

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO DE OCEANOGRAFIA

ANA CAROLINA TRINDADE DE FREITAS

**Avaliação espaço-temporal de feições ciclônicas no
Embaçamento de Tubarão (ES) através de imagens de satélite
de concentração de clorofila-*a***

VITÓRIA

2014

ANA CAROLINA TRINDADE DE FREITAS

**Avaliação espaço-temporal de feições ciclônicas no
Embaimento de Tubarão (ES) através de imagens de satélite
de concentração de clorofila-*a***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Oceanografia, do Departamento
de Oceanografia e Ecologia (DOC)
da Universidade Federal do Espírito
Santo (UFES), como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Renato David
Ghisolfi.

VITÓRIA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO DE OCEANOGRAFIA

ANA CAROLINA TRINDADE DE FREITAS

**Avaliação espaço-temporal de feições ciclônicas no
Embaimento de Tubarão (ES) através de imagens de satélite
de concentração de clorofila-*a***

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi
ORIENTADOR – UFES/DOC

Prof.Dr. Camilo Dias Júnior – UFES/DOC

Dra. Meyre Pereira da Silva

**Avaliação espaço-temporal de feições ciclônicas no
Embaçamento de Tubarão (ES) através de imagens de satélite
de concentração de clorofila-*a***

Por

Ana Carolina Trindade de Freitas

Submetido como requisito parcial para a obtenção de grau de

Oceanógrafo

na

Universidade Federal do Espírito Santo

Dezembro de 2014

© Ana Carolina Trindade de Freitas

Por meio deste, o autor confere ao Colegiado do Curso de Oceanografia e ao Departamento de Oceanografia e Ecologia da UFES permissão para reproduzir e distribuir cópias parciais ou totais deste documento de trabalho de conclusão de curso para fins não comerciais.

Assinatura da autora.....

Curso de graduação em Oceanografia
Universidade Federal do Espírito Santo
03 de Dezembro de 2014

Certificado por.....

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi
Orientador

Certificado por

Prof.Dr. Camilo Dias Junior - DOC/UFES

Certificado por

Dra. Meyre Pereira da Silva

Aceito por

Angelo Fraga Bernardino
Prof. Adjunto/Coordenador do Curso de Oceanografia
Universidade Federal do Espírito Santo
CCHN/DOC/UFES

RESUMO

Os vórtices ciclônicos são descritos como feições bem definidas que apresentam forte gradiente de propriedades em relação ao seu entorno. Diversos estudos relatam a ocorrências de incremento de biomassa fitoplanctônica, devido ao movimento vertical ascendente intrínseco a essas feições que possibilita o alcance de águas mais profundas e ricas em nutrientes a camada fótica. Esse aumento de biomassa implica no aumento da concentração de pigmentos fotossintetizantes dos produtores primários, permitindo a distinção dessas feições em relação ao seu entorno. Assumindo-se que é possível identificar a ocorrência de feições ciclônicas através da observação da concentração de clorofila-*a*, no presente estudo, foram usadas imagens de satélite do período entre janeiro de 2008 e dezembro de 2012, para avaliar a ocorrência de feições ciclônicas na região oceânica ao largo do Espírito Santo, conhecida como Embaiamento de Tubarão. Foi possível observar ainda que o tamanho das feições ciclônicas identificadas esteve marcadamente relacionado com sua região e, possivelmente, processo de formação. Em termos de padrão de deslocamentos foi possível identificar a translação de vórtices ciclônicos em todas as direções, mas, em sua maioria, foram coerentes com o efeito β topográfico, ou seja, acompanhando contorno batimétrico do ET. Pode-se concluir que a dinâmica física tem papel fundamental na distribuição de comunidades fitoplanctônicas na região do ET que feições ciclônicas são recorrentes na região ao longo de todo o ano.

Palavras-chave: clorofila-*a*, sensoriamento remoto, Vórtice de Vitória.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de formação de vórtices e sua estrutura hidrográfica associada.....	3
Figura 2: Esquema da Conservação da vorticidade potencial.	5
Figura 3: Forças que atuam nas partículas de fluido em um vórtice anticiclônico.....	6
Figura 4: Localização das estações hidrográficas e trajetória de derivadores	7
Figura 5: Vórtice de Vitória.....	8
Figura 6: Trajetórias seguidas pelo VV.	9
Figura 7: Esquema mostrando o VV (VE) entre VA (AE) e o VVS (SVE).	9
Figura 8: Modelo esquemático da formação dos vórtices.	10
Figura 9: Snapshots de campos horizontais de velocidade	11
Figura 10: Ocorrência dos dois tipos de vórtices ciclônicos.....	11
Figura 11: Estrutura vertical do Vórtice de Vitória.....	12
Figura 12: Distribuição de clorofila-a (mg / L) através do vórtice.	14
Figura 13: Embaiamento de Tubarão.....	15
Figura 14: Exemplos de imagem útil (esquerda) e imagem inútil (direita)	17
Figura 15: Exemplo de feições do tipo A.	17
Figura 16: Exemplo de feições do tipo B.....	18
Figura 17: Exemplo de feições do tipo C.....	18
Figura 18: Representação gráfica no número de imagens úteis por estação e ano.....	20
Figura 19 : Representação gráfica do número de feições por tipo e estação do ano.	21
Figura 20: Tamanho das feições ciclônicas encontradas por estação e ano.	21
Figura 21: Exemplos de tamanho de feições ciclônicas	22
Figura 22: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 1-1.	23
Figura 23: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 1-1	24
Figura 24: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 1-2.	25
Figura 25: Trajetória dos centros dos vórtices identificados nos Eventos 1-2 e 1-3.	26
Figura 26: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 1-3..	27
Figura 27: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento.....	28
Figura 28: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 2-2.	30
Figura 29: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 3-1.	31
Figura 30: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 3-1.	32
Figura 31: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 3-2.	34
Figura 33: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 3-3.	35
Figura 34: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 3-3.	36
Figura 35: Sequência de imagens da concentração de clorofila-a no Evento 4-1..	37
Figura 36: Trajetórias dos centros dos vórtices identificados no Eventos 4-1	38
Figura 37: Exemplos do comportamento da CB ao passar pela CVT o	42

