

Observação da variação da frente Brasil-Malvinas por dados de temperatura da superfície do mar

Márcio Borges Ferreira^{1,2}
Paulo Simionatto Polito²
Paulo Pereira Oliveira Matos¹
Renato Feijó da Rocha¹

¹Marinha do Brasil – Centro de Hidrografia da Marinha – CHM/MB
Rua Barão de Jaceguai, s/nº - 24048-900 - Niterói - RJ, Brasil
{marcio.borges, paulo.matos, feijo}@chm.mar.mil.br

² Universidade de São Paulo – Instituto Oceanográfico – USP/IO
Praça do Oceanográfico 191 - 05508-900 - São Paulo - SP, Brasil
polito@usp.br

Abstract. The Brazil-Malvinas Confluence is formed by the encounter of the Brazil Current with the Malvinas Current at the South Atlantic ocean. This is one of the most energetic regions of the world oceans and it is characterized by intense meridional sea surface temperature gradients. Satellite data and *in situ* observations often reveal the presence of cyclonic and anticyclonic meanders and vortices at the Brazil-Malvinas Confluence region. The sea surface temperature (SST) fields of the Brazil-Malvinas Frontal region can be used to detect the position of the thermal front. However, at energetic regions like Brazil-Malvinas Confluence, the SST is not enough to define the mean position front with some precision. It is necessary to employ the sea surface temperature gradient like additional parameter in the trace of Brazil-Malvinas Front (BMF) in absence of other measures like salinity, for example. Our study involved the determination of the mean BMF and its meridional displacement on an interannual scale using a time series of sixteen years of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) database from Pathfinder version 5 (V5) program. We detected a significant meridional variability of the mean position of the front most probably due to an increase in the Brazil Current flux.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, oceanography, sensoriamento remoto, processamento de imagens, oceanografia.

1. Introdução

O Atlântico Sudoeste é uma região onde a circulação oceânica gera fortes frentes. Dentre elas, a frente oriunda do encontro da Corrente do Brasil (CB), que é composta por água morna e salina, com a água subantártica fria e pouco salina transportada pela Corrente das Malvinas (CM) é caracterizada por intensos gradientes de temperatura da superfície do mar (TSM) devido à disparidade termohalina dessas correntes.

Imagens obtidas pelo sensor AVHRR revelam padrões de TSM associados às correntes das camadas superiores no Atlântico Sudoeste. Em particular, elas mostram claramente os fortes gradientes termois de superfície associados com regiões frontais, de acordo com Olson et al. (1988). Desta forma, o estudo de dados de TSM nessa região é essencial para a verificação da variabilidade da posição da Frente Brasil-Malvinas (FBM), a partir do estabelecimento de sua posição média.

Neste trabalho, serão descritos o método de interpolação utilizado e os demais processos empreendidos para tratamento e interpretação dos dados de TSM obtidos por sensor AVHRR a bordo dos satélites da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) pertencentes ao programa *Pathfinder* Versão 5 (V5). Além disso, serão apresentados os aspectos inerentes ao uso combinado de isotermas e gradiente de TSM para o traçado da FBM média e a análise de sua variabilidade.

2. Metodologia de Trabalho

Os dados AVHRR do programa *Pathfinder V5* são disponibilizados com resolução espacial de 4km x 4km e temporal de 8 dias. O método de interpolação empregado no estudo foi o de mínima curvatura com tensão variável (Smith e Wessel (1990)). Para a interpolação dos dados de TSM foram utilizados para o parâmetro de tensão T os valores de 0,25 no interior do domínio e 0,75 nos contornos. Esses valores foram aplicados a fim de suprimir oscilações espúrias no interior do domínio e aplainar a solução junto aos contornos.

Os dados de TSM foram interpolados com o emprego de um programa de domínio público que é parte do *Generic Mapping Tools* (GMT) (Smith e Wessel (1990)) para uma grade espacial regular de 0,25° x 0,25° x 8 dias. O raio de busca empregado para inicialização da grade foi de 1°. Foi necessária apenas uma iteração para estabelecer a superfície de mínima curvatura na precisão requerida pelo estudo (~0,1°C).

