

**Impactos da utilização de uma grade de alta resolução horizontal na  
componente oceânica do modelo brasileiro do sistema terrestre  
(BESM)**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Andyara Oliveira Callegare (UFSCar, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: andyara.callegare@cptec.inpe.br

Dr. Emanuel Giarolla (DMD/CPTEC/INPE, Orientador)  
E-mail: emanuel.giarolla@cptec.inpe.br

Julho de 2014

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**PROJETO**

**Impactos da utilização de uma grade de alta resolução horizontal na  
componente oceânica do modelo brasileiro do sistema terrestre  
(BESM)**

**PROCESSO: 10508/2014-8**

Relatório elaborado por ANDYARA OLIVEIRA CALLEGARE relativo  
ao período de março de 2014 a julho de 2014

**Andyara Oliveira Callegare - Bolsista PIBIC/CNPq**  
**E-mail:** andyara.callegare@cptec.inpe.br

**Dr. Emanuel Giarolla - Orientador**  
**E-mail:** emanuel.giarolla@cptec.inpe.br

Julho de 2014

## RESUMO

Este trabalho possui como objetivo avaliar a qualidade dos resultados quando uma grade horizontal de  $\frac{1}{4}^\circ$  de latitude x  $\frac{1}{4}^\circ$  de longitude é definida para o Modelo Global de Circulação Oceânica (MGCO) "Modular Oceanic Model" versão 4p1 (MOM4p1), do "Geophysical Fluid Dynamics Laboratory" (GFDL), que é a componente oceânica do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM). Para isso foram integralizados 30 anos de simulações, partindo de um estado inicial do oceano com as correntes em repouso e estrutura climatológica de temperatura e salinidade de Levitus, forçando a interface atmosfera-oceano com ventos e fluxos de calor de médias mensais climatológicas baseados nas reanálises do NCEP/NCAR. As análises focaram na região equatorial, tais como a comparação da profundidade das termoclinas dos oceanos Pacífico, Atlântico, e Índico com suas correspondentes profundidades médias climatológicas anuais, e comparações da subcorrente equatorial atlântica, simulada pelo MCGO com grade de alta resolução, e pelo Modelo de Circulação Geral acoplado Oceano-Atmosfera (MCGOA) com uma grade horizontal menos refinada, com observações de Johns et al. (2014) em 4 seções verticais ao longo do Equador. Na análise da termoclina, a profundidade média dos 30 anos de simulação, comparada com a profundidade média climatológica, não apresentou grandes desvios; apenas no extremo oeste do atlântico há uma divergência inferior a 40 metros de profundidade, que é atenuada em direção ao leste. A subcorrente equatorial do atlântico foi analisada em  $35^\circ\text{W}$ ,  $23^\circ\text{W}$ ,  $10^\circ\text{W}$  e  $0^\circ\text{E}$ . O MCGO foi capaz de representar tanto a velocidade zonal como a profundidade do núcleo da corrente, assim como o MCGOA, porém este último com o núcleo da corrente menos intenso e mais profundo do que as medições; Ambos MCGO e MCGOA representaram o núcleo da corrente mais esparso do que o observado, em um formato elipsoide em suas profundidades. Como a dissipação de energia (difusão e mistura) nos modelos oceânicos é feita por parametrizações, com coeficientes de ajuste, acredita-se que o achatamento da subcorrente possa ser causado por coeficientes de difusão e mistura vertical ainda não calibrados para estes tipos de grade. Portanto dois testes foram realizados mudando estes coeficientes, em simulações curtas de 6 anos cada, e os resultados foram analisados através de perfis de velocidade zonal no equador nas

