

CIRCULAÇÃO OCEÂNICA: MONITORAMENTO ATRAVÉS DE ALTIMETRIA MULTI SATÉLITE

Marcio L. Vianna^{1,2} e Viviane V. de Menezes²

1. CEP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas 1758, 12 227-010 S. José dos Campos, SP., marcio@vmoceanica.com.br
2. VM Oceânica Ltda. R. Manoel Bandeira 210, 12 240-710, S. José dos Campos, SP, e Av. Litorânea 430/51, Arraial do Cabo, RJ, vvm@vmoceanica.com.br

1. Introdução

O grande problema da observação dos oceanos deve-se ao fato de que oceano é um fluido dominado pela produção de grandes estruturas hidrodinâmicas coerentes e estatisticamente previsíveis, como giros, vórtices e “correntes”, em meio a campos turbulentos de circulação (na melhor das hipóteses com estatísticas previsíveis). A dinâmica do oceano inclui escalas de variabilidade que vão de metros a milhares de km, e de minutos a muitos anos. Isto significa que quando se fala em monitorar o oceano, é necessário determinar quais são as escalas que caracterizam os movimentos que desejamos observar, já que cada escala exige a utilização de tecnologias específicas.

Uma das conquistas mais importantes da oceanografia moderna é a que envolve a altimetria multi-satélite, estabelecida por um forte esquema de cooperação e parceria internacional estável e de longo prazo. Esta tecnologia apresenta a vantagem de permitir um monitoramento global da evolução das estruturas de circulação da camada superior dos oceanos em meso e grande escala (100-10 000 km; dias-anos), sem a interferência negativa da cobertura de nuvens como é o caso dos radiômetros que operam nas faixas do visível e do infravermelho.

O objetivo deste capítulo é descrever de maneira introdutória e resumida o estágio atual da utilização da altimetria multi-satélite para o monitoramento da circulação oceânica por parte de organizações estatais (Marinhas, organizações espaciais, centros de previsão) e iniciativas privadas. Mas para tanto, é necessário voltar um pouco no tempo para oferecer uma perspectiva do que foi conquistado nos últimos 15 anos no desenvolvimento desta tecnologia.

No início da década de 90 dois satélites com radares-altímetros foram lançados: em 1991 o 1º Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto (ERS-1), e quase um ano depois o satélite franco-americano dedicado exclusivamente a altimetria o TOPEX/POSEIDON (TP). O TP foi assim chamado por portar dois altímetros: o TOPEX, americano e operacional, e o POSEIDON, francês, para teste de inovação tecnológica. O TP teve um desempenho muito superior ao esperado, ainda em funcionamento, apresenta um ciclo de repetição de 9.9155 dias, com 127 revoluções e, portanto, 254 trajetórias. Ao contrário do TP, o ERS-1 não foi uma missão exclusivamente dedicada a altimetria, e possuiu 7 diferentes fases de A a G, cada uma com uma finalidade, e com um ciclo de repetição diferente em cada uma. As fases dedicadas aos oceanos foram a: C (14/04/92 a 20/12/93) e a G(21/03/95 a 02/06/96),

que possuíam 501 revoluções, para um ciclo de repetição de 35 dias. Em 1995, foi o lançado o sucessor do ERS-1, o ERS-2 que, embora não somente dedicado a altimetria, possui um altímetro mais preciso que seu antecessor e teve um único ciclo de repetição de 35 dias.

Os dados do TP e do ERS-2 revolucionaram a área de estudos climáticos do oceano, pois permitiram pela primeira vez o monitoramento global de feições oceanográficas de grande escala. Entretanto, o esquema de amostragem deixava lacunas de dados tanto em tempo como em espaço. Um dos grandes problemas que esta tecnologia precisava vencer, sob o ponto de vista do oceanógrafo interessado em monitorar a circulação oceânica em escala de recirculações e vórtices, consistia no fato de que cada um destes satélites amostrava efeitos do Geóide em áreas diferentes sob suas trajetórias, quando saltos geoidais (gravitacionais) importantes, como os causadas pela Cordilheira Meso-Atlântica, sempre aparecem atravessando estes buracos nos dados. Isto se constituía em uma séria geração de erros para a realização de estimativas interpoladas de dados altimétricos gerados por diferentes satélites. No caso dos gradientes utilizados para o cálculo de correntes marinhas, isto gerava erros nas direções normais às trajetórias, prejudicando o mapeamento em grade regular. Outro problema grave era a falta de cobertura da Altura da Superfície nestes mesmos buracos, o que também impedia um mapeamento da Altura com maior resolução. Estes e outros obstáculos tinham que ser vencidos o mais cedo possível, já que o advento de novas tecnologias, como a representada por um “Altímetro Orbital de Larga Varredura Lateral”, a exemplo dos Sonares de Varredura Lateral de Longo Alcance (Long Range Side Scan Sonar) dos geólogos marinhos, ainda estava apenas na imaginação dos projetistas de sensores orbitais.

A solução encontrada foi a de tentar mergir os dados dos satélites TP e ERS-2 e mapeá-los em grades espaço-temporais regulares. Mas antes algumas questões ligadas a intercalibração dos dados deveriam ser estudadas, analisadas, e vencidas. Para facilitar uma introdução mais detalhada e rápida a este assunto por parte de leitores mais especializados, fazemos referências aos trabalhos de Jacobs & Mitchel (1997), LeTraon et al. (1998), LeTraon & Dibarbure (1999), Koblinski et al. (1999), Ducet et al. (2000), LeTraon et al. (2001), Jacobs et al. (2001), e LeTraon et al. (2003).

Com a demonstração de que era possível mergir dados obtidos por diferentes satélites (o que passou a ser conhecido como a altimetria multi-satélite), foi iniciado um esforço conjunto para colocar em órbita uma constelação de satélites altimétricos. Em 1998, a Marinha Americana (US Navy) lançou o seu novo satélite Geosat (Geosat Follow-On-ou GFO), que tem um período de 17 dias, e 244 revoluções. Em 2002, foi lançado o sucessor do TP em uma mesma órbita, o JASON-1, enquanto o TP foi deslocado para uma órbita adjacente. E em 2003, a Agência Espacial Européia (ESA) lançou o sucessor do ERS-2, o ENVISAT, na mesma órbita. Hoje, portanto, temos dados intercalibrados de 4 satélites altimétricos: o TP, o JASON-1, o ENVISAT e o GFO (o gravador de bordo do ERS-2—para os dados Low Bit Rate—enguiçou, e isto impede sua cobertura altimétrica global desde 2003).