Após a interpolação dos dados de TSM foi realizada a detecção da FBM. Comumente é empregada a distribuição espacial de isotermas a fim de definir o limite de uma determinada massa de água e realizar o estudo da variabilidade de sua posição, como executado por Olson et al. (1988). Porém, a fim de identificar com maior precisão a presença de uma frente em regiões altamente energéticas, faz-se necessário associar ao emprego das isotermas o estudo do gradiente espacial da TSM.

No presente estudo, o método empregado para a detecção da FBM consiste na seleção visual do máximo valor do gradiente de temperatura encontrado no interior da área delimitada pelas isotermas características que são observadas tipicamente na superfície da CB e da CM.

Desta forma, após obtidos os mapas de TSM para a região da CBM, foi calculado o gradiente e para cada ciclo de oito dias foi plotado com a sobreposição das isotermas características da CB e da CM. A escolha dessas isotermas foi efetuada com base nos estudos de Olson et al. (1988) para o verão. Devido à variação dos campos de TSM na região da CBM acompanhar a alteração das estações climáticas ao longo do ano, não foi possível empregar as mesmas isotermas durante todo o período. Sendo assim, foram empregadas as isotermas constantes da Tabela 1 por estação do ano, mantido o intervalo de 5°C entre as mesmas obtido no verão por Olson et al. (1988), a fim de delimitar a área de busca do máximo gradiente de TSM no interior da região da CBM.

Tabela 1. Valores de TSM (°C) característicos de cada Corrente (CB e CM) empregados para delimitar a área de busca do máximo gradiente no interior da região da CBM, por estação do ano.

Isoterma característica (CB e CM) por Estação do Ano		
Estação	Isoterma CB (°C)	Isoterma CM (°C)
Verão	21,0	16,0
Outono	19,0	14,0
Inverno	16,0	11,0
Primavera	17,0	12,0

O traçado da FBM ligando visualmente e de forma aproximada os pontos de máximo gradiente de temperatura existentes no interior da área delimitada pelas isotermas típicas de cada estação do ano foi realizado para cada um dos 720 ciclos de oito dias (45 ciclos por ano) compondo a série temporal de posições da FBM no período de 1993 a 2008. Foi também efetuado o traçado da FBM seguindo a mesma metodologia de detecção sobre o mapa de gradiente médio por estação do ano para todo o período de estudo.

Uma frente é, por definição, uma região de gradiente máximo. Porém, no caso da FBM, a linha de máximo gradiente absoluto por vezes evade a área caracterizada por massas d'água da

CB e da CM. Assumir uma isoterma como linha demarcadora da frente contraria a definição de frente como gradiente máximo. Contudo, a definição baseada no gradiente máximo não se aplica de forma irrestrita à área de estudo em toda a série temporal de dados. Dessa forma, a solução aqui adotada é a de confiar num "observador treinado" utilizando ambos os critérios de avaliação. A Figura 1 demonstra a importância do emprego simultâneo dos mapas de TSM associados aos mapas de gradiente de TSM. Ela exemplifica também a detecção da FBM em um mapa de gradientes médios para o inverno do ano 2000, sendo esta demarcada pelos valores de gradiente máximos encontrados na região delimitada pelas isotermas de 16°C e 11°C, características respectivamente da CB e da CM nessa estação do ano.

