

VARIABILIDADE NO NÍVEL DO MAR NO ATLÂNTICO OCIDENTAL SUL CAUSADA POR MECANISMOS INTERNOS E PELA PASSAGEM DE CICLONES ATMOSFÉRICOS

Emanuel Giarolla
Divisão de Ciências Meteorológicas
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
emanuel@met.inpe.br

Edmo J. D. Campos
Depto. de Oceanografia Física
Instituto Oceanográfico da USP
edmo@usp.br

Pedro L. S. Dias, Ricardo de Camargo
Depto. de Ciências Atmosféricas
Instituto Astronômico e Geofísico da USP
pldsdias@model.iag.usp.br, ricamarg@model.iag.usp.br

ABSTRACT

The Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model (MICOM) was used to study the sea surface elevation variability in the Southwestern Atlantic, caused by internal mechanisms (basically eddies influence) and by an atmospheric cyclone passage over the ocean. Considering the variability due to internal mechanisms, in the Brazil-Malvinas Confluence zone, the displacement of the zero elevation line (the approximated confluence position) reached over 2.5 latitude degrees, caused mainly by eddy activity. Considering the effects due to atmospheric cyclones passage, two experiments were carried out, the first one with a 5 degree radius cyclone and the other one considering a cyclone with a half of this radius. The smaller cyclone perturbs a smaller area, but this perturbation last much longer than those produced by the large one. The waves generated in the adjustment process propagate energy to the west, and it can be seen that part of this energy is trapped near the continent when waves reflect on the coast, an additional energy input to the confluence variability.

INTRODUÇÃO

O Atlântico Ocidental Sul é uma das regiões oceânicas mais energéticas de todo o globo. Nesta parte do Atlântico, ocorre o encontro de duas correntes com características contrastantes: a Corrente do Brasil, quente e mais salina, se encontra com uma corrente relativamente mais fria e menos salina, a Corrente das Malvinas, formando a chamada Confluência das Correntes Brasil-Malvinas. Uma grande variabilidade de meso-escala na elevação da superfície do mar é observada nesta área (Provost e Le Traon, 1993) devido a vários fatores, incluindo mecanismos dinâmicos internos (instabilidades) (Garzoli e Simionato, 1990; Bonatti e Rao, 1999), variações induzidas pelo vento em escala local ou global (Matano *et al.*, 1993; Garzoli e Giulivi, 1993; Smith *et al.* 1994) e a flutuações no transporte de massa na Corrente Circumpolar Antártica que alimenta a Corrente das Malvinas (Whitworth, 1983; Smith *et al.*, 1994). Além disso, a região atmosférica sobre o Atlântico Ocidental Sul apresenta atividade ciclogênica intensa, com freqüentes passagens de ciclones sobre o oceano. A figura 1 mostra um exemplo de um destes ciclones, observado em fevereiro de 1999, que em 36 horas passou sobre o Atlântico Ocidental Sul em uma trajetória de noroeste para sudeste.

Este trabalho faz uma investigação da variabilidade na elevação do nível do mar causada por dois fatores: os mecanismos internos e a passagem de ciclones atmosféricos sobre o oceano. Os estudos são baseados em resultados de um modelo numérico de circulação oceânica, forçado apenas por tensões do vento.

MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico utilizado neste trabalho é o modelo numérico de coordenadas isopícnais de Miami (MICOM), um modelo de equações primitivas que trata o oceano como uma “pilha” de camadas, cada uma com um valor constante de densidade potencial (exceto a camada de mistura, que apresenta densidade variável e um

outro tipo de tratamento para estimar as trocas de calor com a atmosfera). Descrições do modelo podem ser encontradas em vários artigos, incluindo Bleck e Smith (1990), Bleck *et al.* (1992) e Bleck e Chassignet (1994).

O modelo foi aplicado a uma bacia oceânica fechada limitada em $20^{\circ} - 55^{\circ}$ S e $65^{\circ} - 20^{\circ}$ W, representando o Atlântico Ocidental Sul, com topografia de fundo realista. A resolução horizontal escolhida foi de $0,25^{\circ}$ em Projeção Mercator (uniforme em longitude e decrescendo com o cosseno da latitude) e como resolução vertical foram escolhidas 11 camadas.