longitudes anteriormente definidas. Entretanto a média dos últimos cinco anos não divergiu significativamente da média do mesmo período da simulação com os coeficientes originais, então uma simulação mais longa pode ser necessária.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the quality of the results when a  $\frac{1}{4}^\circ$  latitude x  $\frac{1}{4}^\circ$  longitude horizontal grid is defined for the Ocean General Circulation Model (OGCM) “Modular Oceanic Model” version 4p1 (MOM4p1), from the “Geophysical Fluid Dynamics Laboratory” (GFDL), which is the oceanic component of the Brazilian Earth System Model (BESM). For this purpose, 30 years of simulations were integrated, from an initial state with zero currents and temperature and salinity structure from Levitus climatology, forcing the ocean-atmosphere interface with monthly mean climatological winds and heat fluxes based in the NCEP/NCAR reanalysis. The analysis were focused in the equatorial region, such as comparisons of the thermocline depth at the Pacific, Atlantic, and Indian oceans, with their corresponding climatological annual means, and comparisons of the equatorial undercurrent, simulated by the OGCM with the higher resolution grid, and by the Atmosphere-Ocean coupled General Circulation Model (AOGCM) with a coarser horizontal grid, with observations from Johns et al. (2014) in 4 vertical sections along the equator. In the thermocline analysis, the mean depth of 30 years of simulation, compared with the climatological mean depth, did not presented remarkable bias; only in the western Atlantic there is a divergence with depth less than 40 meters, that is attenuated eastwards. The equatorial undercurrent was analysed at  $35^\circ\text{W}$ ,  $23^\circ\text{W}$ ,  $10^\circ\text{W}$ , and  $0^\circ\text{E}$ . The OGCM was able to represent both the core and depth of the zonal velocity, as well as the AOGCM, but the latter with cores weaker and deeper than the observations; Both CGM’s represented the current cores sparser than the observed ones, with an ellipsoid appearance on their depth. As the energy dissipation of the oceanic models are made by parameterization, with adjustable coefficients, it is believed that the flattening of the undercurrent may be caused by inaccurate diffusion and vertical mixing, which still have to be calibrated for those grids. Therefore two tests were made changing those coefficients, in short period simulations of 6 years each, and the results were analysed through zonal velocity profiles at the equator on the longitudes previously defined. However, the mean of the last five years did not depart significantly

from the mean of the same period of the simulation with original coefficients, so a longer simulation might be necessary.

## LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1 - Termoclina Equatorial .....	04
Figura 2 - Velocidade zonal (cm/s) em 35°W.....	06
Figura 3 - Velocidade zonal (cm/s) em 23°W.....	06
Figura 4 - Velocidade zonal (cm/s) em 10°W.....	07
Figura 5 - Velocidade zonal (cm/s) em 0°E .....	07
Figura 6 - Perfil de velocidade zonal (cm/s) conforme a profundidade (m) na latitude equatorial.....	08

## SUMÁRIO

	Pag
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 METODOLOGIA.....	02
2.1 MODELOS.....	02
2.2 ANALISES .....	03
2.2.1 Termoclina.....	03
2.2.2 Subcorrente Equatorial do Atlântico.....	03
2.2.3 Testes dos Coeficientes.....	03
3 RESULTADOS.....	03
3.1 Termoclina.....	03
3.2 Subcorrente Equatorial do Atlântico.....	04
3.3 Testes dos Coeficientes.....	08
4 CONCLUSÕES FINAIS.....	08
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	09

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo do clima sofreu um grande avanço com o desenvolvimento dos modelos numéricos de circulação atmosférica. Depois dos modelos atmosféricos, vieram os modelos oceânicos de circulação e hoje temos os modelos climáticos, que consistem no acoplamento dos modelos atmosférico e oceânico, juntamente com outros modelos do sistema terrestre (modelos de gelo marinho, vegetação, hidrológicos, de química da atmosfera, de ondas oceânicas geradas pelo vento, de gelo continental, etc). Pela complexidade destes modelos climáticos e pelo esforço computacional envolvido, são poucos os centros de estudos climáticos no mundo que podem desenvolver projetos deste porte. O Brasil, graças ao esforço de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), entrou para esta comunidade internacional de modeladores do clima em 2012 (Nobre et al., 2012), com o modelo acoplado oceano-atmosfera desenvolvido no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), que agora também é a base do “modelo brasileiro do sistema terrestre” (“BESM”, de “Brazilian Earth System Model”), desenvolvido em parceria com outras instituições.

Os artigos (Nobre et al., 2012, 2013) apresentaram à comunidade a versão acoplada oceano-atmosfera (OA2.3) do modelo BESM. Bottino (2013) alterou o esquema de cobertura de nuvens e coeficientes de propriedades óticas da componente atmosférica, gerando uma versão mais recente e estável, BESM-OA2.3.1.