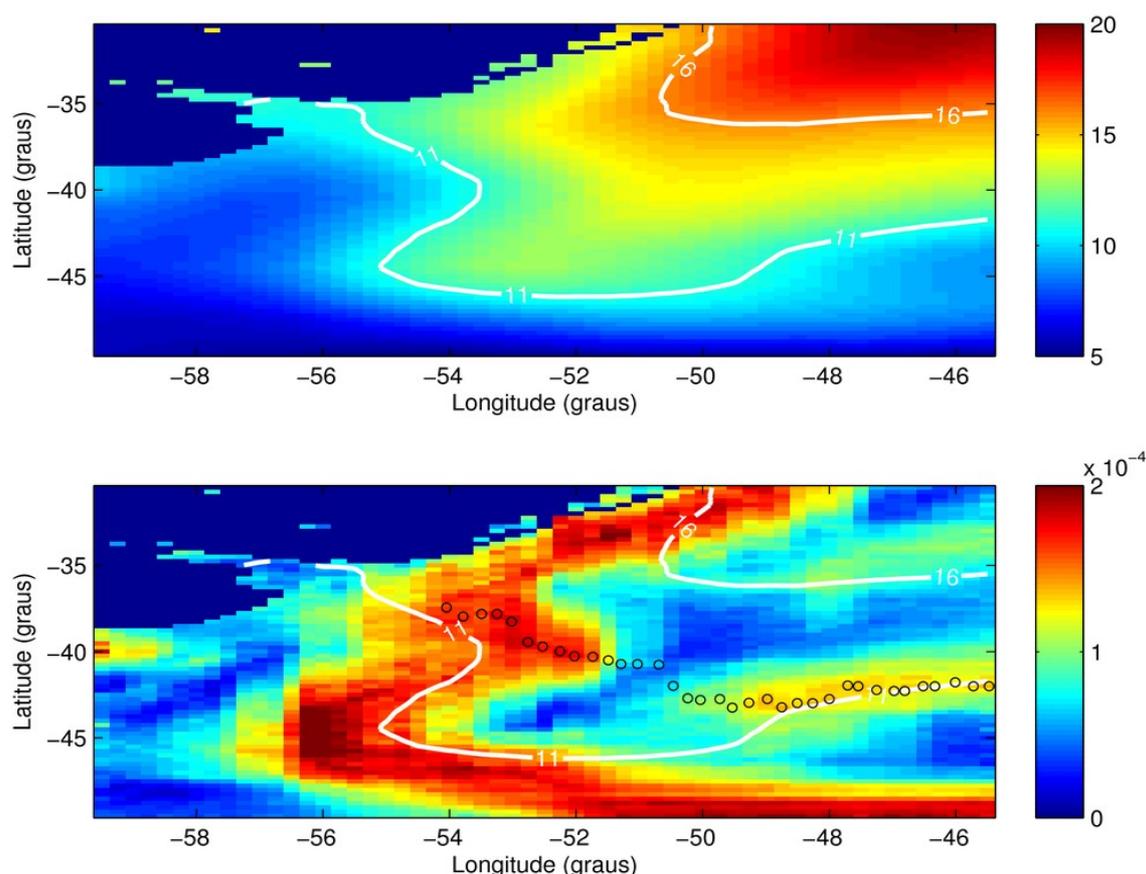


Figura 1. Mapa de TSM média (°C) interpolado para o inverno de 2000 (painel superior) contendo as isotermas características (em branco) da CB (16°C) e da CM (11°C). No painel inferior, encontra-se a FBM demarcada (círculos negros) no interior da área delimitada pelas isotermas características (isolinhas em branco) sobre o mapa de gradiente de TSM médio (°C/m) para o inverno de 2000.

A escala temporal da variação meridional da FBM observada por Olson et al. (1988) foi de 30–60 dias a até escalas anuais e semianuais. Já Saraceno et al. (2004) não corroboram essas observações. Os autores encontraram um padrão oscilatório da FBM em torno de um ponto fixo localizado aproximadamente em 39,5°S e 53,5°W, com mudança sazonal da orientação da frente (N–S ao longo de 53,5°W no inverno e direção NW–SE entre 38° e 40°S no verão).