Por outro lado, os autores deste Capítulo iniciaram seus estudos e aplicações da altimetria multi-satélite orientada para a circulação oceânica em torno de 1999, mas adotando a

abordagem regional no Atlântico Tropical e Atlântico Sudoeste, tendo o cuidado de validar os resultados “altimétricos” com medidas “in situ” (ver Vianna e Menezes, 2001; Vianna e Menezes, 2003). Estes trabalhos serviram de base para o desenvolvimento de uma metodologia inovadora na VM Oceânica Ltda, que foi posteriormente implementada em um software construído “in house”, que possibilita o monitoramento altimétrico da circulação de meso-escala para atender a demandas das indústrias offshore, como a do Petróleo, da Pesca, e das Marinhas. Este Capítulo, como dissemos acima, oferece então um apanhado resumido do que se faz hoje, e especialmente como a VM Oceânica Ltda realiza seus trabalhos de oceanografia operacional baseados em técnicas multi-satélite, orientados para atender a usuários específicos.

2. É viável estimar a circulação oceânica a partir da altimetria?

Antes de entrar em detalhes específicos sobre o uso da altimetria multi-satélite, é útil relembrar alguns pontos sobre a física básica envolvida. Um pequeno volume de água na superfície do mar ficaria imóvel se apenas sujeita ao equilíbrio hidrostático sobre o Geóide. Mas outras influências causadas localmente ou não localmente alteram, i.e. “enrugam”, a Superfície do Mar, separando-a do Geóide (G) Parte deste “enrugamento” (ondulação) é devido às ondas de gravidade e ondas de marés, que ocorrem nas escalas de segundos a horas. Em escalas de dias a anos, entretanto, prevalecem as estruturas hidrodinâmicas coerentes (correntes, vórtices e giros). A altimetria por satélite é justamente adequada para monitorar estas estruturas coerentes em escala global, como descrito no capítulo de Paulo Polito (neste livro).

O dado altimétrico de interesse para o monitoramento da circulação oceânica é Altura da Superfície do Mar (AS). A AS, sob a trajetória do satélite, é estimada em relação a um Elipsóide de Referência, através de operações de filtragem do sinal altimétrico primário. Estas operações incluem a retirada da componente de alturas de ondas, inclusive as de alturas de maré (oceânica e terrestre), e correções geofísicas do sinal altimétrico (capítulo de Paulo Polito, neste livro). No entanto, as ondulações da superfície do mar causadas pela circulação oceânica se manifestam como perturbações sobre o Geóide, i.e., estamos interessados na diferença $[AS(t) - G]$, sendo esta da ordem de centímetros! (**Figura 1**). Esta quantidade é chamada pelos Oceanógrafos de Topografia Dinâmica da Superfície do Mar: $TD(t)=AS(t)-G$. Assim, a circulação oceânica pode ser estimada, em princípio, a partir da altimetria, já que as correntes dependem principalmente das inclinações e curvaturas locais da $TD(t)$.

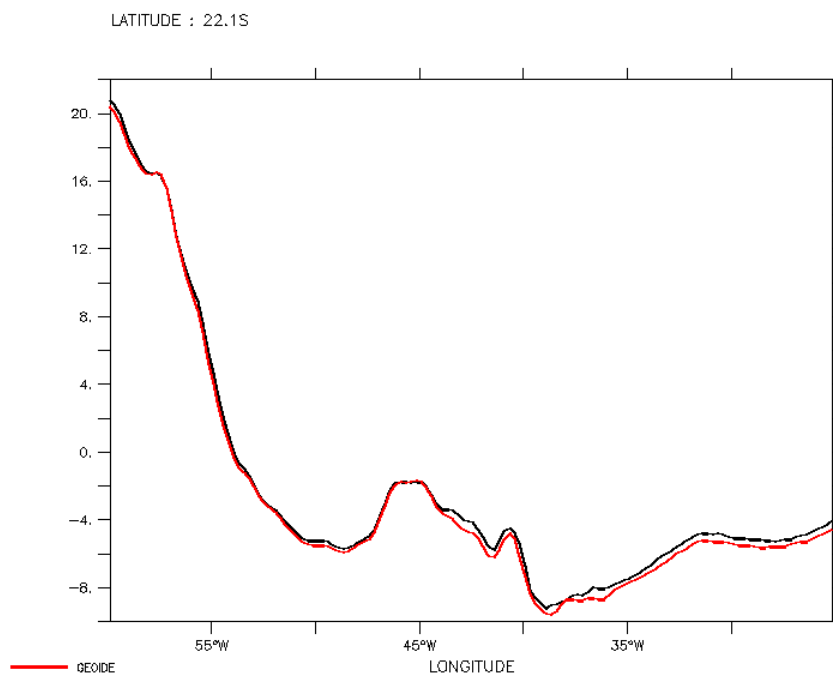


Figura 1. Exemplo de relação entre Geóide (vermelho) e Superfície Média do Mar (preto), em corte na latitude de 22° S no Atlântico Sudoeste. A ordenada é em metros. A TD é a diferença entre as 2 curvas.

O problema é que o Geóide não é ainda conhecido na escala de 100Km com a precisão necessária para calcular a TD(t), sendo hoje a sua modelagem uma fronteira importante de pesquisa. Mas, felizmente, o Geóide é (supostamente) quase estacionário na escala geológica (mais de 100 anos sobre os oceanos), exceto por uma pequena variação sazonal causada pelas transferências hidrológicas entre as massas de água terrestres e oceânicas (Chambers et al., 2004).

Como ainda não se conhecia G com a precisão necessária, a variável altimétrica que se tem utilizado é a Anomalia de Altura da Superfície (AAS), que coincide com a Anomalia de Topografia Dinâmica (ATD). De fato,

$$ATD(t) = TD(t) - \langle TD \rangle = AS(t) - G - \langle [AS(t) - G] \rangle = AS(t) - \langle AS(t) \rangle = AAS(t),$$

onde $\langle \rangle$ representa uma média temporal.

É bom notar que a ATD descreve as *variabilidades* das estruturas hidrodinâmicas coerentes, mas não as estruturas em si.