O modelo oceânico é o MOM4p1 (“Modular Ocean Model” versão 4p1, do “Geophysical Fluid Dynamics Laboratory” – GFDL). A grade horizontal atual não é constante em todas as partes do globo, o espaçamento é de  $1^\circ$  longitude x  $\frac{1}{4}^\circ$  latitude nos trópicos, decrescendo uniformemente para  $1^\circ$  longitude x  $2^\circ$  latitude à medida que se aproxima dos polos. A escolha da resolução horizontal de constantes  $\frac{1}{4}^\circ$  latitude x  $\frac{1}{4}^\circ$  longitude é crítica para a reprodução dos fenômenos turbulentos do oceano, e esta grade deverá ser a grade oficial para a próxima versão do modelo acoplado (BESM-Ibis2.5). Possivelmente ajustes terão que ser feitos nesta nova grade, especialmente nos coeficientes das parametrizações dos fenômenos de escala sub-grade, que costumam ser modificados para cada tipo de grade escolhida.

A escolha da região tropical foi escolhida como foco nas análises é devido a sua grande importância, é nesta região que ocorrem as oscilações de El Niño (ENSO), Ondas de Instabilidade Tropical (OITs), as correntes subequatoriais (Equatorial Undercurrent - EUC), etc. As análises serão compostas pelos estudos da termoclina equatorial e da EUC do Atlântico. A termoclina é uma camada distinta onde a temperatura muda bruscamente conforme a profundidade, separando duas porções de água. Suas mudanças na profundidade estão relacionadas a fatores climáticos. A EUC é uma corrente superficial que flui para leste na latitude equatorial logo acima da termoclina, direção oposta dos ventos alísios logo acima da superfície.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 MODELOS**

O Modelo de Circulação Geral Oceanico (MCGO) é o “Modular Oceanic Model” versão 4P1 (MOM4p1) do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), instalado no Centro Brasileiro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) como a componente oceânica do BESM. Neste experimento o MCGO possuiu uma grade de alta resolução horizontal de constantes  $\frac{1}{4}^\circ$  latitude e  $\frac{1}{4}^\circ$  longitude, e cinquenta níveis verticais, variando de 10 m nos primeiros 220 m até 370 m no oceano profundo. O experimento com o Modelo de Circulação Geral acoplado Oceano-Atmosfera (MCGOA) utilizado usa o mesmo modelo oceânico, porém sua grade horizontal é menos refinada, com  $\frac{1}{4}^\circ$  de latitude e  $1^\circ$  de longitude nos trópicos, chegando gradualmente a  $2^\circ$  de latitude nos pólos, e os mesmos níveis verticais do MCGO. O acoplamento é feito pelo “Flexible Modular System” (FMS), também do GFDL. O estado inicial do oceano é o mesmo em ambos MCGs, as correntes estão em repouso e a estrutura de temperatura e salinidade são climatológicas de Levitus. No caso do MCGO as forçantes atmosféricas são de dados de reanálises do NCEP/NCAR, e a simulação possui 30 anos. No MCGOA a troca de informações com a atmosfera ocorre frequentemente através do FMS, e a simulação possui 300 anos.

## **2.2 ANÁLISES**

### **2.2.1 Termoclina**

Esta análise é realizada através da comparação da profundidade da média anual dos 30 anos de simulação do MCGO com a média climatológica anual Levitus.

### **2.2.2 Subcorrente do Equatorial Atlântico**

Esta análise é realizada em quatro seções transversais da EUC do Atlântico, 35°W, 23°W, 10°W, e 0°E. Comparando nessas seções a média dos dados ADCP do período entre Outubro de 2007 à Maio de 2011 descritas por Johns et al (2014) com a média dos 30 anos de simulação do MCGO, a média dos 30 primeiros anos do MCGOA, e a média dos últimos 30 anos, sendo que o mesmo possui 300 anos de simulação.

### **2.2.3 Teste dos coeficientes**

Os testes mudando os coeficientes de difusão e mistura vertical são simulações de curto período, 6 anos cada. E a análise compara o perfil da velocidade zonal no equador nas mesmas longitudes das análises da EUC da média dos últimos 5 anos, do período de 6 anos, de cada um dos dois testes feitos com a média do MCGO que possui os coeficientes originais neste mesmo período.

