



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 01]  
**ESTUDO PRELIMINAR SOBRE A  
CIRCULAÇÃO DE MESO-ESCALA NA  
BACIA DO ESPÍRITO SANTO**

/  
Preparado para:  
PERENCO PETRÓLEO E GÁS DO BRASIL  
LTDA

Preparado por:  
Maurício da Rocha Fragoso  
Audálio Rebelo Torres Jr. - UFRJ

04 de novembro de 2009

**PROOCEANO**

AV. RIO BRANCO, 311 / 1224 CENTRO  
CEP 20.0040-009 RIO DE JANEIRO RJ  
TEL | FAX +55 21 2532-5666  
WWW.PROOCEANO.COM.BR

RELATÓRIO TÉCNICO [REV.00]

**ESTUDO PRELIMINAR SOBRE A CIRCULAÇÃO  
DE MESO-ESCALA NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO**

Preparado para:  
PERENCO PETRÓLEO E GÁS DO BRASIL LTDA

Preparado por:  
Maurício da Rocha Fragoso  
Audálio Rebelo Torres Jr. - UFRJ

04 de novembro de 2009

## ÍNDICE:

<b>I. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>II. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>III. CONHECIMENTO EXISTENTE SOBRE A CIRCULAÇÃO DA REGIÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>IV. SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....</b>	<b>19</b>
<b>IV.1. O Modelo ROMS .....</b>	<b>19</b>
<b>IV.2. Domínio do Modelo .....</b>	<b>23</b>
<b>IV.3. Condições de Contorno .....</b>	<b>26</b>
<i>IV.3.1. Condição de Contorno de Fundo</i>	<i>26</i>
<i>IV.3.2. Condição de Contorno de Superfície</i>	<i>27</i>
<i>IV.3.3. Condição de Contorno Lateral</i>	<i>28</i>
<b>IV.4. Resultados.....</b>	<b>30</b>
<i>IV.4.1. O Vórtice de Vitória</i>	<i>31</i>
<i>IV.4.2. Circulação Superficial</i>	<i>38</i>
<i>IV.4.3. Derivadores Virtuais</i>	<i>46</i>
<b>V. CONCLUSÕES .....</b>	<b>62</b>
<b>VI. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## I. INTRODUÇÃO

Esse relatório visa apresentar um estudo preliminar a respeito da circulação de meso-escala na região da Baía do Espírito Santo, utilizando dados previamente coletados, estudos publicados e modelagem numérica no intuito de ajudar a esclarecer alguns aspectos dessa complexa região.

A circulação oceânica da Baía do Espírito Santo é influenciada por uma série de fatores, que aliado à carência de dados coletados, fazem com que haja diversas lacunas de conhecimento sobre esse aspecto, e alguns destes serão aqui abordados. É dada especial ênfase ao fenômeno oceanográfico mais notório daquela região, o Vórtice de Vitória, uma feição de meso-escala que influencia de forma importante a oceanografia da Baía do Espírito Santo.

O relatório está dividido da seguinte maneira: No Capítulo II são destacados os objetivos, o Capítulo III faz um apanhado a respeito do estado-da-arte da circulação da Baía do Espírito Santo. No capítulo IV o modelo numérico utilizado é descrito e seus resultados apresentados e, finalmente, o Capítulo VI apresenta as conclusões e recomendações obtidas.

Esse estudo foi elaborado com a colaboração do Professor Audálio Rebelo Torres Jr. do Departamento de Meteorologia da UFRJ e chefe do Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos (LAMMA/UFRJ).

## II. OBJETIVOS

O objetivo principal desse estudo é tentar esclarecer alguns aspectos da circulação oceânica da Baía do Espírito Santo, com ênfase na meso-escala, para que se possa ter um melhor conhecimento prévio das condições oceânicas da região e desta forma, por ocasião das operações previstas pela Perenco haja um aumento da segurança das operações, tanto no aspecto operacional, quanto no ambiental.

Através desse estudo, visa-se também saber quais as principais lacunas de conhecimento que podem ser preenchidas e assim propor um Programa de Monitoramento da Circulação de Meso-escala mais eficiente e objetivo.

Os objetivos específicos desse estudo são:

Ampliar o conhecimento da circulação oceânica superficial, com ênfase na meso-escala, da Baía do Espírito Santo;

Estudar a variabilidade espaço-temporal do Vórtice de Vitória;

Averiguar a adequabilidade de lançamentos de derivadores das locações prováveis da Perenco para o monitoramento do Vórtice de Vitória e outras feições de Meso-escala.

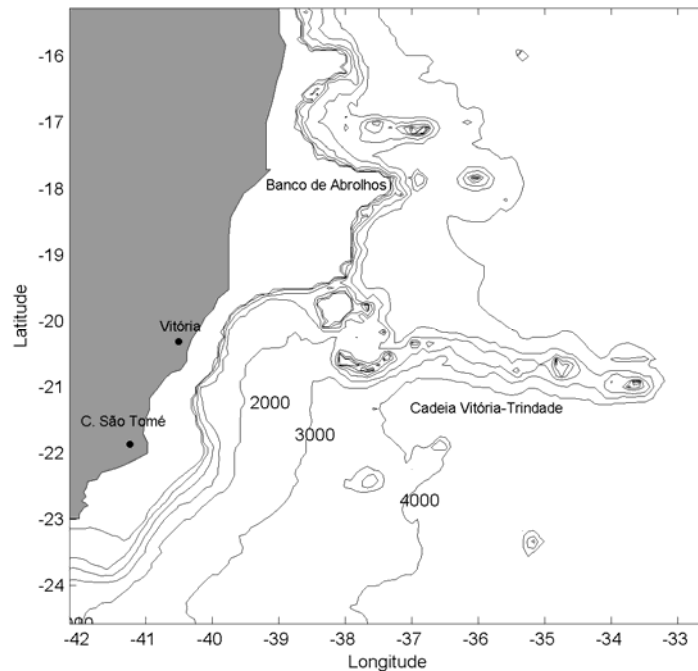
### III. CONHECIMENTO EXISTENTE SOBRE A CIRCULAÇÃO DA REGIÃO

Talvez uma das causas da complexa circulação oceânica da Bacia do Espírito Santo seja a interação do fluxo com o fundo do oceano, visto que essa região de estudo apresenta feições peculiares em sua topografia oceânica. Mecanismos de meandramentos, vórtices e ressurgência costeira estão diretamente ligados à cordilheira submarina, aos bancos, aos alargamentos e estreitamentos da Plataforma Continental e às mudanças de orientação da linha de costa presentes na região (Figura 1).

Ao norte da Bacia do Espírito Santo, a Plataforma Continental entre as latitudes de 10° a 15° S é estreita, apresentando largura típica em torno de 15 km, chegando a alcançar 10 km na latitude de 13° S (a menor do Brasil), possuindo profundidades da quebra da plataforma entre 50 a 60 m. A partir desse ponto, a Plataforma exibe grande variação em sua largura. Na latitude de 15° S, ela possui 35 km aproximadamente. Um pouco mais a sul encontra-se o banco Royal Charlotte e a plataforma se estende até 110 km. Em 17° S, novamente apresenta largura menor, em torno de 45 km, até chegar na região do Banco de Abrolhos, onde chega a 190 km de extensão. Imediatamente ao sul, na Bacia de Campos, a plataforma novamente diminui de largura, tendo em média 80 km, com profundidade de quebra entre 60 e 100m. Na Bacia de Santos, a Plataforma apresenta 50 km de largura na região de Cabo Frio, alargando gradualmente até atingir a segunda maior largura de todo país (230 km, sendo menor apenas que a Plataforma da região Amazônica), em sua parte central (Castro & Miranda, 1998).

A linha de costa apresenta orientação norte-sul desde 10° S até a região de Cabo Frio, onde apresenta uma inflexão de quase 90° e passa a possuir orientação leste-oeste.

Outra feição importante da topografia submarina da região é a cadeia de montes vulcânicos, denominada de Vitória-Trindade. Essa feição perpendicular à costa, estende-se por mais de mil quilômetros ao longo dos paralelos de 20° e 21° em direção ao sudoeste da África. Os pontos culminantes da cordilheira estão submersos a poucas dezenas de metros da superfície. Entretanto, as bases dessas montanhas estão entre 3 e 4 mil metros de profundidade. Na extremidade oriental da cadeia, distante 1.200 quilômetros do litoral de Vitória, surgem os únicos vestígios visíveis à superfície: os rochedos que formam o minúsculo Arquipélago de Martim Vaz e a Ilha de Trindade (Oliveira et al., 2004). Tal formação acarreta em gradientes de profundidade bastante significativos, e ao interagir com o fluxo da CB que por ali passa, gera feições como vórtices e meandros.



**Figura 1 – Batimetria da região da Cadeia Vitória-Trindade. Estão representadas as isóbatas de 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000 e 4000 m.**

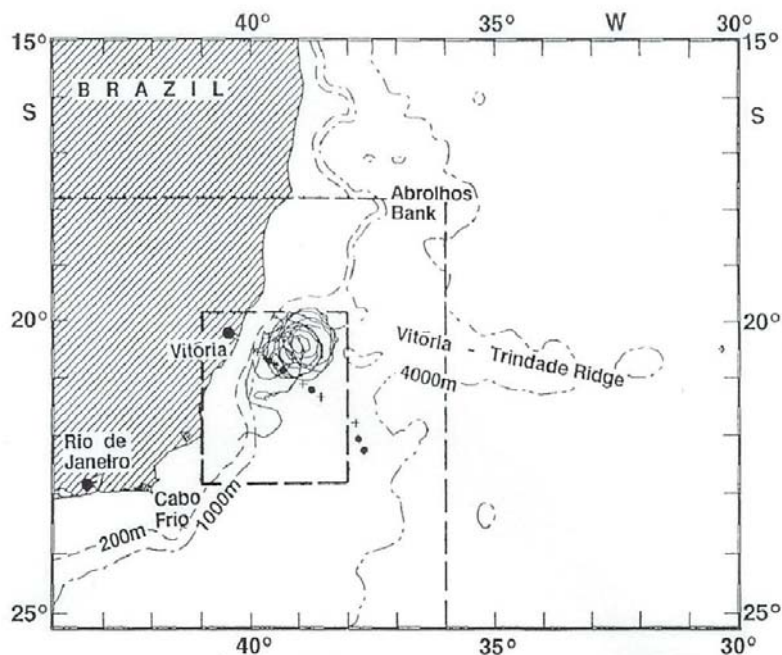
No entorno da latitude de 20°S, a Corrente do Brasil se encontra mais afastada da costa, em virtude do alargamento da plataforma continental. A partir desta latitude, recebe efetiva contribuição da ACAS, torna-se mais profunda e aumenta seu transporte, mas é ainda estreita, com cerca de 75 km de largura, apresentando velocidade máxima em torno de 0,7 m/s (Silveira et al., 2000). Valores de transporte entre 5 Sv e 6.5 Sv foram observados nos primeiros 500 m de coluna d'água (Peterson & Stramma, 1991; Stramma et al., 1990).

Próximo à latitude de 20,5° S, a corrente se depara com a cordilheira submarina Vitória-Trindade e flui preferencialmente através da passagem mais próxima à costa, embora esse fluxo seja pouco documentado (Castro & Miranda, 1998). Stramma et al. (1990 apud Castro & Miranda, 1998) mostram que entre 16 e 19° S a parte mais a oeste da BC flui para sul longe da costa, ao largo da isóbata de 3000 m. Próximo à cadeia, a velocidade da corrente é de 0,5 a 0,6 m/s com transportes entre 3,8 a 6,8 Sv (Evans et al., 1983). Valores maiores, 9,4 Sv, foram encontrados por Schmid et al. (1995).

Nessa mesma latitude, é marcante a presença de um vórtice de meso-escala, que passou a ser conhecido como Vórtice de Vitória. Schmid et al. (1995) realizaram a primeira descrição hidrográfica e dinâmica desse vórtice ciclônico a cerca de 100 km do litoral de Vitória. Esses autores realizaram uma campanha de medição oceanográfica, no verão de 1991, ao longo dessa estrutura, cujo centro situa-se aproximadamente nas latitude de



20,5° S e longitude de 39° W (Figura 2), possui núcleo frio e menos salino em comparação às águas adjacentes, de origem provavelmente relacionada aos movimentos ascendentes, associados a eventos de ressurgência. Possui águas ricas em oxigênio, o que pode causar influência na biologia local. Durante toda a duração da campanha o Vórtice de Vitória permaneceu adjacente à CB, mas apresentou interessante translação. Primeiramente, deslocou-se para nordeste, o que vai de encontro com a teoria da translação de vórtices no oceano aberto (McWilliams & Flierl, 1979 apud Schmid et al., 1995), que diz que vórtices ciclônicos no hemisfério sul devem mover-se para sudoeste na ausência de correntes. Apenas a presença de uma corrente intensa para norte poderia causar tal movimento, o que não é o caso do Vórtice de Vitória. Após esse período, o vórtice passa a se deslocar para sudoeste, sugerindo uma interação com o fluxo da CB, que estaria deslocada para muito mais para leste do que reportado por Evans & Signorini, (1985) (Schmid et al., 1995), mais uma evidência da variabilidade da posição da CB.



**Figura 2 – Localização do Vórtice de Vitória conforme obtido por Schmid et al., 1995.**

Os autores observaram, através de cálculos geostróficos obtidos por medições com XBTs e CTDs, que o Vórtice de Vitória deve estar presente até aproximadamente o nível de 400m (Figura 3). Indicaram também algumas características como transporte de volume, velocidade e direção de translação do Vórtice (Tabela 1).

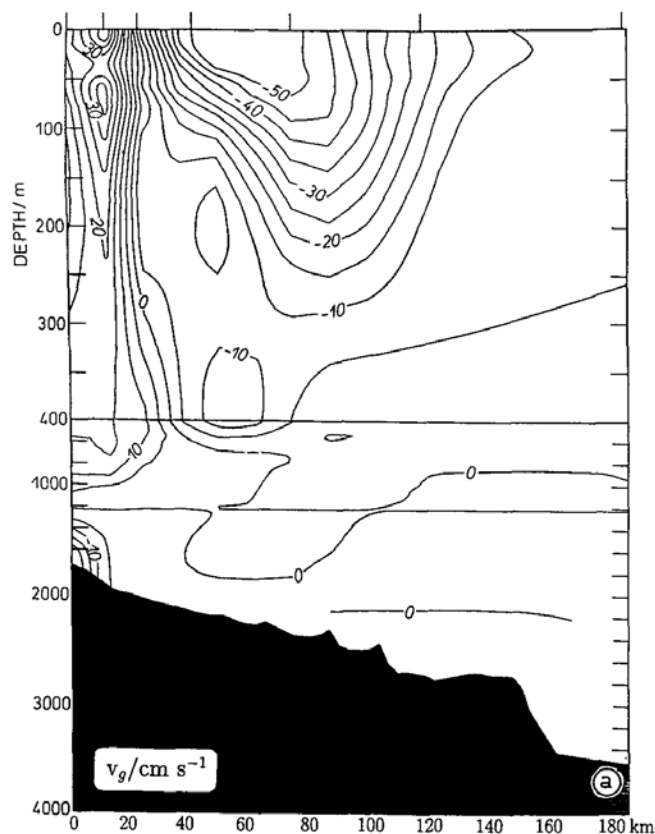


Figura 3 – Estrutura Vertical do Vórtice de Vitória conforme obtido por Schmid et al., 1995.

Tabela 1: Características (Velocidade de Translação, Direção de Translação e Transporte de Volume) do Vórtice de Vitória. Reproduzido de Schmid et al., 1995.

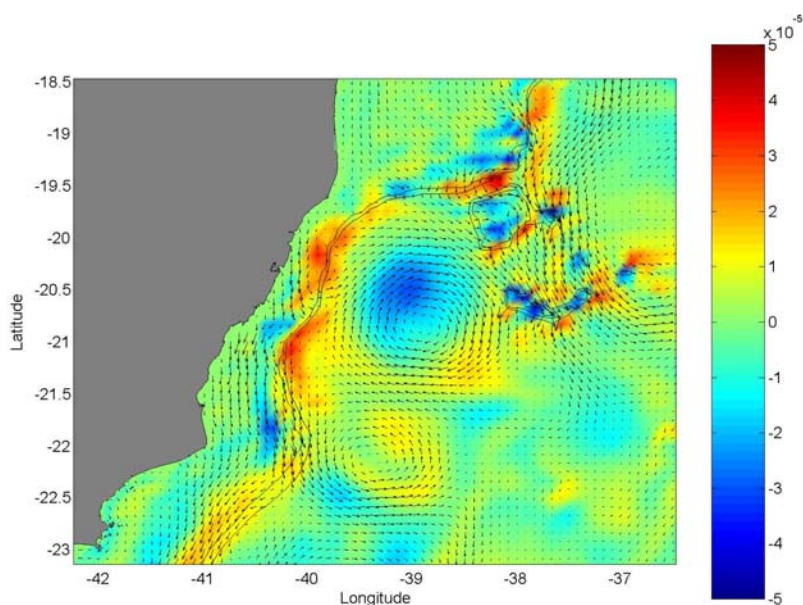
Interval	Yeardays (1991)	Translation velocity (cm s <sup>-1</sup> )	Translation direction (deg)	Transport in eddy (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
a	40–50	5.2	38	1.8
b	50–57	4.5	70	1.6
c	57–82	1.6	236	0.6

O Vórtice de Vitória foi também detectado por Gaeta et al. (1999) em campanha realizada no outono de 1995. Os autores encontraram um vórtice ciclônico de 50 km de diâmetro, com núcleo frio, centrado na latitude de 20,3° S e longitude de 38,9° W. A



análise de nutrientes e de fitoplâncton mostrou que o Vórtice de Vitória contribui significativamente para o aumento da produção primária nessa região.

Fragoso (2004) utilizando um modelo hidrodinâmico (Princeton Ocean Model) reproduziu um vórtice com características idênticas e seu comportamento sazonal foi analisado. O autor observou que esse vórtice tem atividade mais intensa no verão/outono (Figura 4), enfraquece-se bastante no inverno (Figura 5), chegando até a desaparecer. Na primavera, no entanto, volta a se apresentar (Figura 6). Fragoso (2004) sugere então que o Vórtice de Vitória, apresentaria variações de intensidade ao longo do ano, sendo que sua atividade durante a maior parte do inverno não foi detectada, podendo ser então caracterizado como semi-permanente, embora mais sugira também que mais estudos devam ser realizados para confirmar tal hipótese.



**Figura 4 – Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície obtidos pelo modelo para fevereiro de 1999.**

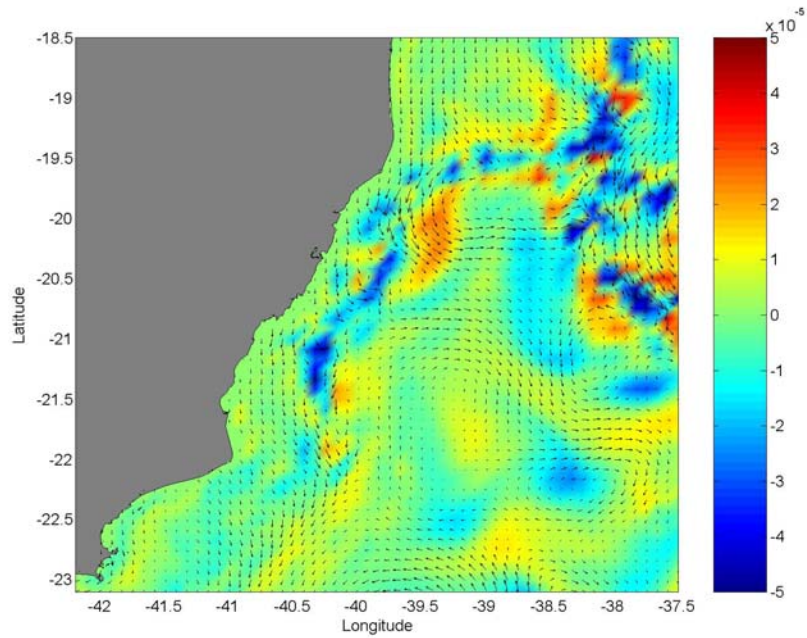


Figura 5 – Campo de vorticidade relativa (s-1) e velocidade em superfície obtidos pelo modelo para julho de 1999.

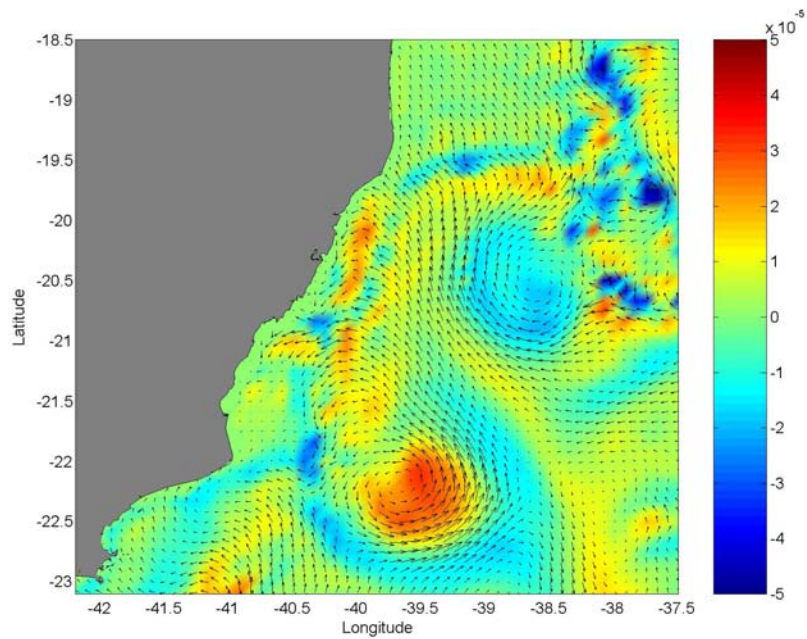


Figura 6 – Campo de vorticidade relativa (s-1) e velocidade em superfície obtidos pelo modelo para dezembro de 1999.

