

Observação por satélite de um vórtice de núcleo quente na Zona de Confluência Brasil-Malvinas durante a Operação Antártica XXI

Milton Kampel¹
Ronald Buss de Souza¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{milton, ronald}@dsr.inpe.br

Abstract. Remote sensing by satellite has been a very useful tool for improving the oceanographic knowledge of the Southwestern South Atlantic Ocean (SWA). The water mass structure in the SWA is complex, especially in the region where the Brazil Current (BC) meets the equatorward Malvinas/Falklands Current (MC). This region, known as the Brazil–Malvinas Confluence Zone (BMCZ), is considered one of the most complex regions of the world ocean. At the surface, BC carries the warm and saline Tropical Water, and MC carries the cooler, less saline, and nutrient-rich Subantarctic Water. This paper investigates a warm core eddy (ring) found in the SWA in November 2002 during the XXIth Brazilian Antarctic Operation as observed by *in situ* data, and AQUA-MODIS sea surface temperature and chlorophyll *a* concentration images of the region. MODIS imagery offers the opportunity for simultaneous two-dimensional comparison of biological (pigment) and physical (thermal) variability in the upper ocean. The surface fields generated from the satellite data contains interesting oceanographic patterns of importance in the dynamical and ecological understanding of this oceanic region.

Palavras-chave: remote sensing, sea surface temperature, chlorophyll *a* concentration, eddy, MODIS-AQUA, Brazil-Malvinas Confluence, sensoriamento remoto, temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila *a*, vórtice, MODIS-AQUA, Confluência Brasil-Malvinas.

1. Introdução

O sensoriamento remoto orbital tem sido uma ferramenta útil para aprimorar o conhecimento oceanográfico da região sudoeste do Oceano Atlântico sul (ASW). Entre 30 e 62°S, a dinâmica do ecossistema pelágico é principalmente governada pela interação da Corrente do Brasil com a Corrente das Malvinas fluindo em direções opostas. Enquanto que a quente e salina Corrente do Brasil (CB) transporta águas de origem tropical de norte para sul, a Corrente das Malvinas/Falklands (CM) flui de sul transportando águas de origem subantártica mais frias, menos salinas e ricas em nutrientes em direção ao equador. As duas correntes se misturam na Zona de Confluência Brasil-Malvinas (ZCBM). A ZCBM é caracterizada por intensos processos de mistura horizontal e vertical (Gordon e Greengrove, 1986; Gordon, 1989, Ikeda *et al.*, 1989; Brandini *et al.*, 2000), que por sua vez, definem conspícuos gradientes biológicos e áreas onde espécies subtropicais e subantárticas são encontradas (Boltovskoy, 1981, 1986). Está situada em torno da latitude média de 39°S (Reid *et al.*, 1977), mas é deslocada sazonalmente para norte e para sul. A posição na qual a CB inverte sua direção, ou seja, seu limite meridional, está localizado mais ao sul, entre 40°S e 46°S (Legeckis e Gordon, 1982; Souza e Robinson, 2004).

As instabilidades dinâmicas causadas pelas interações entre a CB e a CM resultam em feições de mesoescala tais como meandros e vórtices (Legeckis e Gordon, 1982; Olson *et al.*, 1988; Lentini *et al.*, 2002). Ainda que dados *in situ* sejam relativamente raros na região da ZCBM, dados de satélites tem sido utilizados em diversos estudos (Olson *et al.*, 1988;

Chelton *et al.*, 1990; Lentini *et al.*, 2002; Souza e Robinson, 2004; Garcia *et al.*, 2004; entre outros). Lentini *et al.* (2002) descreveram os vórtices da ZCBM baseados em imagens termais do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), considerando-os como mecanismos efetivos de trocas de calor, sal e nutrientes através da frente CB-CM.