## **3 RESULTADOS**

### **3.1 Termoclina**

Conforme a figura 1, a termoclina equatorial do experimento não diferiu muito de Levitus, já que a maior diferença de profundidade é ~30 m no extremo oeste do Atlântico, que rapidamente se aproxima do Levitus em direção leste. No oceano Índico

existem diversas variações de inclinação dentro de uma variação de profundidade muito pequena em todas as longitudes. No Oceano Pacífico, há apenas uma pequena variação de profundidade entre 120°E e 180°W, na qual o modelo representou uma termoclina mais profunda com a diferença sendo inferior a 20 m. E apesar da divergência inicial no extremo oeste, ~30 m, a representação Oceano Atlântico fica muito próximo da média climatológica conforme segue em direção a leste.

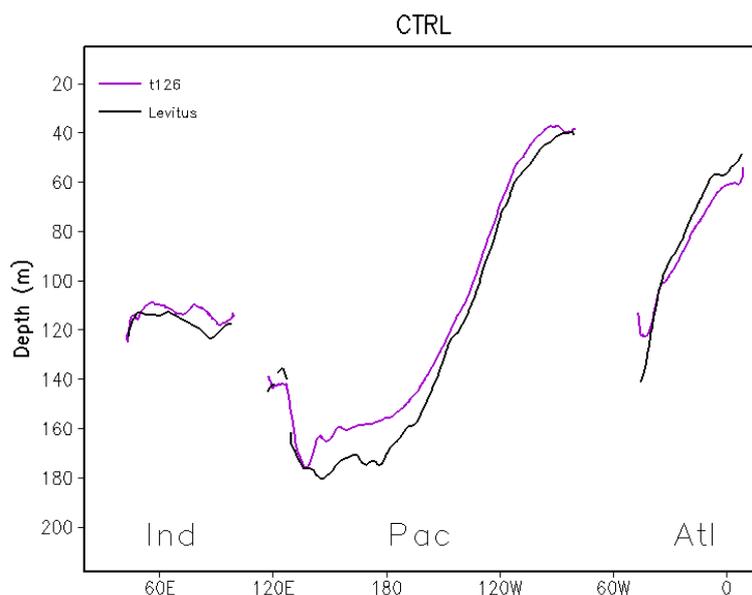


Figura 1 Termoclina Equatorial

### 3.2 Subcorrente do Equatorial Atlântico

As quatro seções longitudinais analisadas são 35°W, 23°W, 10°W, e 0°E. O núcleo da corrente zonal é onde a velocidade é máxima e positiva (para leste). Conforme as figuras 2, 3, 4, e 5, que mostram respectivamente 35°W, 23°W, 10°W, e 0°E, o item (a) é a média da ACDP, o item (b) é a média dos 30 anos de simulação do MCGO, e os itens (c) e (d) são as médias do MCGOA em seus primeiros e últimos 30 anos de simulação em cada uma das figuras. Em 35°W, o núcleo ACDP está em ~100 m de profundidade e no equador, sua velocidade zonal máxima é de 60 cm/s. O MCGO representa bem essas características; enquanto o MCGOA representa um núcleo mais