Rocha (2005) modelou, aplicando o Princeton Ocean Model, alguns efeitos da batimetria, que é bastante complexa em função da presença da cadeia Vitória-Trindade e bancos como o de Abrolhos, no vórtice de Vitória, bem como seu comportamento frente a passagem de sistemas frontais na região que está sob a influência do Anti-Ciclone Subtropical do Atlântico Sul dando origem a um regime permanente de ventos oriundos predominantemente de nordeste, que podem ser enfraquecidos, intensificados ou mudados de direção devido à influência de algum sistemas frontais (Maia, 1986). Seus resultados indicaram que pequenas alterações na batimetria junto ao vórtice, bem como a passagem dos sistemas frontais podem alterar e mesmo dissipar o Vórtice de Vitória.

Outra investigação numérica sobre o Vórtice de Vitória foi realizado por Campos (2006), que utilizou resultados do modelo Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). O autor conclui que o Vórtice de Vitória mantém sua estrutura vertical até a profundidade de 500m (

Figura 7), sendo que nos primeiros 300m situa-se na porção mais rasa da Corrente do Brasil (CB) e em maiores profundidades passa a estar na região offshore da Contra Corrente Intermediária (CCI) (Figura 8). O efeito advectivo da CCI poderia então ser responsável pela deriva para norte do Vórtice, encontrada em seus resultados. O autor mostra um deslocamento para norte do Vórtice (Figura 9), que chega a ultrapassar a Cadeia Vitória-Trindade e observa que se esse movimento realmente acontecer, então o Vórtice de Vitória teria outro papel de importância que é exportar nutrientes e características termohalinas para regiões remotas. Campos (2006) conclui ainda que maiores investigações numéricas e medições devem ser realizadas para se entender a dinâmica do Vórtice de Vitória e verificar os resultados obtidos.

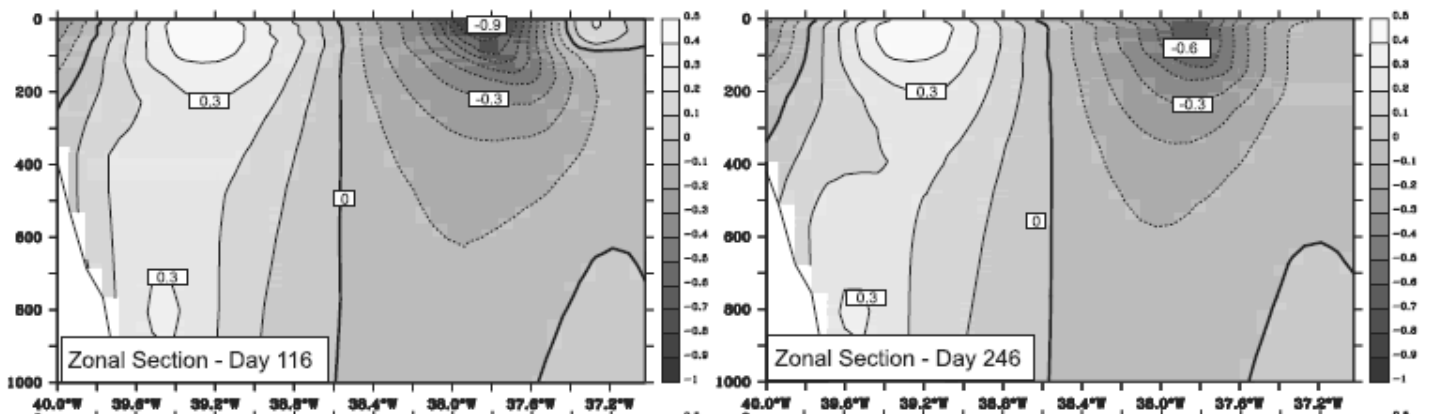


Figura 7 – Seção Vertical da Velocidade Zonal (m/s) mostrando a estrutura vertical do Vórtice de Vitória em dois momentos. Retirado de Campos (2006).

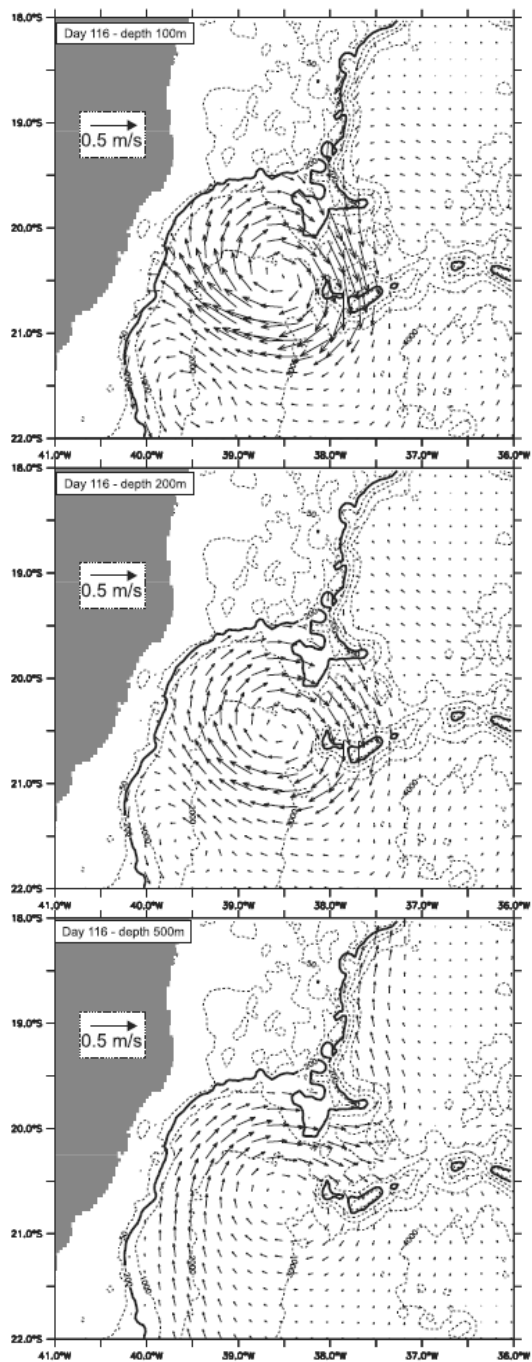


Figura 8 - Campo de corrente (m/s) em três níveis (100, 200 e 500m de profundidade) mostrando o posicionamento do Vórtice de Vitória. Retirado de Campos (2006).



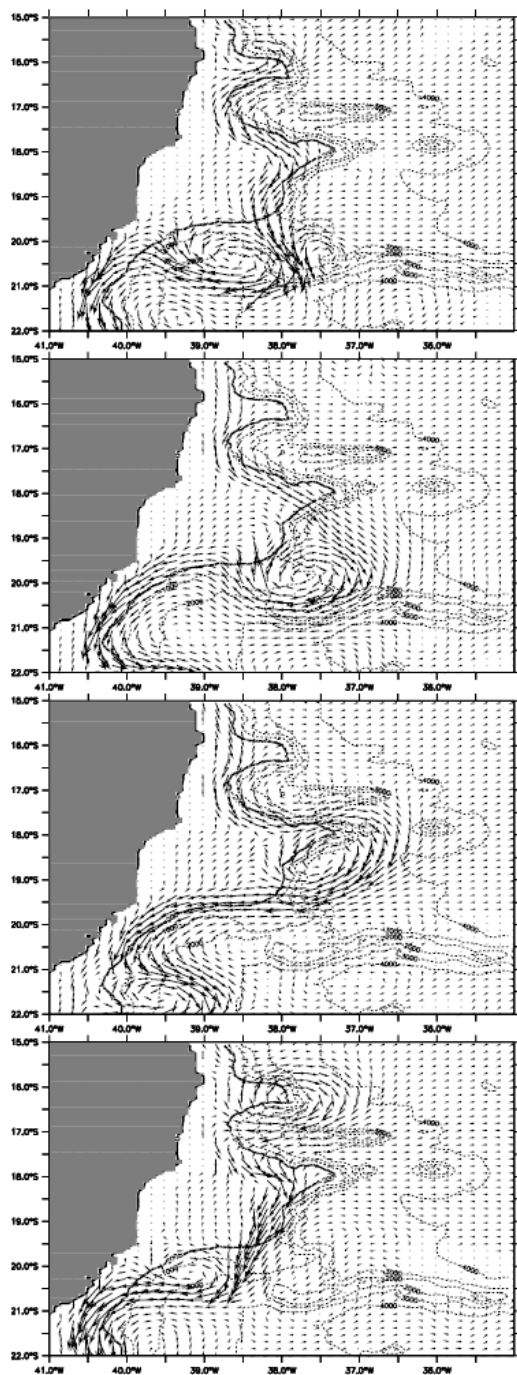


Figura 9 - Campos de corrente (m/s) em superfície em instantes diferentes, mostrando a translação para norte do Vórtice de Vitória. Retirado de Campos (2006).

Em seu trabalho intitulado "Existe um Vórtice de Vitória Climatológico?", Costa (2007) buscou aprofundar conhecimentos sobre a formação do Vórtice de Vitória, principalmente quanto à sua permanência ao longo do ano, tentando responder se o Vórtice seria de fato permanente, recorrente ou esporádico. Para tal, analisou dados da base de dados de climatologia proposta por Boyer et al. [2005]. Através de cálculos geostróficos climatológicos, o autor observa que no campo anual não há nenhuma manifestação do Vórtice de Vitória, o que implica que esta estrutura não seria uma feição permanente nos dados climatológicos. Sazonalmente, evidências da recorrência do vórtice ciclônico se fez presente somente durante o outono. Nos períodos de inverno, verão e primavera não foi observado nenhuma estrutura acerca do Vórtice de Vitória (Figura 10 a Figura 12). A recorrência do Vórtice de Vitória, que demarca os campos climatológicos, sugere uma modulação na formação do vórtice entre o final do verão e primeira metade do outono. Desse modo, seus resultados indicam modulação na formação do Vórtice de Vitória em março e abril. Ao autor conclui então que o Vórtice de Vitória não é uma estrutura permanente no Embaiamento de Tubarão e que esta ocorre em apenas alguns meses do ano, mais especificamente em março e abril com maior recorrência. Costa (2007) observa ainda que algumas questões, como quais seriam os mecanismos de formação do Vórtice de Vitória, a relação entre o fluxo da Corrente do Brasil e a ocorrência do vórtice ainda merecem esclarecimentos.

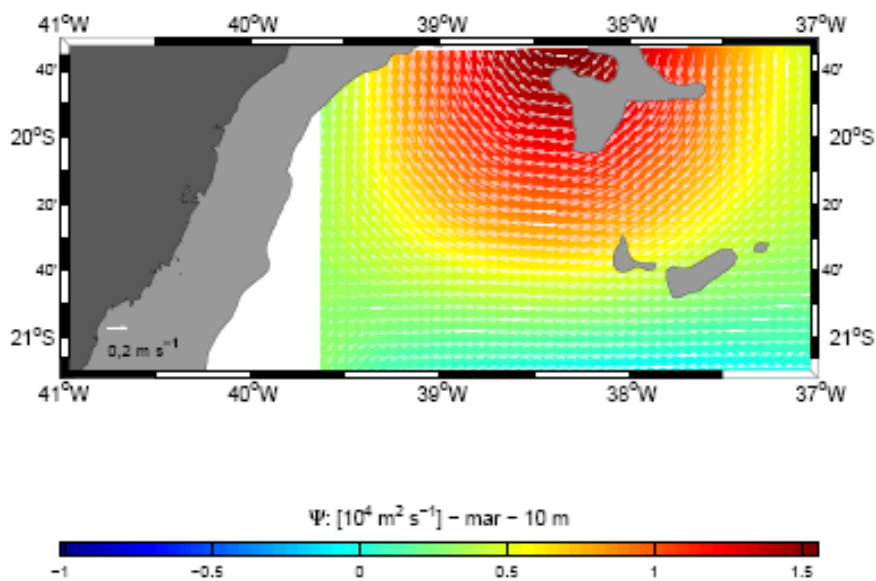
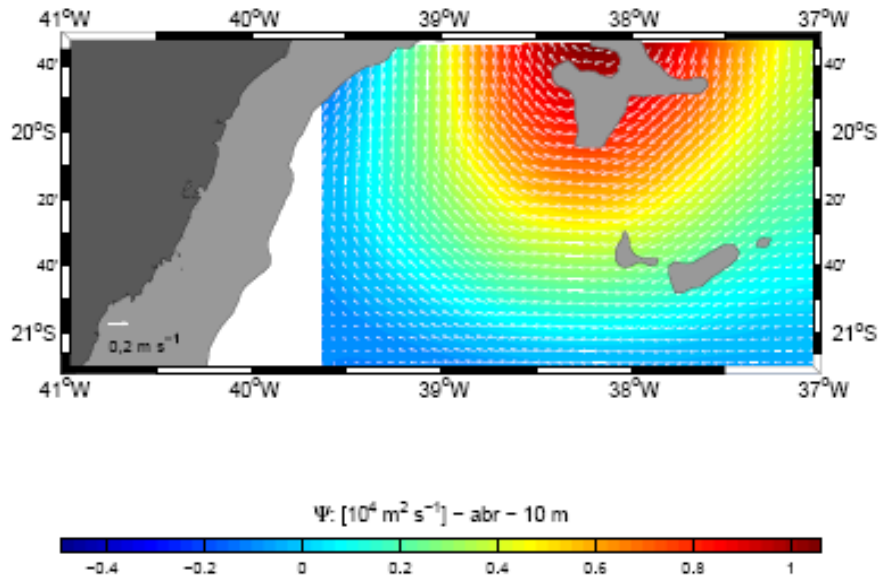
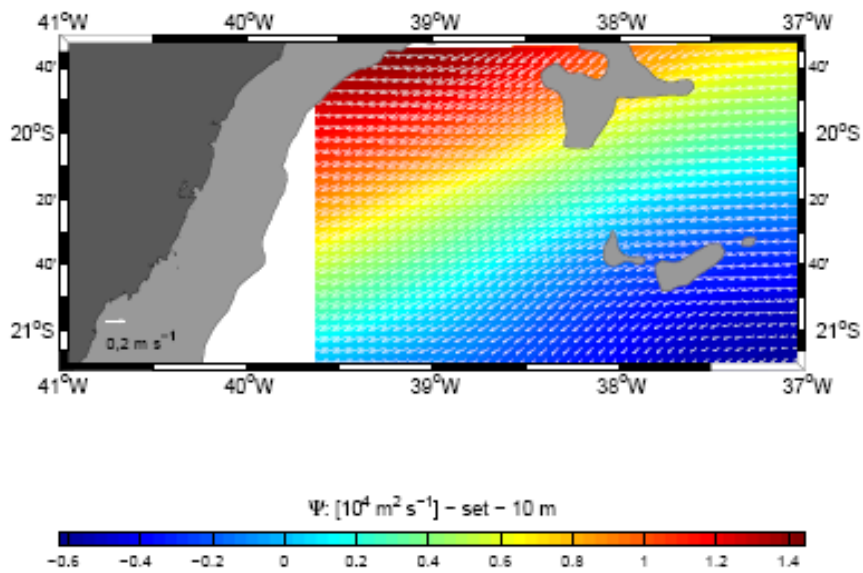


Figura 10 - Campos de função de corrente (m/s) climatológico para o mês de março. Retirado de Costa (2007).



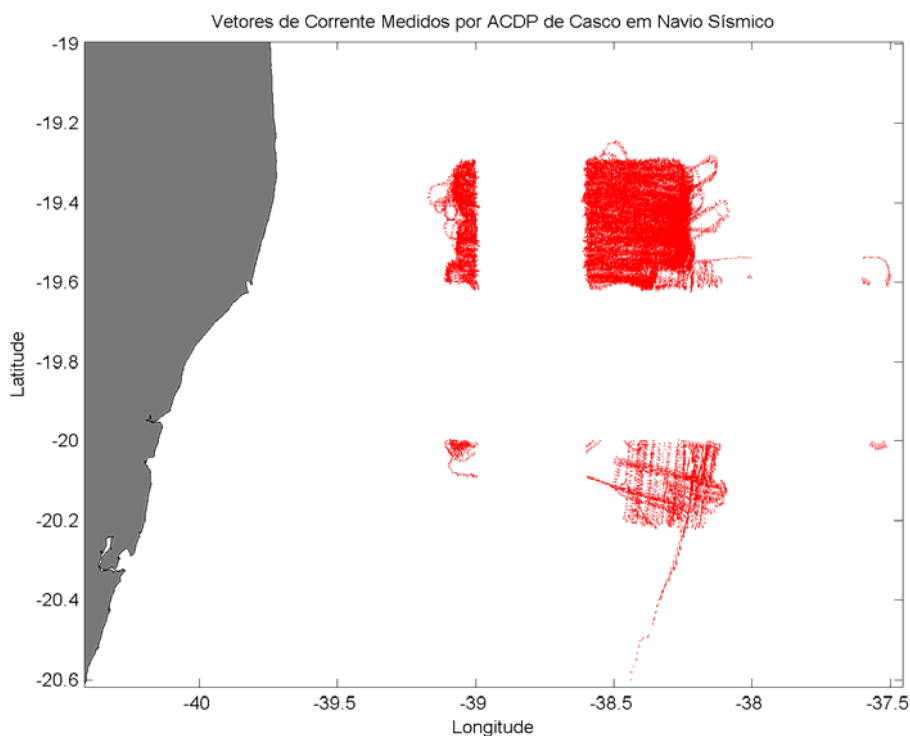


**Figura 11 - Campos de função de corrente (m/s) climatológico para o mês de abril. Retirado de Costa (2007).**



**Figura 12 - Campos de função de corrente (m/s) climatológico para o mês de setembro. Retirado de Costa (2007).**

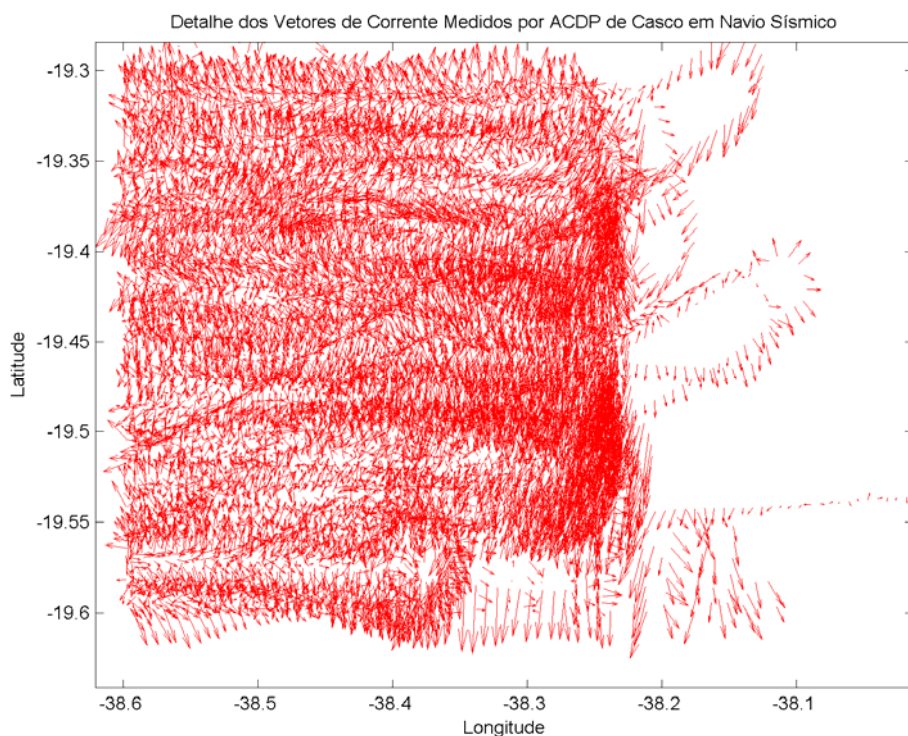
Outra fonte de dados relevante para a análise das correntes na região foi obtida durante a realização de estudos sísmicos na região do empreendimento da Perenco entre os dias 09/12/2008 a 27/03/2009. Nessa ocasião foram medidos dados de corrente utilizando um ADCP de casco, obtendo-se informações a cada 30 segundos nos primeiros 20 metros de profundidade. Como tratam-se de dados medidos, carentes nessa região, estes foram analisados para tentar caracterizar a circulação superficial, ainda que de forma preliminar devido ao curto período de medições e também verificar a presença do Vórtice de Vitória. A Figura 13 mostra a região onde foi feito o levantamento de dados de corrente.



**Figura 13 – Região na qual foram realizadas medições de corrente com ADCP de casco, no período entre 09/12/2008 a 27/03/2009.**

As medições realizadas possuem características lagrangeanas, porém com trajetórias determinadas pelo navio, o que dificulta análises sinóticas, praticamente impossibilitando a verificação de presença de estruturas como vórtices. Isso ocorre porque o navio percorre pequenos espaços (em comparação com a escala sinótica) em um mesmo dia e a medição seguinte pode ser realizada em locais distantes dos realizados anteriormente. Outra característica que impossibilitou a detecção do Vórtice de Vitória por esse conjunto de dados foi a localização das medições, um pouco mais a norte do que a região ocupada na maioria das vezes pelo Vórtice, cujo centro em média está a 20,5° S, ou seja, a cerca de 100 km das medições, o que estaria fora do raio de influência do Vórtice de Vitória. No entanto, análises dos primeiros momentos estatísticos puderam ser realizadas, trazendo informações importantes sobre as correntes da região, no período entre dezembro e março (verão). Os dados mostram que a corrente superficial da região amostrada possui,

na maioria das vezes direção S/SW e velocidades entre 0,4 e 0,5 m/s. No entanto, o padrão de circulação é complexo, como pode ser visto na Figura 14, que mostra todos os vetores de corrente obtidos. É importante ressaltar, no entanto que ao contrário do que a figura possa sugerir essas correntes não necessariamente existiram ao mesmo tempo. Na Figura 15, Figura 16 e na Tabela 2 são apresentados os resultados dos primeiros momentos estatísticos das correntes medidas.