LISTA DE ABREVIATURAS

ACAS - Água Central do Atlântico Sul
ACS - Água Circumpolar Superior
AIA - Água Intermediária Antártica
APAN - Água Profunda do Atlântico Norte
AT - Água Tropical
BA - Banco de Abrolhos
VV - Vórtice de Vitória
CCI - Contra Corrente Intermediária
CCO - Correntes de Contorno Oeste
CG - Corrente do Golfo
CSVV - Cadeia Submarina Vitória-Trindade
ET - Embaiamento de Tubarão
HYCOM - Hybrid Coordinate Ocean Model
N - Norte
NE - Nordeste
O - Oeste
ROMS - Regional Ocean Model
SNB - Subcorrente Norte do Brasil
TSM - Temperatura Superficial do Mar
VA - Vórtice de Abrolhos
VVS - Vórtice de Vitória Sul

SUMÁRIO

RESUMO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	VII
SUMÁRIO.....	VIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Vórtices.....	2
2.2 Vorticidade.....	3
2.3 Translação de vórtices.....	5
2.4 O Vórtice de Vitória.....	6
2.5 A observação de vórtices no oceano.....	13
3. OBJETIVOS.....	14
3.1 Objetivo Geral.....	14
3.2 Objetivos Específicos.....	14
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1 Área de estudo.....	15
4.2 Metodologia.....	16
4.2.2 Dados.....	16
4.2.2 Manipulação das imagens.....	16
4.2.3 Presença-ausência de feições identificáveis.....	16
4.2.6 Velocidade Média de Translação.....	19
4.2.7 Estudos de caso.....	19
5. RESULTADOS.....	19
5.1 Presença-ausência de feições identificáveis.....	19
5.2 Tipo de feição identificada.....	20
5.3 Tamanho das feições.....	21
5.4 Estudos de caso.....	23
5.4.1: Translação acompanhando o contorno batimétrico.....	23
Evento 1-1: Maio a Junho de 2008.....	23
Evento 1-3: Julho de 2009.....	26
5.4.2: Vórtices com elevadas concentrações de clorofila- <i>a</i> em suas bordas.....	28
Evento 2-1: Abril de 2010.....	28

Evento 2-2: Fevereiro a Março de 2009	28
5.4.3: Formação de vórtice no lado leste do ET	30
Evento 3-1: Março de 2010.....	30
Evento 3-2: Julho de 2011	32
Evento 3-3: Fevereiro a Março de 2012	34
5.4.4: Interação entre vórtices ciclônicos no ET.....	36
Evento 4-1: Abril a Junho de 2011	36
6. DISCUSSÃO	38
6.1 Presença-ausência de feições identificáveis.....	38
6.2 Tipo de feição identificada.....	39
6.3 Tamanho das feições.....	39
6.4 Estudos de caso	40
Tipo 1: Translação acompanhando o contorno batimétrico.....	40
Tipo 2: Vórtices gerando filamento com elevadas concentrações de clorofila- <i>a</i>	41
Tipo 3: Formação de vórtice no lado leste do ET	41
Tipo 4: Interação entre vórtices ciclônicos no ET	42
7. CONCLUSÕES	43
8. REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

A complexidade da circulação oceânica ao largo do Brasil está intimamente relacionada à interação das correntes oceânicas com o seu entorno. Essa interação tem implicações bastante significativas na formação de feições vorticais. Neste contexto, destaca-se a ocorrência de uma importante feição ciclônica desenvolvida ao largo do Espírito Santo, o Vórtice de Vitória (VV) (Schmid *et al.*, 1995).

É sabido que os vórtices ciclônicos no oceano apresentam em seu núcleo um movimento vertical ascendente que permite às águas mais profundas e ricas em nutrientes alcançarem a camada superficial e opticamente ativa. As alterações de propriedades químicas da água, associadas à presença de vórtices, tem efeito sobre composição biológica marinha, principalmente quando se trata das comunidades planctônicas. Como consequência deste processo, tem-se observado que associado a feições ciclônicas há um incremento de biomassa de produtores primários identificada pelo aumento da concentração de clorofila-*a* na camada superficial do oceano (Oschlies e Garçon, 1998; Bibby *et al.*, 2008; McGillicuddy Jr. *et al.*, 2007), inclusive no VV (Gaeta *et al.*, 1999).

Além do efeito sobre a composição da comunidade biológica, os vórtices atuam na distribuição de suas propriedades para águas adjacentes e na determinação da circulação dos oceanos, bem como nas trocas de propriedades entre a plataforma continental e as águas oceânicas (Robinson, 1983). Deste modo, o estudo de tais feições e sua interação com o seu entorno permite uma melhor compreensão da circulação oceânica, bem como os processos químicos e biológicos associados a sua ocorrência.

O papel exercido sobre a hidrodinâmica local e importância ecológica dessas feições, tem motivado a comunidade oceanográfica a compreender melhor a sua dinâmica. A respeito do VV, poucos são os trabalhos já desenvolvidos e o estado do conhecimento no que tange a sua dinâmica, mecanismos de formação e de translação e importância ecológica ainda se mostra incipiente. Neste ínterim, o estudo de vórtices na região do Embaiamento de Tubarão pode prover informações relevantes com relação à influência desta feição na dinâmica local e seu efeito no incremento de biomassa fitoplantônica em áreas adjacentes.

