baseiou-se na identificação e digitalização das frentes térmicas da Corrente do Brasil, utilizando imagens obtidas por sensores AVHRR, os quais operam na faixa do infravermelho termal, à bordo dos satélites da série NOAA. Foi utilizado um total de

371 imagens, abrangendo os anos de 1993 a 2001. Desse total, foram selecionadas 105 imagens para discretizar as frentes, eliminando as imagens com excesso de recobrimento de nuvens, interrupção da visualização da frente térmica em função da contaminação atmosférica ou com gradiente térmico difuso que dificultava a sua localização. As frentes foram digitalizadas, em tela do computador, sobre as imagens georreferenciadas, calculando-se as distâncias euclidianas de cada ponto da frente às isóbatas de 200 metros e 1000 metros. Em seguida, aplicou-se o algoritmo da FFT nos arquivos contendo as distâncias calculadas, obtendo-se os espectros de amplitude associados aos números de onda. As distâncias da frente, em relação à isóbata de 200 metros, foram calculadas em três radiais localizadas em pontos notáveis do litoral sudeste brasileiro: Cabo de São Tomé, Macaé e Cabo Frio.

Como principais conclusões podem ser citadas as que se seguem:

- a limitação do comprimento da frente digitalizada nas proximidades da latitude de 26° S, verificada em algumas imagens, pode ter influenciado o desempenho do algoritmo em detectar com eficiência comprimentos de onda em baixa frequência;
- no entanto, conclui que a técnica de FFT é bastante robusta para o objetivo proposto neste trabalho, revelando uma ferramenta eficiente e útil na determinação dos números de onda significativos;
- os comprimentos de onda mais frequentes estão entre 200 e 400 quilômetros, corroborando as hipóteses que procuram explicar fisicamente o aparecimento dos meandros e estruturas vorticiais, assim como experimentos numéricos executados por diversos autores;
- os deslocamentos das frentes nas radiais citadas (Cabo de São Tomé, Macaé, Cabo Frio) mostram que eles são crescentes à medida que a Corrente do Brasil flui para Sul;
- as estimativas de momento dos espectros indicam que esse parâmetro está associado com o grau de meandramento da Corrente e com o afastamento da borda oeste da CB do talude.

9. Referências bibliográficas

CALADO, L. **Dinâmica da formação dos meandros e vórtices da Corrente do Brasil ao largo do sudeste brasileiro**. São Paulo, SP: IO/USP, 2001. 96p. Dissertação de Mestrado (Instituto Oceanográfico) Universidade de São Paulo, 2001

CAMPOS, E. J. D., GONÇALVES, J. E., IKEDA, Y. Water mass structure and geostrophic circulation in the South Brazil bight – summer of 1991. **Journal of Geophysical Research**, v.100, n. C9, p. 18537-18550, 1985.

GARFIELD, N. **The Brazil Current at subtropical latitudes**. Rhode Island: University of Rhode Island, 1990. 122p. (Tese de Doutorado)

GONÇALVES, J. E. **Características e circulação das massas de água no limite oeste do Atlântico Sul entre 20° S e 30° S**. São Paulo, SP: IO/USP, 2000. 133p. Dissertação de Doutorado (Instituto Oceanográfico) Universidade de São Paulo, 2000.

JENKINS, G. M., WATTS, D. G. **Spectral analysis and its applications**. San Francisco: Holden-day, 1968. 525p.

MELO FILHO, E. **Investigações sobre a análise da agitação marítima**. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ/COPPE, 1982. 138p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Oceânica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982.

SILVEIRA, I. C. A., SCHMIDT, A. C., 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.