**Figura 14 – Detalhe da região na qual foram realizadas medições de corrente com ADCP de casco, no período entre 09/12/2008 a 27/03/2009, mostrando os vetores de corrente em superfície.**

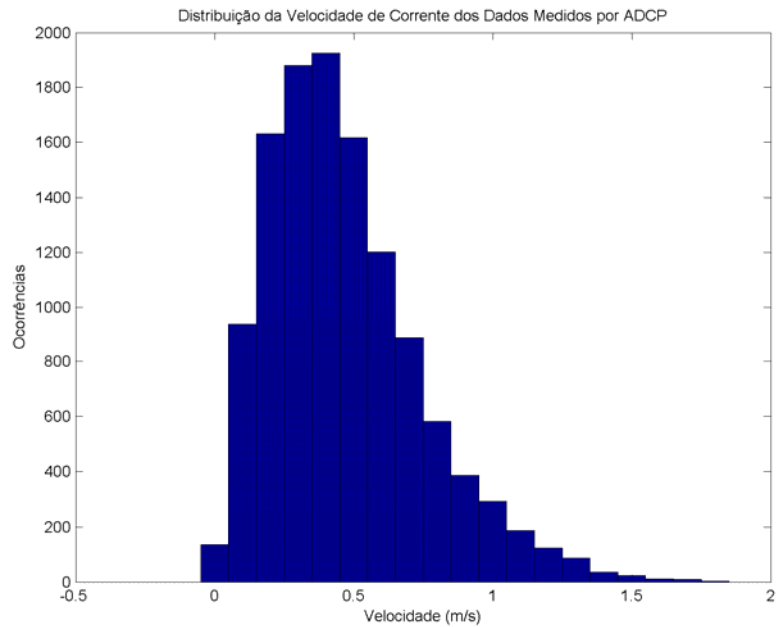


Figura 15 – Distribuição da velocidade de corrente obtida pelas medições feitas com ADCP de casco, no período entre 09/12/2008 a 27/03/2009.

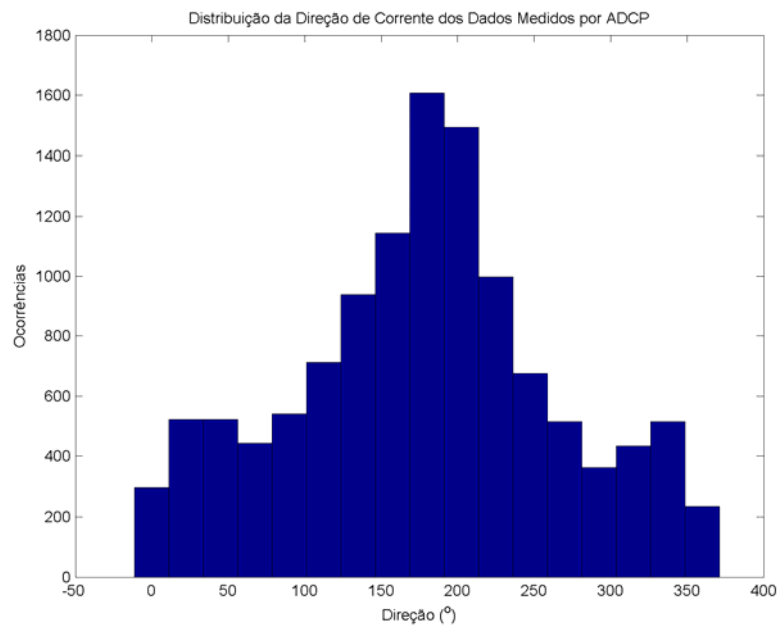


Figura 16 – Distribuição da direção de corrente obtida pelas medições feitas com ADCP de casco, no período entre 09/12/2008 a 27/03/2009.

**Tabela 2: Primeiros momentos estatísticos obtidos a partir das medições feitas com ADCP de casco, no período entre 09/12/2008 a 27/03/2009.**

vel. média (m/s)	mediana (m/s)	moda (m/s)	desv. padrão (m/s)	vel. máx. (m/s)	vel. mín. (m/s)	dir. média (°)	Mediana (°)	moda (°)
0,47	0,42	0,32	0,27	1,79	0,01	177,7	179,5	189,0

Baseado nas conclusões dos trabalhos realizados sobre a circulação de meso-escala, podemos levantar as principais conclusões consensuais:

O Vórtice de Vitória não parece ser permanente de fato;

Sua ocorrência é maior no período verão/outono e menor no inverno;

Sua estrutura vertical se mantém até profundidades entre 400 e 500m, aproximadamente.

Possui importância local e regional, pois proporciona um aumento na concentração de nutrientes na região, podendo inclusive ser exportador dessas propriedades, caso seu movimento para norte, além da Cadeia-Vitória-Trindade seja real.

O que ainda deve ser esclarecido:

Existe sazonalidade na ocorrência do Vórtice de Vitória?

Qual(is) o(s) mecanismo(s) de formação do Vórtice de Vitória?

Qual a relação entre o Vórtice de Vitória e o transporte da Corrente do Brasil?

Existe realmente um movimento em direção ao norte do Vórtice de Vitória, que possa ultrapassar a Cadeia Vitória-Trindade?

#### IV. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com o intuito de estudar a circulação de meso-escala e tentar elucidar alguns dos aspectos levantados no item anterior, foi implementado um modelo numérico hidrodinâmico (Regional Ocean Model – ROMS), que pudesse reproduzir as condições oceanográficas da Bacia do Espírito Santo, apresentando assim evidências da formação, permanência e outras características da circulação de meso-escala dessa região.

##### IV.1. O Modelo ROMS

Para a simulação hidrodinâmica foi utilizado o modelo conhecido como Regional Ocean Modeling System - ROMS (HAIDVOGEL ET AL., 2008). O ROMS é um modelo oceânico de superfície livre, coordenadas seguidoras de terreno e equações primitivas,



utilizado amplamente pela comunidade científica em uma ampla gama de aplicações (e.g., Haidvogel et al., 2000; Marchesiello et al., 2003; Peliz et al., 2003; Di Lorenzo, 2003; Dinniman et al., 2003; Budgell, 2005; Warner et al., 2005a, b; Wilkin et al., 2005). Os algoritmos não lineares que formam o cerne computacional do ROMS são descritos em detalhes em Shchepetkin e McWilliams (2003, 2005). O ROMS inclui modelos acoplados para processos biogeoquímicos, bio-ópticos, transporte de sedimentos e também inclui diversos regimes de mistura vertical (Warner et al., 2005a), níveis múltiplos de aninhamento e grades compostas.

Para minimizar o gasto computacional, as equações hidrostáticas primitivas de momento são resolvidas utilizando um passo de tempo dividido explicitamente, necessitando um tratamento especial e o acoplamento entre os modos barotrópico (rápido) e baroclínico (lento). É realizado um número finito de passos de tempo barotrópicos, onde cada passo baroclínico é efetuado para desenvolver as equações de superfície livre e momento verticalmente integrado. No intuito de evitar erros associados com o aliasing de frequências resolvidas pelos passos barotrópicos, mas não pelo passo baroclínico, são realizadas médias temporais nos campos baroclínicos antes de serem trocados com os valores obtidos com um passo baroclínico de maior duração. Um filtro de tempo cossenoidal, centrado no novo nível de tempo, é usado para fazer as médias dos campos barotrópicos (Shchepetkin and McWilliams, 2005). Além disso, o passo de tempo separado é forçado a manter a conservação de volume e a preservação de consistência, propriedades que são necessárias para as equações de traçadores (p.ex. temperatura e salinidade) (Shchepetkin and McWilliams, 2005). Atualmente, todas as equações em duas e três dimensões são discretizadas no tempo usando um algoritmo de passo de tempo, previsor (Leap-Frog) e corretor (Adams-Molton), de terceira ordem que é altamente robusto e estável. A estabilidade reforçada pelo esquema permite passos de tempo mais longos, por um fator de aproximadamente quatro, o qual mais do que compensa o custo elevado do algoritmo previsor-corretor.

As equações primitivas são discretizadas verticalmente sobre a variável topografia utilizando coordenadas seguidoras de terreno "esticadas" (Song and Haidvogel, 1994). As coordenadas esticadas permitem o aumento da resolução em áreas de interesse, como a termoclina e as camadas limites de fundo. A grade padrão utiliza diferenças finitas de segunda ordem, centradas em uma grade vertical irregular. Opções para grades de ordens maiores são disponíveis via uma reconstrução conservativa de derivadas verticais (Shchepetkin e McWilliams, 2005). Esta classe de modelo apresenta grande sensibilidade à topografia, resultando em erros do gradiente de pressão. Estes erros aumentam devido à divisão do termo do gradiente de pressão em um componente ao longo da coordenada sigma e uma correção hidrostática (para maiores detalhes, veja Haidvogel e Beckmann, 1999). O algoritmo numérico no ROMS é desenvolvido para minimizar tais erros (Shchepetkin e McWilliams, 2003).

Na horizontal, as equações primitivas são calculadas usando coordenadas ortogonais curvilíneas ajustadas ao contorno em uma grade C de Arakawa irregular. A formulação geral das coordenadas curvilíneas incluem as coordenadas cartesianas e as esféricas. Contornos de costa também podem ser especificados como uma grade discretizada finitamente pela máscara terra/mar. Assim como na vertical, a grade horizontal utiliza diferenças finitas de segunda ordem centradas. Entretanto, o código é desenvolvido para fazer a implementação de grades de maior ordem facilmente.

Existem várias opções para esquemas de advecção: diferenças centradas de segunda e quarta ordens; e terceira ordem, upstream biased. Este último esquema, padrão do



modelo, apresenta uma dissipação hiper-difusa dependente da velocidade como erro dominante de truncamento (Shchepetkin e McWilliams, 1998). Estes esquemas são estáveis para a metodologia de previsão e correção do modelo. Além disso, há uma opção para representação da advecção vertical, utilizando spline parabólico conservativo, que tem propriedades de dispersão similares a um esquema convencional preciso de oitava ordem.

Várias parametrizações de escala sub-grade estão presentes no ROMS. A mistura vertical de momento e traçadores pode ocorrer no níveis verticais, superfícies geopotenciais (profundidade constante), ou superfícies isopícnais (densidade constante). O operador de mistura pode ser harmônico (arranjo de 3 pontos) ou biharmônico (arranjo de 5 pontos). Em Haidvogel e Beckmann (1999) podem ser obtidos maiores esclarecimentos sobre estes operadores.

A parametrização vertical de mistura no ROMS pode ser tanto por esquemas de fechamento locais ou não-locais. Os esquemas de fechamento locais são baseados nas equações de energia cinética turbulenta de nível 2.5 de Mellor and Yamada (1982) e a parametrização de Escala Genérica de Dimensão (EGD) (Umlauf and Burchard, 2003). O esquema de fechamento não-local é baseada na formulação de camada limite, perfil-K definida por Large et al. (1994). O esquema de perfil-k tem sido expandido para incluir tanto os limites de camadas de superfície quanto os de fundo. O EGD é um modelo de turbulência de duas equações que permite uma ampla variedade de fechamentos de mistura vertical, incluindo os esquemas k-kl (Mellor-Yamada level 2.5), k-e e k-w. Muitas funções de estabilidade têm sido empregadas para favorecer a flexibilidade. Um estudo recente (Warner et al., 2005a) avaliou a performance desses fechamentos de turbulência no ROMS, em aplicações de transporte de sedimentos idealizado. Além disso, existe um esquema de camada limite de fundo onda/corrente que provoca o estresse de fundo (Styles and Glenn, 2000) e o transporte de sedimentos, que tem ganhado importância em aplicações costeiras.

Atualmente, a camada limite de interação ar-mar utilizada no ROMS, baseia-se na parametrização de Fairall et al. (1996). Esta foi adaptada do algoritmo COARE (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) para o cálculo de fluxos de momentum de superfície, calor sensível, e calor latente. Esta camada limite é utilizada para o acoplamento com modelos atmosféricos.

O ROMS é um código altamente moderno e modular escrito em F90/95. Utiliza pré-processamento C (CPP) para ativar as diversas opções físicas e numéricas. Muitos padrões de códigos têm sido estabelecidos para facilitar a leitura, manutenção e portabilidade do modelo. Todas as variáveis do modelo de estado são dinamicamente alocadas e passadas como argumento das rotinas computacionais.

O conjunto de equações governantes do ROMS é formado pelas equações primitivas do movimento, fazendo uso das aproximações de Boussinesq, plano  $\beta$  e hidrostática. Referenciando-se a um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais com valores positivos de x no sentido leste e de y no sentido norte e realizando a transformação para coordenada sigma, tem-se o conjunto de equações básicas utilizadas pelo ROMS.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_o} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \quad (3)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_o} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \quad (4)$$

Equação da conservação de calor:

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta UD}{\partial x} + \frac{\partial \theta VD}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right] + F_{\theta} - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5)$$

Equação da conservação de sal:

$$\frac{\partial S D}{\partial t} + \frac{\partial S U D}{\partial x} + \frac{\partial S V D}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_s \quad (6)$$

Equação de estado da água do mar:

$$\rho = \rho(S, \theta, P) \quad (7)$$

Nestas equações  $D = H + \eta$ ,  $U$  e  $V$  são os componentes zonal e meridional da velocidade, respectivamente,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho$  é a densidade,  $\rho_o$  é a densidade de referência,  $\rho'$  é a anomalia de densidade,  $\theta$  é a temperatura potencial,  $S$  é a salinidade,  $KM$  é o coeficiente de viscosidade cinemática

vertical,  $KH$  é o coeficiente de difusão de calor vertical,  $\partial R / \partial z$  é o termo de fluxo de calor radiativo e  $\omega$  é a velocidade vertical transformada, correspondente à componente de velocidade normal às superfícies sigma. Essa transformação se dá segundo:

$$W = \omega + U \left( \sigma \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left( \sigma \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial \sigma} \quad (8)$$

#### IV.2. Domínio do Modelo

O domínio do modelo foi estabelecido de maneira a incluir a região dos Bancos de Arolhos e Royal Charlotte ao norte, a Cadeia Vitória Trindade a leste e possuir extensão suficiente para o desenvolvimento e deslocamento do Vórtice Vitória. Foi desenhada uma grade curvilínea (Figura 17) com resolução espacial variável entre 2 e 4km na região dos Blocos da Perenco, do Vórtice de Vitória e da costa até pouco mais de cerca de 30 km em regiões de menor interesse (Figura 18 e Figura 19). A grade possui ainda 30 níveis verticais sigma. Dessa forma, construiu-se uma grade com resolução espacial adequada para os objetivos do estudo ao mesmo tempo que pode-se otimizar o número de pontos utilizados, melhorando o desempenho computacional.

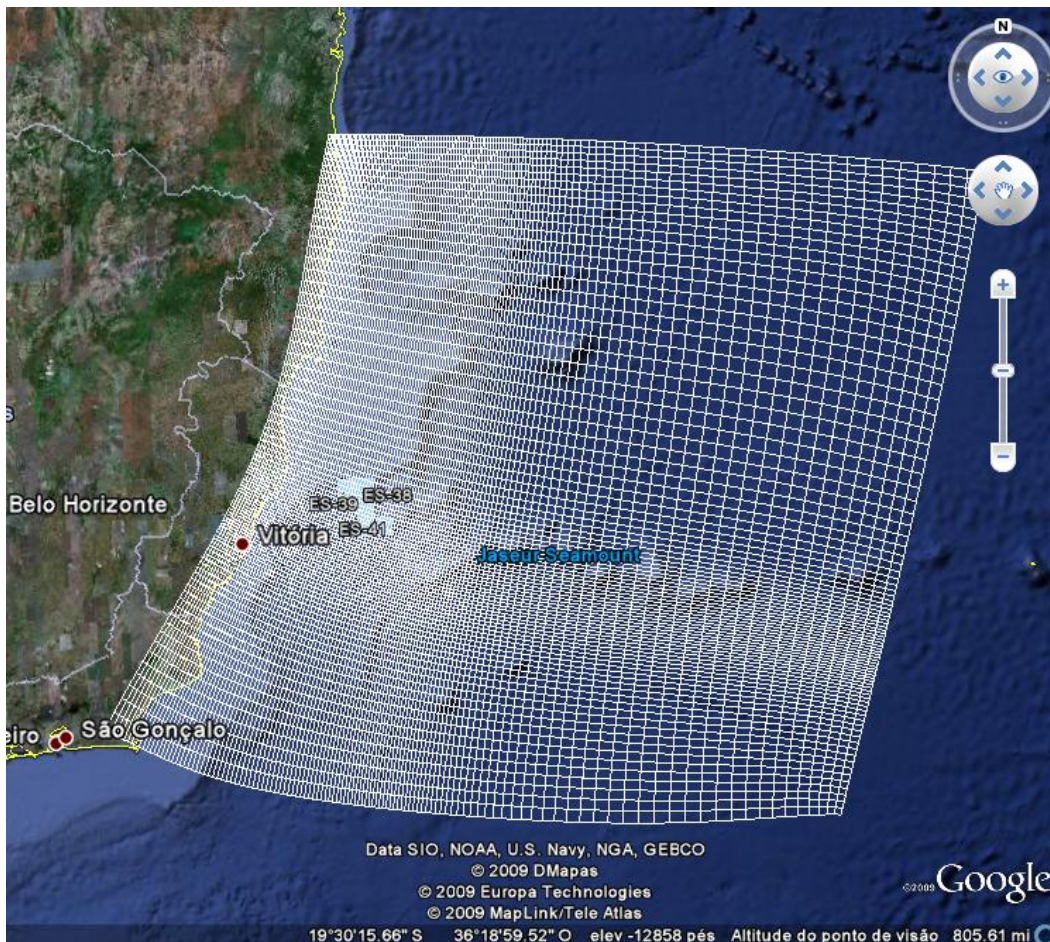
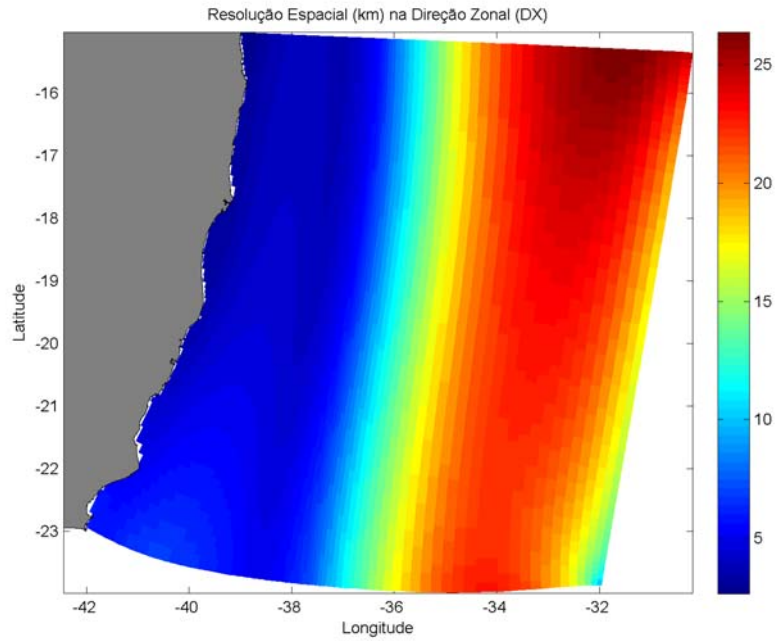
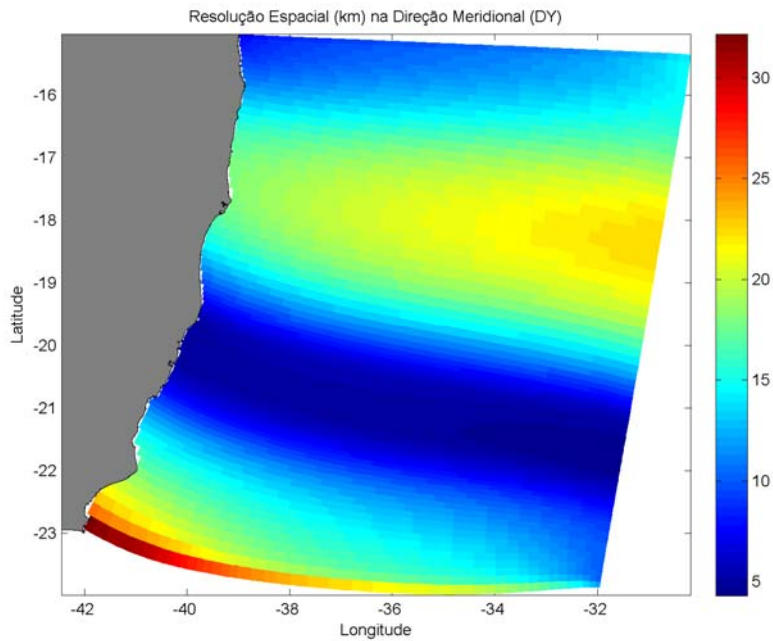


Figura 17 – Grade numérica curvilínea utilizada nas simulações.