Por meio do sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), instalado a bordo do satélite AQUA, é possível obter imagens diárias dos campos de temperatura da superfície do mar (TSM) e da concentração de clorofila *a* da camada superficial do mar (CSM) em bases diárias. O imageamento MODIS oferece a oportunidade de se comparar bi-dimensionalmente e simultaneamente a variabilidade biológica (pigmentos) e física (termal) na superfície do mar. Como demonstrado por Denman e Abbott (1994), a determinação simultânea da TSM e da CSM é interessante na medida em que muitos dos processos físicos que contribuem para o crescimento fitoplanctônico estão associados a anomalias de temperaturas. Medidas da CSM em conjunto com a TSM podem ser utilizadas para delinear áreas de ressurgência, frentes, correntes, meandros e vórtices.

Neste trabalho, dados *in situ* e imagens MODIS da TSM e da CSM foram utilizadas para identificar e descrever um vórtice de núcleo quente destacado da CB em novembro de 2002, durante a XXI Operação Antártica, na região da ZCBM.

2. Material e Métodos

Medidas *in situ*

Dados da temperatura e salinidade da superfície do mar foram continuamente coletados por equipamento termosalinógrafo instalado no casco do Navio Ary Rongel da Marinha do Brasil como parte da XXI Operação Antártica. O conjunto de dados tratado neste trabalho compreende o período entre 11 e 19 de setembro de 2002, sendo que, as informações sobre a posição geográfica do navio (latitude e longitude) também foram incluídas. Com base nos dados de temperatura e salinidade, foi possível calcular a densidade da água seguindo-se as recomendações da UNESCO (1988).

Sensoriamento remoto

Imagens da cor do oceano e infravermelho termal do sensor MODIS instalado a bordo do satélite AQUA foram adquiridas no mesmo período de coleta de dados *in situ* e processadas de modo a fornecer informações sobre os campos de CSM e TSM, respectivamente.

O satélite AQUA foi lançado em 05/04/2002, em órbita polar, heliossíncrona, a uma altitude nominal de 705 km e inclinação de 98,2°. A aquisição de dados MODIS é feita diariamente em 36 bandas espectrais, de 400 a 1440 nm, com resolução radiométrica de 12 bits. Duas bandas possuem resolução espacial de 250 m no nadir enquanto que outras cinco bandas possuem resolução de 500m. As 29 restantes possuem resolução de 1 km. Com um padrão de varredura de $\pm 55^\circ$ a partir de uma órbita de 705 km, o MODIS apresenta uma faixa imageada de 2.330 km. As bandas espectrais do sensor MODIS com resolução de 1 km para estudos da cor do oceano e da temperatura da superfície do mar estão na **Tabela 1**.

As imagens MODIS foram adquiridas da NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). O processamento das imagens foi realizado em ambiente SeaDAS. Os dados brutos foram calibrados radiometricamente para gerar valores de radiâncias normalizadas (cor do oceano) e temperaturas de brilho (termal) referentes à superfície marinha. As imagens com menor cobertura de nuvens foram recortadas de acordo com a área de interesse. Cada imagem passou por algoritmos de correção atmosférica antes do cálculo das concentrações de clorofila *a* e temperatura de superfície, respectivamente. Os valores de CSM foram calculados com a utilização do algoritmo padrão da NASA *chlor_a2* (OC3M):

$$C_{insitu} = 10,0^{(0,2830-2,753R_{3M}+1,457R_{3M}^2+0,659R_{3M}^3-1,403R_{3M}^4)} \quad (1)$$

onde R é a reflectância de sensoriamento remoto, $R_{3M} = \log_{10}(R_{550}^{443} > R_{550}^{490})$, ou seja, o logaritmo máximo entre os valores.

Os valores de TSM foram calculados com a utilização do algoritmo padrão MODIS 11 μm *Non Linear Sea Surface Temperature*, com os coeficientes derivados pela Universidade de Miami, e tendo como estimativa inicial o produto de interpolação ótima de Reynolds (OISST).