No presente estudo, assumiu-se como hipótese que a resposta da comunidade biológica ao processo físico inerente aos vórtices ciclônicos permite a observação sinótica dessa feição, em função do potencial incremento de clorofila-*a* na camada fótica durante o desenvolvimento de feições ciclônicas. Cabe ressaltar que optou-se pela observação de feições ciclônicas a partir concentração de clorofila-*a* em função da boa resolução espacial e temporal quando comparada a resolução de imagens de altimetria. A respeito de imagens de TSM a concentração de clorofila-*a* apresenta outra vantagem, pois a primeira é também limitada pelo forte aquecimento superficial nas regiões tropicais que pode mascarar os gradientes horizontais de temperatura associados aos vórtices ciclônicos.

Tendo em mente esse efeito dos vórtices ciclônicos sobre a comunidade de produtores primários na camada subsuperficial do oceano, neste trabalho, imagens do sensor MODIS, de janeiro de 2008 e dezembro de 2012, da concentração de clorofila-*a* foram utilizadas para identificar e descrever os vórtices ciclônicos recorrentes na região do ET, ao largo do Espírito Santo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vórtices

Vórtice pode ser definido como uma parte ou volume de uma corrente oceânica que desenvolve uma circulação fechada com certa persistência ao redor de seu eixo vertical (Cushman-Roisin, 1994). Souza (2005) os descreve como sendo feições bem definidas de forma quase circular ou elíptica, que apresentam forte gradiente de propriedades em relação às águas adjacentes.

Os vórtices no oceano podem ser classificados em dois tipos: os vórtices ciclônicos e anticiclônicos. Essa classificação é baseada no sentido de rotação dos vórtices em relação ao sentido de rotação da Terra, os primeiros com giro no sentido de rotação do planeta e o segundo no sentido contrário. No hemisfério sul (norte) os vórtices ciclônicos apresentam sentido horário (anti-horário) e os anticiclônicos apresentam sentido anti-horário (horário). Outra característica que distingue vórtices ciclônicos e anticiclônicos é o movimento vertical do fluido no seu interior. As feições ciclônicas são conhecidas por originarem um movimento vertical ascendente em seu núcleo, enquanto que as anticiclônicas apresentam uma convergência em superfície e posteriormente afundamento no seu interior (Cushman-Roisin e Beckers, 2006).

As principais regiões de formação de feições vorticais são as bordas continentais margeadas pelas Correntes de Contorno Oeste (CCO). As CCOs fecham a circulação dos giros subtropicais, e são descritas na literatura como estreitas, de fluxo intenso e bem definidos (ex., Silveira, 2000). Essas características dinâmicas fazem das CCOs sítios favoráveis para o desenvolvimento de instabilidades no fluido, que posteriormente podem desencadear a formação de vórtices.

As instabilidades no oceano podem ser de dois tipos: instabilidade baroclínica e instabilidade barotrópica. De acordo com Campos (1990), no primeiro caso, a energia potencial do fluxo, devido ao cisalhamento vertical do fluxo básico, atua como fonte de energia para o crescimento do vórtice. Já no caso barotrópico, a energia cinética do próprio fluxo alimenta o desenvolvimento do vórtice em função do cisalhamento horizontal de correntes.

As instabilidades acabam por gerar o desenvolvimento de meandros que podem ou não se desprender da corrente que o originou formando a um anel ou vórtice. Embora tenham um mecanismo de formação comum, por vezes, anéis e vórtices são distinguidos na literatura em função do seu tamanho e características da massa d'água que os compõem. Apel (1999) descreve anéis como sendo aquelas feições que ao se desprenderem da corrente englobam em seu interior águas de uma massa d'água adjacente, cujas propriedades são diferentes da corrente que os originaram. Já os vórtices são descritos como aquelas feições de menor escala cuja massa d'água que o compõem é originária da corrente que o formou.

Na Corrente do Golfo (CG), a formação de vórtices ocorre a partir da formação e crescimento de meandros, de modo que as porções de fluido que se fecham dão origem aos vórtices, permitindo que a corrente retorne a um estado de equilíbrio (Figura 1) (Olson, 1991).

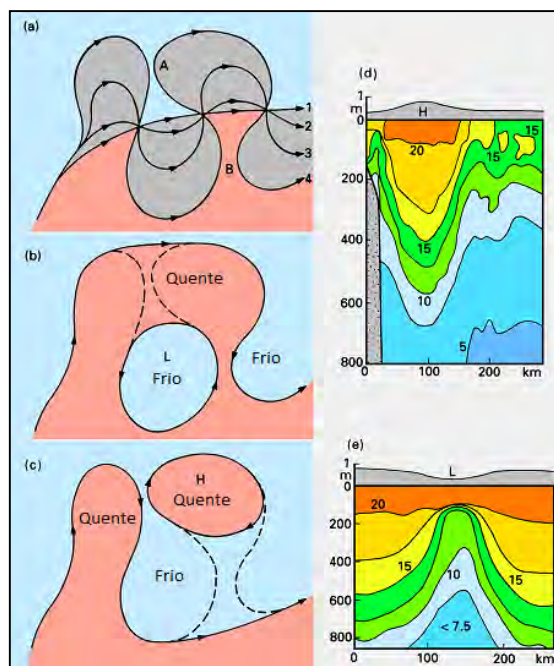


Figura 1: Esquema de formação de vórtices em um jato e sua estrutura hidrográfica associada. (a) Trajetórias sucessivas do jato, em instantes 1-4. (b) Um anel ciclônico (núcleo frio) formado após fusão da trajetória no local A. A linha pontilhada é a trajetória do CG após a formação do anel, a linha contínua é o anel, a linha pontilhada o caminho pouco antes de formação de anel. (c) Semelhante representação de um anel anticiclônico (núcleo quente) formado se o jato se funde. H e L indicam alta e baixa pressão, respectivamente. (d) Uma seção de temperatura (°C) por meio de um anel anticiclônico. (e) Uma seção através de um anel ciclônico. Painéis (a) - (c) mostram um jato no HN, a situação no HS é o inverso. Fonte: Adaptado de Richardson (1983 *apud* Tomczak e Godfrey, 2003).