De posse dos dados de AAS/ATD, e se pudermos estimar uma $\langle TD \rangle$, podemos reconstituir os campos de TD(t), que é o que realmente interessa. Resolver o problema da $\langle TD \rangle$ e do Geóide é hoje uma área de pesquisa muito vigorosa, e várias soluções têm sido apresentadas:

- (i) Utilizar uma $\langle TD \rangle$ climatológica obtida de registros de dezenas de anos de perfis verticais de salinidade, temperatura e profundidade (os famosos CTDs dos oceanógrafos), ou em primeira aproximação pelos dados de temperatura (obtidos por “batitermógrafos descartáveis, os XBT) e de estimativas indiretas de salinidade (por curvas TxS). Uma base de dados interessante para este fim é a de Boyer e Levitus (1997), de alta resolução (0.25 de grau) e de abrangência global. O problema com esta técnica reside na necessidade de se referenciar a $\langle TD \rangle$ a uma superfície de pressão (ou profundidade) constante.
- (ii) Utilizar resultados de saídas de modelos numéricos de circulação ajustados a alguma base de dados para estimar a $\langle TD \rangle$ (Assimilação de Dados em Modelos Numéricos de Circulação, globais ou não).
- (iii) Utilizar todos os dados de orbitografia disponíveis, para estimar um bom modelo de geóide (ex. os JGMs da NASA), e uma boa AS baseada em todos os dados altimétricos disponíveis (hoje a NASA dispõe de uma em grade baseada em 9 anos de dados altimétricos multi-satélite, a GSFCMSS00).
- (iv) Calcular novos modelos de geóide e $\langle TD \rangle$, mais precisos, a partir os dados dos satélites gravimétricos recentemente lançados CHAMP(2000) e GRACE(2002) e dos dados altimétricos. Este é um campo ainda em desenvolvimento.
- (v) Modelos híbridos mergindo várias destas soluções em uma, em geral de abrangência regional.

A viabilidade das empreitadas ligadas aos itens (iv) e (v) foi recentemente estudada por alguns autores (Birol et al., 2005; Rio e Hernandez, 2004; Tapley et al., 2003). Um dos grandes problemas pode ser resumido no seguinte: como se poderia otimizar a análise e a retirada dos erros de mapeamento da $\langle TD \rangle$ de forma a se obter este campo médio com uma acurácia de alguns cm em escalas de 100 km? Um bom avanço foi recentemente proposto por Vianna *et al.* (2005), através do uso de dados do sistema GRACE, com retirada dos ruídos através de técnicas de Análise Espectral Singular (Vautard et al., 1992). A $\langle TD \rangle$ obtida neste trabalho (**Figura 2**) tem impacto direto na estimativa operacional dos campos de circulação do Atlântico Sudoeste, de grande importância para as atividades do Brasil no oceano, oferecendo uma luz sobre o problema de se determinar qual é a estrutura mais correta para descrever a circulação média das camadas superiores em escala de recirculações (sub-giros). Existem duas visões atualmente na literatura: a mais conhecida é a do esquema de Stramma e colaboradores (ver Stramma e England, 1999), onde o Giro do Atlântico Sul apresenta-se com apenas uma célula de recirculação em torno de 35 S e adjacente à costa; a outra, introduzida por Tsuchiya (1985) apresenta-se com duas células de recirculação, uma de Água Tropical (centrada em 22 S) e outra de Água Subtropical (a de Stramma).

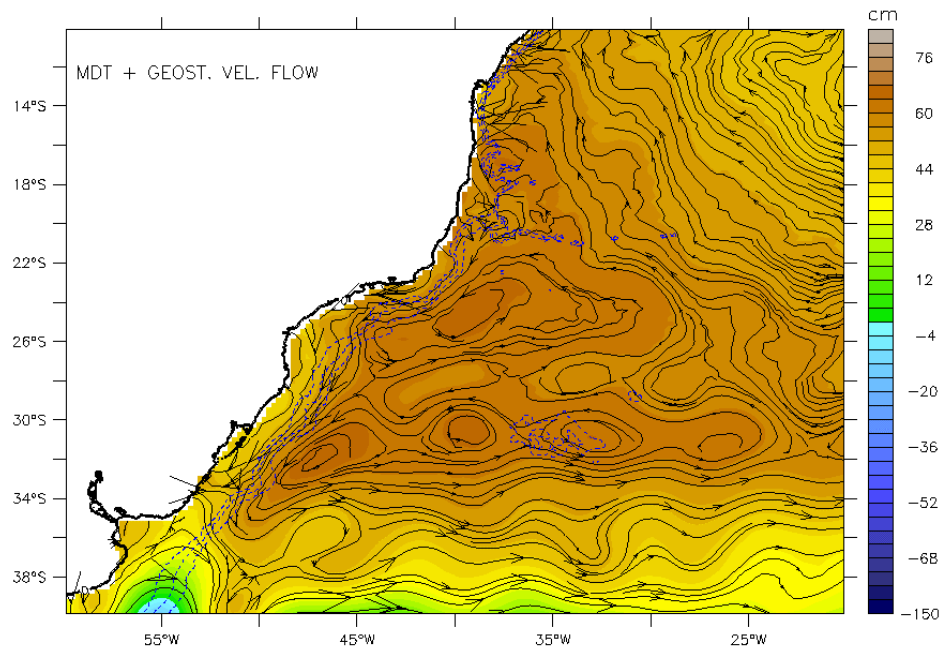


Figura 2. A <TD> obtida pela VM através de pós-processamento dos dados de alta resolução da <TD> produzida pelo CSR/Texas University, a partir do Geóide GRACE (versão 02) e da <AS> produzida pelo GSFC/NASA com 9 anos de dados multi-satélite. As alturas, e as trajetórias das correntes geostróficas médias para o Atlântico Sudoeste exibem uma estrutura de duplo giro de recirculação de água no Giro Subtropical.

Além do desafio <TD>/Geóide, existem outras limitações para estimarmos a circulação oceânica a partir da TD(t). O método mais utilizado para estimar as correntes a partir do campo de TD usa a aproximação geostrófica. Apesar deste método ser satisfatório e amplamente utilizado, há alguns problemas ligados a esta metodologia. Um dos problemas é que a fórmula usual das velocidades geostróficas apresenta uma singularidade sobre o Equador. E ainda, nem sempre as estimativas obtidas são satisfatórias sobre plataformas continentais rasas.

Entretanto, a equação geostrófica pode ser generalizada para incluir o Equador se, além das inclinações (derivadas primeiras) incluirmos as curvaturas (derivadas segundas) da TD(t) (Vianna & Menezes, 2003) (**Figura 3**). Há ainda os erros no sinal de AAS sobre a plataforma continental causado por uma retirada inadequada dos sinais de maré, mas que não parece ser tão importante no cálculo dos seus gradientes, ou seja, nas estimativas de correntes.