EXPERIMENTOS

Os dois fenômenos estudados neste trabalho ocorrem em escalas temporais diferentes; as variações no nível do mar causadas por instabilidades de meso-escala (com conseqüente formação de vórtices, ondulações e meandros) ocorrem em uma escala da ordem de meses, enquanto que os ciclones atmosféricos passam pelo oceano em poucos dias. Os experimentos foram então divididos em duas categorias. Inicialmente, o modelo partiu do repouso (correntes iguais a zero) e com uma distribuição vertical de camadas baseada na climatologia do Atlântico, e foi integrado até que um aproximado equilíbrio dinâmico fosse atingido (o que ocorreu após cerca de 7 anos de simulação). Na primeira categoria de experimentos, o modelo foi integrado por um ano (após o sétimo ano), e os resultados foram gravados a cada 5 dias durante este período para investigar as variações no nível do mar, em especial na região mais próxima à confluência das correntes. As tensões do vento foram mantidas constantes no tempo, para estudar apenas a variabilidade causada pelos próprios mecanismos da circulação oceânica, descartando variações induzidas pelo vento. Pelo fato da área modelada ser uma bacia fechada em 55° S, excluindo portanto a Corrente Circumpolar Antártica que passa mais a sul pelo Estreito de Drake, neste trabalho foi utilizada uma tensão do vento idealizada matematicamente de forma senoidal, artifício também adotado em outros trabalhos (por exemplo, Campos e Olson, 1991), para que a Corrente das Malvinas, formada como uma ramificação da Corrente Circumpolar Antártica, pudesse ser gerada artificialmente.

Na segunda categoria, o modelo também partiu de um estado de equilíbrio após o sétimo ano de simulação, porém foi integrado apenas por 30 dias, com resultados gravados a cada dia. No primeiro experimento desta categoria, um ciclone atmosférico, gerado por uma função matemática e com características semelhantes às do ciclone que ocorreu em fevereiro de 1999, foi incluída nos dados de tensões do vento, passando pela bacia oceânica inteira em uma trajetória de noroeste para sudeste em cerca de 10 dias (figura 2). Um segundo experimento foi realizado, com um ciclone semelhante ao anterior porém com metade do diâmetro, para o estudo dos efeitos de uma perturbação atmosférica com escala espacial menor. Adicionalmente, foi feito um terceiro experimento, sem ciclone, e as análises dos resultados foram então baseadas na diferença (“anomalias”) entre os experimentos com ciclone e sem ciclone.

RESULTADOS

Primeira categoria de experimentos: Para visualizar o comportamento da elevação de superfície na região da confluência, um diagrama do tipo espaço-tempo foi construído, com séries temporais de elevações extraídas em 9 pontos ao longo da região das correntes do Brasil e das Malvinas (figura 3). Observa-se que, em geral, os valores de elevação são positivos em latitudes ao norte de $38^{\circ} - 40^{\circ}$ S e negativos ao sul desta faixa. Nos pontos que foram escolhidos existe uma presença praticamente constante de vórtices durante todo o ano, e a presença de alguns vórtices mais intensos pode ser notada por máximos de elevação (valores acima de 30 cm) que ocorrem na faixa entre $30^{\circ} - 37,5^{\circ}$ S. Considerando-se a confluência das correntes aproximadamente como a linha de elevação nula, observam-se variações no posicionamento acima de $2,5^{\circ}$ de latitude em uma escala temporal de 2 meses. Legeckis e Gordon (1982), com base em imagens de satélite, observaram variações de até 8° de latitude no limite sul da Corrente do Brasil. Este trabalho mostra então que os mecanismos internos da própria circulação oceânica, reponsáveis pela formação de meandros e vórtices, podem contribuir com pelo menos 30% na variabilidade do posicionamento da confluência das correntes.