Em função da sua capacidade de transportar *momentum*, calor, sal e nutrientes para além de sua região de formação, os vórtices e anéis atuam na distribuição de suas propriedades para águas adjacentes e na determinação da circulação dos oceanos (Robinson, 1983). Cabe destacar que estas feições são determinantes nas trocas de propriedades entre a plataforma continental e as águas oceânicas dificultadas pelos fortes gradientes de densidade existentes nas Correntes de Contorno (CC) (Gabioux, 2008).

2.2 Vorticidade

Para estudar o mecanismo de formação de um vórtice é preciso compreender alguns princípios de física dinâmica, onde está inserido o conceito de vorticidade. Os conceitos abordados a seguir estão baseados em Emery, Talley e Pickard (2005). A vorticidade representa a velocidade angular em um ponto no fluido, que está diretamente relacionado com o conceito de rotacional no Cálculo. O vetor de vorticidade ω é o rotacional do vetor velocidade v .

Os fluidos e tudo mais que está no planeta Terra possuem vorticidade simplesmente por causa da rotação do planeta, conhecida como vorticidade planetária. Devido à rotação da Terra, qualquer ponto à superfície do planeta tem vorticidade em torno do eixo da Terra. Essa vorticidade é conhecida como vorticidade planetária e varia com a latitude, logo qualquer partícula de água que se mova meridionalmente varia a sua vorticidade planetária.

A vorticidade do próprio movimento do fluido é chamada vorticidade relativa e é calculada a partir das velocidades do escoamento em relação à superfície da Terra. A vorticidade absoluta de uma parcela do fluido é a soma da vorticidade relativa e a vorticidade planetária.

Na oceanografia de larga escala e ciências atmosféricas, quase sempre se usa apenas a componente vertical local da vorticidade absoluta. (O eixo vertical local é na direção da gravidade local). Isto ocorre porque as camadas de fluido (para o oceano ou atmosfera) são muito estreitas se comparadas com o raio da Terra, de modo que os fluxos no seu interior são quase horizontais em relação à vertical local. Ou seja, o fluxo pode percorrer uma longa distância ao longo da superfície da terra de dezenas a milhares de quilômetros, mas não pode ir muito longe na vertical (dezenas a centenas de metros no máximo).

Compreendidos os conceitos acima, introduz-se o princípio da Conservação da Vorticidade Potencial que é um dos conceitos mais importantes na dinâmica de fluidos. A vorticidade potencial leva em consideração a altura de uma coluna de água, bem como a sua rotação local (vorticidade), e ao considerar apenas os componentes verticais locais, é definida pela Equação 1.

$$Q = \frac{(\zeta + f)}{D}$$

Equação 1

Q = vorticidade potencial;

ζ = vorticidade relativa;

f = vorticidade planetária; e

D = profundidade, se o fluido é não estratificado.

Sob a ação de forças conservativas, a vorticidade potencial Q é conservada. Assim, qualquer alteração ambiental que provoque uma variação da espessura da coluna d'água, ou ganho de vorticidade relativa ou planetária deverá ser compensado pela alteração de pelo menos uma das demais variáveis, conforme a equação acima. Isso significa que se uma coluna é encurtada e achatada (conservando a massa), então ela deverá girar mais devagar. Se, por outro lado, uma coluna é estirada e comprimida (conservando a massa), ela deverá rodar mais rapidamente. Portanto, um aumento na espessura D (estiramento) da coluna d'água deve resultar, em seguida, em um ganho de vorticidade da parcela de água, fazendo com que esta tenda a girar ciclonicamente. No cenário inverso, uma diminuição da espessura ("achatamento") resulta numa diminuição na vorticidade, e a parcela de água tende a adquirir rotação anticiclônica (Figura 2).

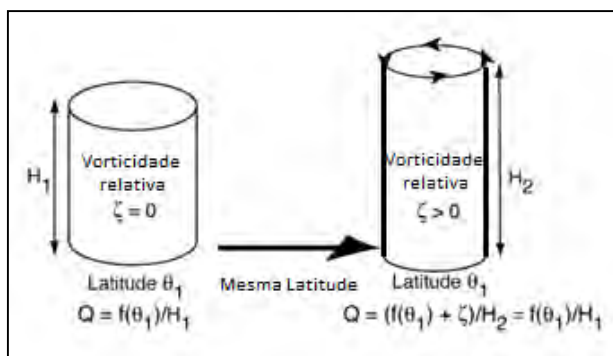


Figura 2: Esquema da Conservação da vorticidade potencial: mudanças na espessura e vorticidade relativa, assumindo-se f constante (f constante). Fonte: Adaptado de Emery, Talley, e Pickard (2005).