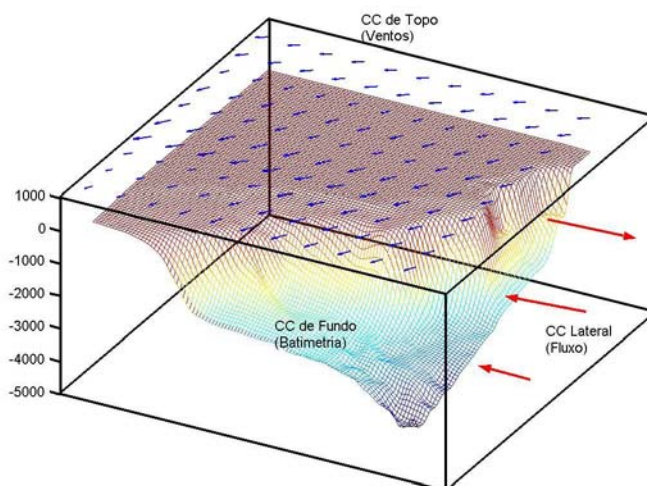
**Figura 18 – Resolução espacial (km) na direção zonal (DX) da grade numérica utilizada nas simulações.**



**Figura 19 – Resolução espacial (km) na direção meridional (DY) da grade numérica utilizada nas simulações.**

### IV.3. Condições de Contorno

Quando se utiliza um modelo de área limitada, como é o caso do POM, um dos fatores primordiais é uma escolha adequada das condições de contorno do modelo (Figura 20). Tal escolha deve ser realizada com bastante critério, uma vez que os resultados serão consequência das condições escolhidas.

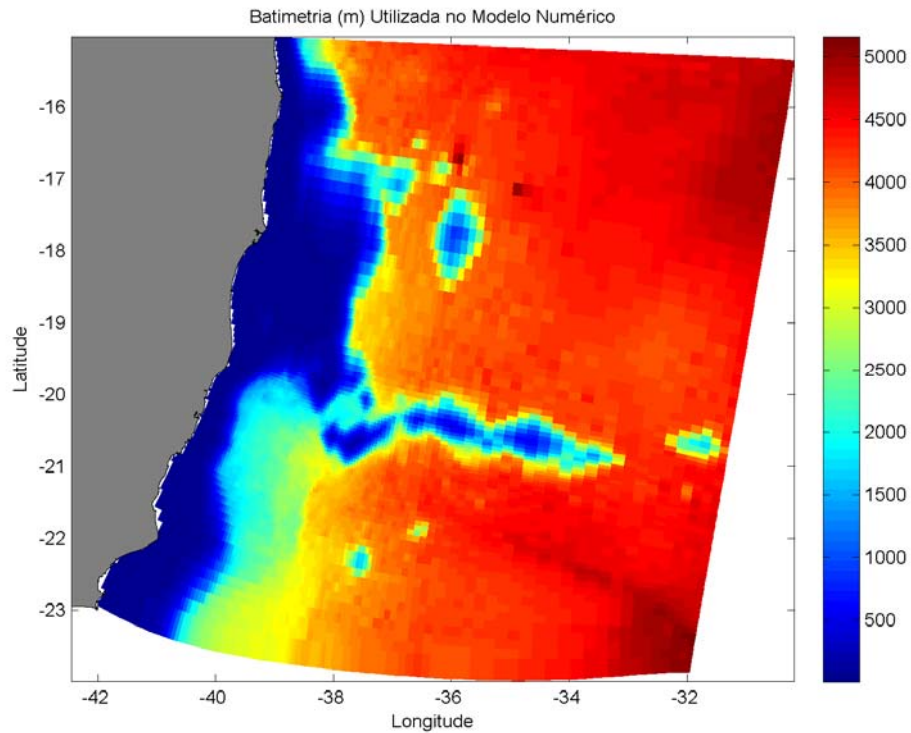


**Figura 20 - Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.**

#### IV.3.1. Condição de Contorno de Fundo

Os dados de batimetria da região foram obtidos da base de dados STRM30+, que possui batimetria e topografia globais com resolução de 30 segundos de arco (cerca de 900m). Esses dados foram então interpolados para a grade do modelo método de Kriging. Após tratamento com um filtro gaussiano bidimensional, obteve-se a matriz de topografia do fundo utilizada no modelo hidrodinâmico (Figura 21).





**Figura 21 - Batimetria da grade do modelo numérico.**

#### *IV.3.2. Condição de Contorno de Superfície*

O modelo utiliza dados de tensão de cisalhamento do vento ( $\tau$ ) como condição de contorno de superfície. Esse valor é obtido através de dados de velocidade e direção do vento, utilizando a parametrização proposta por Mascarenhas (1985), que relaciona esses dois parâmetros através da equação a seguir:

Sendo  $|V|$  o módulo da velocidade (m/s) do vento a 10 m tem-se, para:

$$0 < |V| < 6 \rightarrow \tau = 0,29 + \left(\frac{3,1}{|V|}\right) + \left(\frac{7,7}{|V|^2}\right) \quad 0.1$$

$$|V| > 6 \rightarrow \tau = 0,6 + (0,07 * |V|) \quad 0.2$$

Daí, são obtidos os componentes zonal ( $\tau_x$ ) e meridional ( $\tau_y$ ) da tensão de cisalhamento do vento:

$$\tau_x = -u * |V| * \tau * \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}} \quad 0.3$$

$$\tau_y = -v * |V| * \tau * \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}} \quad 0.4$$

Onde  $\rho_{ar}$  é a densidade média do ar e  $\rho_{água}$  é a densidade de referência da água do mar no local.

Para contemplar o efeito do vento sobre a corrente, foram utilizados os dados de vento obtidos a partir da base de dados do NCEP (Reanálise).

#### *IV.3.3. Condição de Contorno Lateral*

As condições de contorno abertas (CCA) em modelagem oceânica possuem impacto crucial na solução do interior do domínio. Isso é em boa parte devido ao fato de que as escalas de tempo associadas às propagações de ondas através da região oceânica são comparáveis com o comprimento da simulação em si, quando não são muito menores. Uma onda barotrópica, por exemplo, pode cruzar uma região com profundidade de 100m e largura de 100 km em cerca de 1 hora e uma onda interna com velocidade típica de 1 m/s, a cruza em cerca de 1 dia. Isso é muito menor do que a duração de uma previsão típica, que é de no mínimo 1 semana. Além disso, é fato conhecido que as CCAs levam a soluções matematicamente mal-postas (Oliger e Sundström, 1978) e que não existem soluções genéricas. Atualmente, os problemas de condições de contorno abertas podem ser considerados como os aspectos mais desafiadores da modelagem numérica de oceano (Marsaleix et al., 2006).

As CCAs possuem basicamente dois objetivos. Primeiramente, estabelecer as condições de entrada no domínio para forçar a solução do interior com campos externos, obtidos de observações ou de modelos de maior escala. Ao mesmo tempo, estas devem funcionar como saída, permitindo que as ondas sejam irradiadas para fora ou que as massas d'água saiam do domínio sem que haja reflexões espúrias nas fronteiras. No entanto, é bastante difícil satisfazer a ambos os objetivos simultaneamente e os modelos tendem a escolher localmente qual deles irá utilizar, de acordo com o caráter de entrada ou saída da dinâmica ali presente. A direção da propagação da onda é freqüentemente obtida

através da inversão de uma equação de propagação de onda baseada nas variáveis modeladas nas vizinhanças da fronteiras abertas. O caráter de entrada ou saída da dinâmica local é então determinado pelo sinal da velocidade de fase da onda calculada na direção normal à fronteira (Orlanski, 1976).

A maioria das condições de contorno foram amplamente estudadas nos últimos 20 anos (Palma e Matano 1998, 2000). Esses estudos fornecem comparações entre diversas CCAs em casos bem determinados (propagação de ondas livres, jatos costeiros forçados por vento, propagação de tempestades etc.) para os quais existe uma solução de referência (soluções analíticas ou mesmo numéricas validadas com observações). Em resumo, os esquemas mais utilizados podem ser divididos em três classes (Palma e Matano, 1998): 1) condições radiativas (Blumberg e Kantha, 1985), 2) Métodos característicos (Hedstrom, 1979), 3) Métodos de relaxação (Martinsen e Engedahl, 1987).

Nesse modelo hidrodinâmico são utilizadas CCAs dos 3 tipos. Para velocidades baroclínicas (tanto  $u$ , quanto  $v$ ), temperatura e salinidade nas fronteiras norte e sul, foram utilizadas CCAs com método de relaxação (Zavatarelli, 1999), que será descrita a seguir, enquanto na fronteira leste foi utilizada uma condição radiativa (Orlanski, 1976) para estas mesmas variáveis (vide resposta da questão 2). Já para as velocidades barotrópicas nas 3 fronteiras, utilizou-se a condição proposta por Flather (1976):

$$U_f = -\sqrt{g/h} * (\eta - \eta_{ext}) \quad 15$$

Onde  $U_f$  é a velocidade barotrópica na fronteira,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h$  é a profundidade e  $\eta$  é a elevação do nível do mar, dentro e na fronteira do domínio.

As CCAs para as velocidades baroclínicas, temperatura e salinidade seguiram o procedimento proposto por Zavatarelli, (1999), no qual dados de um modelo de maior escala (ECCO-MIT, nesse caso) são prescritos nas fronteiras do modelo sendo interpolados linearmente no tempo.

As temperaturas e salinidades nas imediações da fronteira sul e norte são relaxadas para os dados climatológicos do ECCO-MIT conforme Ezer & Mellor (2000):

$$\phi_j^{n+1} = \phi_j^{n+1} + cff * (\phi_{clim} - \phi_j^{n+1}) \quad 16$$

Onde:

$\Phi$  representa a temperatura ou salinidade;

$J$  é o índice da linha, e nesse caso, a condição é aplicada nas dez linhas mais próximas das fronteiras;

$n$  representa o tempo (sendo portanto  $n+1$  o tempo avançado);

$\Phi_{clim}$  representa dados extraídos do ECCO;

$cff$  é o termo de relaxação, dado por:

$$c_{ff} = c_1 - (c_1 - c_2) * \pm(J - B) / 10 \quad 17$$

Onde:

B representa a linha correspondente à fronteira norte ou sul;

c1 e c2 são termos de relaxação temporal, dados por:

$$C_1 = 2 * dt_i / srt \quad 18$$

$$C_2 = 2 * dt_i / wrt \quad 19$$

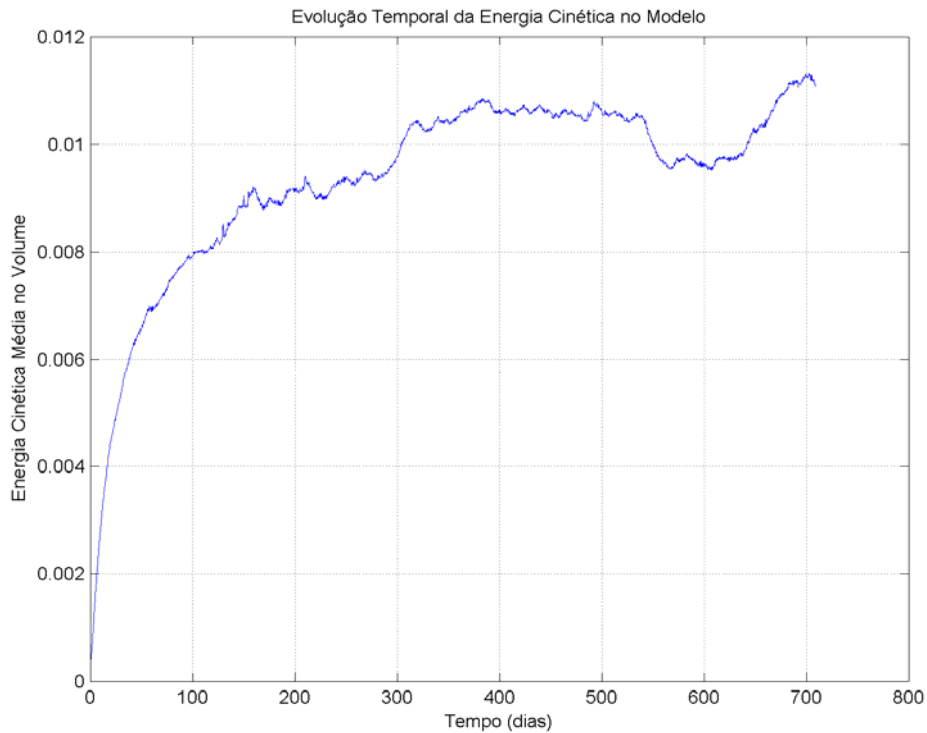
Onde dti é o passo de tempo interno do modelo, srt e wrt são os tempos de relaxação. Nesse caso, foi utilizado srt = 5 dias e wrt = 30 dias.

Com isso, obtém-se uma "zona de relaxação" nas fronteiras, na qual os dados vão sendo forçados para valores climatológicos em períodos que variam de 5 a 30 dias, dependendo da distância da fronteira.

O modelo possui três fronteiras abertas (norte, sul e leste) e uma fechada (oeste). Na fronteira fechada foram utilizadas condições de contorno conhecidas como no-slip, ou seja, velocidades normais ao contorno nulas e free-slip, ou seja, velocidades tangenciais podendo ser diferentes de zero.

#### IV.4. Resultados

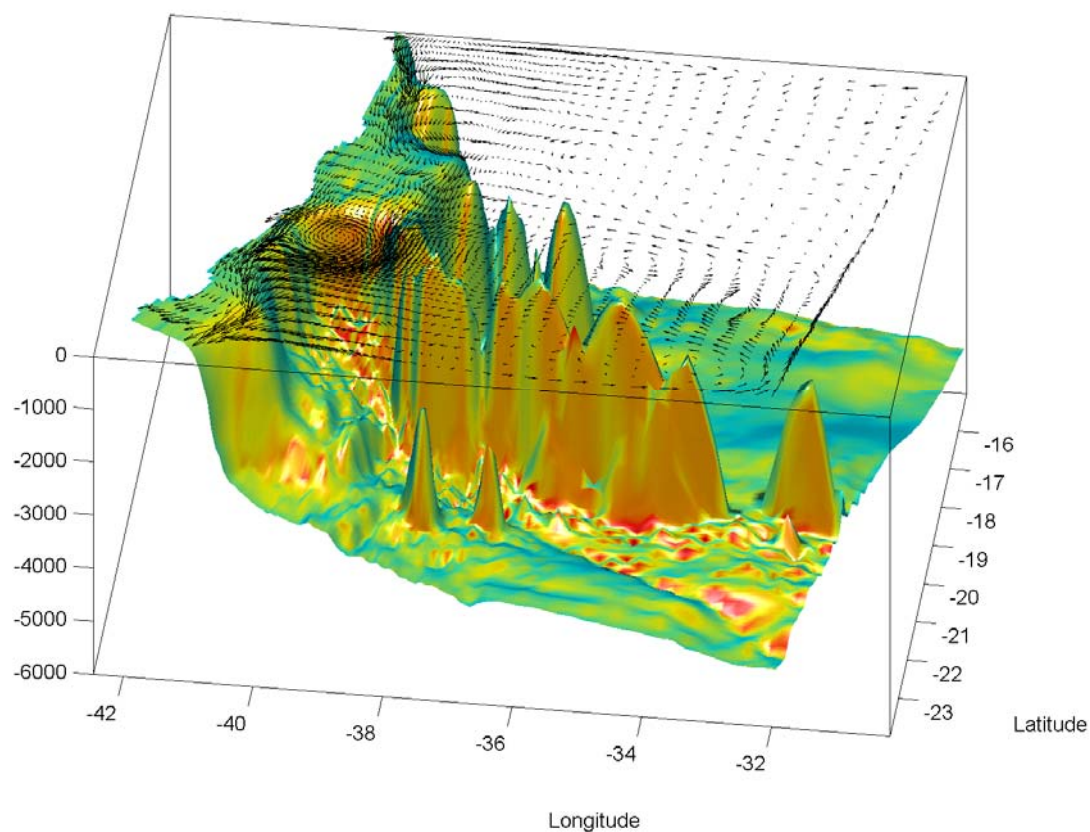
O modelo foi integrado por dois anos (2007 e 2008), sendo que o primeiro ano não foi considerado nas análises, em virtude do modelo somente ter atingido o estado de equilíbrio após cerca de 180 dias (Figura 22). Portanto, apenas os dados correspondentes ao ano de 2008 foram analisados.



**Figura 22 – Série temporal da energia cinética média no volume.**

#### *IV.4.1. O Vórtice de Vitória*

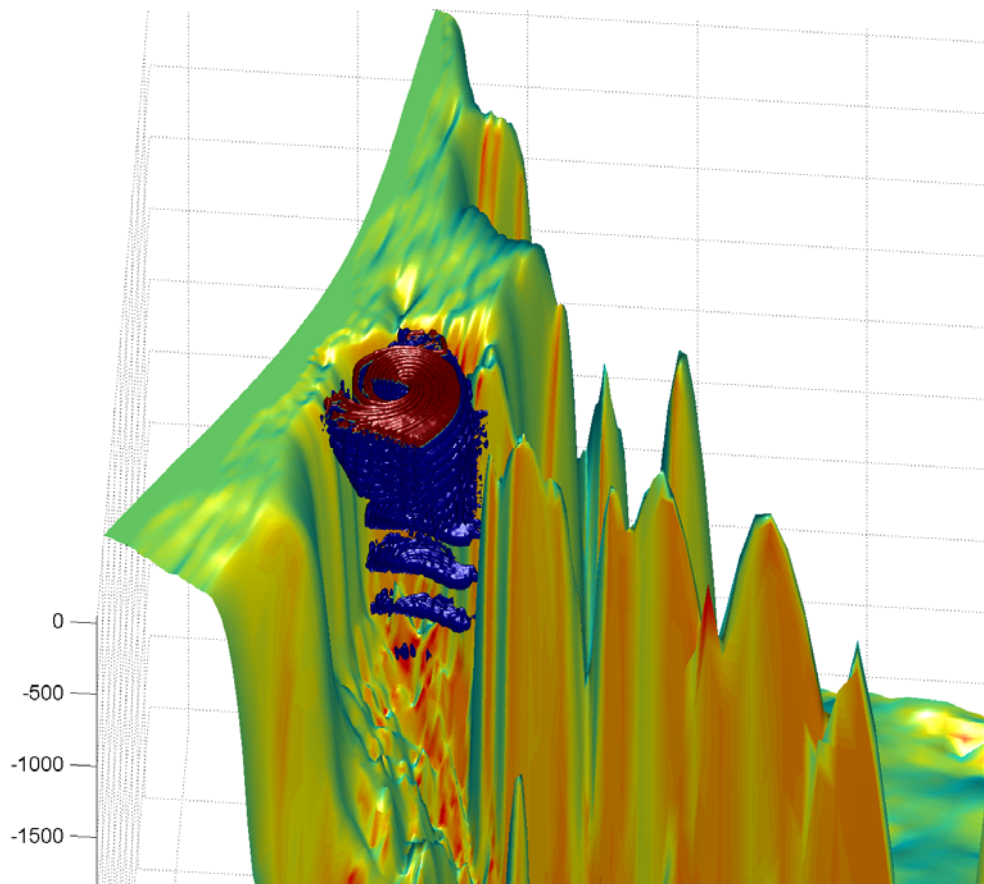
O modelo foi capaz de reproduzir o Vórtice de Vitória e suas principais características, como localização, diâmetro, velocidades e estrutura vertical. A Figura 23 mostra a circulação superficial indicando a presença do Vórtice de Vitória sobre a topografia oceânica. Essa figura ilustra algumas características importantes como a localização e interação do Vórtice de Vitória com a topografia e o fluxo da Corrente do Brasil (CB). O mecanismo de formação desse vórtice, segundo indicado pelos resultados do modelo deve-se à passagem abrupta do fluxo da Corrente do Brasil de menores para maiores profundidades. Ao norte do Vórtice de Vitória, a CB flui sobre a quebra da plataforma continental, que encontra-se alargada devido à presença do Banco de Abrolhos. Logo após o término do Banco, a plataforma estreita-se de forma contundente, formando assim uma "fossa" sobre a qual o Vórtice de Vitória se situa, chamada de Embaiamento de Tubarão (Costa, 2007). Nessa passagem de profundidades menores para maiores, ocorre o que é conhecido como estiramento do tubo de vórtice, que é o alongamento do fluxo e a sua consequente diminuição de diâmetro. Por conservação do momento angular, isso causa o aumento da velocidade tangencial do fluxo e portanto uma maior tendência à rotação (ou aumento da vorticidade relativa). Isso faz com que o fluxo gire ciclonicamente naquela região, formando o Vórtice de Vitória. Embora, esse seja o "berço" desse vórtice, este desloca-se a partir do seu local de origem, como já detectado por outros autores (vide Capítulo III) e mostrado posteriormente nesse relatório.