Segunda categoria de experimentos: A figura 4 mostra as diferenças (anomalias) entre as elevações da superfície do mar do experimento com ciclone maior e sem ciclone. Apenas a subregião próxima à confluência está sendo mostrada. Na figura 4, nota-se que quando o ciclone atmosférico atinge o oceano (por volta do dia 4), regiões com anomalias positivas e negativas aparecem. Três dias depois (dia 7), o ciclone já saiu da subregião mostrada nos mapas, deixando uma espécie de “rastros” formado por anomalias positivas ao norte e negativas ao sul da posição por onde o ciclone passou. Um outro detalhe pode ainda ser observado: quando o ciclone passa pela região costeira (dia 4), observam-se valores elevados de anomalias positivas e negativas, que três dias depois já não são mais notados (dia 7). Na região mais rasa, como o raio de deformação de Rossby barotrópico $RB (= (gH)^{1/2}/f)$ é pequeno (da ordem de 700 Km para profundidades de 500 m), a perturbação gerada pelo vórtice atmosférico é grande (cerca

de 2 vezes maior). Neste caso, a teoria do ajuste geostrófico mostra que a maior parte da energia deve ir para ondas de gravidade inercial, dispersando rapidamente as perturbações na elevação da superfície.

Existe uma persistência das perturbações no nível do mar mesmo alguns dias depois da passagem do ciclone, como pode ser visto nos dias de simulação 13 e 28 na figura 4. Orlanski e Polinsky (1983) apresentam um estudo analítico sobre os efeitos da passagem de tempestades sobre o mar. A teoria mostra uma forte dependência da altura do nível do mar com o raio de deformação de Rossby barotrópico RB e a escala horizontal do fenômeno atmosférico L . Para $L/RB > 1$, a perturbação na superfície livre e a tempestade apresentam escalas similares. Para razões menores do que 1, o efeito na elevação da superfície, embora com amplitude menor, decai muito mais vagorosamente do que a forçante. No caso deste trabalho, o raio de deformação de Rossby barotrópico para esta região é de aproximadamente 2000 Km (admitindo-se valores médios $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e $H = 4000 \text{ m}$ nesta área), e o diâmetro do ciclone cerca de 1110 Km; como a escala do fenômeno atmosférico é ligeiramente menor do que o raio de deformação, é de se esperar que as perturbações persistam por algum tempo, mesmo depois da passagem do ciclone. Embora o estudo analítico de Orlanski e Polinsky (1983) não apresente uma complexidade como a deste trabalho, houve concordância dos resultados obtidos com a teoria.

Com o passar do tempo, observa-se também um crescente “acúmulo” de isolinhas de anomalias de elevação próximo ao continente. Isto porque quando o oceano é perturbado pelo ciclone, ondas são geradas no processo de ajuste, e algumas destas ondas propagam energia para oeste; quando são refletidas na costa, parte da energia fica aprisionada, resultando na concentração de anomalias de elevação próximo ao continente. Este efeito faz com que se note uma coisa interessante: as perturbações no nível do mar, que foram geradas por um fenômeno atmosférico que dura poucos dias, pelo fato permanecerem por muito tempo no oceano acabam tendo influência na variabilidade de meso-escala da confluência (com escala de tempo da ordem de meses).

A figura 5 mostra as diferenças entre as elevações do experimento com ciclone menor e sem ciclone. Comparando-se com a figura anterior, o ciclone menor gera perturbações na altura do mar em uma região significativamente menor, porém seu tempo de decaimento é maior do que as perturbações geradas pelo ciclone com maiores dimensões. Esta característica pode ser observada nos valores das anomalias em regiões afastadas da costa. No caso anterior (figura 4), as anomalias chegavam a apresentar amplitude de 5 cm no dia 7 decaindo para cerca de 3 cm no dia 28. Neste caso, a amplitude tem valores pouco acima de 1 cm no dia 7, porém no dia 28 continuam apresentando valores de 1 cm na regiões interiores do oceano. Isto está de acordo com a teoria desenvolvida por Orlanski e Polinsky (1983), já que neste caso o diâmetro do ciclone atmosférico é cerca de 550 Km, e a razão L/RB torna-se menor do que no caso anterior, esperando-se portanto perturbações com amplitudes menores porém com tempo de decaimento maior. Também neste caso, o aprisionamento de energia causado por reflexões de ondas no continente faz com que haja uma grande concentração de anomalias de elevação da superfície próximo à costa, que pode ser notado no decorrer da simulação.