2.3 Translação de vórtices

O movimento dos vórtices pelos oceanos é influenciado basicamente por três fatores: a autopropulsão intrínseca à feição, a advecção por correntes externas e a influência dos vórtices próximos (Azevedo e Mata, 2010). Analisando o balanço entre as forças atuantes sobre vórtices, esses mesmos autores determinaram uma expressão matemática (Equação 2) que permite o cálculo da velocidade aproximada de translação de vórtices isolados (c). Com isso, eles demonstraram que no plano- β , todo vórtice isolado é sempre autopropulsionado para oeste independente do hemisfério em que se encontre ou mesmo do seu sentido de rotação.

$$c = - \frac{\beta \iint_A \psi dx dy}{f_0 \iint_A dx dy (h-H)}$$

Equação 2

f_0 é o parâmetro de Coriolis na latitude central Y_0 do plano- β ; β é o fator de correção do parâmetro de Coriolis em função da latitude; ψ é uma função de transporte, a qual é constante ao longo de uma linha de corrente; h é a profundidade do vórtice e H é a profundidade equivalente a h , do fluido externo ao vórtice.

Na equação acima, tem-se no lado direito da equação o numerador correspondente a força- β e o denominador representando a diferença entre o volume do vórtice isolado e o volume do fluido externo deslocado pelo movimento do vórtice, referente à força ambiente. A força- β é a resultante entre a força- β planetária e a força- β topográfica.

A força- β planetária é consequente da ação da força de Coriolis sobre cada partícula do fluido, de modo que cada partícula, ao longo de sua trajetória circular no interior do vórtice, tende a ser defletida para a esquerda (direita) no hemisfério sul (norte). Decompondo-se a força de Coriolis no sistema cartesiano x e y , observa-se que as componentes zonais sempre se anulam, pois tem mesma magnitude em pontos simetricamente opostos. Já as componentes meridionais se somam, já que a força de Coriolis é maior quanto mais próximo aos polos. Assim, as partículas localizadas no hemisfério do vórtice mais próximo ao equador tem uma componente meridional menor que aquelas partículas localizadas no hemisfério oposto do vórtice. Portanto, a resultante da componente meridional dessa força mostra que, em qualquer hemisfério, os vórtices ciclônicos (anticiclônicos) tendem a sofrer um desvio em sua translação em direção aos polos (equador), devido a essa força interna β .

Na Figura 3 são representadas as componentes zonais e meridionais da força de Coriolis, criando-se então uma força líquida (FC_L) que, no caso do hemisfério Norte do vórtice isolado, aponta para sul.

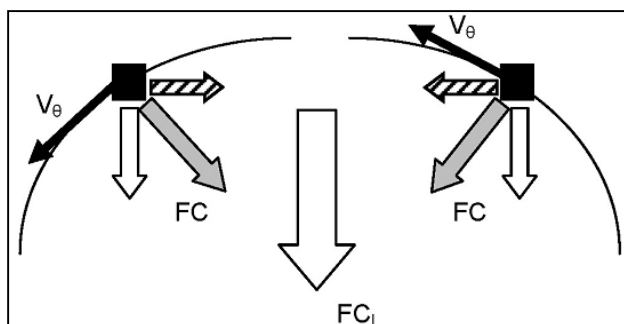


Figura 3: Forças que atuam nas partículas de fluido que passam pela porção norte de um vórtice anticiclônico que translada zonalmente pelo hemisfério Sul da Terra. O vetor preto representa a velocidade angular destas partículas, a seta cinza é a força de Coriolis, as setas branca (pequena) e hachurada são as componentes meridional e zonal desta força, respectivamente, e a seta branca grande representa a força de Coriolis resultante sobre a feição devido aos movimentos representados. Fonte: Azevedo e Mata (2010).

A força ambiente consiste na força que o fluido externo ao vórtice impinge sobre ele devido ao seu deslocamento; logo, tem sentido contrário ao sentido de translação do vórtice.

A autopropulsão para oeste é resultado da interação entre a força- β , a força de Coriolis e a força ambiente.

Analogamente ao efeito da força- β planetária, a translação de vórtices pode ser influenciada pela batimetria, causando o efeito β topográfico.

Neste caso, o efeito da batimetria sobre a translação de vórtices é similar ao efeito da variação de Coriolis (β) (Nof, 1983). Se um vórtice encontra-se, limitado inferiormente por um fundo inclinado, as partículas de fluido ao redor do vórtice serão movidas para cima ou para baixo neste declive e, neste trajeto, passam por ajustes de vorticidade. O resultado é um desvio do vórtice mantendo sempre a região mais rasa à sua esquerda (direita) no Hemisfério Sul (Norte) (Cushman-Roisin e Beckers, 2006), em função da conservação da vorticidade potencial.

Estima-se que, devido a declividade do fundo, vórtices no oceano profundo podem migrar com velocidades entre 4 e 9 km/d e transladar por alguns milhares de km (Nof, 1982).

2.4 O Vórtice de Vitória

O meandramento da CB resulta em diversas feições de mesoescala principalmente entre 20°S e 31°S, onde são desenvolvidos redemoinhos, meandros e frentes associados ao escoamento da CB (Silveira, 2004; Garfield, 1990). Ao largo do sudeste brasileiro, o padrão meandrante da CB resulta na formação de vórtices que eventualmente se desprendem dessa corrente. Essas estruturas foram diversas vezes descritas na literatura (ex., Signorini, 1978; Garfield, 1990; Calado, 2001; Fernandes, 2001). Uma dessas feições vorticais associadas à CB ainda pouco descritas é o Vórtice de Vitória, que se forma na região oceânica ao largo do Espírito Santo.

A primeira descrição hidrográfica e dinâmica do VV foi realizada por Schmid *et al.* (1995), a partir de dados hidrográficos provenientes do cruzeiro METEOR 15 em fevereiro de 1991 ao longo da latitude de 20,5°S, de boias de deriva (ARGO) e imagens de TSM obtidas por satélite (NOAA 11) (Figura 4).