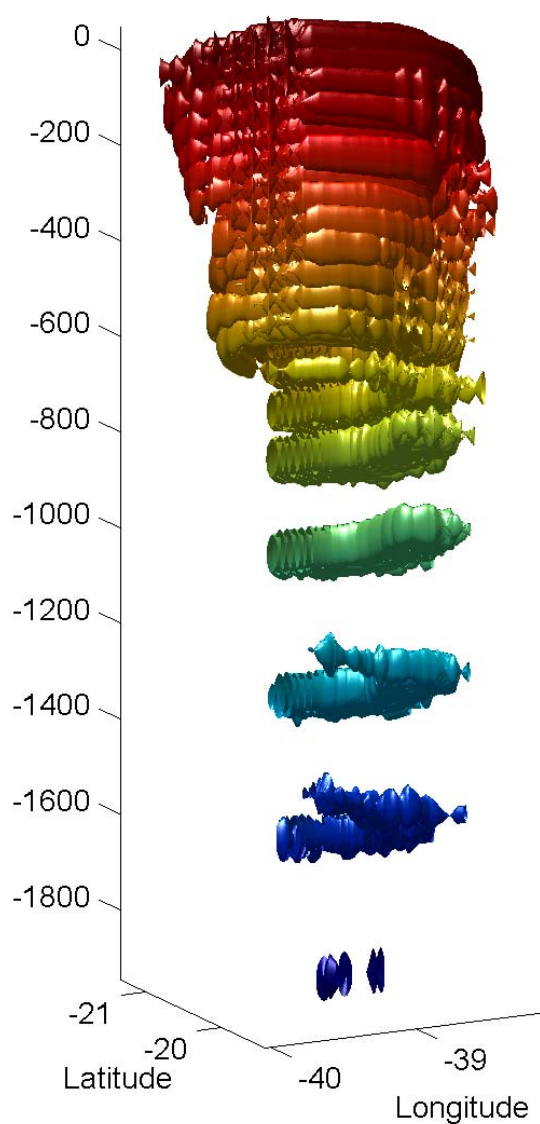
**Figura 23 – Campo de corrente superficial superposto à topografia oceânica. O eixo vertical indica a profundidade em metros.**

Para estudar mais detalhadamente o Vórtice de Vitória, optou-se por analisar separadamente a região compreendida entre as longitudes de  $39,8^{\circ}$  S e  $38,2^{\circ}$  S e as latitudes de  $21,4^{\circ}$  S e  $19,6^{\circ}$  S, onde esse vórtice encontra-se em sua maior parte. A Figura 24 mostra uma visão da estrutura vertical do vórtice e seu posicionamento em relação à topografia oceânica. Pode-se observar que o Vórtice de Vitória encontra-se “encaixado” no Embaiamento de Tubarão, tendo como obstáculos a quebra da plataforma continental a oeste, o Banco de Abrolhos a norte e a Cadeia Vitória-Trindade a leste. Pode-se notar também que o vórtice só se configura como uma estrutura coerente até aproximadamente 600m de profundidade. Esse detalhe fica ainda mais claro nas Figura 25 e Figura 26.

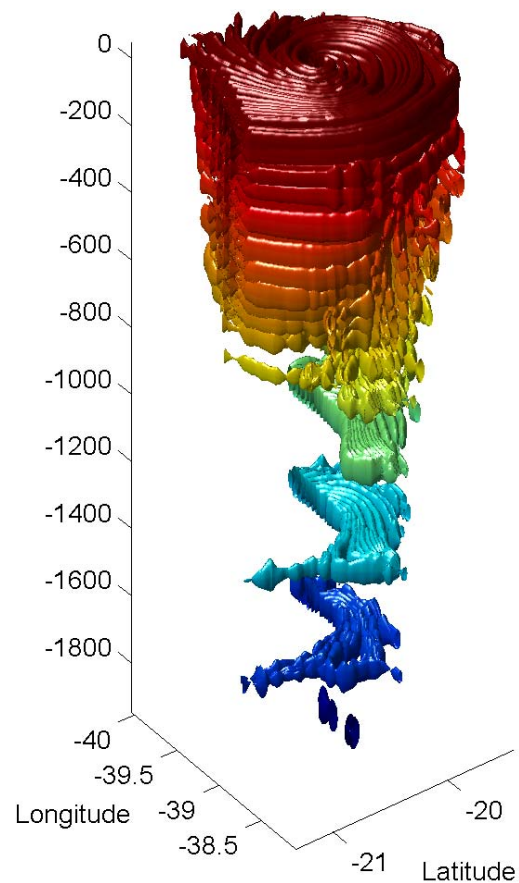




**Figura 24 – Detalhe do Vórtice de Vitória (em visão volumétrica em perspectiva), superposto à topografia oceânica. O eixo vertical indica a profundidade em metros.**

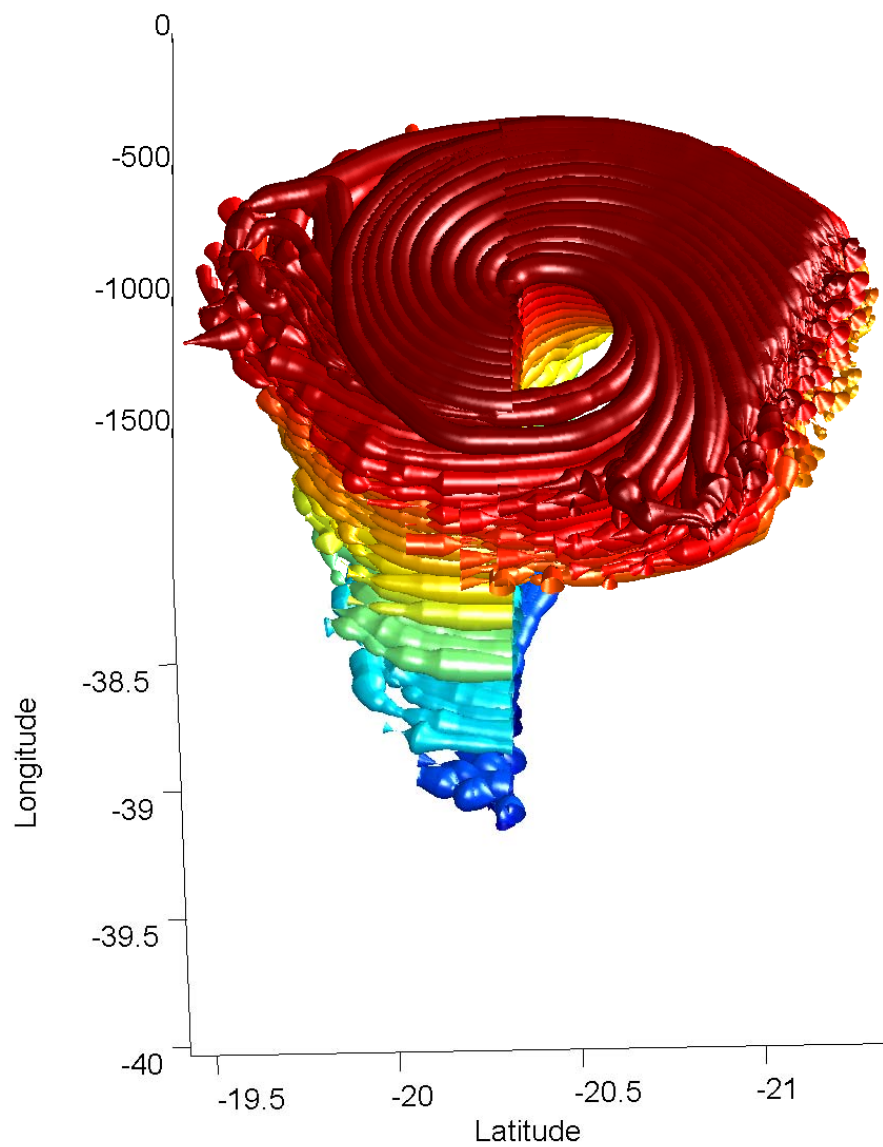


**Figura 25 – Detalhe do Vórtice de Vitória (em visão volumétrica em perspectiva) de outro ângulo, destacando a estrutura vertical. O eixo vertical indica a profundidade em metros.**

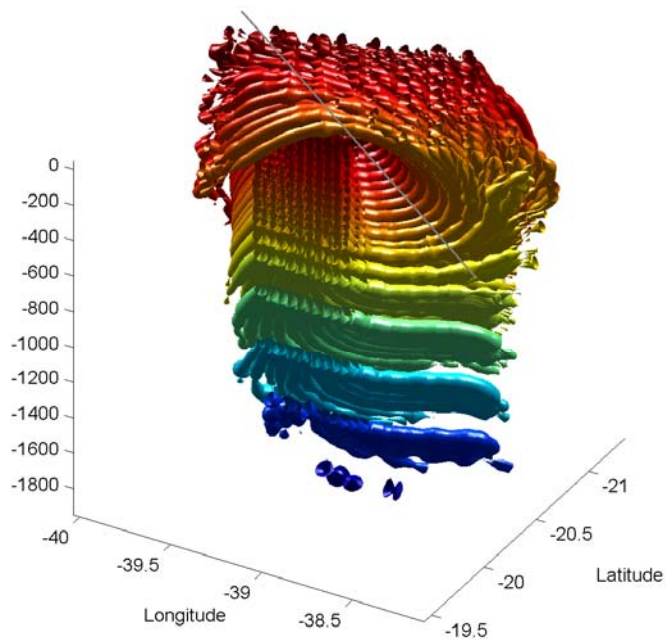


**Figura 26 – Detalhe do Vórtice de Vitória (em visão volumétrica em perspectiva) de outro ângulo, destacando a estrutura vertical. O eixo vertical indica a profundidade em metros.**

Outra característica importante sobre a estrutura tridimensional do Vórtice de Vitória, que os resultados das simulações puderam destacar, foi a inclinação do eixo vertical. Pode-se observar nas Figura 27 e Figura 28 que o eixo inclina-se em relação ao plano vertical. Não é de nosso conhecimento que tal observação já tenha sido relatada em outros estudos, sendo assim, provavelmente inédita.



**Figura 27 – Detalhe do Vórtice de Vitória (em visão volumétrica em perspectiva). O eixo vertical indica a profundidade em metros.**



**Figura 28 – Detalhe do Vórtice de Vitória (em visão volumétrica em perspectiva) de outro ângulo, destacando a inclinação do eixo vertical (indicada pela linha em cinza). O eixo vertical indica a profundidade em metros.**

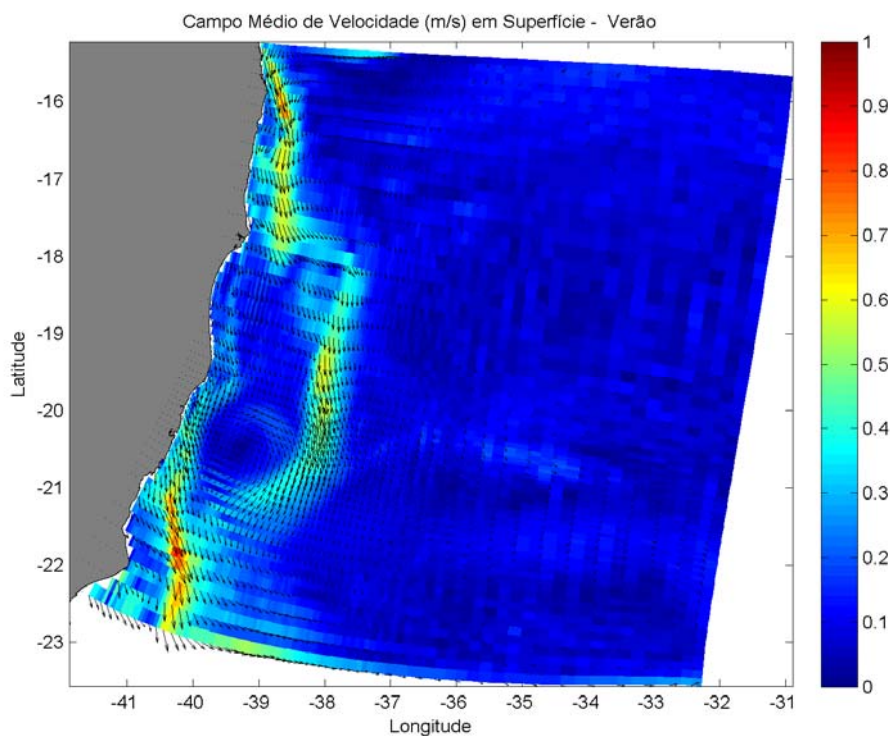


#### IV.4.2. Circulação Superficial

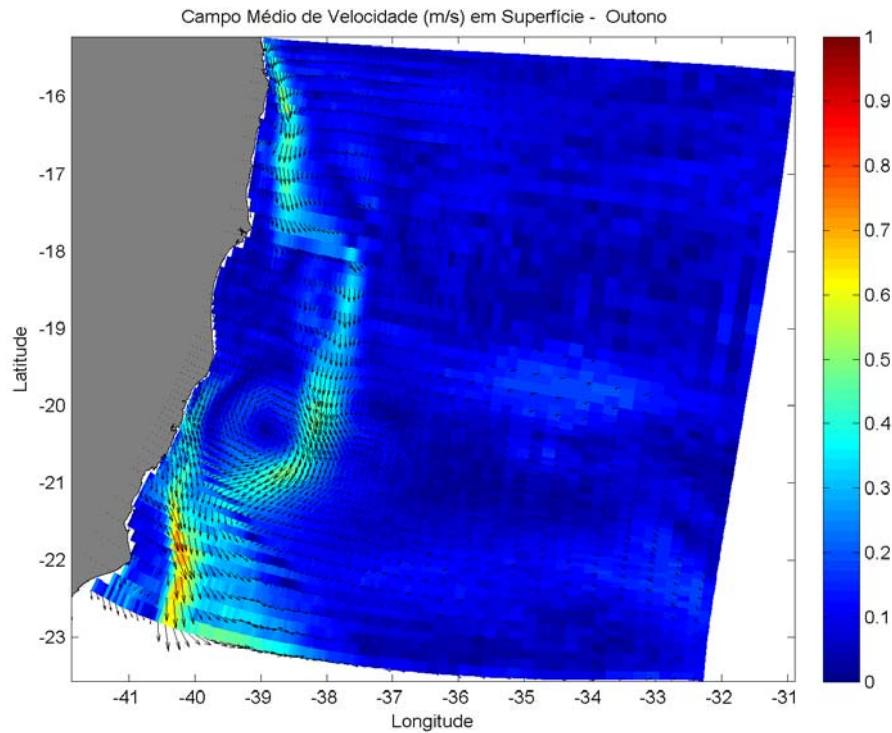
Para analisar as características espaciais e temporais da circulação da região, foram realizadas médias sazonais dos campos de velocidade superficiais e algumas características são aqui destacadas.

Durante o verão, em média, observa-se maiores velocidades associadas ao fluxo da Corrente do Brasil, chegando a atingir valores superiores a 1m/s (Figura 29). As regiões cujo fluxo da CB são mais intensos estão entre 16° S e 18° S e ao sul de 21° S.

Pode-se notar que o Vórtice de Vitória encontra-se presente nessa média, o que indica que esteve presente, senão sempre, ao menos na maior parte desse período.

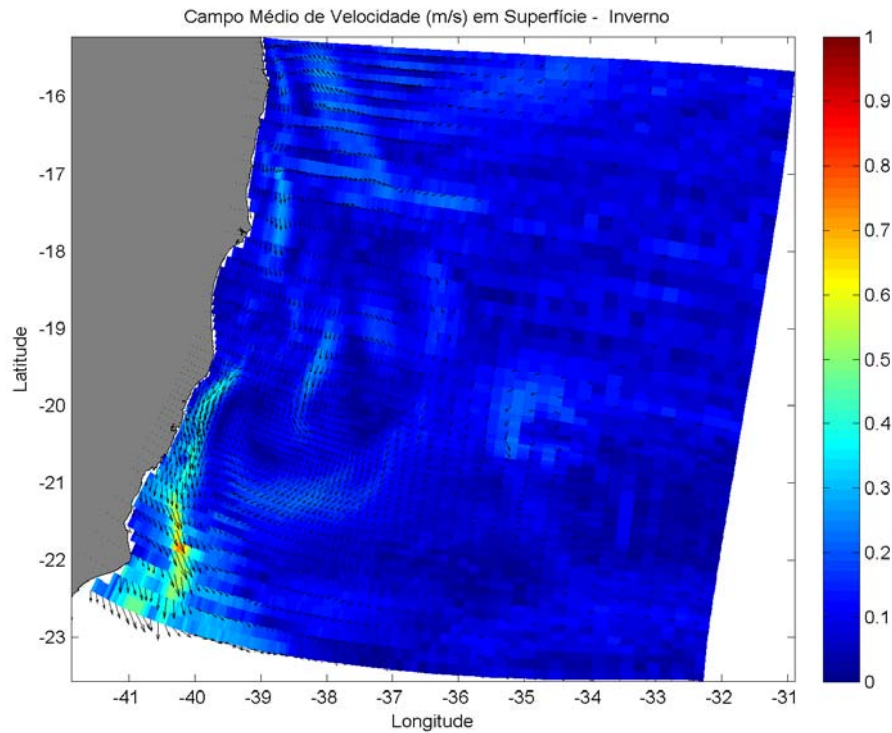


**Figura 29 – Campo médio de velocidade em superfície para o período de verão (dezembro a fevereiro).**



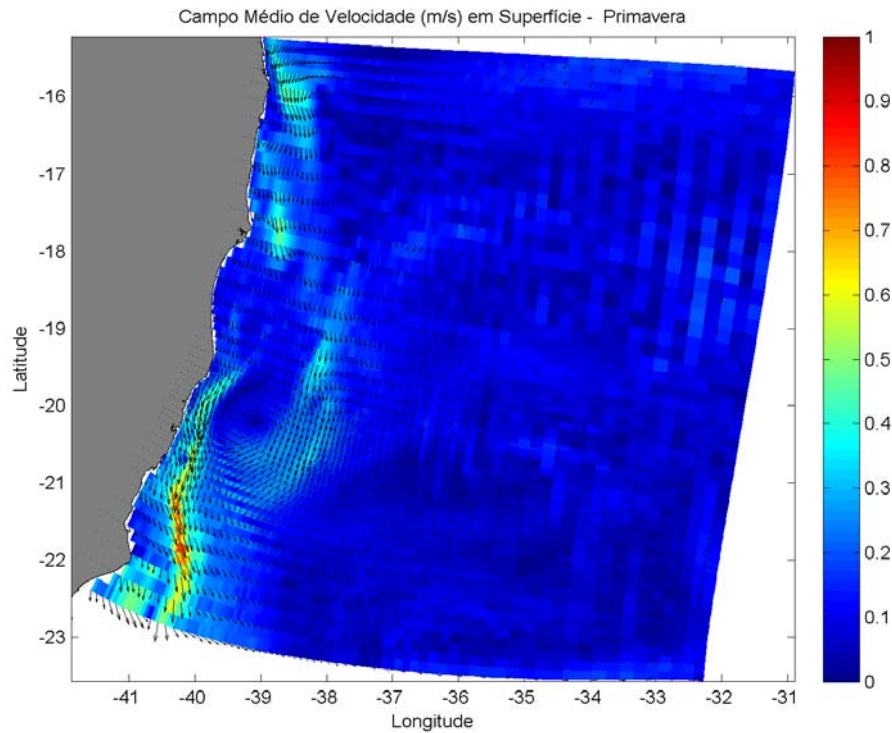
**Figura 30 – Campo médio de velocidade em superfície para o período de outono (março a maio).**

Durante o outono, o fluxo da CB não é tão intenso quanto no verão, em média (Figura 30). Com diminuição principalmente ao norte do Banco de Abrolhos (entre 16° S e 18° S). Nota-se novamente a presença do Vórtice de Vitória na média, o que indica sua permanência durante o outono.



**Figura 31 – Campo médio de velocidade em superfície para o período de inverno (junho a agosto).**

Durante o inverno, há uma diminuição ainda maior do fluxo da CB, sendo que o fluxo superficial ao norte de  $17^{\circ}$  S apresenta uma inversão de sentido, rumando para norte. Isso pode ser um indicativo da influência da bifurcação da Corrente Sul Equatorial que desloca-se mais para sul nessa época do ano. Desta vez, não é nítida a presença do do Vórtice de Vitória na média, o que indica que ao menos durante a maior parte do inverno, o vórtice não estava presente.

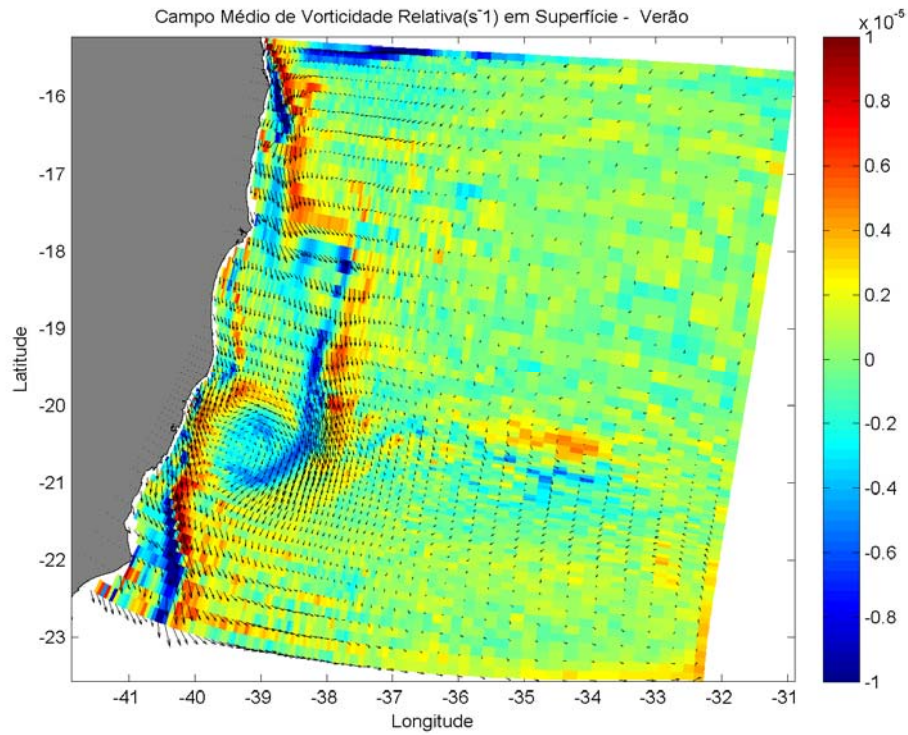


**Figura 32 – Campo médio de velocidade em superfície para o período de primavera (setembro a novembro).**

Durante a primavera, o fluxo da CB volta a se intensificar, não havendo mais inversão de sentido na corrente ao norte do domínio. O Vórtice de Vitória volta a ser identificado.