Tabela 1 - Bandas espectrais do sensor MODIS-AQUA para estudos da cor do oceano e temperatura da superfície do mar

Uso Principal	Banda	Largura de Banda
Cor do oceano / Fitoplâncton / Biogeoquímica	8	405 – 420 nm
	9	438 – 448 nm
	10	483 – 493 nm
	11	526 – 536 nm
	12	546 – 556 nm
	13	662 – 672 nm
	14	673 – 683 nm
Temperatura da superfície do mar	15	743 – 753 nm
	16	862 – 877 nm
Temperatura da superfície do mar	31	10,78 – 11,28 μm
	32	11,77 – 12,27 μm

3. Resultados e Discussão

As imagens média mensal de TSM e CSM para o mês de novembro de 2002 obtidas a partir do sensor MODIS são apresentadas na **Figura 1**, respectivamente. A trajetória do navio foi sobreposta às imagens em preto.

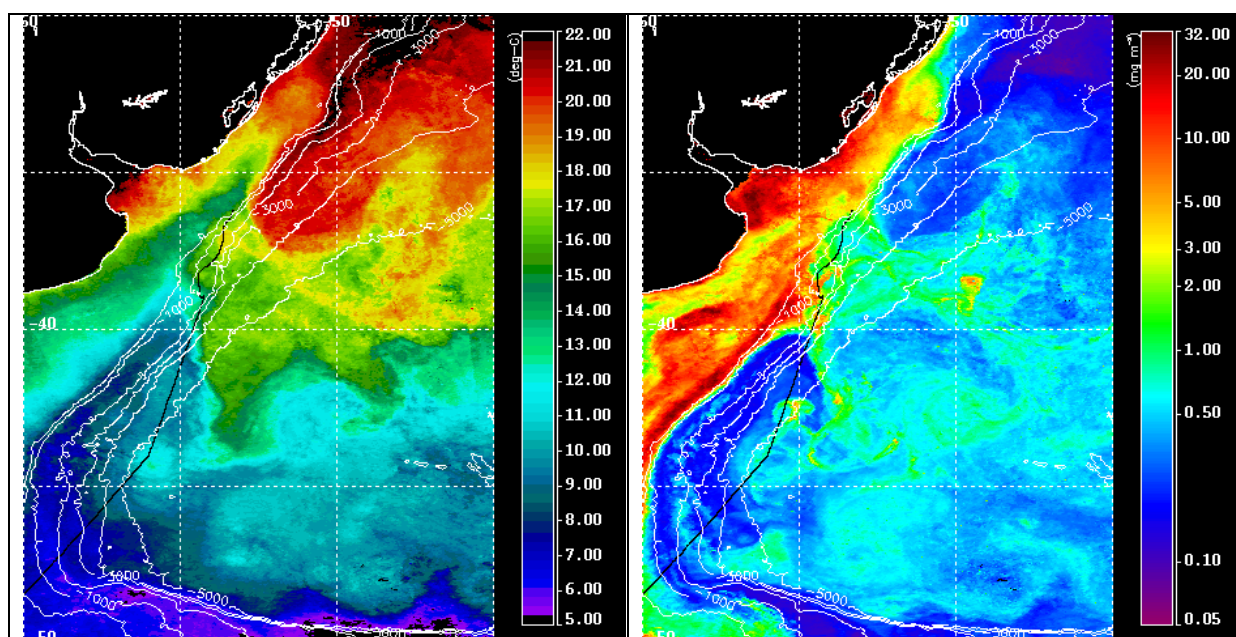


Figura 1 – Imagens MODIS média mensal da temperatura da superfície do mar (esquerda) e concentração de clorofila a (direita) do mês de novembro de 2002, respectivamente. Isóbatas de 500, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 e 5.000m em branco. Trajetória do Navio Ary Rongel sobreposta em preto.