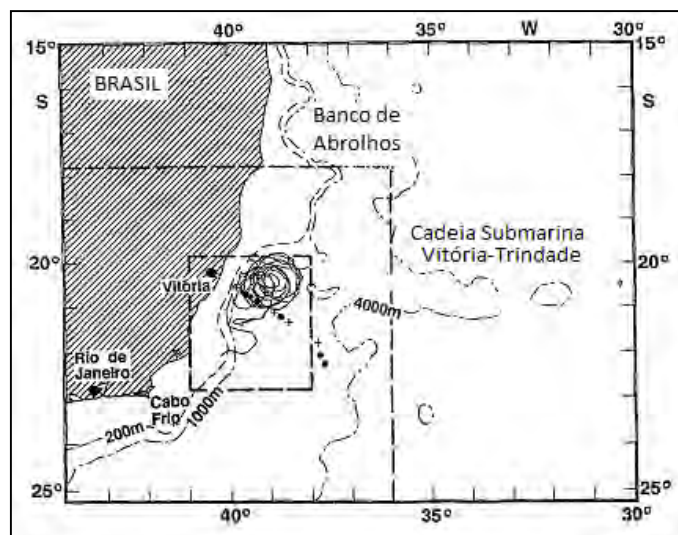


Figura 4: Localização das estações hidrográficas durante o cruzeiro METEOR 15/2 e a trajetória de derivadores durante o cruzeiro (Brügge, 1992) na região de formação do VV. Fonte: Adaptado de Schmid *et al.* (1995)

Os resultados deste trabalho evidenciaram a ocorrência de uma feição ciclônica ao largo do Espírito Santo, com diâmetro médio de 50 km e extensão vertical de 700 m. Também foram observadas a inclinação da termoclina na direção leste-oeste (20 m a oeste e 40 m a leste) e temperatura até 8°C menores (a 100 m) que nas áreas adjacentes ao vórtice. Durante essas observações, o VV se localizava a oeste da CB e seu transporte (2,9 Sv) correspondeu a cerca de 1/3 do transporte da respectiva corrente (9,4 Sv), indicando a importância para os níveis de energia e a circulação local. O vórtice observado possuía velocidades de 50 cm/s para sul no lado leste e 40 cm/s para norte no lado oeste do vórtice. A assimetria do VV e sua posição em relação a CB foram indicativos da interação do VV com a CB.

De acordo com esses autores, provavelmente a translação do VV se deve a topografia local, a interação com o escoamento da CB ou mesmo a sua interação com a Cadeia Submarina Vitória-Trindade (CSV-T).

Com base nas imagens de TSM obtidas no período no qual foi possível a observação remota desta feição, os autores sugeriram que o mecanismo de formação do VV está relacionado ao desenvolvimento de uma ressurgência costeira, causada pela atuação de ventos na região. A interação entre essa ressurgência e a porção interna do fluxo da CB, resultou na formação de um vórtice ciclônico (Figura 5) que transladou para NE. Contrariamente, Silveira (2004) propõe que a formação de vórtices ciclônicos é que impulsiona a “ressurgência de quebra de plataforma” ao longo do escoamento da CB, ocasionando a intrusão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na porção costeira e não o contrário como proposto por Schmid *et al.* (1995).

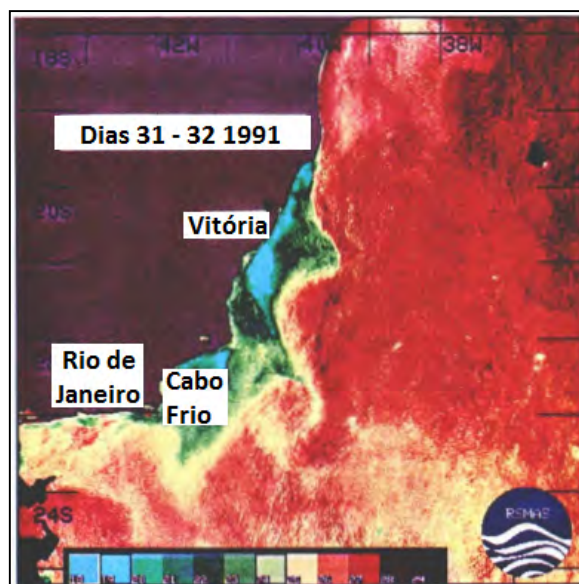


Figura 5: TSM computado com dados coletados pelo AVHRR nos dias julianos 31 e 32 do ano de 1991. O Vórtice de Vitória é evidente devido aos menores valores de TSM observados em formato circular ao largo da cidade de Vitória. Fonte: Schmid *et al.* (1995).

Durante uma campanha oceanográfica no outono de 1995 dentro do projeto JOPS-II-9, Gaeta *et al.* (1999) também detectaram a presença do VV. Os autores encontraram a 50 m de profundidade altas concentrações de nitrato (0,6 a 1,5 μM). Além disso, foram observadas concentrações de clorofila-*a* e produtividade primária entre 1 a 2 vezes maiores na camada superficial do que sobre o Banco de Abrolhos (BA). Esse estudo permitiu inferir a contribuição do bombeamento de águas de camadas mais profundas e ricas em nutrientes pelo VV e o efeito no aumento da produção fitoplanctônica nas águas tropicais da costa leste brasileira. Outros autores ainda especularam o fato desta feição ciclônica poder ser um importante exportador de nutrientes para a região do BA através de sua translação (Arruda *et al.*, 2013; Fragoso e Torres Jr., 2009).