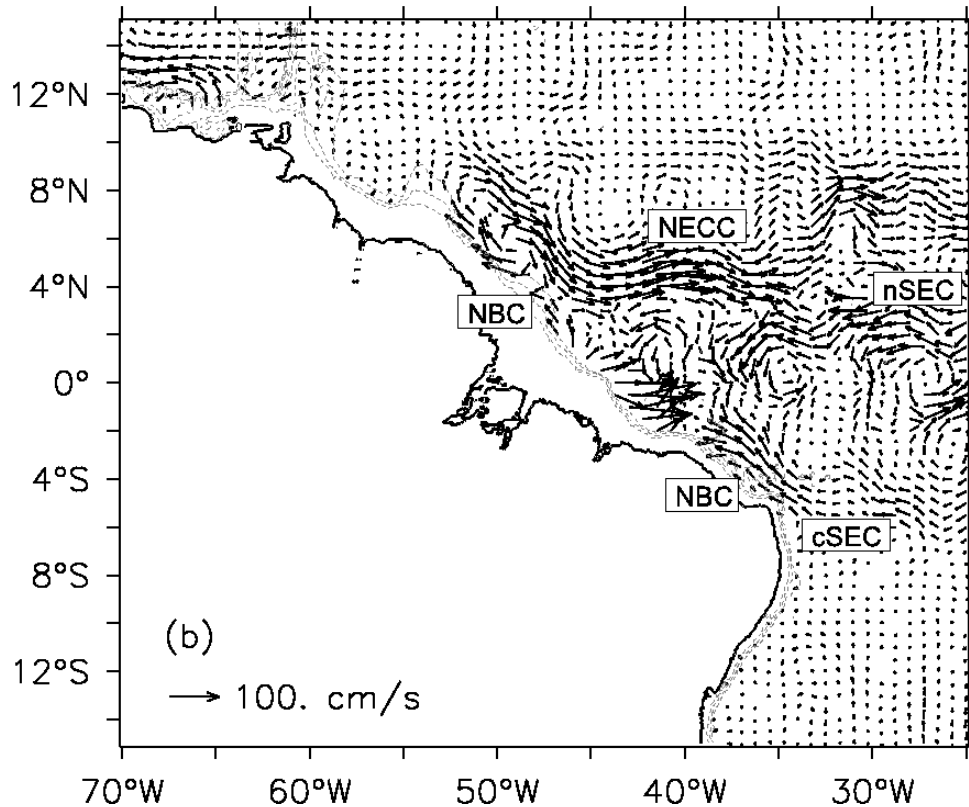


Figura 3. Correntes geostróficas sazonais (referentes a setembro de 1997) computadas para o Atlântico Equatorial Oeste utilizando mapeamento em grade de $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4}$ de grau com dados de AAS obtidas do TP e do ERS-2, e uma $\langle TD \rangle$ hidrográfica Boyer-Levitus (1997) relativa a 1000 m. Note que não há descontinuidade no Equador. A retroflexão da Corrente Norte do Brasil (NBC), a Contra-Corrente Norte Equatorial (NECC) e seus meandramentos, bem como a Corrente Sul Equatorial (ramo central) são bem visíveis (de Vianna & Menezes, 2003).

Outra limitação consiste no fato de que a altimetria detecta apenas a TD da superfície, que representa uma variável física que depende da estrutura vertical de densidade do oceano, sendo obtida pela integração vertical de todas as camadas na coluna d'água, do fundo até a superfície. Se a variância da TD nas escalas de interesse for dominada pelos movimentos da termoclina (interface entre as águas quentes da camada superior e das águas frias das camadas mais profundas), como é o caso nos oceanos tropicais, então a altimetria detecta diretamente boa parte desta variância. Isto é, a altimetria detecta bem o “primeiro modo baroclínico”. É por causa disso que se usa “validar” as estimativas altimétricas das correntes comparando-se estas com as obtidas por medidas diretas no mar (**Figura 4**).

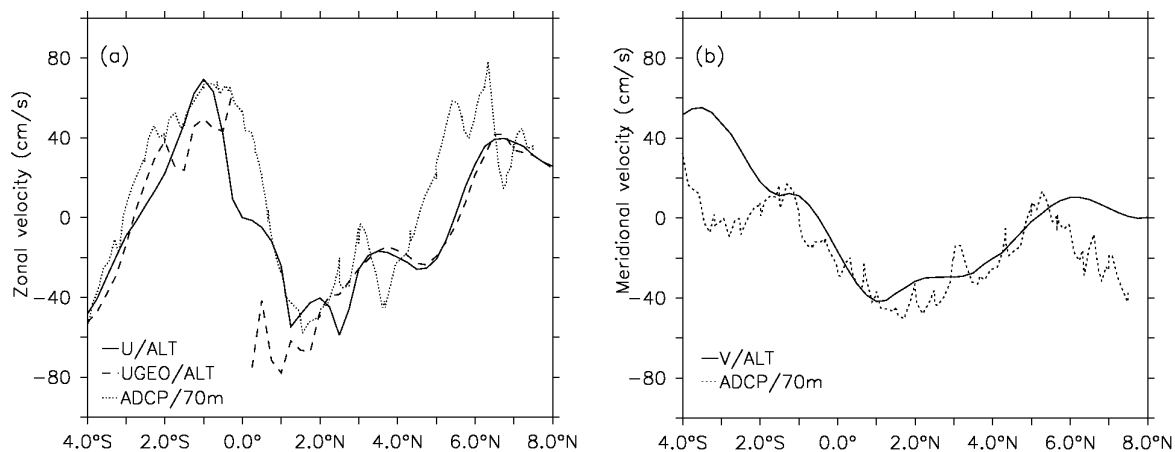


Figura 4. Exemplo de validação de dados de corrente ao longo de perfil meridional trans-equatorial, calculado com a nova aproximação geostrófica sem descontinuidade (linha cheia), geostrófica tradicional (linha achuriada), e a medida com Perfilador Doppler-Acústico de Correntes (ADCP) (linha pontilhada). A conclusão é a de que a nova aproximação é boa, mas a natureza dos erros observados ainda está em estudo.

Para se estender às estimativas de correntes obtidas pela altimetria para outras camadas mais profundas, ou se realiza diretamente o processo de Assimilação de Dados em Modelo Numérico Hidrodinâmico, um processo muito caro do ponto de vista computacional, ou se utiliza um outro método que pode ser chamado de *Método dos Perfis Sintéticos*. Este método utiliza longas séries hidrográficas de medidas no mar para caracterizar o comportamento da coluna d'água, através de correlações entre TD da superfície e os “modos estatísticos” que medem as variabilidades dominantes. A partir destas estatísticas hidrográficas, pode-se estimar os perfis verticais de correntes a partir dos dados altimétricos, supondo que o campo de TD hidrográfico coincide com o altimétrico. Este é o espírito do sistema de observação rápida adotado pela Marinha Americana, chamado MODAS (*Modular Ocean Data Assimilation*). Este Sistema foi desenvolvido para a US Navy pela *Dynalysis of Princeton*, uma firma de consultoria constituída inicialmente por dois sócios-pesquisadores famosos, um deles George Mellor, que desenvolveu o famoso Princeton Ocean Model (POM) juntamente com Alan Blumberg, que também tem uma outra empresa de serviços chamada Hydroqual, esta com uns cem funcionários. Ambos são pesquisadores da Universidade de Princeton. Hoje a Dynalysis está “muito” aumentada, sendo constituída por quatro sócios!