As águas oligotróficas e quentes da CB aparecem em tons de laranja e vermelho com valores de TSM $> 18,0^{\circ}\text{C}$ (à esquerda na **Figura 1**). Concentrações de clorofila $a < 0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ também podem ser associadas à CB. As águas frias e mais ricas da CM aparecem em tons de cian e azul, com valores de TSM $< 14,0^{\circ}\text{C}$ (à esquerda na **Figura 1**). Sobre a plataforma continental é possível observar uma faixa com valores de CSM $> 2,0 \text{ mg.m}^{-3}$, com máximos de até $20,0 \text{ mg.m}^{-3}$ próximo ao estuário do Rio da Prata. Uma assinatura do vórtice de núcleo quente, destacado da CB foi identificada em torno da posição $44,5^{\circ}\text{S} - 56,0^{\circ}\text{W}$, com diâmetro médio de 100 km, aproximadamente.

Apesar da intensa cobertura de nuvens presente na imagem MODIS do dia 18/11/2004 (**Figura 2**), foi possível observar nitidamente o vórtice de núcleo quente e pobre em clorofila em torno da posição $44,7^{\circ}\text{S}-55,7^{\circ}\text{W}$. Um zoom destacando este vórtice é mostrado na **Figura 2** (no meio), com um trecho de 200 km da trajetória do navio sobreposto em vermelho (“A” = $44,9^{\circ}\text{S}-56,6^{\circ}\text{W}$ e “B” = $43,5^{\circ}\text{S}-55,0^{\circ}\text{W}$). As séries de valores de TSM e CSM obtidas nas imagens sobre este trecho da trajetória do navio são apresentadas na parte inferior da **Figura 2**. A cerca de 50 km do ponto A, uma extremidade do núcleo quente do vórtice apresenta TSM = $10,9^{\circ}\text{C}$. No centro aproximado da estrutura, a cerca de 100 km de “A”, o valor de TSM atinge $14,0^{\circ}\text{C}$. A outra extremidade, distante 150 km do ponto A, possui TSM = $11,2^{\circ}\text{C}$. A assinatura do vórtice nos campos de clorofila a apresenta valores de CSM = $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ a 50 km do ponto A, mínimos em torno de $0,25 \text{ mg.m}^{-3}$ em seu centro, a 90 km de “A” e $0,56 \text{ mg.m}^{-3}$ na outra extremidade aproximada da estrutura, a 150 km de “A”. O diâmetro médio do vórtice foi estimado em torno de 100 km.

Trabalhos de outros autores (Legeckis e Gordon, 1982; Olson *et al.*, 1988) indicam a presença de vórtices anticiclônicos formados por separação do extremo da CB, na zona de sua retroflexão a sul de 42°S , com diâmetros médios da mesma magnitude ao observado neste trabalho.

Os dados *in situ* coletados pelo equipamento instalado no navio também indicam uma assinatura do vórtice, com valores de temperatura ($13,0-14,0^{\circ}\text{C}$) e salinidade (36,5 PSU) de superfície relativamente mais altos (**Figura 3**). As diferenças observadas entre o núcleo do vórtice e as águas subantárticas adjacentes ficaram em torno de $4,5^{\circ}\text{C}$ e 0,5 PSU. As séries de valores de TSM e CSM obtidas a partir das imagens MODIS entre 9-16/11/2002 apresentam uma concordância qualitativa com os dados *in situ* (**Figura 4**).