profundo e menos intenso, ~20 m mais profundo e 10 cm /s menos intenso do que a ACDP. Em 23°W, o núcleo ACDP está em ~75 m de profundidade e à 1/4° no hemisfério sul, sua velocidade zonal máxima é de 60 cm/s. O MCGO representou bem a profundidade do núcleo e velocidade zonal máxima, porém o núcleo ficou localizado exatamente no equador; e o MCGOA representou um núcleo mais profundo nos primeiros 30 anos, e esta diferença acentuou nos últimos 30 anos, localizados respectivamente em ~100 m e ~120 m, localizado no equador, e com velocidade zonal máxima mais fraca em 50 cm/s em ambos os períodos. Em 10°W, o núcleo ACDP está em ~75m de profundidade e no equador, sua velocidade zonal máxima é de 50 cm/s. O MCGO representa bem a profundidade e a posição latitudinal, porem com velocidade zonal máxima mais forte em 60 cm /s; enquanto o MCGOA nos primeiros 30 anos representa um núcleo mais profundo em ~100 m, que nos últimos 30 anos se deslocou à ~75m, a posição latitudinal e a velocidade zonal máxima do núcleo estão bem representadas. Em 0°E, o núcleo ACDP está em ~65m e de 1/4 ° no hemisfério sul, sua velocidade máxima zonal é de 50 cm/s. O MCGO representa bem a profundidade, porém apresenta um núcleo mais fraco de 40 cm/s e o núcleo está localizado no equador; o