RESUMO E CONCLUSÕES

Observa-se no Atlântico Ocidental Sul uma grande variabilidade na altura do nível do mar, em especial na região da confluência das correntes oceânicas do Brasil e das Malvinas. Esta variabilidade pode ser causada por diversos fatores, incluindo variações no vento em escala local ou global, mecanismos internos e variações no transporte da Corrente Circumpolar Antártica, que alimenta a Corrente das Malvinas. Diversos trabalhos investigam a contribuição dos ventos e do transporte da Corrente Circumpolar Antártica na variabilidade do nível do mar, porém pouco se fala sobre a contribuição devida somente aos mecanismos internos. Resultados de simulações numéricas em pontos ao longo das correntes do Brasil e das Malvinas mostraram que a confluência das correntes, definida como a linha de elevação nula, apresentou deslocamentos algumas vezes acima de $2,5^\circ$ de latitude em uma escala temporal de 2 meses. Legeckis e Gordon (1982) estimaram variações no posicionamento extremo da Corrente do Brasil de 8° de latitude em uma escala de 2 meses, o que significa que os mecanismos internos (instabilidades e formação de meandros e vórtices) poderiam estar contribuindo com pelo menos 30% na variabilidade.

Um outro ponto pouco explorado diz respeito às perturbações geradas no processo de ajuste do oceano à passagem de ciclones atmosféricos, como o que passou pelo oceano em fevereiro de 1999 (figura 1). Simulações mostraram que os efeitos destes ciclones no nível do mar persistem por vários dias e, pela propagação e reflexão das ondas geradas no processo de ajuste, tendem a se acumular nas regiões mais próximas ao continente (especialmente na região da confluência), um efeito importante que também deve contribuir na variabilidade de meso-escala presente no encontro das correntes. No caso dos ciclones menores, suas perturbações ocorrem em áreas menores, porém o tempo de persistência destas perturbações é maior.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da FAPESP, que contribuiu com o financiamento aos projetos CAOS (94/3592-3) e SAMC (96/4060-0), e também com o apoio do Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) ao projeto SAMC.

REFERÊNCIAS

- Bleck, R. e L. Smith, A wind-driven isopycnic coordinate model of the North and Equatorial Atlantic Ocean. 1. Model development and supporting experiments, *J. Geophys. Res.* **95**, 3273-3285, 1990.
- Bleck, R., Rooth, C., Hu, D. e L. Smith, Salinity-driven thermocline transients in a wind- and thermohaline-forced isopycnic coordinate model of the North Atlantic, *J. Phys. Oceanogr.* **22**, 1486-1505, 1992.
- Bleck, R. e E. P. Chassignet, Simulating the ocean circulation with isopycnic-coordinate models, In: The Oceans: physical-chemical dynamics and human impact. Majumdar, S. K., Miller, E. W., Forbes, G. S., Schmalz, R. F e A. A. Panah (editores), The Pennsylvania Academy of Science, 17-39, 1994.
- Bonatti, J. P e V. B. Rao, Mesoscale perturbations and thermohaline fronts in the South Atlantic Ocean, *Dyn. Atmos. Oceans* **30**, 1-24, 1999.
- Campos, E. J. D. e D. B. Olson, Stationary Rossby Waves in Western Boundary Current Extensions, *J. Phys. Oceanogr.* **21**, 1202-1224, 1991.
- Garzoli, S. e C. Simionato, Baroclinic instabilities and forced oscillations in the Brazil-Malvinas confluence front, *Deep Sea Res.* **37**, 1053-1074, 1990.
- Garzoli, S. e C. Giulivi, What forces the variability of the Southwestern Atlantic boundary currents?, *Deep Sea Res.* **41**, 1527-1550, 1994.
- Legeckis, R. e A. L. Gordon, Satellite observations of the Brazil and Falklands currents - 1975 to 1976 and 1978, *Deep Sea Res.* **29**, 375-401, 1982.
- Matano, R. P., Schlax, M. G. e D. B. Chelton, Seasonal variability in the Southwestern Atlantic, *J. Geophys. Res.* **98**, 18027-18035, 1993.
- Orlanski, I. e L. J. Polinsky, Ocean response to mesoscale atmospheric forcing, *Tellus* **35A**, 296-323, 1983.
- Provost, C. e P. Y. Le Traon, Spatial and temporal scales in altimetric variability in the Brazil-Malvinas current confluence region: dominance of the semiannual period and large spatial scales, *J. Geophys. Res.* **98**, 18037-18051, 1993.
- Smith, L. T., Chassignet, E. P. e D. B. Olson, Wind-forced variations in the Brazil-Malvinas confluence region as simulated in a coarse resolution numerical model of the South Atlantic, *J. Geophys. Res.* **99**, 5095-5117, 1994.
- Whitworth, T., III, Monitoring the transport of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage, *J. Phys. Oceanogr.* **13**, 2045-2057, 1983.

