

Variabilidade sazonal da profundidade da camada de mistura na região do Complexo Recifal dos Abrolhos e da Cadeia Vitória-Trindade baseada em dados de ventos derivados do satélite QuikSCAT

Leonardo Nascimento Lima^{1,a,*}
Carlos Alexandre Domingos Lentini^{1,b,*}

¹Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Instituto de Física
Travessa Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Ondina, Salvador - BA, Brasil

^aleonasc_l@hotmail.com

^bclentini@ufba.br

*Grupo de Oceanografia Tropical – www.goat.fis.ufba.br

Abstract. This work investigates the seasonal variability of the mixed layer depth (MLD) in the Abrolhos and Vitória-Trindade region based on sea winds derived from the QuikSCAT scatterometer and numerical model outputs generated by the Parallel Ocean Program (POP) model from 1999 to 2003 in the region between 13°S-23°S and 44°W-28°W. A combination of horizontal maps of wind speed, wind-stress curl and Hovmöller diagrams are used to address this issue. Wind speeds of 5 to 6.6 m/s were found during summer season, while during wintertime, the speed of the wind reached values from 6.6 to 8.4 m/s. The summertime MLD derived from POP varied from 10 to 20 meters, whereas the wintertime MLD reached depths down to 100-125 meters. Based on the analysis of the wind stress curl, it was expected that positive values would induce upwelling, whereas negative values would be an indicative of downwelling. The results showed positive values all season-round during the period of study. A good agreement between positive wind stress curl and upwelling were observed during spring. However, north of ~15°S during the autumn-winter of 2000, autumn of 2001 and 2003, the curl of the wind stress was negative. Our results suggested that the depth of the mixed layer could be driven by other forcings instead of being purely related to the dynamics of Ekman in the area of study.

Palavras-chave: velocidade do vento, rotacional do vento, escaterômetro, wind speed, wind-stress curl, SeaWinds.

1. Introdução

As camadas mais superiores no oceano desempenham um importante papel na troca de energia e massa na interface atmosfera-oceano (Kumar e Narvekar, 2005). Desta forma, a variabilidade da profundidade da camada de mistura é um indicativo comumente usado na análise da resposta da camada superior dos oceanos às forçantes atmosféricas (Noh e Lee, 2008).

Na atmosfera, as forçantes que regulam a mistura na superfície oceânica são os ventos, as ondas, o aquecimento solar e as taxas de evaporação e precipitação. A camada de mistura oceânica ainda desempenha um papel vital nas alterações climáticas, bem como no próprio ecossistema marinho (Nagai et al. 2005). Por esta razão, a profundidade da camada de mistura pode afetar a produtividade biológica marinha de diferentes maneiras (Sakar et al. 2005).

Desta forma, este estudo visa o entendimento dos processos que regulam a profundidade da camada de mistura no noroeste do Atlântico Sul (NOAS). Para este propósito serão utilizados dados de ventos derivados do satélite QuikSCAT. Aumentar o conhecimento acerca do NOAS é fundamental devido à quantidade e diversidade de ecossistemas presentes nesta região, sendo o mais importante deles o Banco dos Abrolhos (BAS).

1.1. Região de estudo

A área de estudo estende-se de 13° a 23°S, e de 44° a 28°W compreendendo duas plataformas continentais com regimes hidrodinâmicos e geomorfológicos distintos: a plataforma continental leste brasileira (PCLB), de 8° a 15°S, e a plataforma de Abrolhos-Campos (PAC), de 15° a 23°S (Figura 1) (Castro e Miranda, 1998; Knoppers et al. 1999).