MCGOA, em ambos os períodos, representa bem a profundidade do núcleo, mas apresenta a velocidade zonal máxima menos intensa em 30 cm /s, localizada no equador. No geral, MCGO foi capaz de reproduzir a velocidade zonal e profundidade melhor do que o MCGOA; porem ambos MCGs não foram capazes de localizar em alguma localização diferente do equador. Uma característica que apareceu em todas as análises foi a representação da corrente em forma espalhada, elipsoide com o eixo menor em sua profundidade, e simétrica em ambos os eixos (latitude e profundidade). O gradiente da velocidade zonal média da corrente é geralmente simétrica no eixo latitudinal, enquanto no eixo da profundidade é geralmente mais forte sobre o núcleo (do núcleo para a superfície do oceano), e mais fraca abaixo do núcleo (do núcleo para o fundo do oceano). Este forte gradiente acima do núcleo é causado pelos ventos alísios que fluem no sentido contrário da EUC.

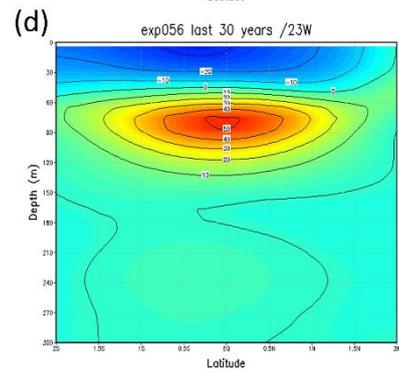
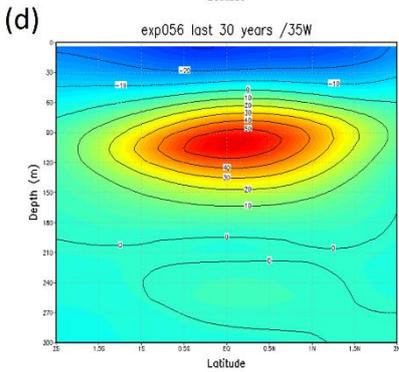
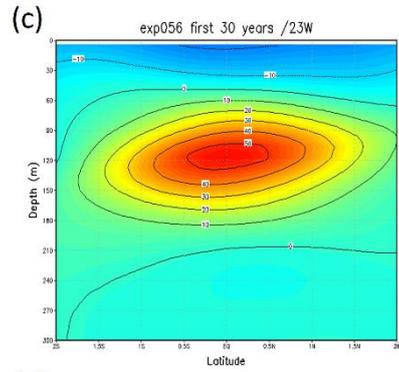
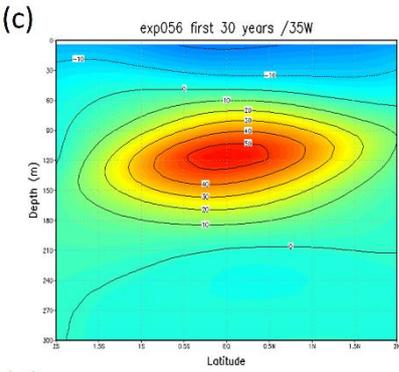
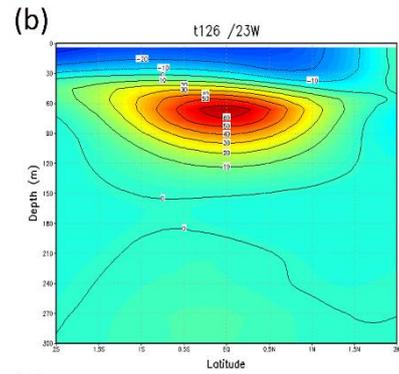
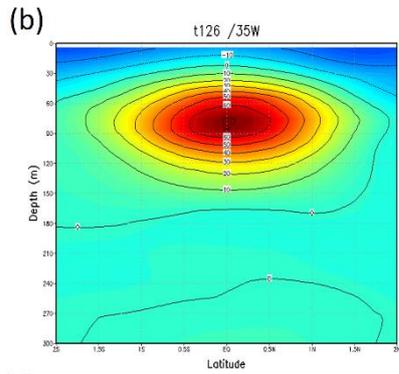
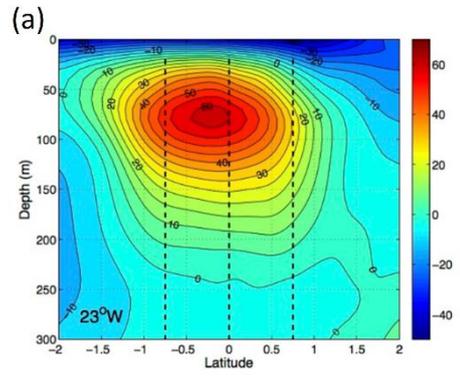
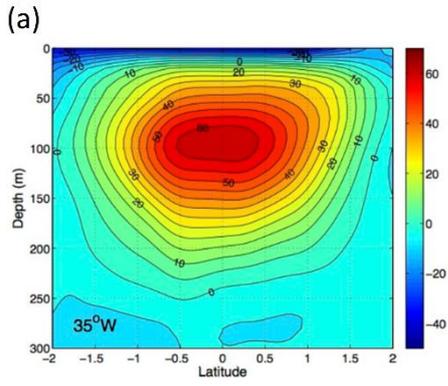