Para uma caracterização mais adequada do Vórtice de Vitória, os campos de vorticidade relativa médios sazonais foram calculados (Figura 33 a Figura 36). Com estes campos podemos melhor determinar algumas características, como o diâmetro do vórtice e a localização do seu centro.

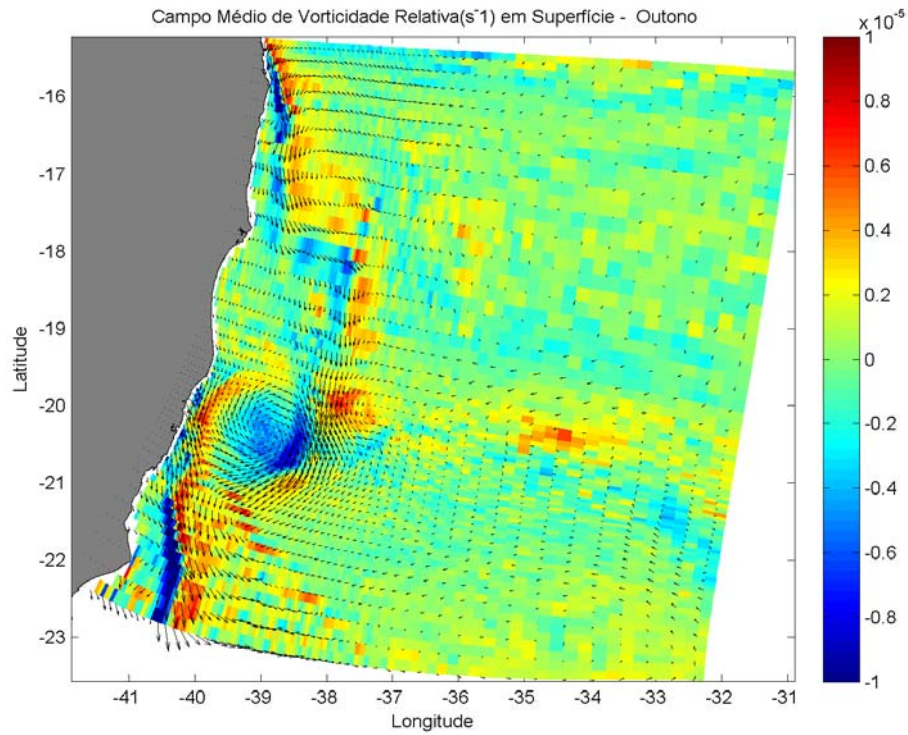




**Figura 33 – Campo médio de vorticidade relativa em superfície para o período de verão (dezembro a fevereiro).**

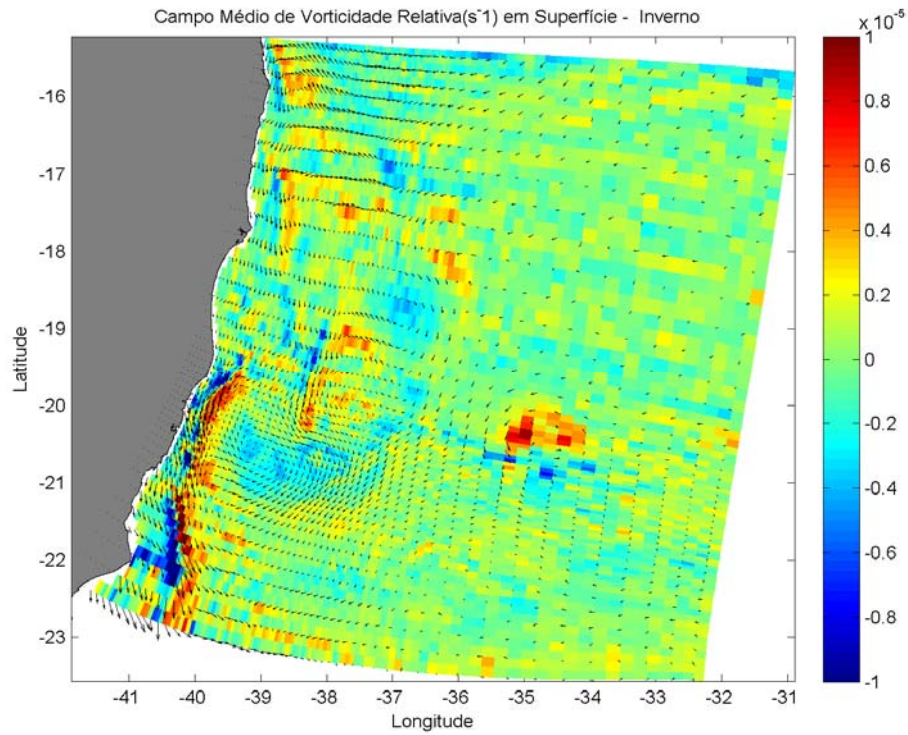
Durante o verão, o Vórtice de Vitória apresentou em média um diâmetro de 120 km, sendo centrado em  $20.56^{\circ}$  S e  $39.26^{\circ}$  W.





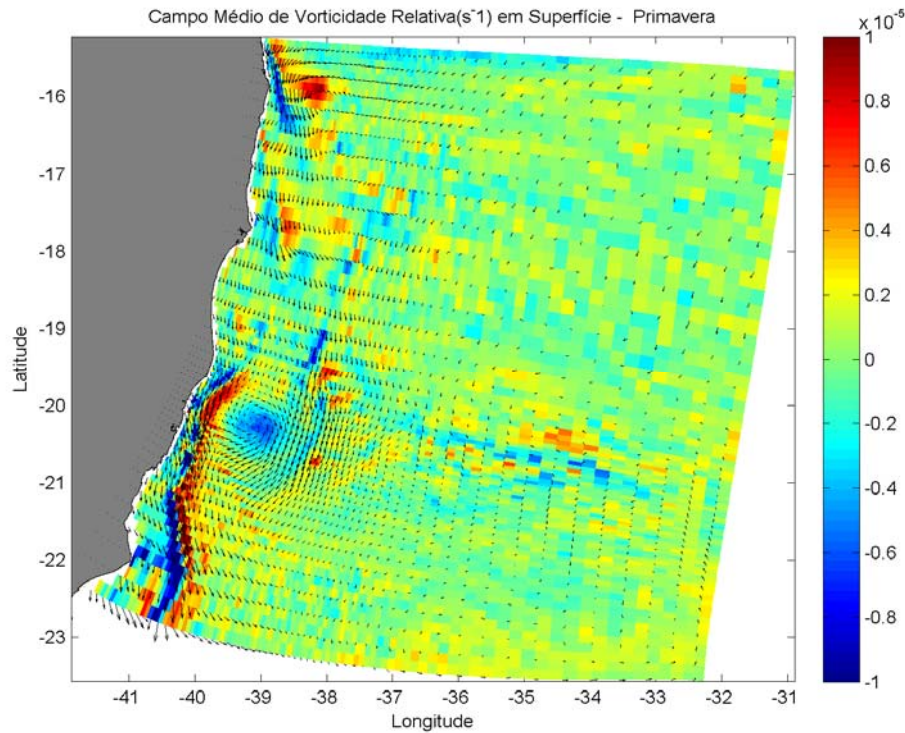
**Figura 34 – Campo médio de vorticidade relativa em superfície para o período de outono (março a maio).**

Durante o outono, o Vórtice de Vitória apresentou em média um diâmetro de 130 km, sendo centrado em 20.37° S e 39.0° W.



**Figura 35 – Campo médio de vorticidade relativa em superfície para o período de inverno (junho a agosto).**

Durante o inverno, o Vórtice de Vitória não se apresenta como uma estrutura coerente, em média.

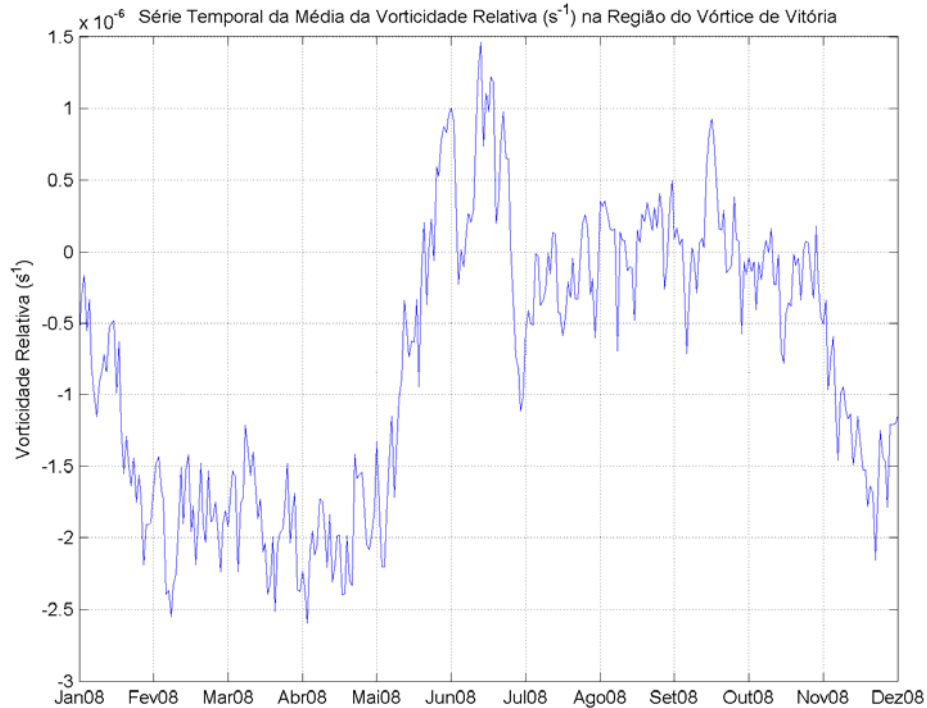


**Figura 36 – Campo médio de vorticidade relativa em superfície para o período de primavera (setembro a novembro).**

Já durante a primavera, o Vórtice de Vitória volta a ser observado, apresentando em média um diâmetro de 70 km, sendo centrado em  $20.12^{\circ}$  S e  $39.18^{\circ}$  W.

Esses resultados numéricos indicam que há uma sazonalidade na presença do Vórtice de Vitória, sendo mais intenso durante o verão e outono, diminuindo de intensidade no inverno e voltando a aumentar durante a primavera. Tal fato também foi relatado por outros autores (vide Capítulo III).

Para melhor investigar a sazonalidade do Vórtice de Vitória, a vorticidade média em superfície na região do vórtice (entre as longitudes de  $39.8^{\circ}$  S e  $38.2^{\circ}$  S e as latitudes de  $21.4^{\circ}$  S e  $19.6^{\circ}$  S) foi calculada para todo o ano de 2008. A Figura 37 mostra a série temporal obtida.



**Figura 37 – Evolução temporal da média espacial da vorticidade relativa em superfície na região do Vórtice de Vitória.**

Podemos notar claramente a sazonalidade da vorticidade relativa média, que apresenta maiores valores (com sinal negativo) entre os meses de janeiro e abril. A partir de maio, a vorticidade passa a ter valores menores (em módulo), chegando a atingir valores positivos (o que indicaria tendência de rotação anti-ciclônica). De novembro em diante, a vorticidade novamente se intensifica.

Desta forma, os resultados do modelo mostram de forma clara que o Vórtice de Vitória não seria permanente, mas estaria presente na maior parte do ano, sendo mais intenso durante o outono e menos (chegando a não estar presente) durante o inverno.

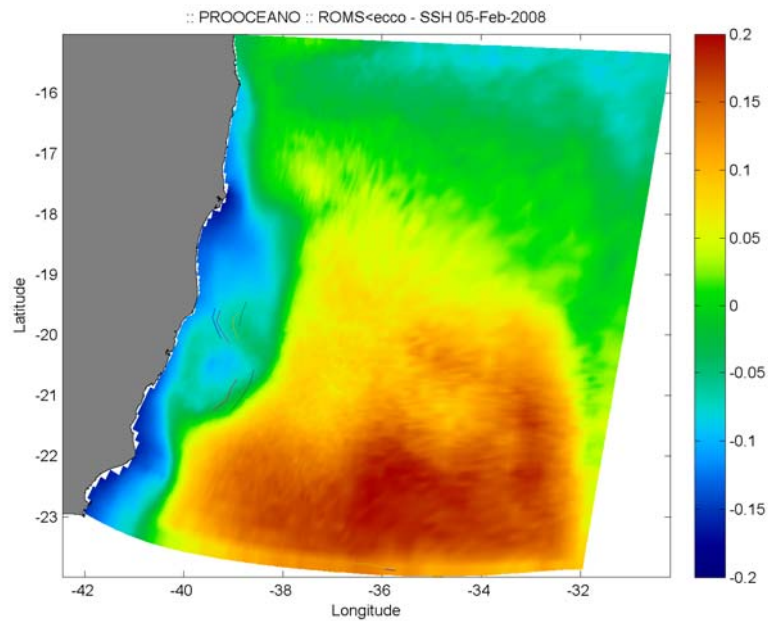
#### *IV.4.3. Derivadores Virtuais*

Um experimento numérico foi realizado para que se pudesse observar se o lançamento de derivadores a partir das coordenadas das prováveis locações da Perenco na Baía do Espírito Santo, seria adequado para o monitoramento de feições de meso-escala, principalmente do Vórtice de Vitória. A preocupação maior era verificar se estes seriam capazes de serem capturados pelo vórtice, assim amostrando suas características e rastreando sua trajetória.

Nesse experimento, utilizou-se o modo de derivadores lagrangeanos virtuais do ROMS, sendo lançados seis derivadores no 1º dia de cada mês de seis coordenadas, nas quais havia maior chance de ser realizado algum tipo de operação nos blocos.

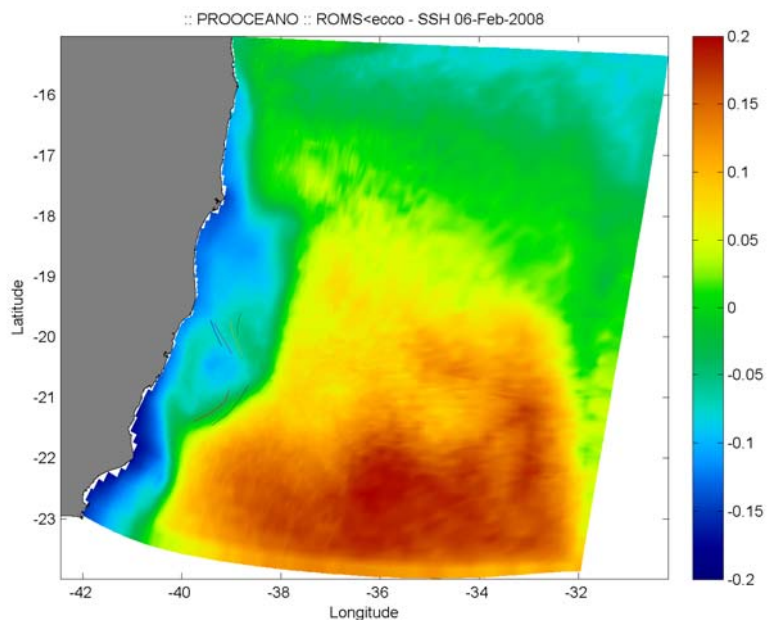


Os resultados obtidos nesse experimento mostram que seria pertinente o lançamento dos derivadores a partir desses pontos. Em algumas ocasiões, como pode ser observado na seqüência das Figura 38 a Figura 48, que mostra os resultados otidos para o período entre 05 e 15 de fevereiro de 2008, os derivadores não são capturados pelo Vórtice de Vitória, embora ele esteja presente.

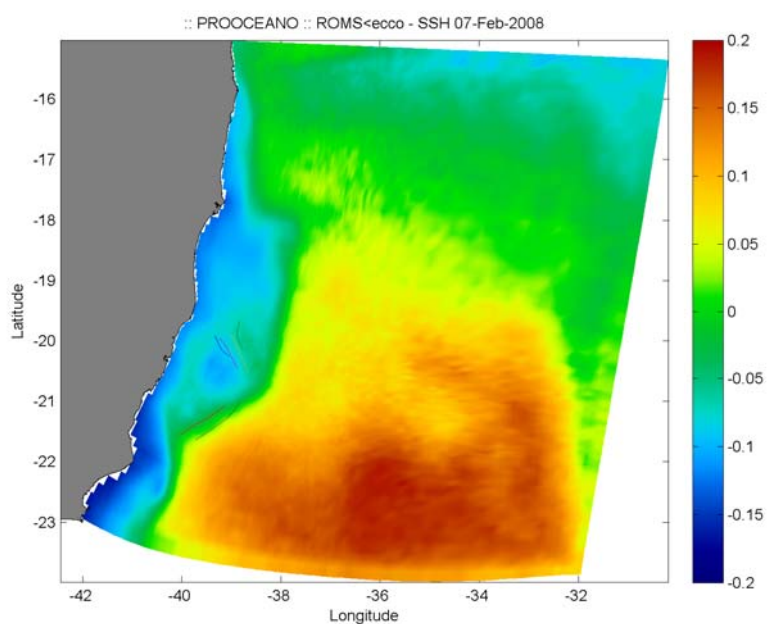


**Figura 38 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 05/02/08.**





**Figura 39 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 06/02/08.**



**Figura 40 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 07/02/08.**

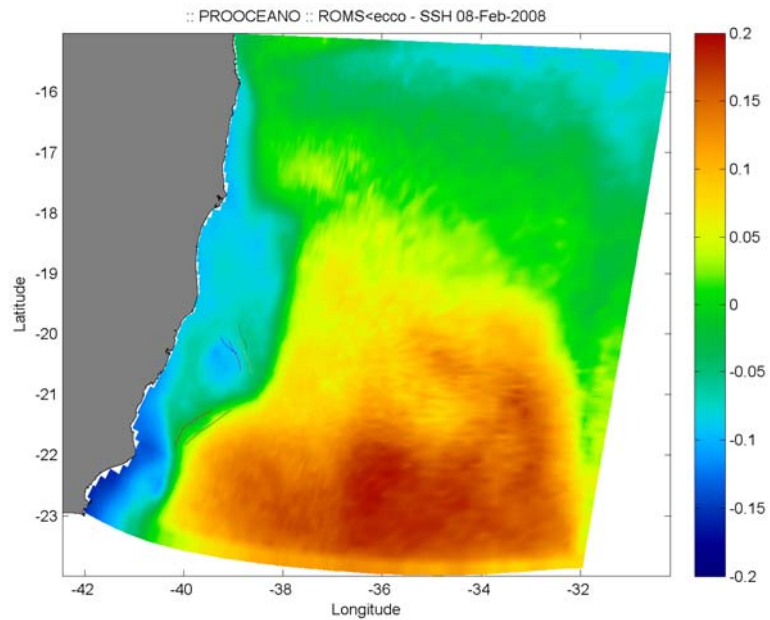


Figura 41 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 08/02/08.