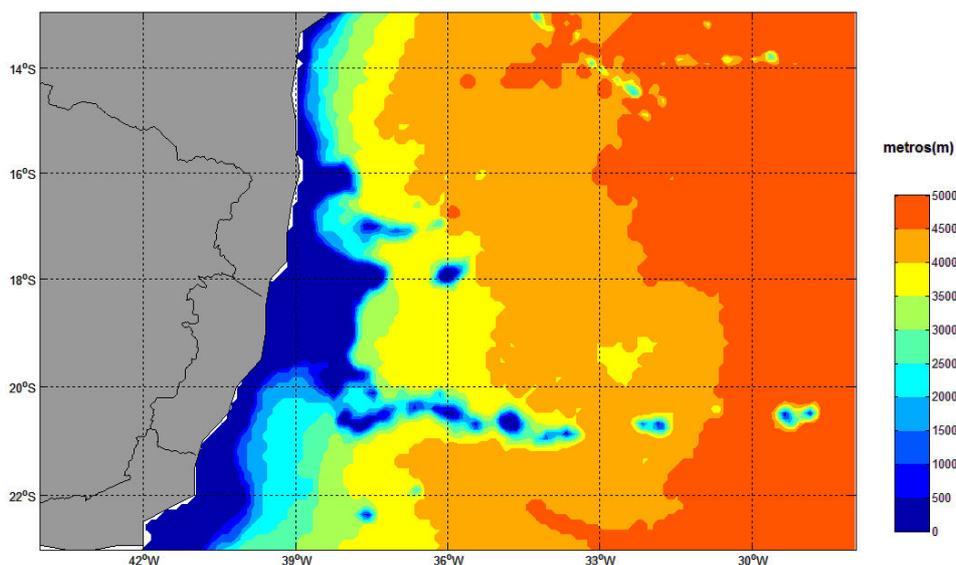


Figura 1. Batimetria da região de estudo segundo o modelo *Parallel Ocean Program* (POP).

Ao norte de 15°S, a plataforma continental é relativamente estreita, com aproximadamente 15 km de largura e a profundidade de quebra da plataforma ocorre em torno dos 60 m. A PCLB é dominada pela presença da Corrente Norte do Brasil, a Corrente Sul Equatorial e pela Corrente do Brasil (Castro e Miranda, 1998).

Abaixo dessa latitude até o paralelo de 23°S, a topografia é complexa. A extensão da PAC é bem variável com uma largura de 35 km na sua porção norte, aumentando na direção sul nas proximidades do Banco de Royal Charlotte, onde atinge 110 km. Em seguida ela se estreita (~45 km) para novamente se estender até 190 km na altura do BAS (Castro e Miranda, 1998).

O NOAS abriga uma das maiores e mais ricas estruturas recifais do Brasil, o BAS. O BAS representa um dos mais importantes ecossistemas marinhos brasileiros, abrangendo a maior biodiversidade do Atlântico Sul e abrigando diversas espécies de mamíferos, tartarugas, peixes e invertebrados marinhos ameaçados de extinção (e.g., Leão et al. 2003).

Além disso, mais ao sul da região de estudo, outra estrutura geomorfológica presente é a Cadeia Vitória – Trindade. Uma longa cadeia formada de ilhas oceânicas e montes submarinos disposta na crosta oceânica em torno de 20,5 °S, culminando, a leste, nas Ilhas de Trindade e Martin Vaz e em direção à costa da cidade de Vitória – ES.

2. Metodologia de Trabalho

Os dados de profundidade da camada de mistura foram derivados do *Parallel Ocean Program* (POP). Trata-se de um modelo de circulação oceânica global, coordenada z , com uma resolução horizontal de $1/10^\circ$ e uma resolução vertical de 40 níveis de profundidade, havendo uma maior resolução próxima a superfície (14 níveis verticais nos primeiros 200 metros de profundidade). As saídas do modelo são sazonais (i.e., JFM, AMJ, JAS e OND) e correspondem ao período de 1994 a 2003 após 15 anos de spin-up (1979 a 1993).