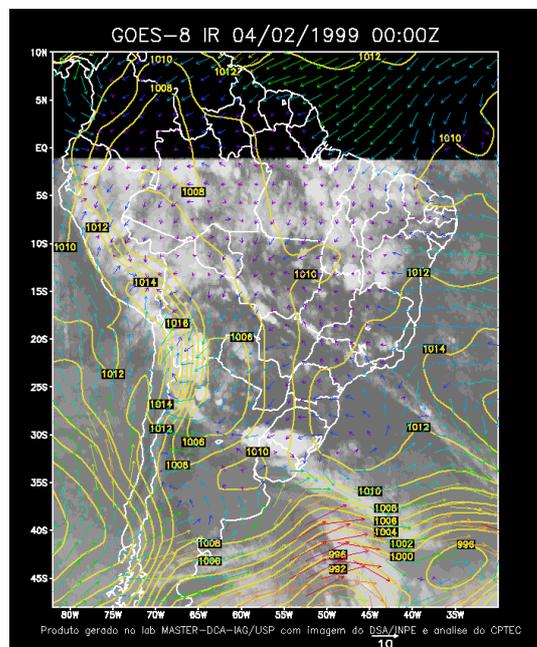
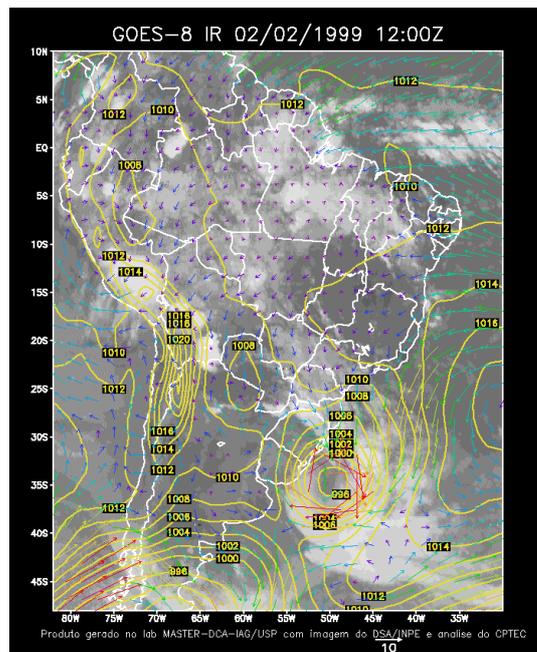


Figura 1: Mapas gerados pelo laboratório MASTER (IAG/USP), compostos por análises de pressão atmosférica (hPa) e ventos (m/s) (CPTEC/INPE) sobrepostos sobre imagens de satélite (DSA/INPE). A seqüência mostra os dias 2/2/99 (12:00Z) e 4/2/99 (0:00Z).