Os valores de temperatura de superfície medidos *in situ* foram comparados quantitativamente com as TSM's estimadas com os dados MODIS (**Figura 5**). O coeficiente de determinação (R^2) encontrado na regressão linear entre a TSM *in situ* e a obtida por satélite foi igual a 0,83. A diferença média (ΔT) entre as temperaturas *in situ* e os dados de satélite foi de $0,34^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,49^{\circ}\text{C}$). Souza (2000) obteve uma diferença ΔT média entre dados *Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset* e estimativas AVHRR igual a $-0,49^{\circ}\text{C}$ na área da ZCBM, no período 1993–1994. Comparando dados de bóias de deriva com dados AVHRR, Souza (2000) encontrou uma diferença média ΔT igual a $-1,44^{\circ}\text{C}$. Kampel (2003) obteve uma diferença média negativa entre temperaturas *in situ* coletadas a bordo de navio com equipamento CTD na costa sudeste brasileira e estimativas AVHRR nos períodos de verão em 2001 e 2002 igual a $-0,32^{\circ}\text{C}$. Nos períodos de inverno em 2001 e 2002, e considerando o conjunto completo de dados, Kampel (2003) obteve diferenças ΔT médias iguais a $0,47^{\circ}\text{C}$ e $0,26^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Ainda que as correções atmosféricas aplicadas nas imagens MODIS no presente trabalho tenham subestimado ou superestimado os efeitos da atmosfera e da superfície de pele do oceano, a diferença média total encontrada ficou abaixo de $0,5^{\circ}\text{C}$.