As tendências positivas da AASM observadas por Polito e Sato (2008) com maior intensidade nas metades oeste das bacias e a ocorrência de máximos e mínimos locais da altura da superfície do mar (ASM) em pontos próximos exatamente onde as CCO mais

intensas guinam para leste, sugerem que nessas regiões houve aumento da instabilidade. A ocorrência de uma variação meridional interanual da posição de frentes existentes em regiões de encontro de duas CCO, tais como a FBM, ou de uma intensificação destas correntes constituem possíveis causas para o aumento da instabilidade.

De modo a confirmar a ocorrência desta variação interanual, após a detecção da FBM sobre os mapas de gradiente de TSM foi efetuado o estudo da variabilidade temporal da FBM por meio da análise da média meridional e seu respectivo desvio padrão.

3. Resultados e Discussão

A análise da posição média da FBM foi efetuada dividindo-se a série contendo as posições detectadas da frente pelo gradiente médio por estação do ano em dois períodos. Um período do ano 1993 ao ano 2000 e outro do ano 2001 ao ano 2008. Dessa forma, foi possível avaliar se ocorreu variação interanual considerável na posição da FBM por estação do ano em cada período de oito anos e qual foi o comportamento da variabilidade meridional da mesma neste período.

Para o estudo da variabilidade da posição da FBM foi necessário separar a série de dados por estação do ano devido à variação dos valores de TSM na região da CBM não permitir que a detecção da frente fosse efetuada para todo o período de estudo seguindo os mesmos limites de isotermas obtidas dos mapas de TSM interpolados.

Essa variação sazonal também foi constatada quando da detecção e digitalização da FBM, não sendo possível estabelecer um padrão coerente com o máximo gradiente para a frente a oeste da longitude 54°W no inverno, principalmente durante os primeiros oito anos da série temporal (1993-2000). Esse fenômeno se deve à migração da CM para o norte e provavelmente está associado ao enfraquecimento da CB durante o inverno, permitindo o avanço da CM para latitudes menores. Nas demais estações do ano foi possível detectar a presença da FBM desde 56°W com sua extensão para leste avançando em direção ao interior da bacia do Atlântico até a latitude aproximada de 46°W , corroborando as observações de Saraceno et al. (2004). Alguns padrões anômalos com relação ao ponto inicial da digitalização da FBM ocorreram em estações e anos específicos na série temporal do estudo e serão tratados a seguir.

No inverno de 1998 a CM não apresentou o avanço para o norte observado nos primeiros cinco anos da série temporal do estudo e a retroflexão da CB apresentou seu limite mais austral anormalmente mais ao sul quando comparado ao restante da série temporal do estudo. Este padrão de circulação anômalo foi descrito por Spadone e Provost (2009) e associado pelos autores a uma possível mudança de posição da linha de rotacional nulo do vento sobre o Atlântico Sul devida ao *El Niño* ocorrido naquele ano. Esse mesmo padrão com menor intensidade (a partir de 55°W) foi verificado ainda durante o inverno na série de 2001-2008. Spadone e Provost (2009) constataram que nos anos em que as variações de transporte da CM tiveram energia concentrada em torno do período anual (2001 a 2006) a CBM e a retroflexão da CB posicionaram-se anormalmente mais ao sul. A variação do transporte da CM observada pelos autores é coerente com a de uma migração menos intensa da CM para o norte durante o inverno de 2001 a 2008 obtida no presente estudo, constituindo uma possível causa dos resultados das análises de variabilidade da FBM para o inverno de 2001-2008.

A Figura 2 exhibe como exemplo a FBM média sazonal obtida para as duas séries de oito anos, durante o verão. O desvio padrão meridional da posição da frente e os anos em que foram observados valores extremos são destacados em relação aos demais componentes da série.

Os mapas de gradiente de TSM na segunda série de oito anos do estudo (2001-2008) apresentaram uma aproximação das isotermas limites empregadas para a delimitação da região da CBM. Com isso, os gradientes de TSM máximos observados ao longo da FBM

foram ligeiramente maiores ($1,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/m}$) quando comparados aos observados ao longo da FBM durante o primeiro período do estudo ($1,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/m}$ de 1993 a 2000). Os valores do gradiente térmico observados de 1993 a 2000 neste estudo são semelhantes aos resultados obtidos por Saraceno et al. (2004) para 1987-1995.