Figura 2 – Velocidade zonal (cm/s) em 35°W

Figura 3 – Velocidade zonal (cm/s) em 23°W

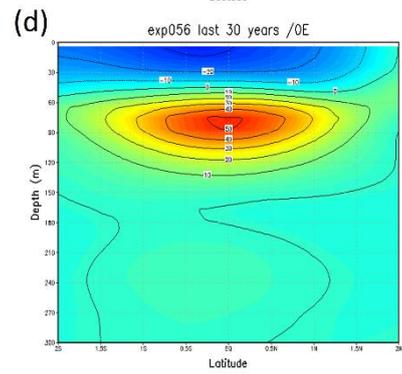
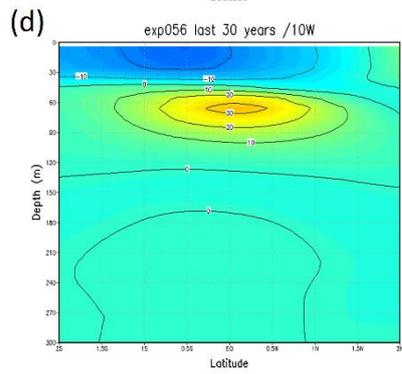
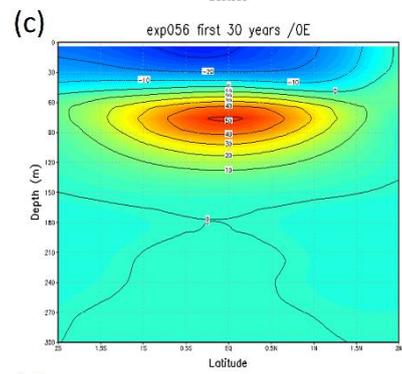
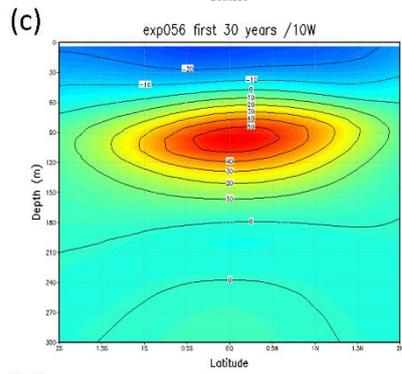
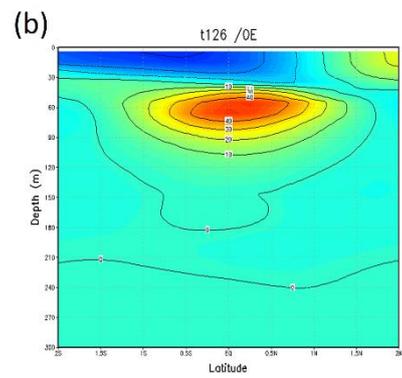
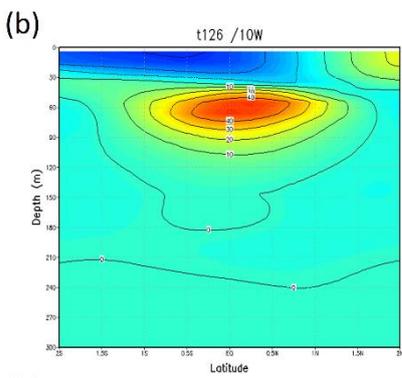
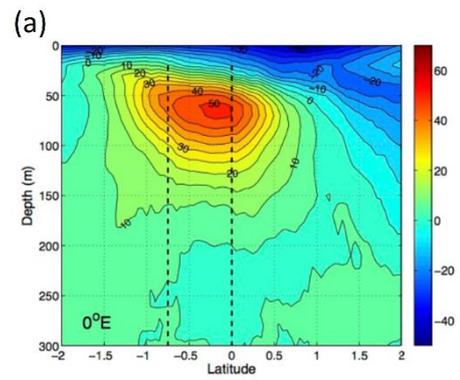
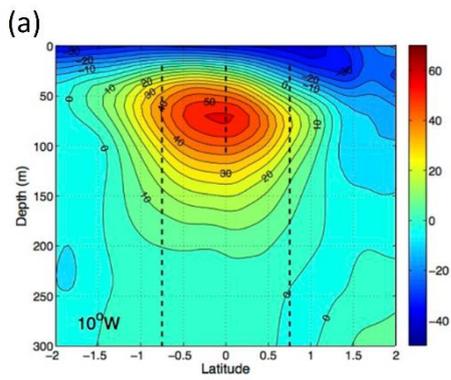