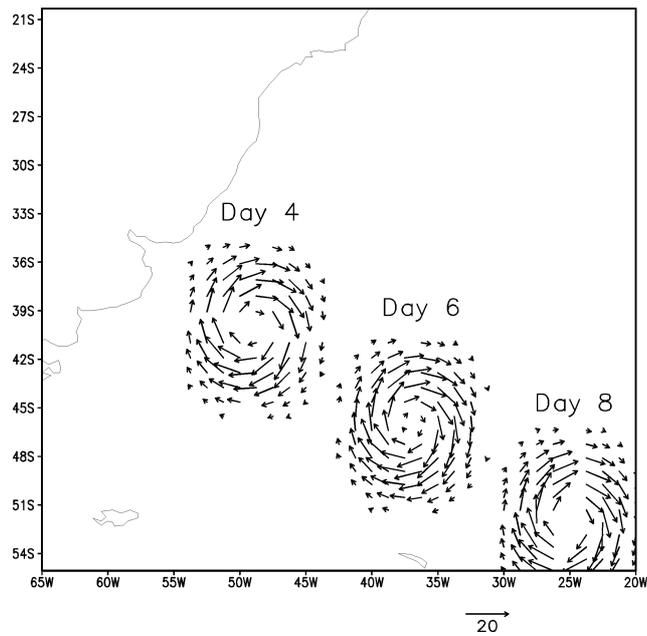


Figura 2: Representação gráfica do vórtice atmosférico utilizado no experimento com passagem de ciclone sobre o oceano, com características semelhantes ao que passou em fevereiro de 1999 (figura anterior), e seu posicionamento nos dias 4, 6 e 8 do experimento.

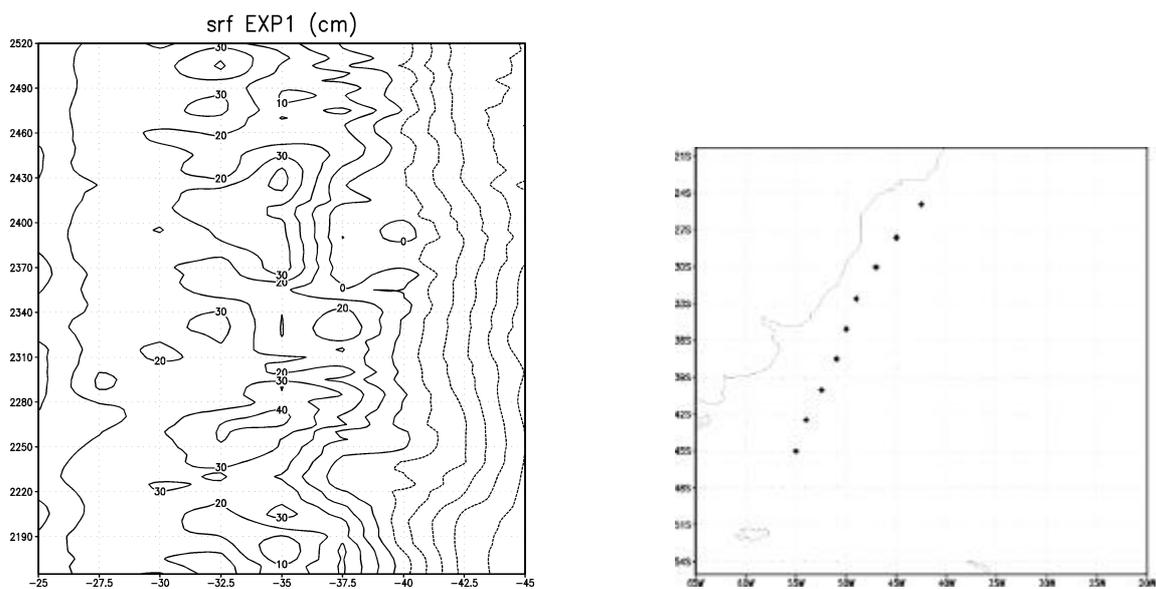


Figura 3: Diagrama espaço-tempo (esquerda) de elevações de superfície (cm), em função da latitude (eixo horizontal) e do dia de simulação (eixo vertical), construído com séries temporais em 9 pontos ao longo das correntes do Brasil e Malvinas (direita).