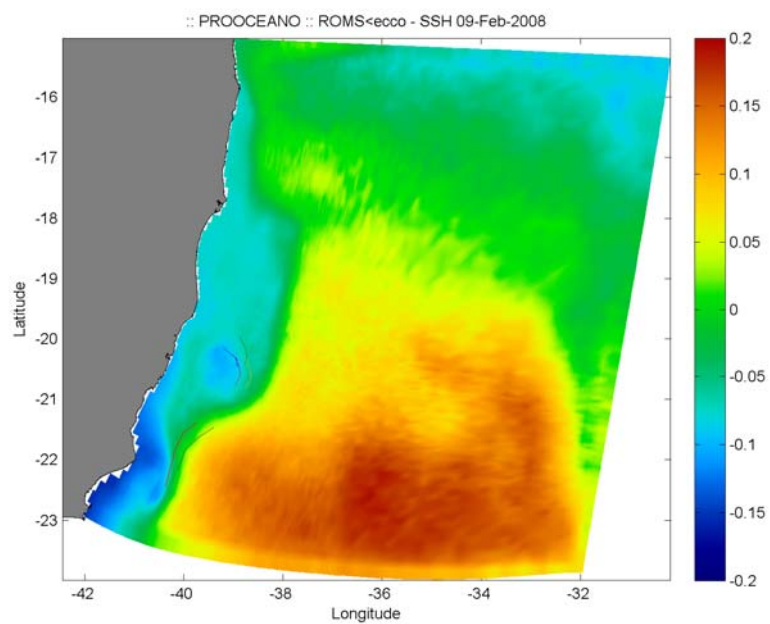
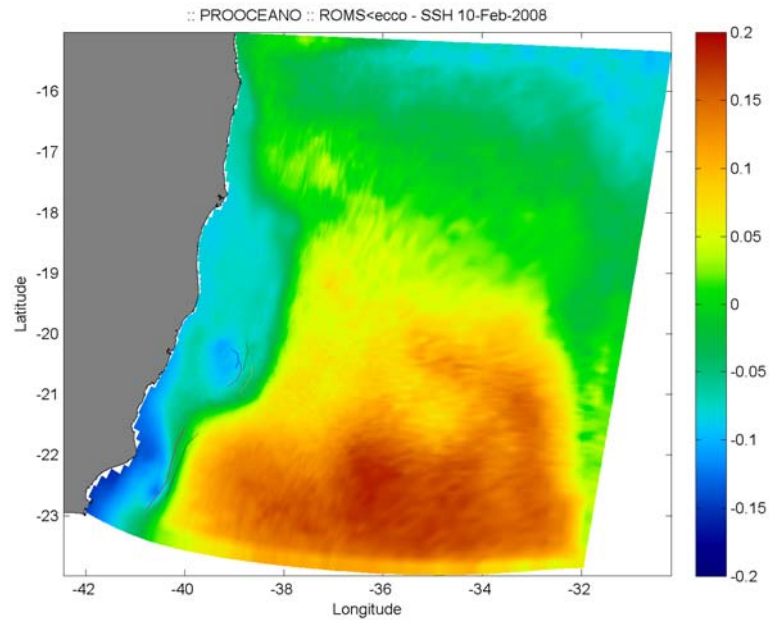
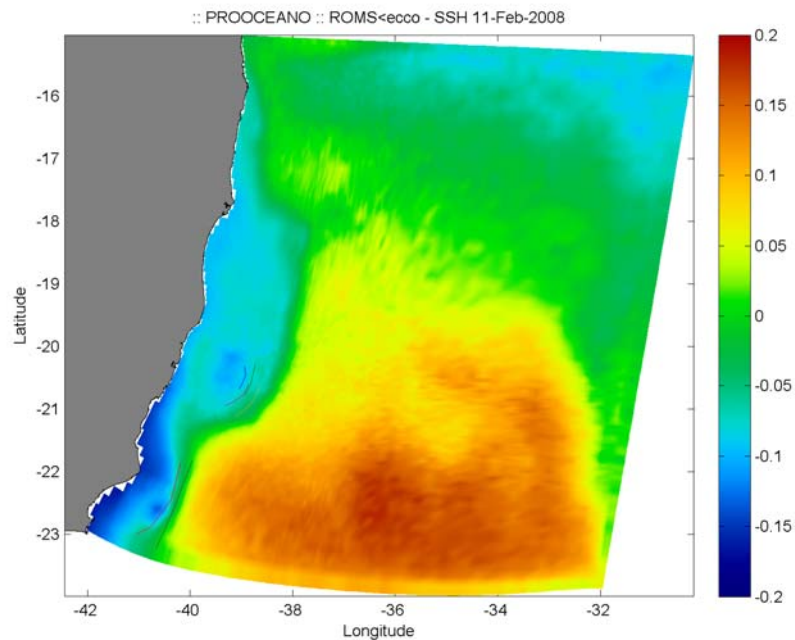


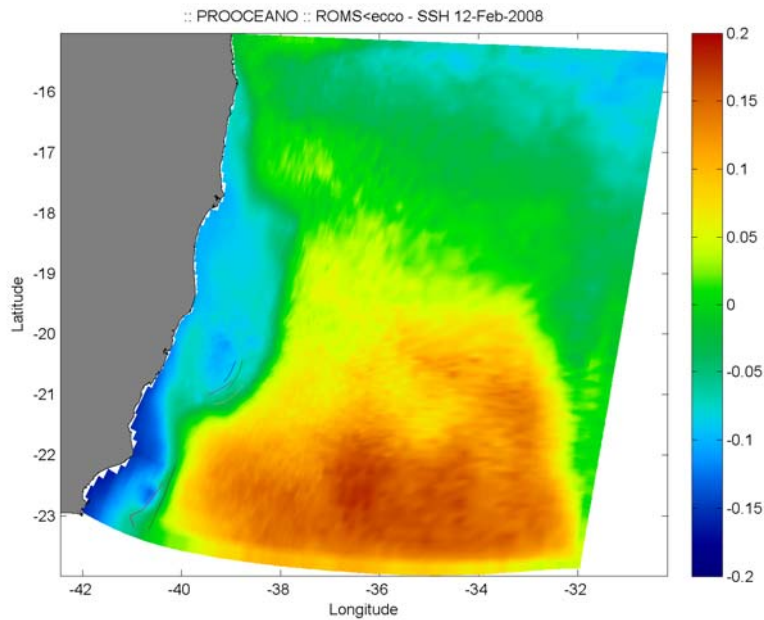
Figura 42 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 09/02/08.



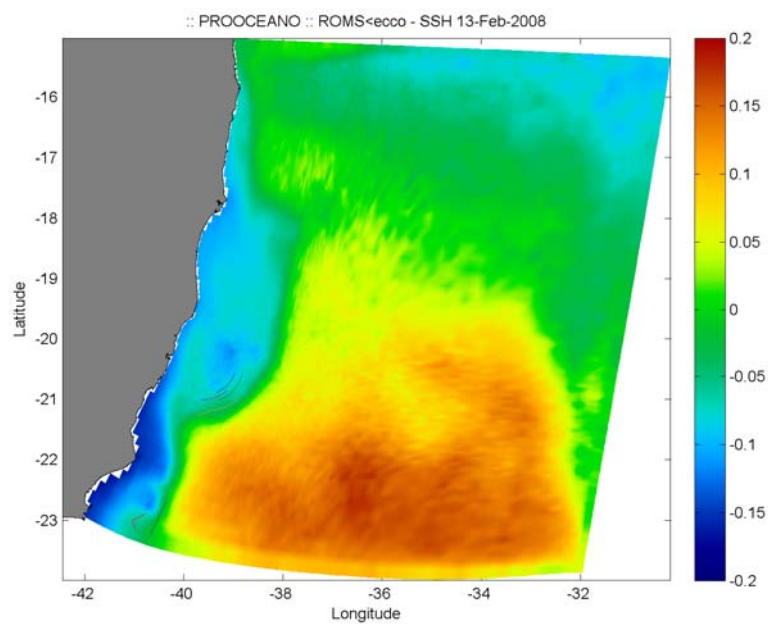
**Figura 43 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 10/02/08.**



**Figura 44 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 11/02/08.**



**Figura 45 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 12/02/08.**



**Figura 46 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 13/02/08.**



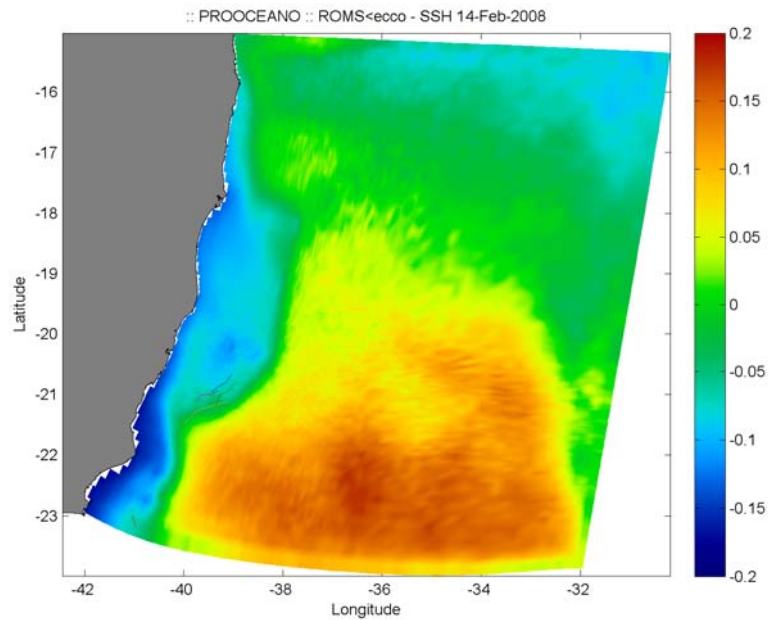


Figura 47 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 14/02/08.

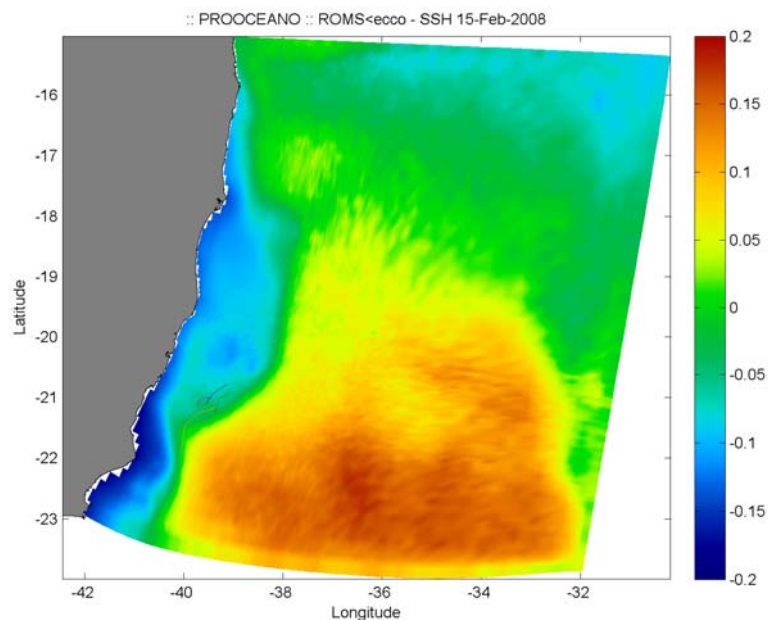
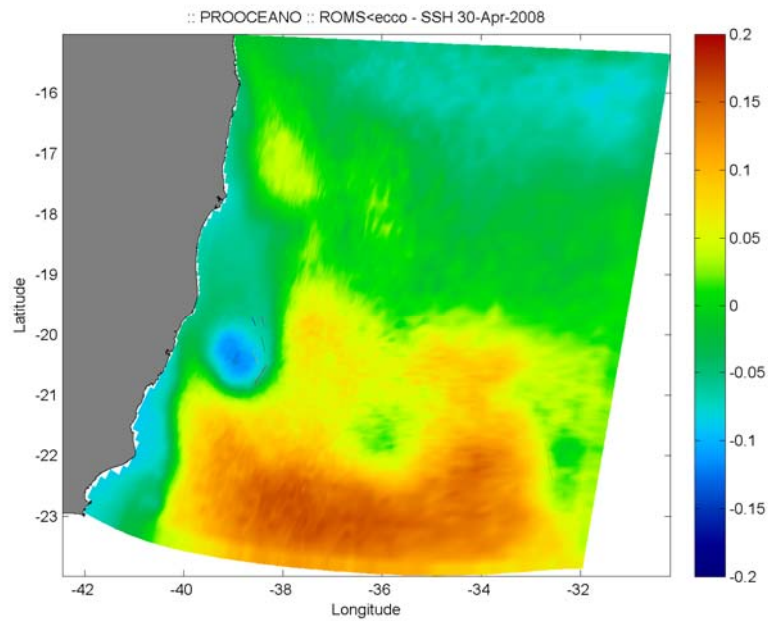


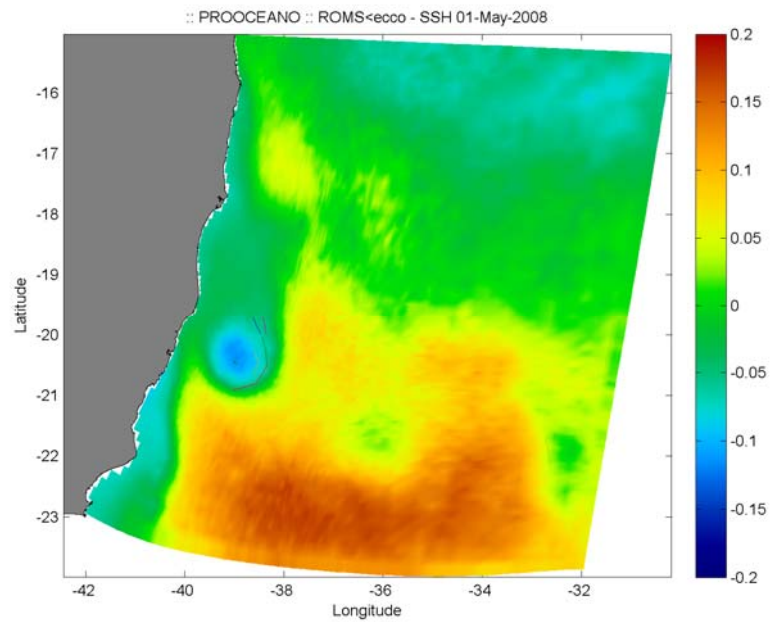
Figura 48 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 15/02/08.



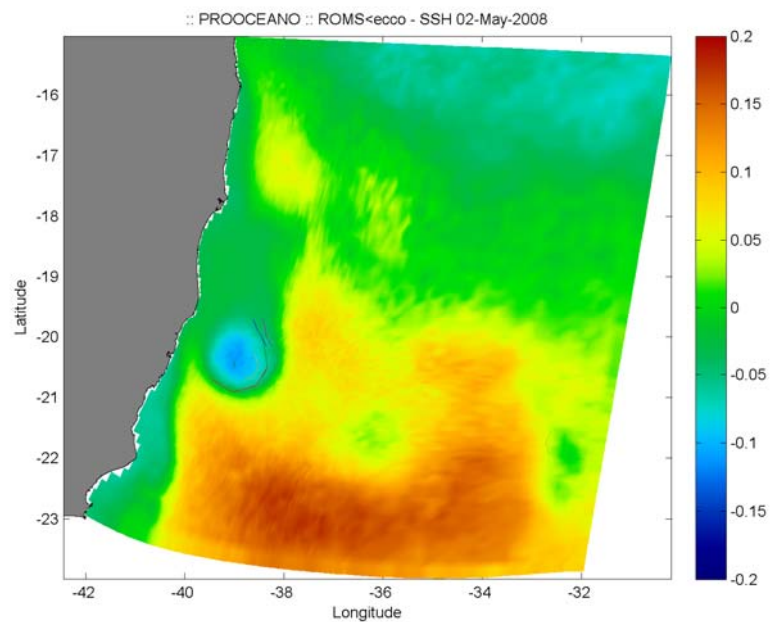
Porém em outras ocasiões, como pode ser observado no período entre 30 de abril e 10 de maio de 2008, os derivadores são capturados pelo Vórtice de Vitória, descrevendo diversas revoluções e acompanhando essa feição por longos períodos.



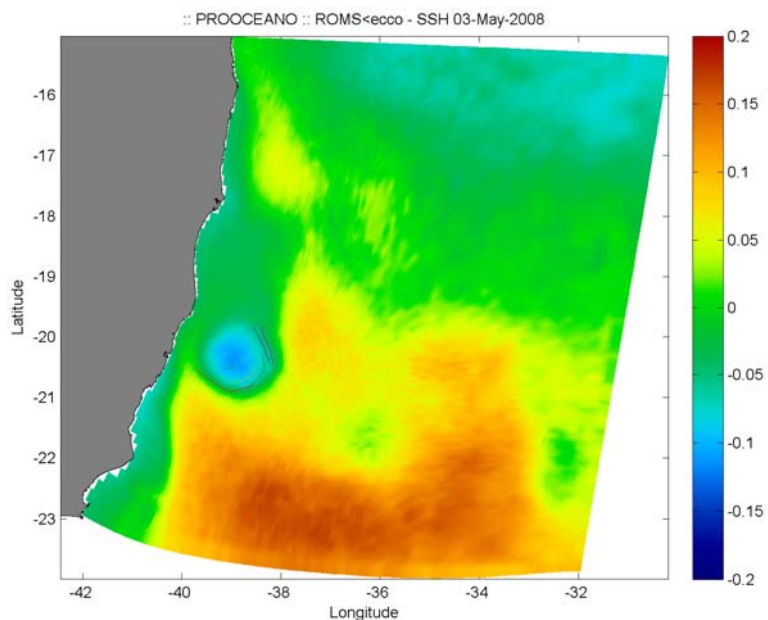
**Figura 49 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 30/04/08.**



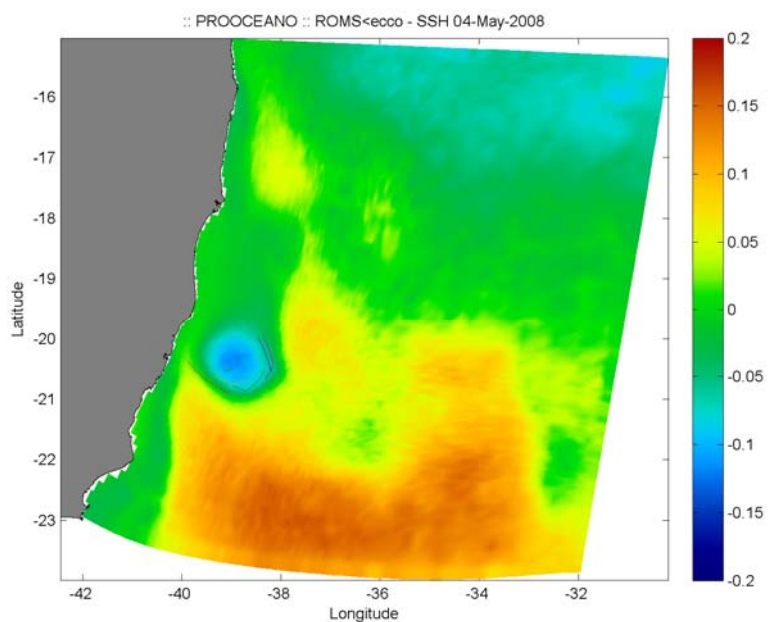
**Figura 50 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 01/05/08.**



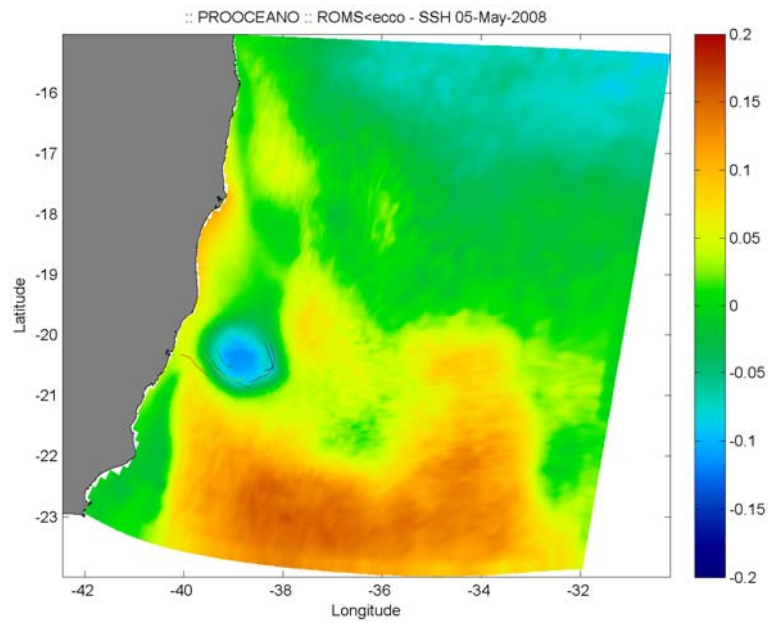
**Figura 51 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 02/05/08.**



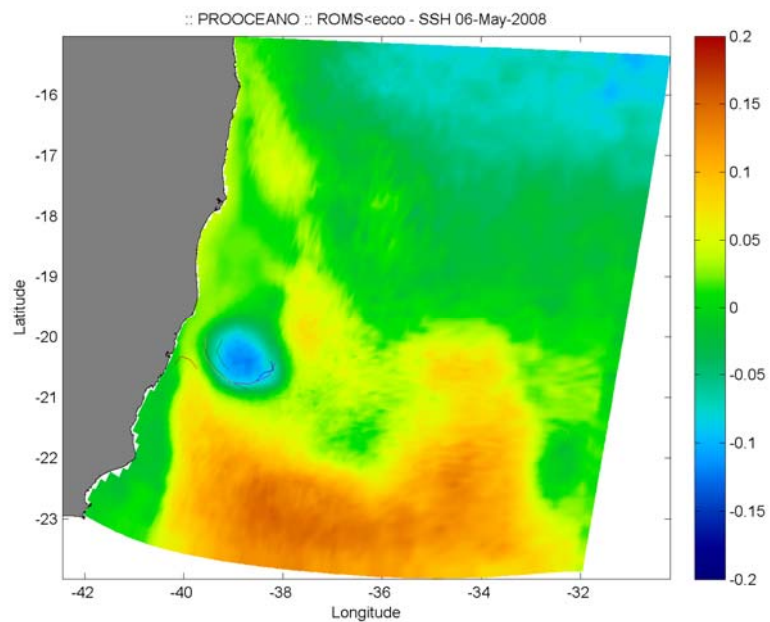
**Figura 52 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 03/05/08.**