Embora existam variadas formas de se determinar a profundidade da camada de mistura (Tomczak e Godfrey, 1994; Lorbacher et al. 2006), neste trabalho foi usada a mesma definição usada por Cirano et al. (2006) para definir a camada isopical. Nesta definição, a profundidade da camada de mistura corresponde a profundidade na qual a densidade potencial do primeiro nível do modelo é menor igual a 0,125. Também a partir do modelo POP foram gerados dados de anomalia de temperatura do primeiro nível mais superficial do modelo, correspondente à profundidade de 5 m.

Os dados de intensidade e de rotacional do vento são derivados do escaterômetro *SeaWinds* que voa a bordo do satélite QuikSCAT (NASA). O banco de dados utilizado foi extraído de <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/mwf-QuikSCAT/data>. Para que os campos médios de vento pudessem ser comparados com as médias sazonais do modelo, computou-se a média sazonal dos dados do QuikSCAT de outubro de 1999 até dezembro de 2003. Como os dados de vento do QuikSCAT compreendem uma série temporal inferior à do modelo, somente os campos referentes ao período de 1999 a 2003 são apresentados neste trabalho.

3. Resultados e Discussão

Os resultados de intensidade do vento estão presentes na Figura 2. A Figura 2a evidencia o verão sendo a estação cuja intensidade dos ventos é mais baixa. Nesta estação a velocidade varia entre 5 e 6,6 m/s em quase toda a área de estudo, exceto na região sudoeste, abaixo de 20 °S. Nesta região específica, os ventos alcançam velocidade de até 7,6 m/s. No outono (Figura 2b) há um aumento na intensidade dos ventos, pouco expressivo, porém, o suficiente para impor características próprias a esta estação. Já o inverno (Figura 2c) trata-se da estação cuja intensidade dos ventos é mais elevada. Nesta estação há registros de até 8,6 m/s, mas na maior parte da região os ventos variam em intensidade de 6,6 a 8,4 m/s. Na primavera (Figura 2d), no sudoeste da área de estudo, adjacente a costa dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, os ventos alcançam os maiores valores de intensidade (8,6 m/s), entretanto, esta característica não se estende por toda a região de estudo. Além disso, no verão e na primavera os ventos são predominantemente de nordeste. No outono e no inverno, acima de 18 °S, os ventos são preferencialmente de sudeste. Abaixo de 18 °S os ventos são preferencialmente de leste.

A Figura 3 mostra os resultados de rotacional do vento para as quatro estações do ano. No verão (Figura 3a), o rotacional do vento alcança valores de 4 a 8×10^{-8} Pa m⁻¹ na maior parte da área de estudo. Ainda assim, na região oeste a 39 °W há presença de valores negativos variando entre -8×10^{-8} e 0 Pa m⁻¹. No outono (Figura 3b) é importante destacar a única região com valores de rotacional do vento negativos no noroeste da área de estudo, acima de 16 °S. O inverno (Figura 3c) segue um padrão que difere pouco do outono. Já na primavera (Figura 3d), o rotacional do vento alcança os maiores valores, até 10^{-7} Pa m⁻¹ entre 20 e 22 °S e revela um padrão com características mais próximas ao verão.

A análise da variação sazonal da profundidade da camada de mistura será inicializada com o estudo da variação sazonal da intensidade e do rotacional dos ventos. A Figura 4 mostra o comportamento da camada de mistura em cada estação para o período de estudo (1999-2003). No inverno de 2003 a profundidade alcança os valores mais elevados (até ~125 m), entretanto, este padrão não se estende de norte a sul na região. No inverno de 2001, por exemplo, maiores profundidades (~100 m) são encontradas abaixo de 17 °S. Nas outras estações há uma redução na profundidade da camada de mistura, sendo o verão a estação com os menores registros.