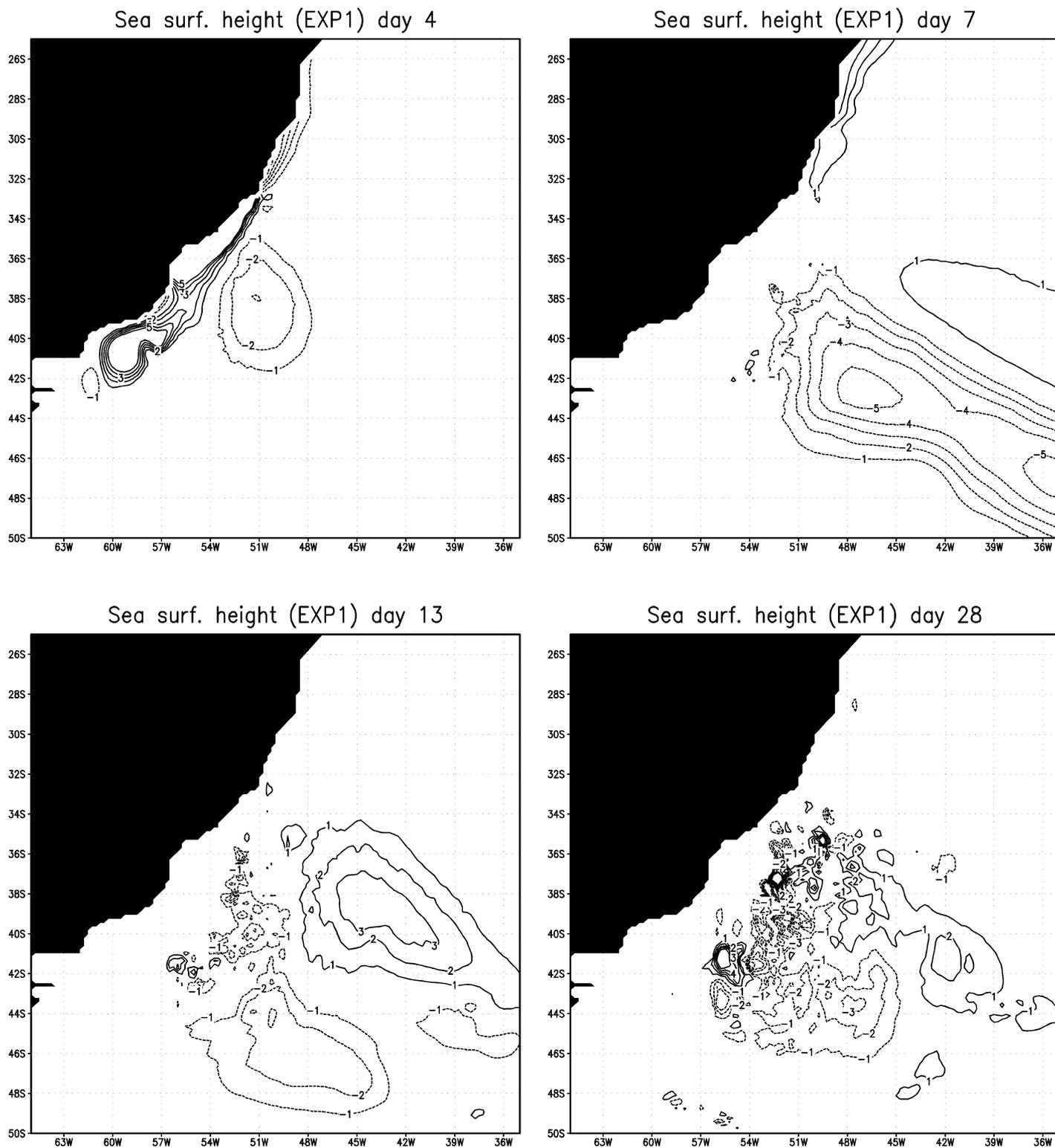


Figura 4: Mapas da diferença (anomalias) entre os valores das elevações da superfície livre do experimento com ciclone de diâmetro maior e sem ciclone, nos dias de simulação 4, 7, 13 e 28. Valores em cm.