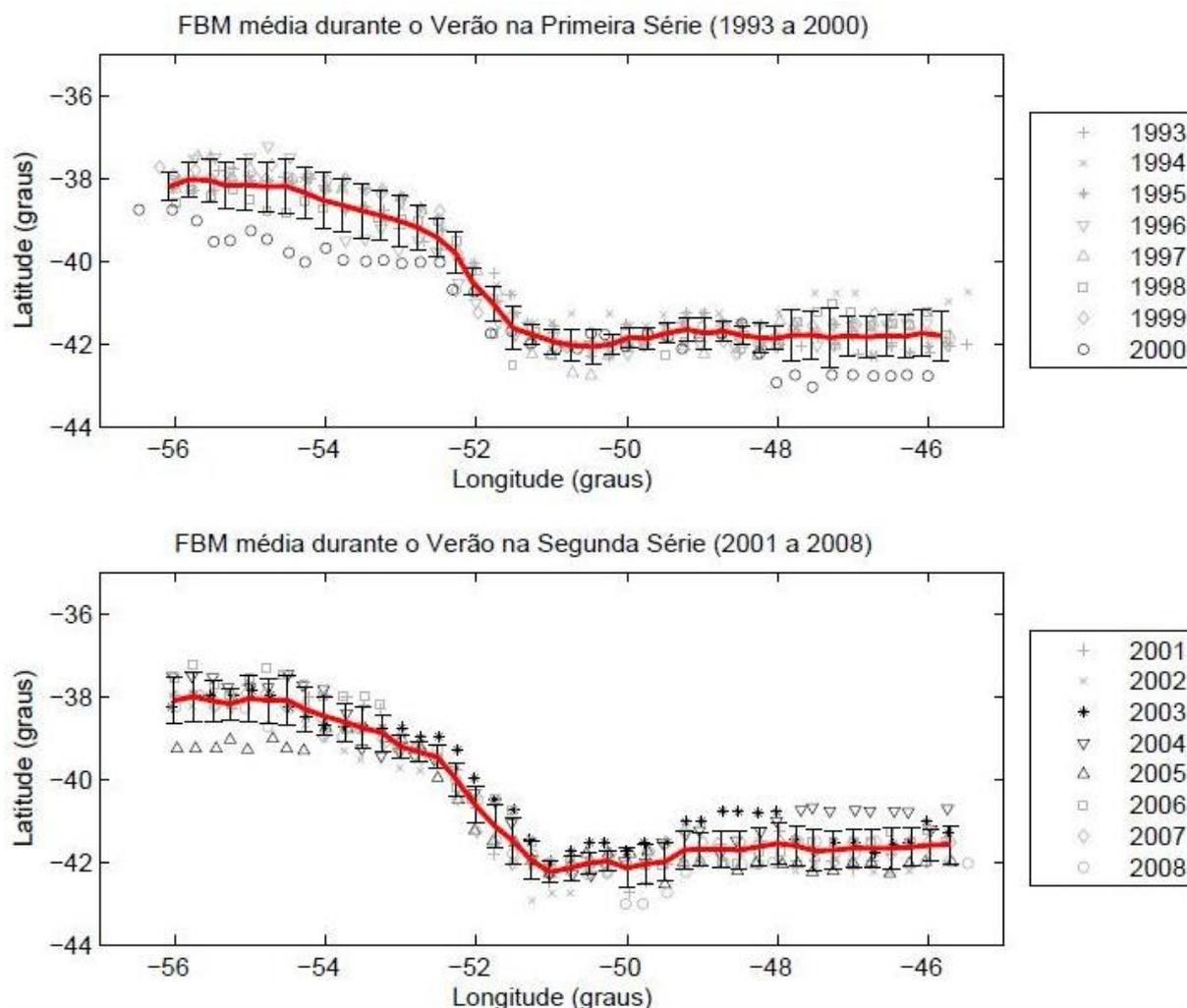


Figura 2. Média da FBM sazonal para o verão (em vermelho) de 1993 a 2000 (painel superior) e de 2001 a 2008 (painel inferior). As barras verticais ao longo da frente indicam o desvio padrão meridional da posição média dos oito anos da série. A legenda à direita indica os símbolos utilizados para as posições obtidas em cada ano que compõe a série de observações. Os símbolos em negrito indicam valores de posição extremos em relação à FBM média obtida na série (maiores ou menores que um desvio padrão em relação à média).

A análise comparativa da posição média da FBM na primeira série de oito anos (1993-2000) em relação à posição média obtida na segunda série mostrou que a frente esteve praticamente inalterada, porém foi observado um aumento considerável da variabilidade meridional da mesma a leste de 51°W , principalmente no inverno. Isso é demonstrado pelo desvio padrão meridional da posição na segunda série ser cerca de três vezes maior nessa região em relação ao valor obtido nos primeiros oito anos do estudo, conforme representado na Figura 3.