3. Monitoramento Operacional da Circulação Oceânica: Exemplo Real

A utilização da altimetria no monitoramento operacional da circulação oceânica em meso-escala só é possível devido a grande sinergia internacional entre um grande número de indivíduos e instituições que disponibilizam em tempo quase real na rede mundial de computadores, os dados globais adquiridos pelos vários satélites altimétricos (Jason-1, Topex/Poseidon, Envisat, GFO).

Eles são responsáveis por: Receber os dados altimétricos brutos em tempo real; transformar estes dados em medidas físicas gerando o chamado RGDR (*Near Real Time Geophysical*

Data Records); calcular a altura da superfície relativa ao elipsóide de referência e a AAS ao longo das trajetórias dos satélites, os chamados dados colineares.

A **figura 5** mostra esquematicamente os passos e instituições envolvidas nestes processamentos. Para os dados JASON-1 e Topex/Poseidon, as instituições envolvidas são: JPL (*Jet Propulsion Laboratory*)/NASA, que é responsável pelo produto *Fast Delivery Data* e pelo cálculo das órbitas previstas; ADFC (*Altimeter Data Fusion Center*)/NAVO/marinha americana que transforma as medidas de alcance (*range*) altimétrico no produto RGDR. Para os dados ERS2 e Envisat, as instituições são: ESA, que é responsável pelo produto *Fast Delivery Data*; a Universidade Delft, que calcula as órbitas previstas e o *Satellite and Ocean Dynamics Branch*/NOAA que produz o RGDR (Jacobs et al., 2002; Leben, 2000; Lilibridge et al., 1997). Para o GFO as instituições são: NAVO/Marinha Americana que opera o satélite e processa seus dados e GFSC/NASA que auxilia no processamento. A distribuição dos dados colineares é realizada principalmente pelo laboratório NRLSSC da Marinha Americana que recebe os produtos RGDR dos satélites, aplica as correções geofísicas disponíveis, faz os ajustes entre os dados multi-satélite, referenciando-os a médias consistentes, e gera os dados colineares de AAS. Estes dados são então enviados também, ao projeto GODAE (*Global Ocean data Assimilation Experiment*). Além do NRLSSC e do GODAE, o Centro de Pesquisa Astrodinâmica da Universidade do Colorado, o CCAR também distribui dados altimétricos multi-satélite.

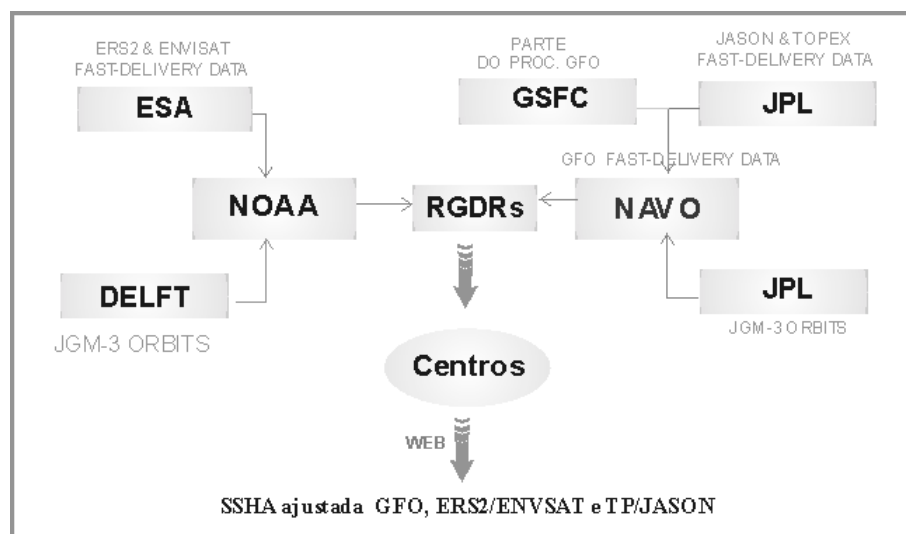


Figura 5. Fluxograma exibindo resumidamente as etapas entre aquisição de dados e distribuição dos produtos altimétricos operacionais.

Desta forma, são disponibilizados livremente à comunidade os dados colineares globais de AAS processados, diariamente em modo operacional. Mas como já vimos, o que interessa para o monitoramento das estruturas hidrodinâmicas é o campo de TD(t). Como obtê-lo operacionalmente? Como gerenciar o volume de dados gerados? Este monitoramento é importante? Então vejamos.

Com o anúncio de que a plataforma P-36 da Petrobras estava afundando, os autores iniciaram o monitoramento da circulação na região da Bacia de Campos, enviando ao CENPES/Petrobrás diariamente mapas da Circulação Geostrofica, e outros produtos altimétricos baseados nos dados dos satélites disponíveis operacionalmente na época (T/P e ERS-2). Estes produtos permitiram identificar e traçar a evolução de um forte vórtice ciclônico sobre a área da P-36. Esta circulação sugeria que o derrame de óleo não atingiria a costa. Em 2002, a VM iniciou o serviço de monitoramento diário para a Petrobrás no âmbito do PROCAP-3000, baseado nos produtos derivados de dados altimétricos multi-satélite.

A questão mais importante no monitoramento operacional, que difere bastante da abordagem acadêmica, é que necessitamos produzir diariamente os campos de TD e circulação oceânica, a partir dos dados colineares, com a melhor acurácia possível, e enviá-los ao usuário, sem falhas em todo o processo. Para que possamos realizar esta tarefa, que inclui entre outras coisas, a aquisição automática de todos os dados colineares disponíveis na rede, seu processamento, cálculo das variáveis de interesse, geração de mapas, envio ao usuário, etc, é necessário ter uma capacidade computacional bem estabelecida. Nós solucionamos estes problemas, desenvolvendo um software Orientado a Objeto (OO), que chamamos de *Sistema de Monitoramento Altimétrico e Remapeamento de Temperaturas (SMART-VM)*, cujas principais características são a flexibilidade e a manutenção relativamente simples. A linguagem escolhida foi o Java por ser OO e multi-plataforma, i.e, funciona em diferentes sistemas operacionais. A principal vantagem da estrutura que nós adotamos é que podemos adicionar novas funcionalidades e desenvolver melhorias nos produtos a curto, médio e longo prazos sem a necessidade de alterar todo software, é só adiciona-las.