A variabilidade temporal do VV investigada por Costa (2007) o caracterizou como uma feição transitória cujo desenvolvimento ocorre o final do verão e início do outono, com maior recorrência nos meses de março e abril. Fragoso e Torres Jr. (2009) averiguaram a sazonalidade do VV a partir de campos de vorticidade relativa média produzidos a partir de resultados de simulação numérica. Os maiores valores (negativos) ocorreram no período entre janeiro e abril, concordante com a ocorrência do VV. A partir de maio, a vorticidade relativa diminuiu em módulo favorecendo a ocorrência de rotação anticiclônica.

Os resultados de Fragoso e Torres Jr. (2009) também indicaram que a formação do VV se deve a passagem abrupta da CB de menores para maiores profundidades, em função da variação da largura da plataforma continental entre o BA e o Embaiamento de Tubarão, onde ocorre um grande estreitamento da plataforma continental. Essa variação topográfica ocasiona o estiramento do tubo de vórtice da CB que, por conservação do momento angular, gera um aumento da vorticidade relativa induzindo a formação de um vórtice ciclônico na região, o VV. Neste trabalho, ainda foi observado que o vórtice só se configura como uma estrutura coerente até aproximadamente 600m de profundidade.

Recentemente, Arruda *et al.* (2013) estudaram o deslocamento e os possíveis mecanismos que poderiam influenciar a modalidade de translação do VV. A partir de dados de altimetria, modelagem hidrodinâmica (HYCOM), histórico de dados hidrográficos e dados de expedição oceanográfica, apresentam as evidências da translação do VV rumo ao Equador. Neste trabalho,

foi observado o desprendimento do VV da CB e subsequente deslocamento para o norte, inclusive seguindo o contorno batimétrico após cruzar CSVT (Figura 6).

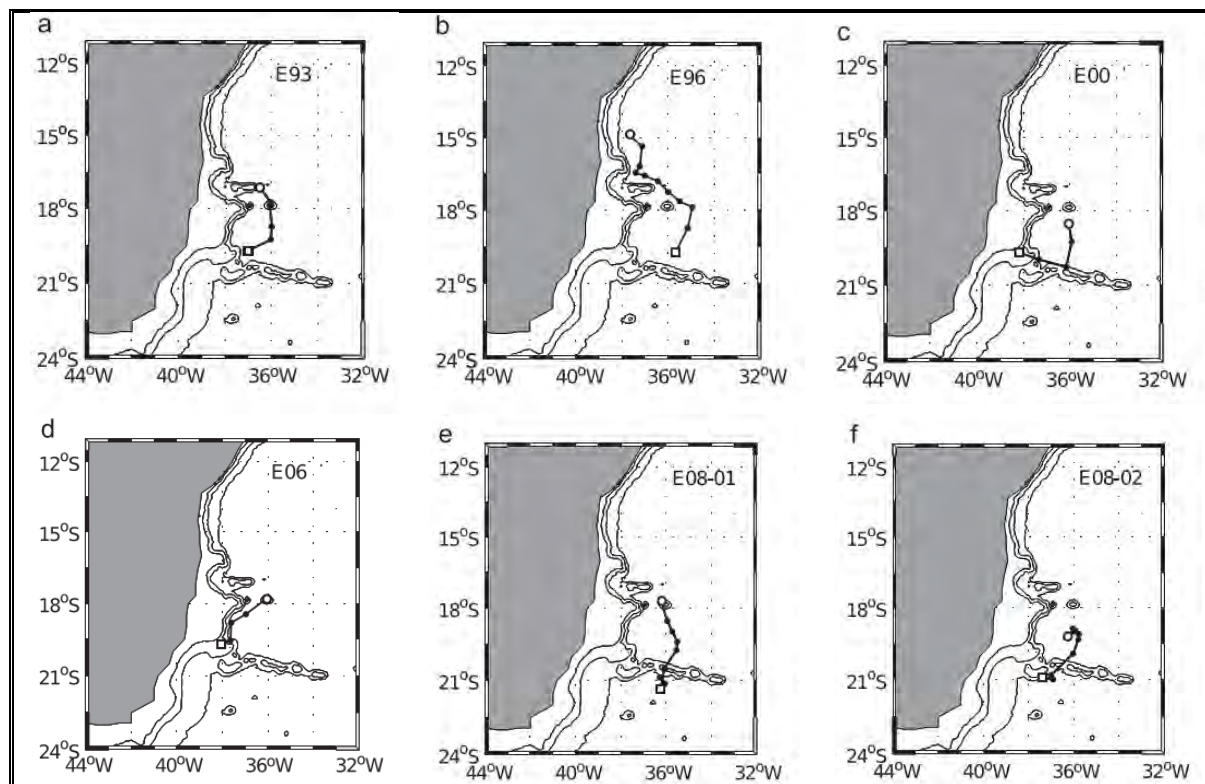


Figura 6: Trajetórias seguidas pelo VV em cada um dos eventos de translação rumo ao equador detectados nos mapas de altimetria. Em cada mapa os quadrados abertos indicam as posições onde os vórtices foram primeiramente detectados livres do meandro da CB, enquanto os círculos abertos indicam as últimas posições onde os vórtices foram identificados como estruturas vorticais coerentes. Fonte: Arruda *et al.* (2013).

Arruda *et al.* (2013) propõem que o mecanismo de translação do VV é influenciado pela interação com dois vórtices anticiclônicos recorrentes ao norte e ao sul do VV, respectivamente o Vórtice de Abrolhos (VA) e o Vórtice de Vitória Sul (VVS), conforme abaixo na Figura 7.