Fundamentado na intensidade dos ventos é possível explicar em parte o comportamento da camada de mistura no período de estudo. Na Figura 5, os dados do QuikSCAT evidenciam que durante os períodos de verão, devido a uma menor intensidade dos ventos (abaixo de 6,6 m/s), a profundidade da camada de mistura reduziu, variando sempre entre 10 e 25 m. Já durante os períodos de inverno, os ventos foram mais intensos (~8 m/s), acarretando numa camada de mistura mais profunda, atingindo valores acima de 100 m (Figura 4). O ano de 2003, entretanto, possuiu características peculiares. No inverno deste ano, apesar de serem observados os maiores registros para a profundidade da camada de mistura (alcançando 125 m), a intensidade dos ventos não seguiu o mesmo padrão dos anos anteriores. Na primavera, o comportamento da camada de mistura não foi o esperado com base na força dos ventos e na

dinâmica, pois seguido do inverno, esta estação possuiu os maiores registros de intensidade; entretanto, a camada de mistura foi rasa em todos os anos de estudo nesta estação.

Baseado no rotacional do vento (Figura 6) é esperado que valores positivos induzam o processo de ressurgência, enquanto que valores negativos induzam o processo de subsidência. Os resultados evidenciam valores positivos em todas as estações durante o período de estudo. Entretanto, a norte de 15 °S, durante o outono e o inverno de 2000 e o outono de 2001, e a norte de 17 °S, durante o outono de 2003, o rotacional do vento é negativo. Como consequência, o processo de subsidência determinaria uma camada de mistura mais profunda, porém a profundidade da camada de mistura foi mais rasa (15 a 45 m), comparando com regiões sob condição de rotacional positivo neste mesmo período. Por outro lado, como o rotacional do vento positivo auxilia no processo de ressurgência espera-se uma camada de mistura mais superficial. De fato, por ser a estação cujos valores de rotacional são mais elevados, até 1×10^{-7} Pa/m, a primavera (Figura 3d e 6) obteve valores bem baixos de profundidade da camada de mistura (5 a 15 m). Vale ressaltar, no entanto que, apesar do rotacional do vento ter sido positivo em boa parte do período de estudo, a resposta na profundidade da camada de mistura não seguiu o comportamento esperado. Este resultado sugere que a profundidade da camada de mistura possa ser uma manifestação de outras forças, realmente, ao invés de estar relacionada puramente à dinâmica de Ekman.

A análise da Figura 7 evidencia que a anomalia de temperatura é negativa a partir da primavera de 1999 cujos valores variam entre -1,5 e -0,75 °C até o verão de 2001. No outono e inverno de 2001 a anomalia já assume valores positivos abaixo de 19 °S. Os anos de 2002 e 2003 foram os anos que apresentaram os valores positivos mais elevados de anomalia, variando entre 0,5 e 1,75 °C. Neste período, no outono e no inverno de 2002 foram encontrados os valores positivos relativamente mais altos ($\sim 1,75$ °C) abaixo de 21 °S.