Para exemplificar de forma clara como se aplicam estes conceitos e técnicas, apresentamos uma descrição dos procedimentos básicos realizados pelo sistema *SMART-VM* :

- Diariamente os dados colineares globais de AAS provenientes de todos os satélites operacionais são adquiridos automaticamente pelo sistema. Estes dados têm resolução espacial de aproximadamente 7Km;
- Os dados colineares são então submetidos ao controle de qualidade, padronizados (formato e unidades) e armazenados;
- Como os dados de AAS ao longo das trajetórias são extremamente ruidosos nas escalas espaciais menores que 40km, a VM Oceânica desenvolveu e implementou no sistema *SMART-VM* um método de filtragem adaptativa para a remoção destes ruídos de alta frequência. Ao contrário dos métodos tradicionais, este método preserva as amplitudes máximas e mostra boa performance em séries curtas, e ainda não perde dados nas fronteiras. É baseado na aplicação dos mesmos procedimentos matemáticos da Análise Espectral Singular (SSA) (Vautard et al., 1992), mas modificados para tratar séries espaciais. No procedimento automático implementado, a filtragem deixa passar apenas os comprimentos de onda desejados, excluindo os menores que n Km, onde n é um valor dado pelo operador do software, sendo o valor padrão (*default*) 80Km.
- Para obtermos o campo de AAS a partir dos dados colineares, o sistema *SMART-VM* utiliza o Mapeamento Objetivo (MO) espaço-temporal ou

Interpolação Ótima. Por que MO? Acontece que cada satélite tem periodicidade de repetição de passagem diferente (ex. Jason 10 dias; GFO 17 dias; Envisat 35 dias). Como as feições oceanográficas de meso-escala mudam pouco em 1-2 semanas, pode-se usar todos os dados (passagens) dos últimos dias para fazer um MO. O método mais popular usa um “estimador linear ótimo”, satisfazendo o Teorema de Gauss-Markov (ver, por ex., Le Traon et al., 2003 e referências ali contidas). No sistema *SMART-VM*, há 2 diferentes algoritmos implementados: Kessler e McCreary (1993) e Jacobs et al. (2001). O primeiro, é um MO mais rápido do ponto de vista computacional, não faz estimativa dos erros do mapeamento e nem leva em conta os diferentes erros esperados para cada satélite. O segundo, é mais caro computacionalmente, mas leva em conta os erros esperados e estima o erro do mapeamento. Este segundo MO, é o algoritmo padrão utilizado pela VM nos seus produtos. Estes mapeamentos podem realizados tanto em grade curvilínea dada pelo usuário quanto em grade quadrada, sem restrições a áreas geográficas ou resolução. Os parâmetros do MO, i.e, a quantidade de passagens utilizadas, a função de decorrelação, as escalas desta função em longitude(X), latitude (Y) e tempo (T) são escolhidos pelo operador.

- A TD(t) é obtida no sistema *SMART-VM* pela a superposição do campo de AAS com a <TD>. Há 2 <TD>s disponíveis atualmente: uma baseada na climatologia hidrográfica de Boyer e Levitus (1997), no qual o operador deve escolher a profundidade de referência, e a outra baseada no modelo VM-Grace. No primeiro caso obteremos uma TD(t) relativa, e no segundo uma TD absoluta.
- O *SMART-VM* também realiza os cálculos das grades referentes às velocidades geostróficas zonal e meridional, baseadas nos campos acima.

Passamos agora a descrever os produtos altimétricos obtidos diariamente pelo sistema *SMART-VM* para a área compreendida entre 30S-12S e 52W-30W, como um exemplo ilustrativo.

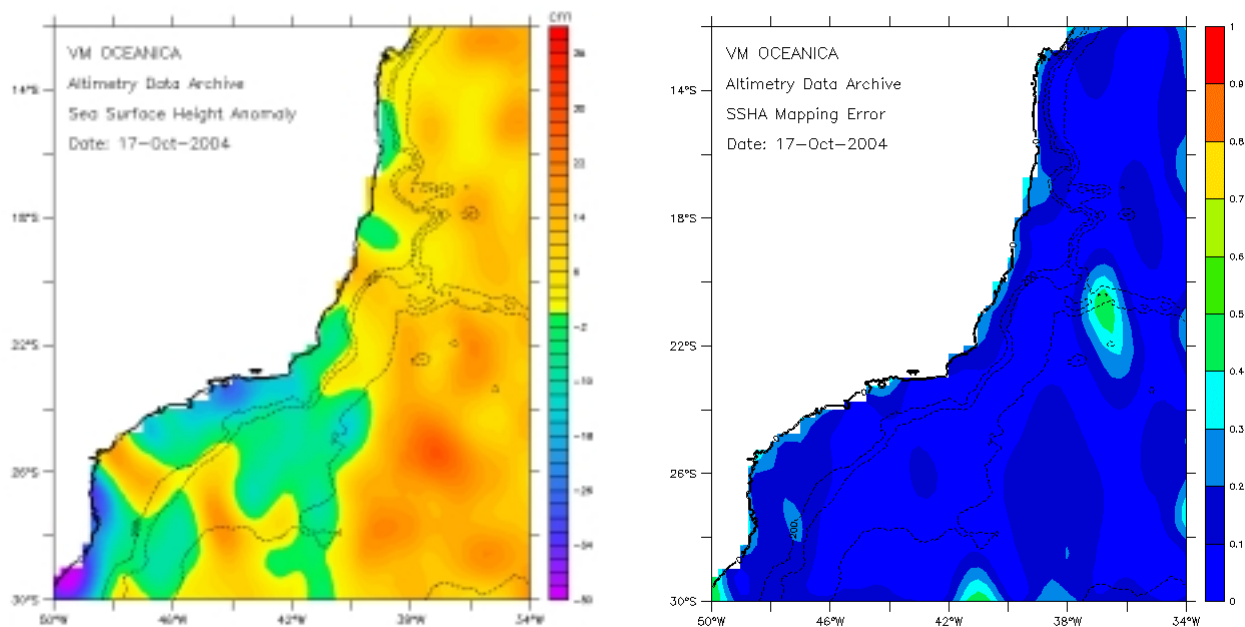


Figura 6: Campo de Anomalia Altura da Superfície do Mar (AAS) para o dia 17/10/2004. Este produto foi calculado a partir dos dados colineares filtrados dos satélites Jason-1, Envisat e GFO, obtidos entre os dias 3 e 17 de outubro. Este campo tem resolução espacial de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ (27 Km aproximadamente). A função de decorrelação utilizada no MO foi gaussiana em espaço e tempo (Jacobs et al., 2001), e as escalas foram respectivamente 150 Km em X e em Y e 15 dias. A escolha destas escalas se baseou em parte no estudo global realizado por Stammer (1997).