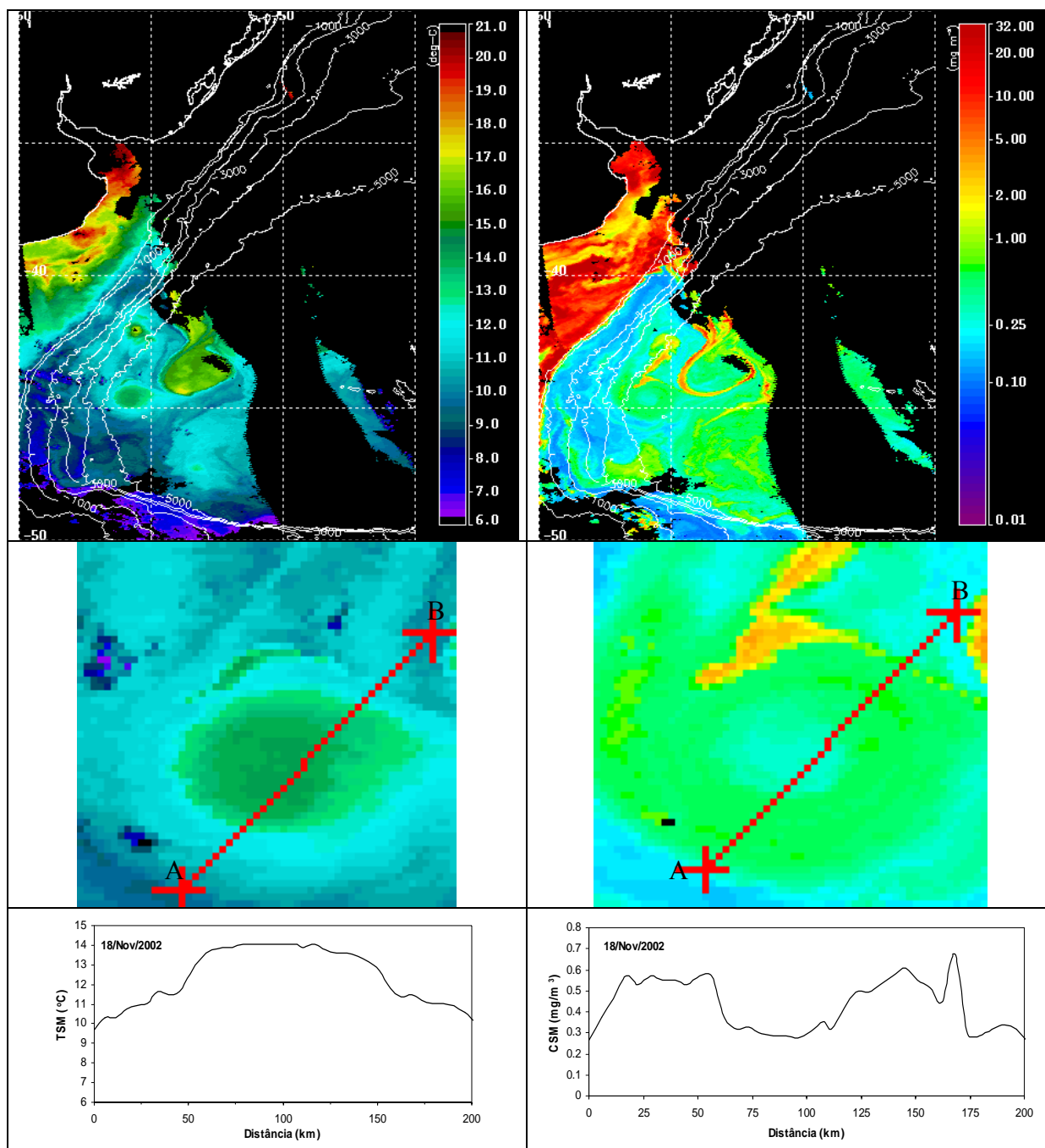


Figura 2 – Imagens MODIS de TSM (esquerda em cima) e CSM (direita em cima) do dia 18/11/2002. Isóbatas de 500, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 e 5.000m em branco. Destaque do vórtice com o trecho “AB” da trajetória do navio Ary Rongel sobreposta em vermelho (no meio, TSM à esquerda e CSM a direita). Valores de TSM (embaixo à esquerda) e CSM (embaixo à direita) obtidos nas imagens sobre o trecho e trajetória “AB” (“A” = 44,9°S-56,6°W e “B” = 43,5°S-55,0°W).

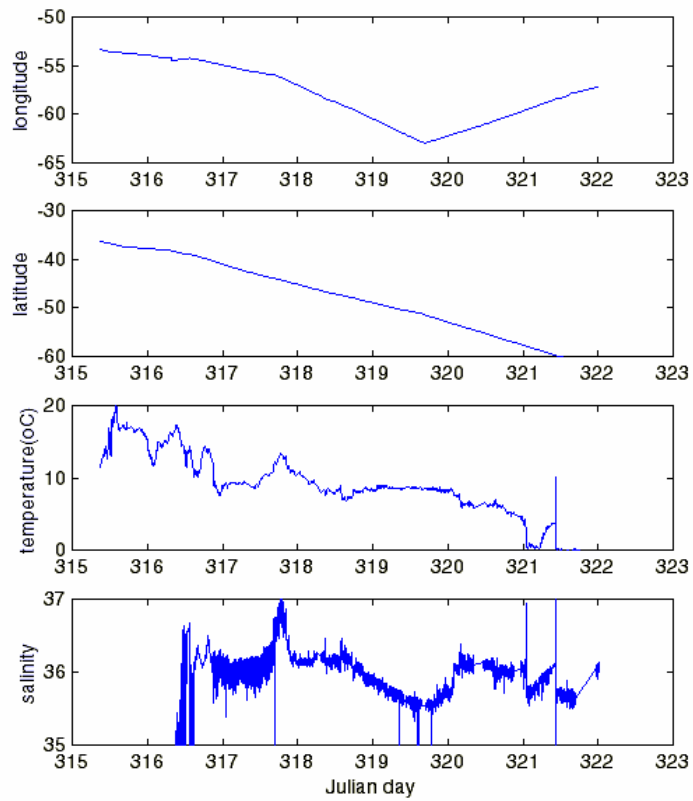


Figura 3 – Séries temporais de dados *in situ* obtidos pelo navio Ary Rongel durante a XXI Operação Antártica.