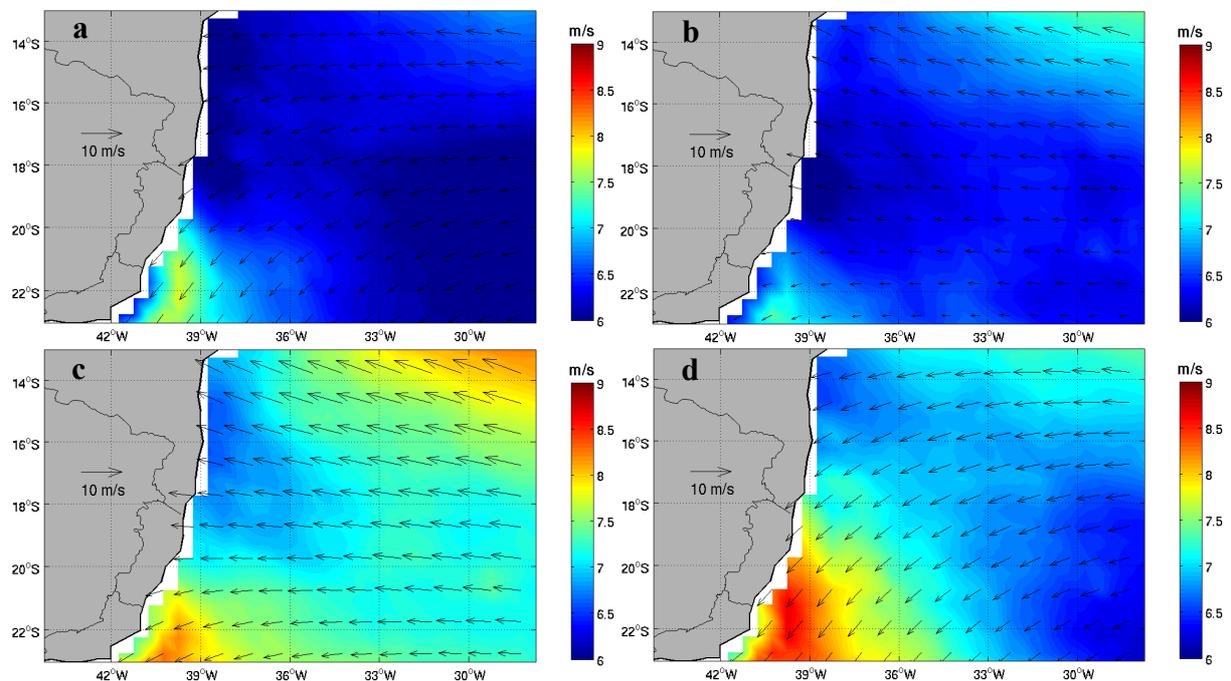


Figura 2. Distribuição climatológica sazonal média para o período de 2000-2003 dos campos horizontais de velocidade do vento (em m/s) para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