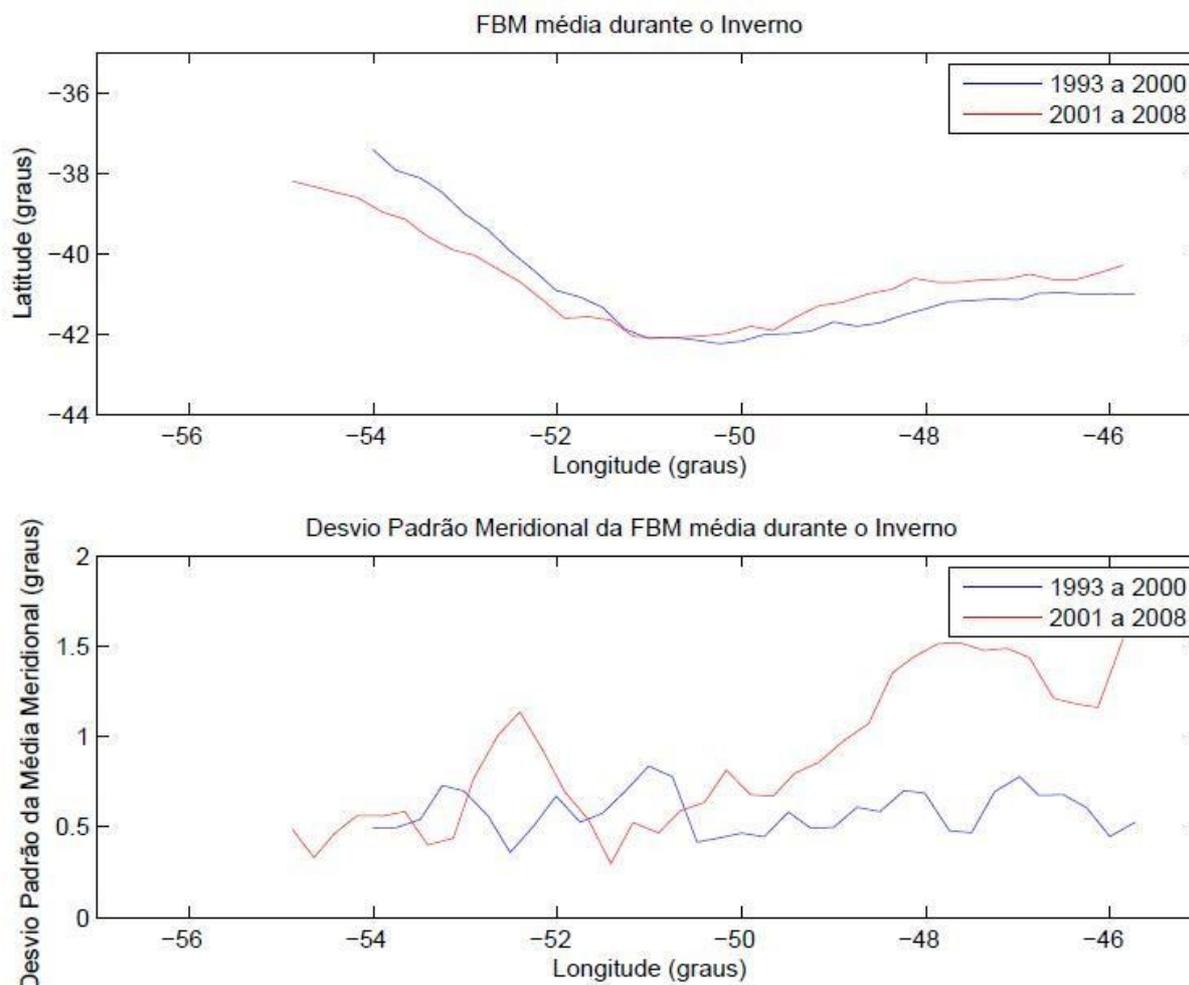


Figura 3. No painel superior, gráfico referente a análise comparativa da FBM média sazonal durante o inverno obtida na primeira série (1993-2000 em azul) e na segunda série (2001-2008 em vermelho). No painel inferior, gráfico do desvio padrão meridional em relação à média descrita no painel superior (primeira série em azul e segunda série em vermelho).

Segundo Saraceno et al. (2004) em seu estudo baseado em nove anos de dados de TSM oriundos de sensores AVHRR, mais especificamente uma série temporal de janeiro de 1987 a dezembro de 1995, a FBM varia sazonalmente e gira em torno de um ponto fixo aproximadamente situado em $39,5^{\circ}\text{S}$ e $53,5^{\circ}\text{W}$, alterando apenas sua orientação em torno desse ponto. No inverno, a FBM é orientada na direção N-S e no verão NW-SE, assumindo uma orientação intermediária a essas no outono e na primavera de acordo com os autores. O aumento da variabilidade meridional da FBM observado mais notadamente durante o inverno no presente estudo, sugere a presença mais marcante de um ciclo anual na posição da FBM em detrimento da ocorrência de variações sazonais observadas em estudos anteriores. Contudo, não ocorreu alteração sazonal considerável da direção de orientação da FBM conforme observado por Saraceno et al. (2004).

4. Conclusões