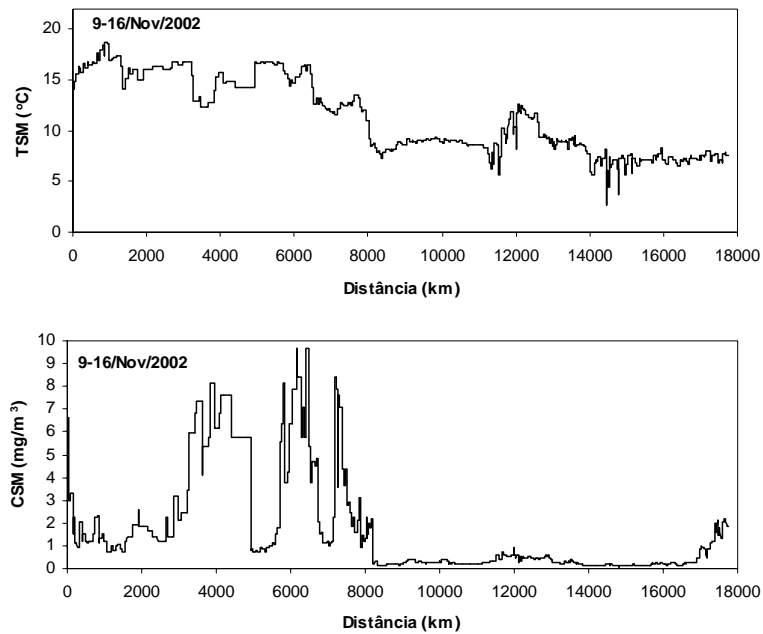


Figura 4 – Séries de valores das temperaturas da superfície do mar e concentração de clorofila *a* obtidas a partir das imagens MODIS entre 9-16/11/2002 sobre a trajetória do navio Ary Rongel.

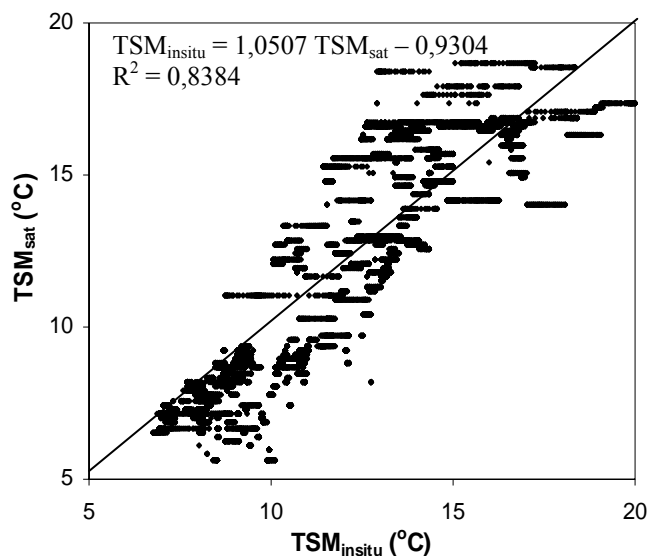


Figura 5 - Diagrama de dispersão das temperaturas obtidas por satélite (MODIS-AQUA) entre 9-16/11/2004 *versus* a temperatura da superfície do mar medida *in situ* a bordo do navio Ary Rongel durante a XXI Operação Antártica.

4. Conclusões

Neste trabalho, foi possível identificar e descrever um vórtice de núcleo quente destacado da Corrente do Brasil na região da Zona de Confluência Brasil-Malvinas. Foram utilizados dados orbitais do sensor MODIS, instalado no satélite AQUA, processados para gerar imagens da temperatura da superfície do mar e concentração de clorofila *a*, em conjunto com dados *in situ* coletados pelo navio Ary Rongel durante a XXI Operação Antártica, em novembro de 2002.

Ainda que se tenha identificado um único vórtice na região da ZCBM, este trabalho mostrou a potencialidade do sensor MODIS para monitorar simultaneamente os campos bi-dimensionais de temperatura e concentração de clorofila *a* na superfície do mar, na ausência de nuvens. A diferença média total encontrada entre as medidas de temperatura da superfície do mar *in situ* (termosalinógrafo) e obtidas por satélite ficou abaixo de 0,5°C, o que pode ser considerado consistente.