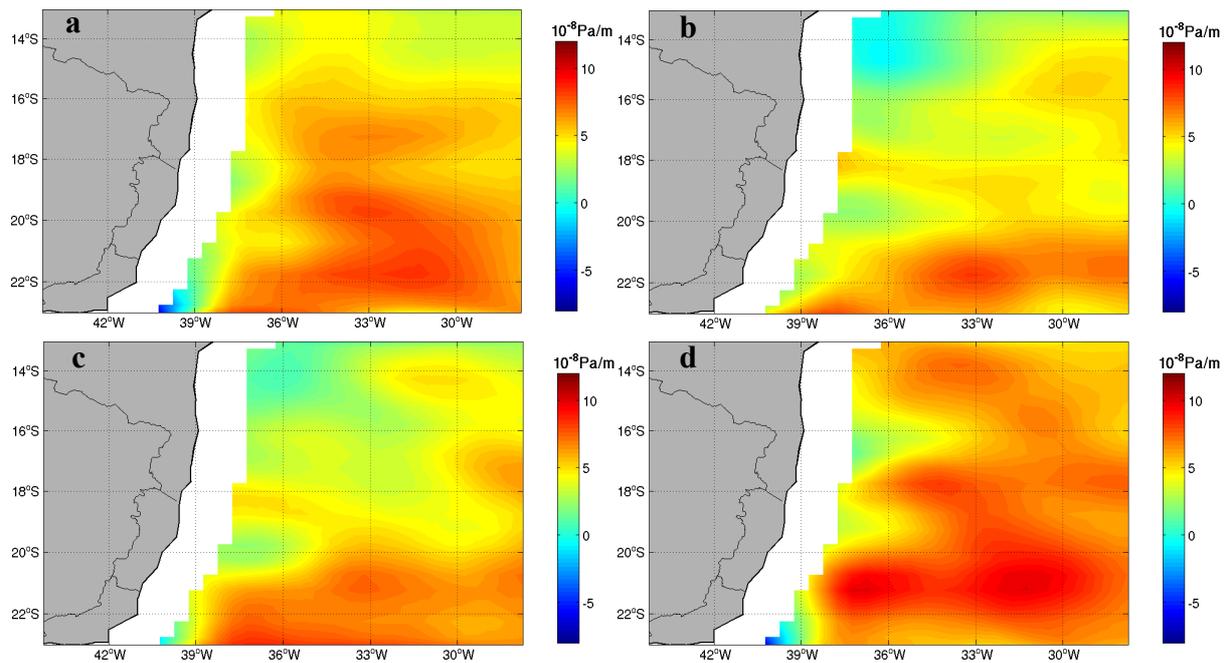


Figura 3. Distribuição climatológica sazonal média para o período 2000-2003 dos campos horizontais de rotacional do vento ($\times 10^{-8} \text{ Pa m}^{-1}$) para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

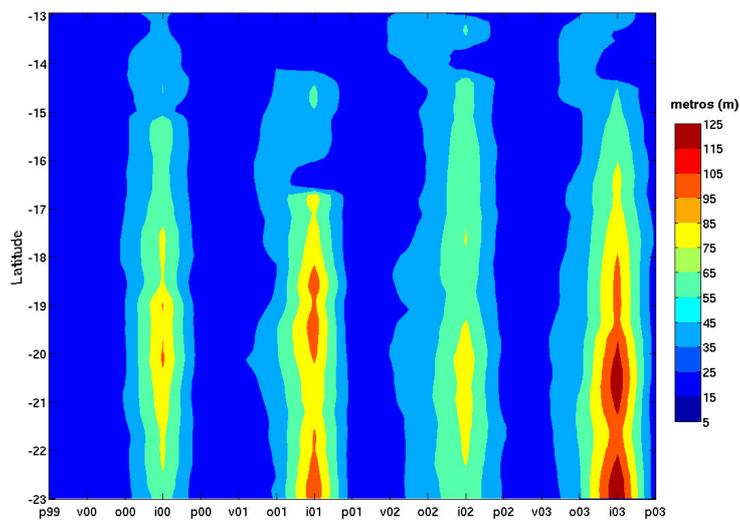


Figura 4. Hovmoller da profundidade da camada de mistura (em metros) ao longo de 35.25 °W. P99 corresponde a Primavera de 1999; V00 ao Verão de 2000; O00 ao Outono de 2000; I00 ao Inverno de 2000 e assim sucessivamente.

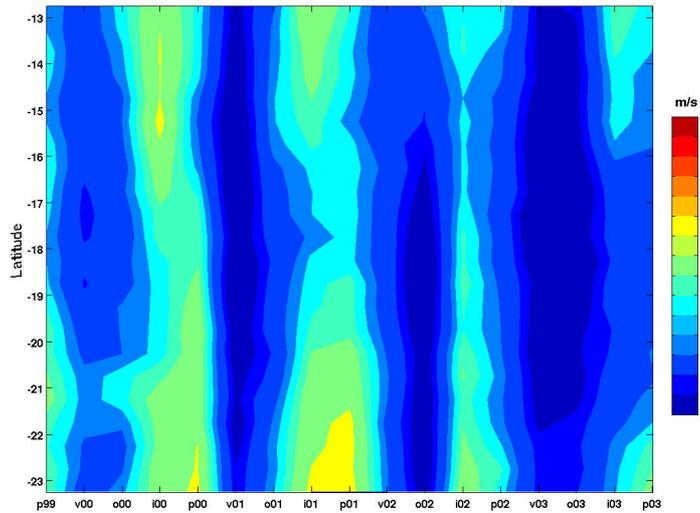


Figura 5. Hovmoller da velocidade do vento (em m/s) ao longo de 35.25 °W.