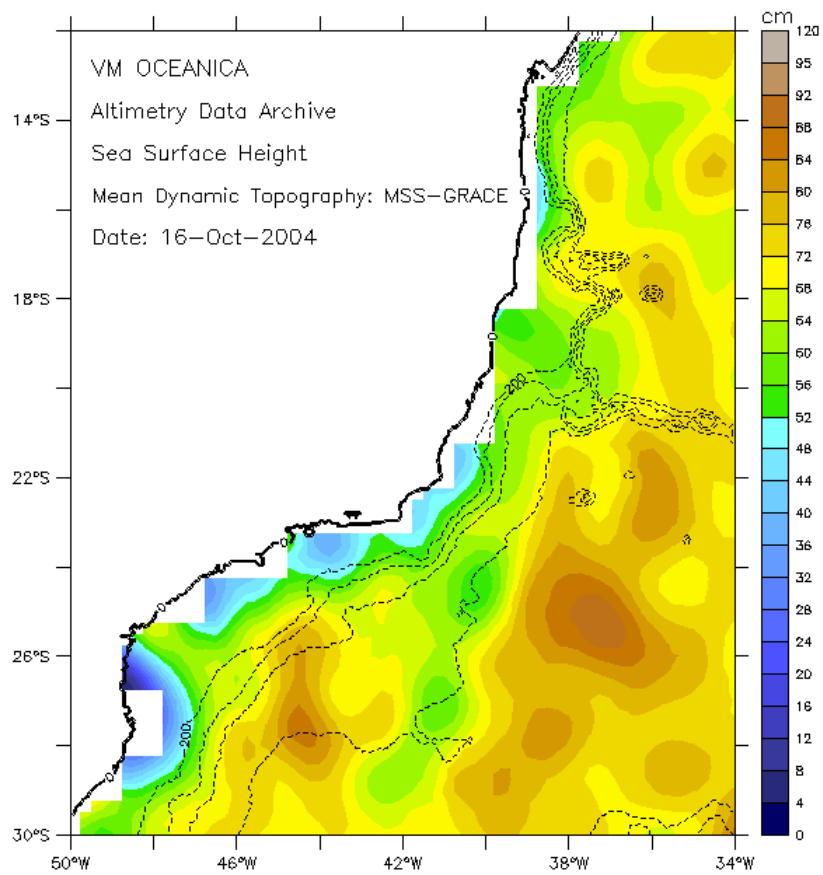


Figura 7. TD (Mean Dynamic Topography-MDT em inglês) obtida para o dia 17/10/2004. Os vórtices anticiclônicos (rotação anti-horária) correspondem aos “altos” com curvas de nível fechadas, e os ciclônicos aos “baixos” também com curvas de nível fechadas.

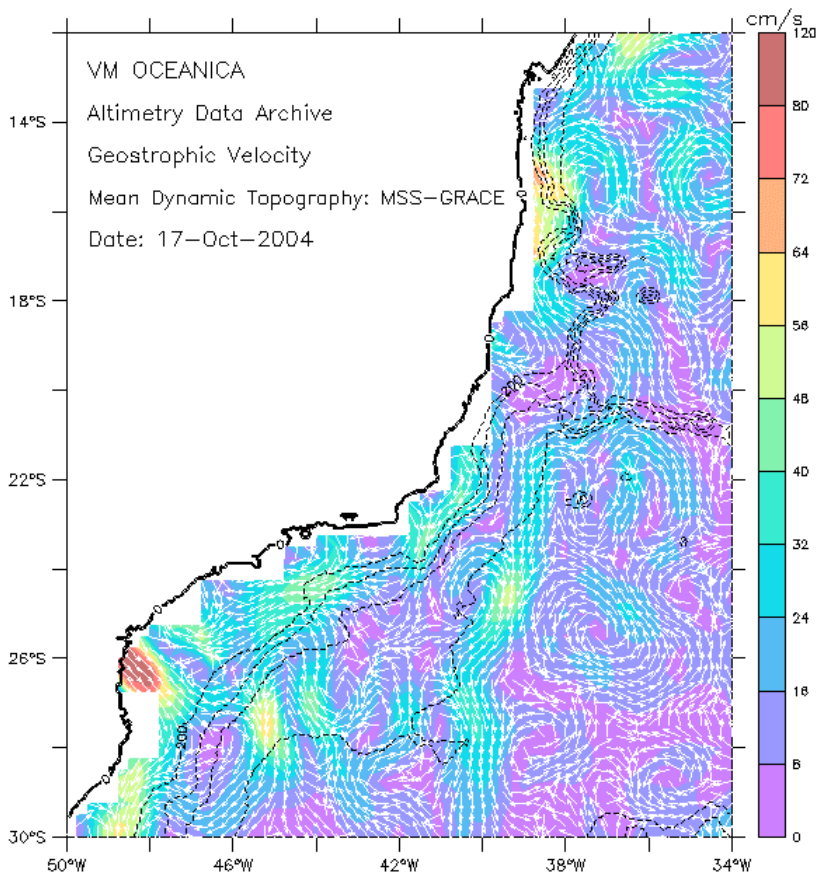


Figura 8. Circulação geostrófica estimada correspondente à TD da figura 7. Apesar de se identificar o que seria a Corrente do Brasil como o jato para o sul que se separa do talude em torno de 22° S, vemos que na realidade as figuras 6 e 7 sugerem que esta corrente é obtida como resultante de circulações vorticiais. Os vórtices e anéis de corrente em torno de 14° S, que sempre aparecem nos nossos mapas de circulação, foram recentemente reportados com base em análise de dados hidrográficos obtidos durante a Comissão Oceano Leste 1, realizada a bordo do N/O Antares (de Paula et al., 2004).