A posição média da frente termal detectada no presente estudo não apresentou variação considerável de posição entre o primeiro e o segundo período de estudo. Entretanto, houve

aumento significativo da variabilidade da posição meridional da frente média termal para o segundo período de oito anos (2001-2008). Isto ocorreu principalmente no inverno onde o desvio padrão meridional foi três vezes maior, a leste de 51°W, do que o valor observado na primeira série.

Agradecimentos

Agradecemos à Marinha do Brasil pela oportunidade de estudo em conjunto com o Laboratório de Oceanografia por Satélites do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Referências Bibliográficas

- Olson, D.B.; Podesta, G.P.; Evans, R.H.; Brown, O.B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas Currents. **Deep-Sea Research**, v. 35, n. 12, p. 1971-1990, 1988.
- Polito, P.S.; Sato, O.T. Global Inter Annual Trends and Amplitude Modulations of the Sea Surface Height Anomaly from the TOPEX/Jason-1 Altimeters. **Journal of Climate**, v. 21, p. 2824-2834, 2008.
- 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, p. C05027, 2004.
- Smith, W.; Wessel, P. Gridding with continuous curvature splines in tension. **Journal of Geophysics**, v. 55, n. 3, p. 293-305, 1990.
- Spadone, A.; Provost, C. Variations in the Malvinas Current volume transport since October 1992. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. C02002, p. 1-21, 2009.