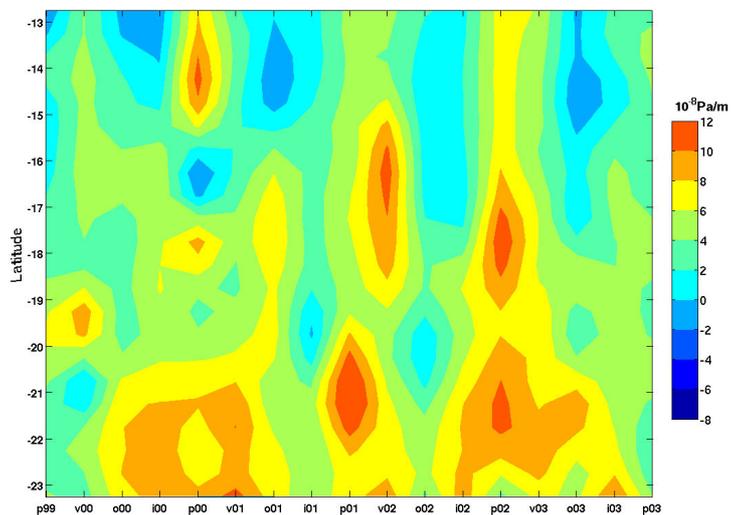


Figura 6. Hovmoller do rotacional do vento ($\times 10^{-8} \text{ Pa m}^{-1}$) ao longo de 35.25 °W.

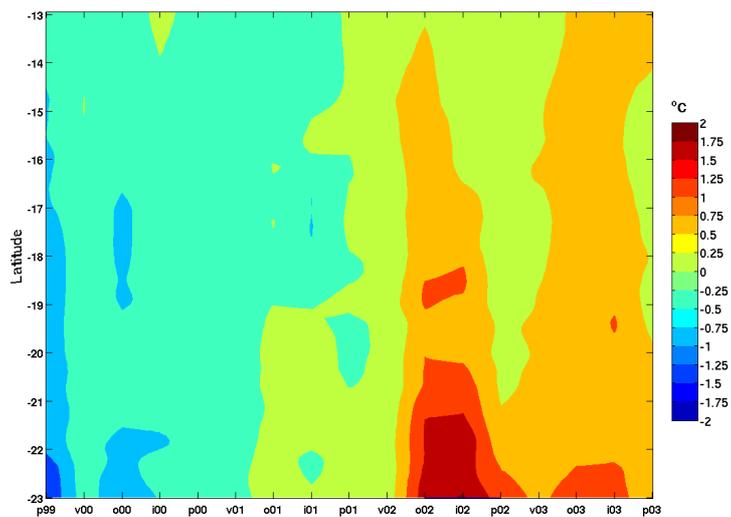


Figura 7. Hovmoller da anomalia de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$) ao longo de 35.25 °W.

Como em outros oceanos, a profundidade da camada de mistura na região de estudo alcançou seu máximo no período de inverno, devido ao resfriamento na superfície e a maior

agitação provocada pela maior intensidade dos ventos (Kara et al. 2000). No verão, estação que obteve as menores velocidades de vento (5 a 6,6 m/s), a profundidade da camada de mistura mais baixa também pode está associada ao forte aquecimento promovido pela maior intensidade de luz solar durante esta estação e o que acarreta, entre outras consequências, na formação da termoclina sazonal (Pereira e Moura, 1988; Tomczak e Godfrey, 1994; Stewart, 2005). Kumar e Narvekar (2005), estudando o Mar da Arábia, associaram uma camada de mistura mais superficial na primavera, entre outros fatores, à baixa intensidade dos ventos. No presente estudo, entretanto, não foi possível encontrar uma relação convincente entre a profundidade da camada de mistura e a intensidade dos ventos nesta estação. Apesar de a primavera ser a estação com valores relativamente altos de velocidade do vento (~ 8 m/s em 2001), a camada de mistura foi mais superficial. Este comportamento foi mais bem explicado através do estudo do rotacional do vento, como foi descrito na Figura 6.