4. Conclusões

A tecnologia do monitoramento da circulação oceânica multisatélite, apesar de ainda estar em sua infância, já é utilizada em apoio à segurança de instalações *offshore*, para a calibração de modelos de previsão de dispersão de poluentes no mar, de estudos pesqueiros, operações de segurança e salvamento de embarcações, avaliação de rotas de migração de mamíferos marinhos, dispersão de larvas de espécies exploráveis para previsão de safras, estudos climáticos, e algumas outras aplicações. Trata-se de uma ferramenta fundamental para o que se convencionou chamar de *Oceanografia Operacional*, que é uma atividade de

grande abrangência social na atualidade. As tarefas ligadas a esta atividade podem ser de âmbito estatal, como seria o caso da Previsão Oceânica Global nos moldes do que se faz nos Centros de Previsão de Tempo, como podem ser de âmbito mais dirigido e específico, como é o caso das abordagens regionais ou locais, mais apropriadas para ser conduzidas pela Iniciativa Privada. Neste último caso, não é eficiente a simples importação de produtos altimétricos produzidos em grade e distribuídos pelos Centros de Previsão global. É necessário se ter um controle de qualidade do dado mais rigoroso dos dados primários, de não haver falhas no fornecimento dos produtos requeridos, e se ter a possibilidade de desenvolver em curto prazo produtos adequados (customizados) para o atendimento de diferentes demandas. Por outro lado, é necessário fazer inovação dentro da própria empresa incorporando e participando nos desenvolvimentos desta tecnologia que se apresenta com um crescimento explosivo nos aperfeiçoamentos.

A VM Oceânica, como foi visto acima, tem participado não só de certos aspectos ligados à pesquisa para a melhoria de seus serviços, mas tem feito isso como resultado da experiência adquirida com a participação em Contratos com a Indústria do Petróleo, tanto no modo de monitoramento diário de longo prazo, como em trabalhos de consultoria em casos de contingências emergenciais. Neste processo, às vezes é necessário contribuir decisivamente para fazer avançar a fronteira internacional de pesquisa, como tem sido o caso do desenvolvimento de uma Topografia Dinâmica Média Absoluta própria e inovadora, para melhorar as estimativas espaciais de correntes marinhas no *modo operacional* ou no *modo histórico*.

Acreditamos que este Capítulo seja de utilidade tanto para o principiante quanto para os especialistas de língua portuguesa, pois se trata do primeiro trabalho em português que trata do monitoramento rotineiro da circulação oceânica através de tecnologia multi-satélite, utilizando os radares-altímetros, que não são afetados pela presença de nuvens. As outras tecnologias, especialmente as baseadas apenas em sensores nas faixas do visível e infravermelho, sendo importantíssimas em apoio a estudos climáticos, sofrem de limitações devidas as coberturas imprevisíveis de nuvens, o que quebra a regularidade e garantia necessária para a observação contínua do oceano.

Referências Bibliográficas

Birol, F., J. M. Brankart, J. M. and Lemoine, P. Brasseur, and J. Verron. Assimilation of satellite altimetry referenced to the new grace geoid estimate. *Geophys. Res. Lett.*,32: L06601, doi: 10.1029 / 2004GL021329, 2005.

T. Boyer and S. Levitus. Objective analyses of temperature and salinity for the world ocean on a quarter-degree grid. Technical Report 11, NOAA, 1997.

D. P. Chambers, Wahr, J. and R. S. Nerem, Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE. *Geophys. Res. Lett.* 31: L13310, doi:10.1029/2004GL020461, 2004.

- Ducet, N. & P. Y. Le Traon, Global high resolution mapping of ocean circulation from Topex/Poseidon and ERS-1 and -2. *J. Geophys. Res.*, 105, C8: 19477-19498, 2000.
- G.A Jacobs, C.N. Barron, D.N Fox, K.R Whitmer, S Klingenberger, D. May, and J.P. Blaha. Operational altimeter sea level products. *Oceanography*, 15 (1): 13-21, 2002.
- G.A Jacobs, C.N. Barron, and 2001 Rhodes, R. C. Mesoscale characteristics. *Journal of Geophysical Research* , 106: 19581-19595, 2001.
- C.J. Koblinski, R. Ray, B. D. Beckley, Y. Wang, L. Tsaoussi, A. Brenner, and R. Williamson. Ocean altimeter pathfinder project - report 1: Data processing handbook. Technical Report NASA/TM-1998-208605, NASA, 1999. 55 pp.
- P. Y. Le Traon, F. Nadal, and N. Ducet, An improved mapping method of multisatellite altimeter data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 522–534, 1998.
- P. Y. Le Traon & G. Dibarboure, Mesoscale mapping capabilities of multi-satellite altimeter missions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1208-1223, 1999.
- P. Y. Le Traon, G. Dibarboure, and N. Ducet, Use of a high-resolution model to analyze the mapping capabilities of multiple-altimeter missions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 1277–1288, 2001.
- P. Y. Le Traon, Faugère Y., Hernandez F., Dorandeu J., Mertz F. & M. Ablain, 2002. Can we merge GEOSAT Follow-On with T/P and ERS-2 for an improved description of the ocean circulation? *J. Atmos. Oceanic Tech.* 20: 889-895, 2003.
- A C de Paula, Calado, L., Silveira, I. C., Cirano, M. A origem da Corrente do Brasil. Pôster apresentado no *II Simp. Bras. de Oceanografia*, IOUSP, 2004.
- M.-H. Rio and F. Hernandez. A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a Geoid model. *J. Geophys. Res.*, 109 (C12032): doi:10.1029/2003JC002226, 2004.
- D. Stammer. Global characteristics of ocean variability estimated from regional Topex/Poseidon altimeter measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 8: 1743-1769, 1997.
- Stramma, L. and England, M. On the Water Masses and Mean Circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C9), 20863-20883, 1999.
- B. D. Tapley, D. P. Chambers, S. Bettadpur, and J. C. Ries. Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid. *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no. 22, 2163, doi:10.1029/2003gl018622, 2003

M. Tsuchiya.. Evidence of a double-cell subtropical gyre in the south atlantic ocean. *Journal of Marine Research*, 43:57–65, 1985.

R. Vautard, P. Yiou, and M. Ghil. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica D*, 58: 95-126, 1992.

M. L. Vianna & Menezes, V. V. Shelf Edge Circulation off the Campos Basin from Altimetry and Current Meter Moorings. *An Ocean Odyssey* (Joint Assemblies of the International Association for Physical Sciences of the Oceans and International Association for Biological Oceanography), Mar del Plata, 2001..

M.L. Vianna & Menezes,V.V. A seasonal and interannual study of the western equatorial Atlantic upper thermocline circulation variability. In: Goni,G.J., Malanotte-Rizzoli,P.(Ed.), *Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean*. Elsevier Oceanographic Series 68, pp.137 –174, 2003.

Vianna, M. L., Chambers, D., Menezes, V. V. Mean Dynamic Topography based on the GRACE GGM02 Model and Altimeter MSS: Can we Capture Subgyre Structures by use of Adaptative Filters? *Joint Assembly: American Geophysical Union (AGU), North American Benthological Society (NABS), Society of Exploration Geophysicists (SEG), Solar Physics Division-American Astronomical Society (SPD/AAS)*. New Orleans, May 2005.