Agradecimentos

As imagens MODIS foram disponibilizadas pela NASA. O Navio Ary Rongel pertence à Marinha do Brasil. O CNPq e o Ministério da Ciência e Tecnologia custeiam o Projeto GOAL (55.0370/02-1) dentro do PROANTAR.

Referências

- Brandini, F.P.; Boltovskoy, D.; Piola, A.; Kocmur, S.; Röttgers, R.; Abreu, P.C.; Lopes, R.M. Miltiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30-62°S). **Deep-Sea Research**, v.47, p. 1015-1033, 2000.
- Boltovskoy, D. Características biológicas del Atlántico Sudoccidental. In: Boltovskoy, D. (ed.). **Atlas del Zooplancton del Atlántico Sudoccidental y Métodos de Trabajo con el Zooplancton Marino**. INIDEP, Mar del Plata, pp. 239-251, 1981.
- Boltovskoy, D. Biogeography of the southwestern Atlantic: overview, current problems and prospects. In: Pierrot-Bults, A.C., Van der Spoel, S., Zahuranec, B.J., Johnson, R.K. (eds.). **Pelagic Biogeography**, v. 49. UNESCO Technical Papers in Marine Science, UNESCO, Holanda, pp. 14-24, 1986.

- Chelton, D.B., Schlax, M.G., Witter, D.L., and Richman, J.G. GEOSAT altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean, **Journal Geophysical Research**, v.95, p. 17.877-17.903, 1990.
- Denman K.L.; Abbott, M.R. Time scales of pattern evolution from cross-spectrum analysis of advanced very high resolution radiometer and coastal zone color scanner imagery. **Journal of Geophysical Research**, v.99, p. 7433-7442, 1994.
- Garcia, C.A.E.; Sarma, Y.V.B.; Mata, M.M.; Garcia, V.M.T. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region. **Deep-Sea Research**, v.51, p. 159-171, 2004.
- Gordon, A.L. Brazil-Malvinas Confluence - 1984. **Deep-Sea Research**, v.36, p. 359-384, 1989.
- Gordon, A.L., Greengrove, C.L. Geostrophic circulation of the Brazil-Falkland confluence. **Deep-Sea Research**, v.33, p. 573-585, 1986.
- Ikedo, Y.; Siedler, G.; Zwierz, M. On the variability of Southern Ocean front locations between southern Brazil and the Antarctic Peninsula. **Journal of Geophysical Research**, v.94, p. 4757-4762, 1989.
- Kampel, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* na Costa Sudeste Brasileira**. 2003. 311 p. (TDE-29042004-165724). Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
- Legeckis, R.; Gordon, A.L. Satellite observations of the Brazil and Falkland Currents - 1975 to 1976 and 1978. **Deep-Sea Research**, v.29, p. 375-401, 1982.
- Lentini, C.A.D.; Olson, D.B.; and Podestá, G. Statistics of Brazil Current rings observed from AVHRR: 1993 to 1998, **Geophysical Research Letters**, v.29(16), p. 58-1 – 58-4, 2002.
- Olson, D.B.; Podestá, G.P.; Evans, R.H.; Brown, O. B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. **Deep-Sea Research**, v.35, p. 1.971-1.990, 1988.
- Reid, J.L.; Nowlin Jr., W.D.; Patzert, W.C. On the characteristics and circulation of the Southwestern Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v.7, p. 62-91, 1977.
- Souza, R.B. **Satellite and lagrangian observations of mesoscale surface processes in the Southwestern Atlantic Ocean**. 2000. 238 p. Doctor of Philosophy. Faculty of Science Oceanography. University of Southampton, Southampton. 2000.
- Souza, R.B.; Robinson, I.S. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. **Continental Shelf Research**, v.24, p. 241-262, 2004.
- UNESCO. **Progress on oceanographic tables and standards: work and recommendations of the UNESCO/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel**. Unesco technical papers in marine science, v.50, 1988.