**Figura 53 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 04/05/08.**

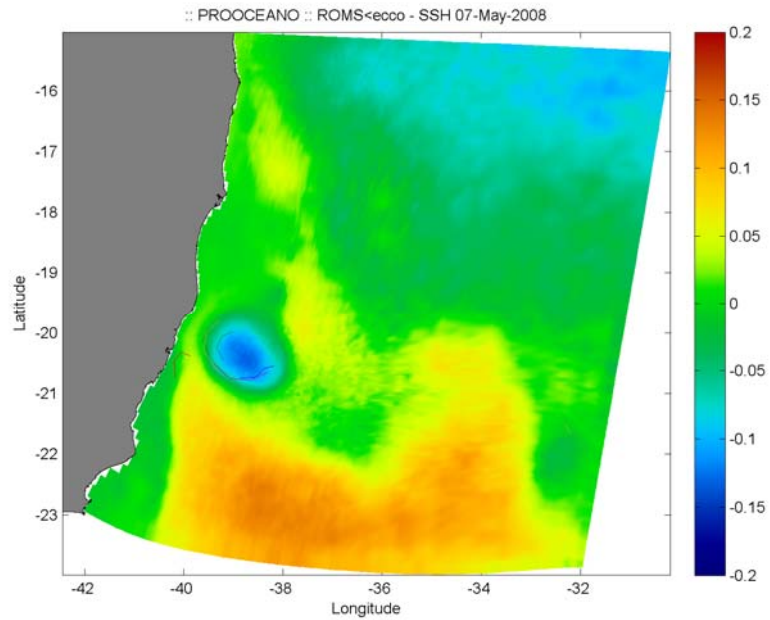


**Figura 54 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 05/05/08.**

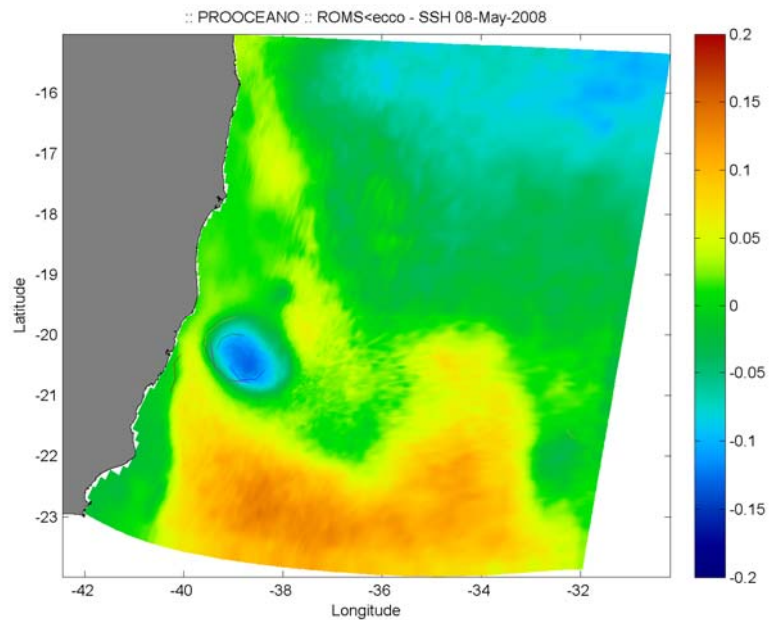


**Figura 55 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 06/05/08.**



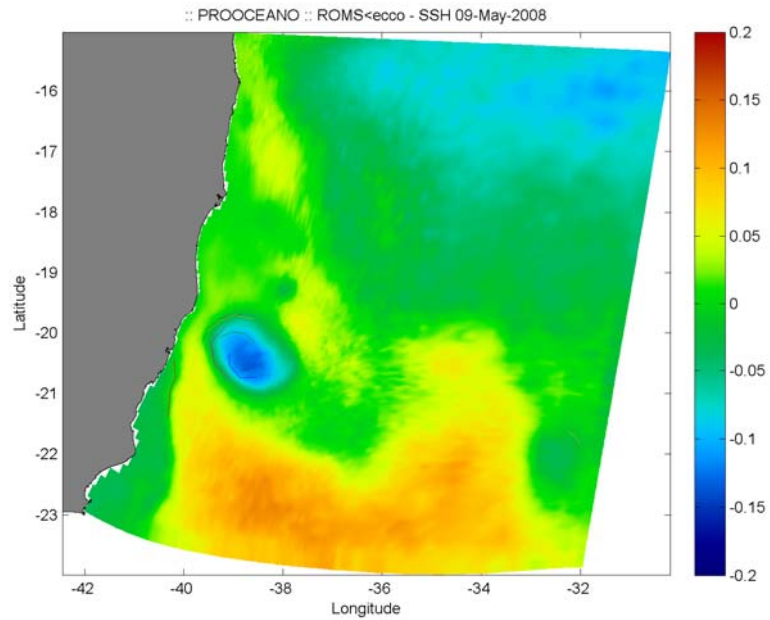


**Figura 56 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 07/05/08.**

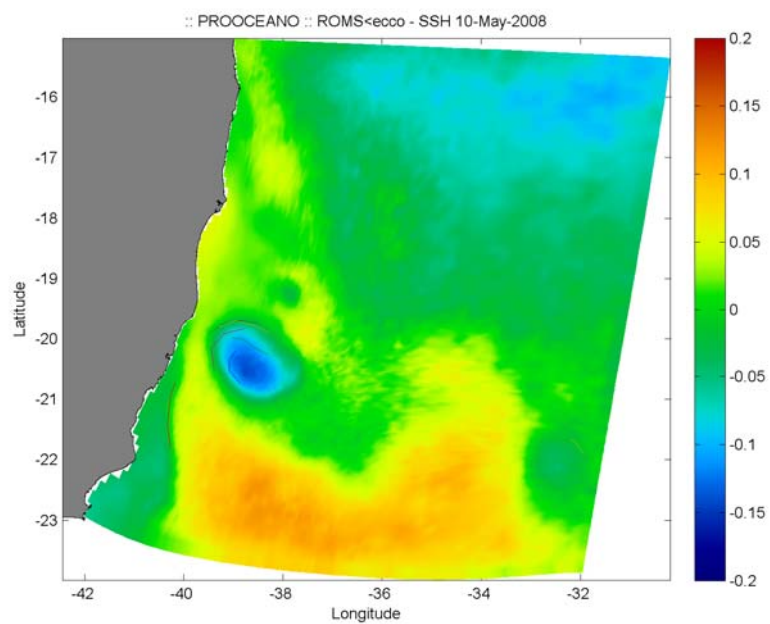


**Figura 57 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 08/05/08.**



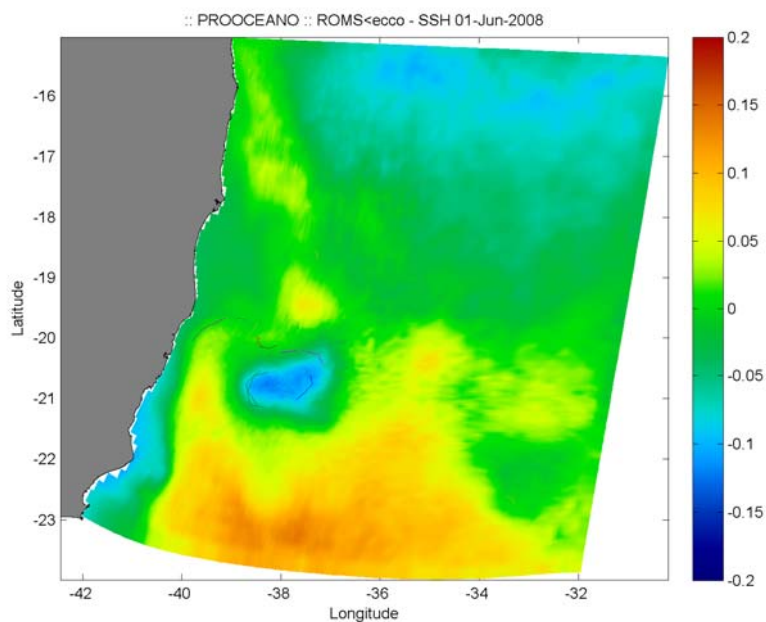


**Figura 58 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 09/05/08.**

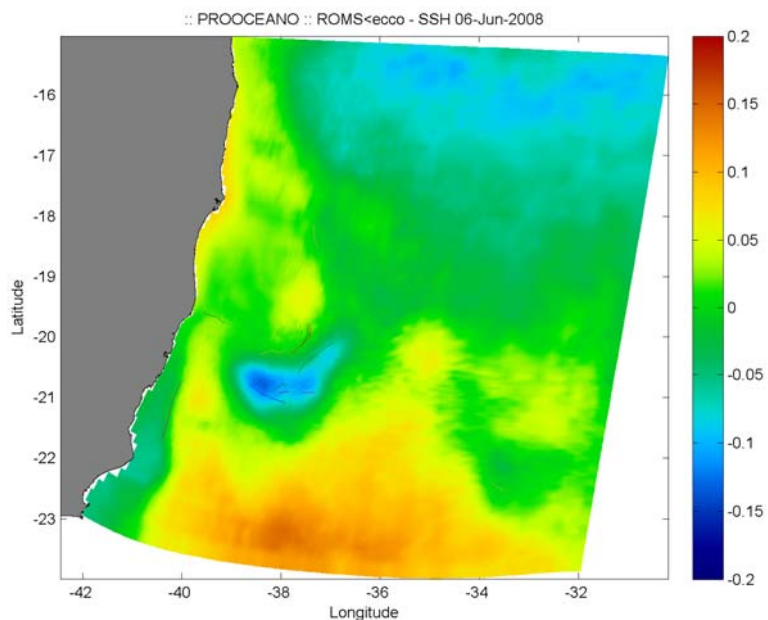


**Figura 59 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 10/05/08.**

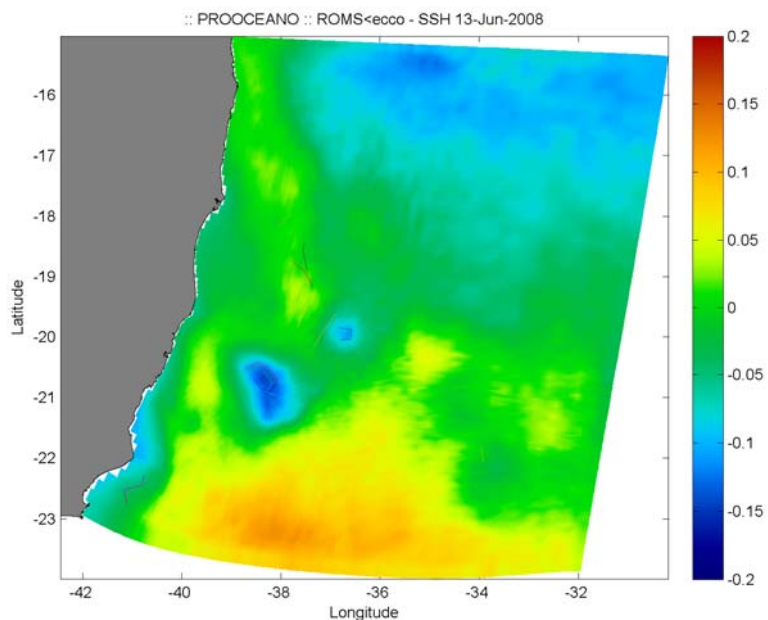
Outro resultado bastante interessante ocorreu no período entre 01 e 27 de junho de 2008 (Figura 60 a Figura 63), quando o Vórtice de Vitória desloca-se primeiramente para leste, sendo acompanhado por alguns derivadores e depois divide-se, sendo que uma parte se desloca para norte, passa pela Cadeia Vitória-Trindade, atingindo a latitude de  $18,5^{\circ}$  S. Comportamento semelhante foi descrito por Campos (2006) e caso seja comprovado, pode indicar que Vórtice de Vitória possa também funcionar como um exportador de nutrientes para latitudes mais ao norte.



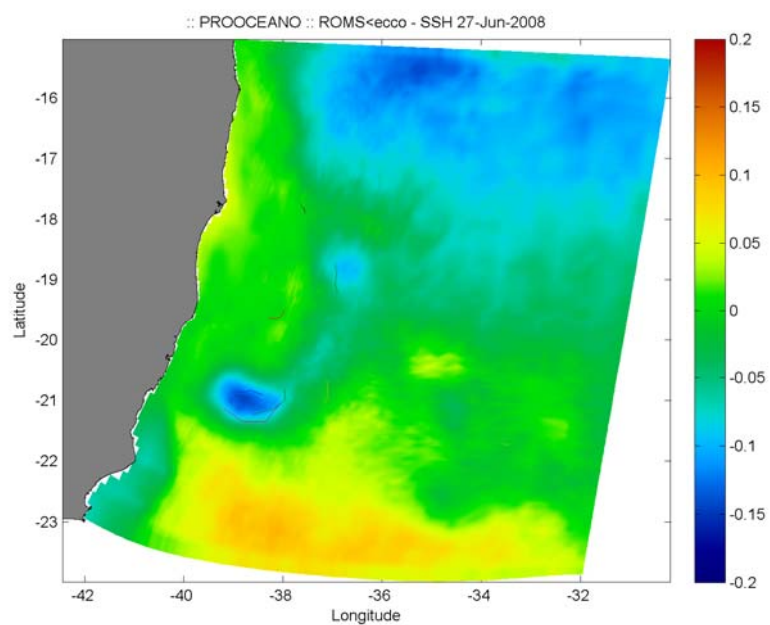
**Figura 60 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 01/06/08.**



**Figura 61 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 06/06/08.**



**Figura 62 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 13/06/08.**



**Figura 63 – Campo de elevação da superfície (m) e trajetórias dos derivadores virtuais lançados a partir dos locais prováveis das locações da Perenco no instante correspondente ao dia 27/06/08.**

## V. CONCLUSÕES

Os trabalhos ora realizados sobre a circulação de meso-escala da Bacia do Espírito Santo, indicam que:

O Vórtice de Vitória não parece ser permanente de fato;

Sua ocorrência é maior no período verão/outono e menor no inverno;

Sua estrutura vertical se mantém até profundidades entre 400 e 500m, aproximadamente.

Possui importância local e regional, pois proporciona um aumento na concentração de nutrientes na região, podendo inclusive ser exportador dessas propriedades, caso seu movimento para norte, além da Cadeia-Vitória-Trindade seja real.

Porém não é consenso pelos autores ou não havia sido possível esclarecer alguns pontos, como:

Existe sazonalidade na ocorrência do Vórtice de Vitória?

Qual(is) o(s) mecanismo(s) de formação do Vórtice de Vitória?

Qual a relação entre o Vórtice de Vitória e o transporte da Corrente do Brasil?

Existe realmente um movimento em direção ao norte do Vórtice de Vitória, que possa ultrapassar a Cadeia Vitória-Trindade?

Com o intuito de elucidar essas e outras questões, foi implementado um modelo numérico hidrodinâmico (ROMS) para a Bacia do Espírito Santo e realizada uma simulação para o período de 2007 e 2008. Para preservar a significância dos resultados, apenas o período de 2008 foi analisado.

Os resultados desses experimentos tornaram possível abordar algumas questões, porém é fundamental ressaltar que estes são resultados de um experimento numérico e que precisam ser validados através de extensivas comparações com medições realizadas em campo. Portanto, as conclusões descritas a seguir devem ser encaradas como sugestões e indicativas, nunca como conclusivas.

Os resultados numéricos indicaram que o Vórtice de Vitória possui uma sazonalidade bem marcada, sendo mais intenso no período de verão e outono, enfraquecendo-se no inverno, quando sua presença é mais rara e voltando a se fortalecer na primavera.

Através da análise da interação do Vórtice de Vitória com a topografia oceânica local, pode-se sugerir que seu mecanismo de formação está relacionado com o estiramento do tubo de vórtice, devido à brusca passagem do fluxo de maiores para menores profundidades.

Durante o mês de junho de 2008, o Vórtice de Vitória apresentou um deslocamento para norte, ultrapassando a Cadeia Vitória-Trindade, chegando até a latitude de 18,5° S, conforme já descrito por Campos (2006).



O experimento realizado com derivadores virtuais indicou que o lançamento de derivadores a partir das locações da Perenco na Baía do Espírito Santo seria adequado para o monitoramento das feições de meso-escala, sendo que por diversas ocasiões, os derivadores foram capturados pelo Vórtice de Vitória, acompanhando essa feição por longos períodos.

## VI. REFERÊNCIAS

Boyer, T., S. Levitus, H. Garcia, R. A. Locarnini, C. Stephens, & J. Antonov, 2005: Objective analyses of annual, seasonal, and monthly temperature and salinity for the world ocean on a 0.25 degrees grid. *Int. J. Climatology*, 25(7), 931-945.

A.F. Blumberg and L.H. Kantha. (1985). "Open Boundary Condition for Circulation Models", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 111 237-255.

Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, N. S. Heaps (Ed.), 1-16, American Geophysical Union, Washington, DC, 1987.

Budgell, W.P., 2005: Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region, *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-005-0008-3.

Campos, E. J. D. (2006), Equatorward translation of the Vitoria Eddy in a numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L22607 doi:10.1029/2006GL026997.

Castro, B.M.; Miranda, L.B., 1998: "Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S." In: Robinson, A.R.; Brink, K.H. (eds.): *The Sea*, Vol. 11: pp. 209-252, New York, John Wiley & Sons.

Costa, T.P., 2007: "Existe um Vórtice de Vitória Climatológico?" Monografia de Bacharelado em Oceanografia. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 76p.

Di Lorenzo, E., 2003: Seasonal dynamics of the surface circulation in the southern California Current System, *Deep-Sea Res., Part II*, 50, 2371-2388.

Dinniman, M. S., J. M. Klinck, and W. O. Smith Jr. (2003), Cross shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry, *Deep-Sea Res., Part II*, 50, 3103-3120.

Evans D.L. , S. S. Signorini & L.B. Miranda, 1983: A note on the transport of the Brazil Current. *Journal Of Physical Oceanography*, 9, 724-738.

Ezer & Mellor, 2000: "Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model", *Dyn. Atm. Ocean*, 32, pp. 185-208

FAIRALL, C.W., E.F. BRADLEY, D.P. ROGERS, J.B. EDSON and G.S. YOUNG, 1996: Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, *J. Geophys. Res.*, 101, 3747-3764.

Fragoso, M. R., 2004. Um Modelo Numérico da Circulação Oceânica para as Bacias Leste e Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 173p.

Gaeta, S.A., Lorenzetti, J.A., Miranda, L.B., Susini-Ribeiro, S.M.M., Pompeu, M., DE Araújo, C.E.S., 1999. "The Vitória Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during the austral fall of 1995." Arch. Fish. Mar. Res. 47 (2/3), pp. 253-270.

Haidvogel, D. B. and A. Beckmann, 1999: Numerical Ocean Circulation Modeling. Imperial College Press.

Haidvogel, D. B., H. G. Arango, K. Hedstrom, A. Beckmann, P. Malanotte-Rizzoli, and A. F. Shchepetkin (2000), Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates, Dyn. Atmos. Oceans, 32, 239-281.

G.W. Hedstrom, Nonreflecting boundary conditions for nonlinear hyperbolic systems, J. Comput. Phys. 30 (1979) 222-237.

LARGE, W. G., J. C. MCWILLIAMS, and S. C. DONEY, 1994: Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. Rev. Geophys., 32, 363-403.

Maia, L. F. P. G., 1986: "Alguns Aspectos Dinâmico-Climatológicos em Minas Gerais", Tese Apresentada à Universidade Federal de Viçosa.

MARCHESIELLO, P., J.C. MCWILLIAMS, and A. SHCHEPETKIN, 2003: Equilibrium structure and dynamics of the California Current System, J. Phys. Oceanogr., 33, 753-783.

Marsaleix P., Auclair F., Estournel C., 2006. "Considerations on Open Boundary Conditions for Regional and Coastal Ocean Models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23,1604-1613".

MARTINSEN EA & ENGEDAHL H. 1987. Implementation and testing of a Lateral Boundary Scheme as an Open Boundary Condition in a Barotropic Ocean Model, Coastal Eng., 11: 603-627.

Mascarenhas Jr, A S 1985 - "Revisão sobre o cálculo da tensão de cisalhamento do vento sobre o oceano." In: Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, n.14, pp.1-10

Mellor, G. L., and T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Reviews of Geophysics and Space Physics, 20, 851-875, 1982.

Oliger J., and A. Sundström, 1978: "Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid mechanics". SIAM J. Appl. Math., 35, 419-446.

Oliveira, F. S; Clemente, E. P.; Schaefer, C. E.; G. R.; Moreira, Gilberto Fialho; Oliveira, Aline Calixto de; Faria, Lopes A. L. "A Biogeografia Insular da Ilha de Trindade e Sua Contribuição Para o Levantamento Pedológico: Uma Experiência." [www.cibergeo.org/agbnacional/VICBG-2004/Eixo2/E2\\_092.htm](http://www.cibergeo.org/agbnacional/VICBG-2004/Eixo2/E2_092.htm)

ORLANSKI I. 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, J. Comput. Phys., 21: 251-269.

PALMA ED & MATANO RP. 1998. On the implementation of open boundary conditions to a general circulation model: The barotropic mode, J. Geophys. Res., 103: 1319-1341.

PELIZ, A., J. DUBERT, D. B. HAIDVOGEL, and B. LE CANN (2003), Generation and unstable evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current, J. Geophys. Res., 108(C8), 3268, doi:10.1029/2002JC001443.

Peterson, R.G. and L. Stramma, 1991: "Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean." *Progress in Oceanography*, 26, pp. 1-73.

Rocha, C. R. M., 2005: "Influência da topografia marinha no vórtice de Vitória". Monografia de Graduação, Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 33p.

Schmid, C., H. Schäfer, G. Podestá & W. Zenk, 1995. "The Vitória Eddy and Its Relation to the Brazil Current." *Journal of Physical Oceanography*, 25: pp. 2532-2546.

SHCHEPETKIN, A. F., and J. C. MCWILLIANS (2003), A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.

SHCHEPETKIN, A. F., and J. C. MCWILLIANS (2005), The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling*, 9, 347-404.

Signorini, S.R., 1978: On the circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of Sao Tome and Guanabara Bay, *Deep-Sea Research*, 25, 481-490 p.

Silveira, I. C.A. da; A. K. Schmidt; E.J.D. Campos; S. S. de Godoi; Y. Ikeda, 2000. "A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira." *Rev. Bras. Oceanogr.*, 48(2), pp. 171-183.

SONG, Y. and D. B. HAIDVOGEL, 1994: A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *J. Comp. Phys.*, 115(1), 228-244.

STYLES, R. and S.M. GLENN, 2000: Modeling stratified wave and current bottom boundary layers in the continental shelf. *J. of Geophys. Res.*, 105, 24119-24139.

UMLAUF, L., H. BUCHARD, 2003: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Marine Res.*, 61, 235-265.

Warner, J.C, C.R. Sherwood, H.G. Arango, and R.P. Signell, 2005a: Performance of four Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic Length Scale Method. *Ocean Modelling*, 8, 81-113.

Wilkin, J.L., H.G. Arango, D.B. Haidvogel, C.S. Lichtenwalner, S.M. Durski, and K.S. Hedstrom, 2005: A regional Ocean Modeling System for the Long-term Ecosystem Observatory. *J. Geophys. Res.*, 110, C06S91, doi:10.1029/2003JC002218.

Zavatarelli M., 1999 - "On The Specification of MOM Data on POM Open Boundaries" MFSP-6 - Meeting, - Fevereiro de 1999 - Atenas, Grécia.