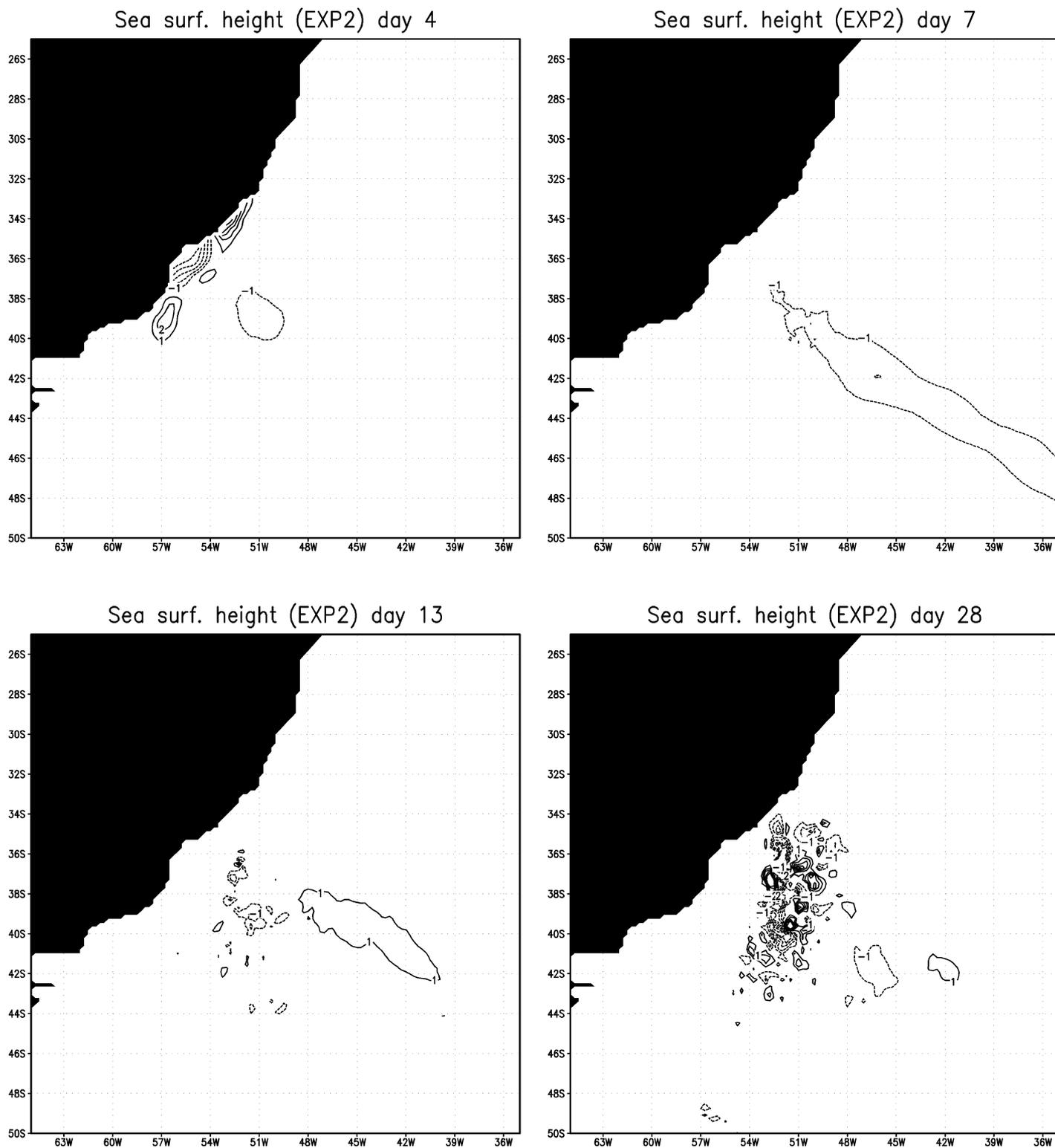


Figura 5: Mapas da diferença (anomalias) entre os valores das elevações da superfície livre do experimento com ciclone de diâmetro menor e sem ciclone, nos dias de simulação 4, 7, 13 e 28. Valores em cm.