Os maiores registros de anomalia de temperatura positiva foram encontrados nos anos de 2002 e 2003. Entretanto, este possível aumento de temperatura não interferiu na profundidade da camada de mistura. No inverno de 2003, por exemplo, a profundidade da camada de mistura alcançou os maiores registros (~175 m). Não houve uma mudança perceptível no padrão sazonal da camada de mistura em função da anomalia de temperatura.

4. Conclusões

A profundidade da camada de mistura na região noroeste do Atlântico Sul obedece a um padrão marcadamente sazonal. Entre outras forçantes que desempenham um importante papel na interface atmosfera-oceano, os ventos mostraram ser uma variável fundamental nesta região. As maiores velocidades do vento no inverno propiciaram os maiores registros para a profundidade da camada de mistura. Por outro lado, no verão houve uma redução na profundidade da camada de mistura. Entre outros fatores, a redução na velocidade dos ventos durante esta estação propiciou esta característica. Na primavera, a profundidade da camada de mistura foi mais bem explicada baseada no rotacional do vento. Nesta estação foram encontrados os valores de rotacional relativamente mais positivo o que acarreta em processos de ressurgência. Este fato gera uma camada de mistura mais superficial. Outras forçantes, no entanto devem ser investigadas a fim de buscar um maior entendimento do comportamento da camada de mistura na região, principalmente nos episódios que não houve uma boa explicação baseada na dinâmica dos ventos.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos projetos BACANA (proc. No. 478398/2006-9) e PRÓ-ABROLHOS (proc. No. 420219-2005-6).

Referências Bibliográficas

Castro, 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: The Sea**, v. 11, p. 209-251, 1998.

Cirano, M.; Mata, M.M.; Campos, E.J.D.; Deiró, N.F.R. A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação Global OCCAM. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 2, p. 209-230, 2006.

Kara, A.B.; Rochford, P.A.; Hurlburt, H.E. Mixed layer depth variability and barrier layer formation over the North Pacific Ocean. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 105, p. 16783-16801, 2000.

Knoppers, B.; Ekau, W.; Figueiredo, A.G. The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport. **Geo-Marine Letters**, v. 19, p. 171-178, 1999.

Kumar, S. P.; Narvekar, J. Seasonal variability of the mixed layer in the central Arabian Sea and its implication on nutrients and primary productivity. **Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography**, v. 52, p. 1848-1861, 2005.

Leão, Z.M.A.N.; Kikuchi, R.K.P.; Testa, V. Corals and coral reefs of Brazil. In: Cortéz, J.(Org.). **Latin American Coral Reefs**. San José, Costa Rica: Editora Elsevier, 2003. p. 9-52.

Lorbacher, K.; Dommenges, D.; Niiler, P.P.; Köll, A. Ocean mixed layer depth: A subsurface proxy of ocean-atmosphere variability. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 111, 2006.

Nagai, T.; Yamazaki, H.; Nagashima, H.; Kantha, L.H. Field and numerical study of entrainment laws for surface mixed layer. **Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography**, v. 52, p. 1109-1132, 2005.

Noh, Y.; Lee, W. S. Mixed and Mixing Layer Depths Simulated by an OGCM. **Journal of Oceanography**, v. 64, p. 217-225, 2008.

Pereira, C. S.; Moura, A.D. Balanço de energia da camada de mistura superior oceânica - uma revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, p. 233-245, 1988.

Sarkar, N.; Royer, T.C.; Grosch, C.E. Hydrographic and mixed layer depth variability on the shelf in the northern Gulf of Alaska, 1974-1998. **Continental Shelf Research**, v. 25, p. 2147-2162, 2005.

Stewart, R.H. **Introduction to Physical Oceanography**. Disponível em:
<<http://www.ocean.uni-bremen.de/EInfo/materialien/IntroPhysOc/IntroPhOcindex.html>>.
Acesso em: 15.set.2008.

Tomczak, M.; Godfrey, J. S. **Regional Oceanography: An Introduction**. Pergamon Press, 1994. 422 p.