Figura 4 – Velocidade zonal (cm/s) em 10°W

Figura 5 – Velocidade zonal (cm/s) em 0°E

### 3.3 Testes dos Coeficientes

Não houve variações significativas no perfil de velocidade zonal no corte equatorial, conforme mostra a figura 6, o item (a) é o corte em 35°W, (b) em 23°W, (c) em 10°W, e (d) em 0°E, com a maior variação inferior à 5 cm/s em ambos os testes e em 35°W, significando que a corrente continua com o mesmo perfil de velocidade zonal da simulação com o coeficiente original, ou seja, continua com o formato espalhado.

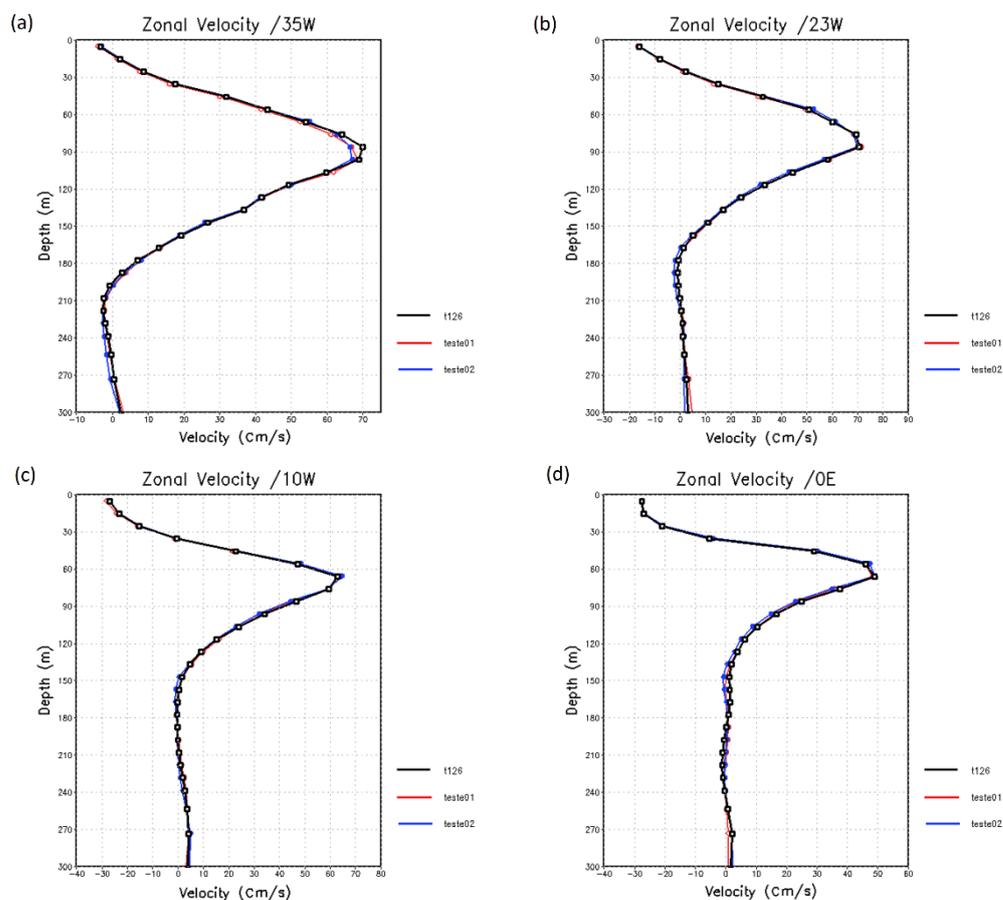


Figura 6 - Perfil de velocidade zonal (cm/s) conforme a profundidade (m) na latitude equatorial

## 4 CONCLUSÕES FINAIS

O MCGO, com sua grade de alta resolução horizontal e forçado com ventos climatológicos, conseguiu reproduzir a inclinação e profundidade da termoclina, quando

comparada sua média com a média climatológica Levitus; sendo sua maior divergência ~30 m de profundidade no extremo oeste do atlântico, que rapidamente é atenuada em direção ao leste. E na análise da EUC conseguiu reproduzir tanto a profundidade como a velocidade zonal máxima do núcleo, e fixando sempre o núcleo no equador, enquanto a média ACDP mostra que em dois dos cortes longitudinais selecionados, 23°W e 0°E, o mesmo se desloca um pouco para o hemisfério sul. Sua contraparte acoplada, o MCGOA, que possui uma grade horizontal menos refinada e trocou dados com a atmosfera, teve um desempenho inferior na representação da EUC, não reproduzindo sempre a velocidade zonal máxima do núcleo e/ou sua profundidade corretamente, geralmente apresentando velocidades zonais inferiores à ACDP, e também fixou o núcleo no equador. No entanto, a característica mais notável em ambos MCGs é a representação da corrente mais esparsa do que o observado, em um formato elipsoide em suas profundidades. Como a dissipação de energia (difusão e mistura) nos modelos oceânicos é feita por parametrizações, com coeficientes de ajuste, acredita-se que o achatamento da EUC possa ser causado por coeficientes de difusão e mistura vertical ainda não calibrados para estes tipos de grade. Os testes mudando estes coeficientes em simulações de curta duração não apresentou divergências significativas no perfil de velocidade zonal quando comparado com a simulação com os coeficientes originais, sendo necessária então uma simulação mais longa.

## **5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Bottino, M. J., 2013: Impacto da parametrização de propriedades de nuvens na simulação do clima na região do Atlântico com o modelo acoplado oceano-atmosfera de INPE/CPTEC. Tese de doutorado em meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 102 pp. <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E2L5B5>
- Giarolla, E., Nobre, P., Malagutti, M. and Pezzi, L.P. (2005). The Atlantic Equatorial Undercurrent: PIRATA observations and simulations with GFDL Modular Ocean Model at CPTEC. *Geophysical Research Letters* 32: doi: 10.1029/2004GL022206. issn: 0094-8276.

Johns, W. E., Brandt, P., Bourlès, B., Tantet, A., Papapostolou, A e A. Houk, 2014:  
Zonal structure and seasonal variability of the Atlantic Equatorial Undercurrent.  
Climate Dynamics, doi:10.1007/s00382-014-2136-2

Nobre, P., et al., Coupled ocean-atmosphere variations over the South Atlantic ocean. J.  
Climate, 2012. 25(18): p. 6349-6358.

Nobre, P. e Coauthors, 2013: Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate  
Model. J. Climate, 26, 6716–6732. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>