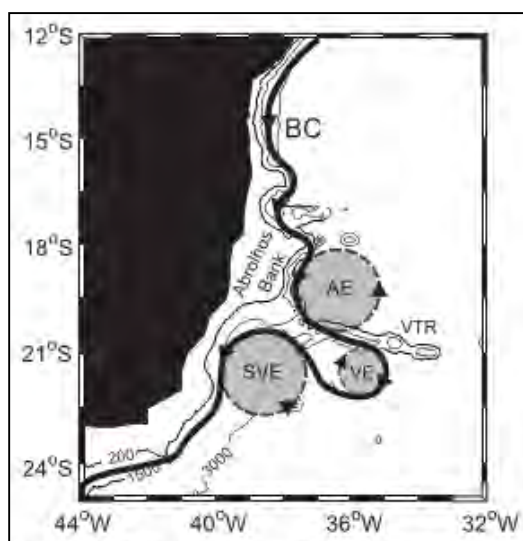


Figura 7: Esquema mostrando o VV (VE) entre VA (AE) e o VVS (SVE). Fonte: Arruda *et al.* (2013).

De fevereiro a março a formação e desprendimento do VV da CB foram notados neste trabalho. Arruda *et al.* (2013) afirmam que após seu desprendimento da CB, o deslocamento do VV para o norte é incitado pelo VVS e constataam que, no caso típico, o VV orbita ao redor do VA,

centrado em 19°S, onde o VA se apresenta como uma estrutura anticiclônica profunda alimentado pelo fluxo intermediário da Subcorrente Norte do Brasil (SNB). Já em situações anômalas, o enfraquecimento do VA permite o deslocamento do VV rumo ao equador alinhado com a borda da plataforma devido a sua interação com a topografia e a advecção pela SNB.

Servino (2014) buscou analisar os possíveis mecanismos de formação do Vórtice de Vitória e sugeriu que os vórtices ciclônicos do ET podem ser formados a partir de dois mecanismos. O primeiro se deve ao fechamento de meandros associados ao desenvolvimento de instabilidades baroclínicas nas regiões adjacentes a CB (Figura 8), podendo ocupar o embaimento posteriormente devido a sua translação. O segundo processo ocorre a partir da recirculação do jato norte da CB, formado no processo de bifurcação da corrente no talude do embaimento.

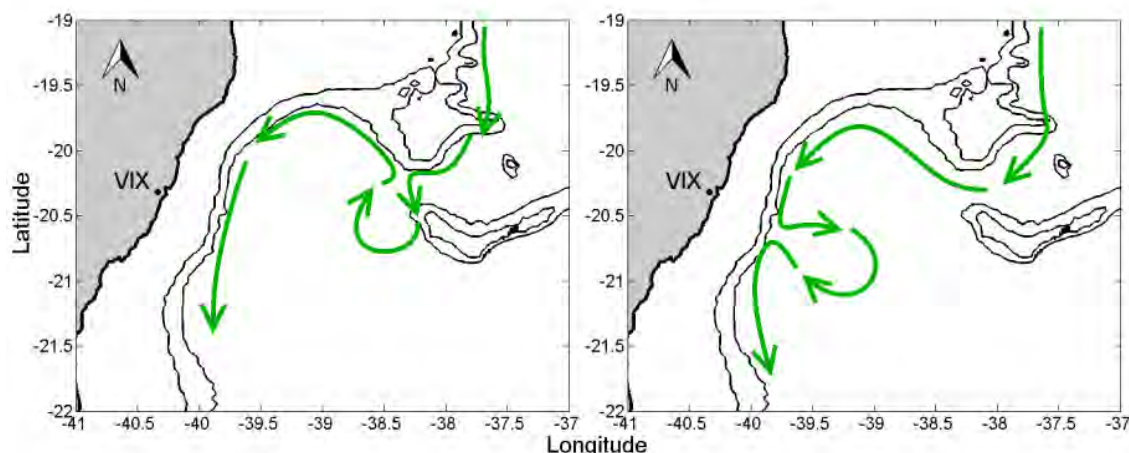


Figura 8: Modelo esquemático da formação dos vórtices a partir do processo de fechamento de um meandro da Corrente do Brasil (setas verdes). As linhas pretas contínuas representam as isóbatas de 0 m (linha de costa), 100 m e 1000 m. A área cinza escura mostra a região continental. Fonte: Servino (2014).

A partir da análise de resultados de um experimento em modelagem numérica com o modelo HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model), Servino (2014) buscou caracterizar o processo de bifurcação da CB no ET com o intuito de determinar seu papel na formação de vórtices ciclônicos. Baseando-se no comportamento da bifurcação de um jato geostrofico ao interagir com uma parede, como observado no mar de Alborão por VIÚDEZ *et al.* (1998 *apud* Servino, 2014) e nos experimento de GLEIZON *et al.* (1996 *apud* Servino, 2014), Servino mostrou que o mesmo processo poderia ser observado na CB e na conseqüente formação do Vórtice de Vitória.

Resumidamente, esse processo de formação de vórtices, como estudado por Servino (2014) ocorre quando o jato da corrente é direcionado à costa em condições aproximadamente perpendiculares e, devido à interação do fluxo da corrente com o talude, esta é bifurcada, gerando dois fluxos paralelos à costa e em direções opostas. Nos casos em que esse fluxo é direcionado para uma região confinada (ex. o ET), pode ocorrer da corrente recircular, dando origem a um vórtice (Servino, 2014).

Esse autor fez um levantamento da presença ou ausência diária de vórtices ao longo de quatro anos (2008 a 2011). Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram a ocorrência da bifurcação da CB em 72% dos dias ao longo dos quatro anos de resultados analisados, onde foram identificados dois tipos diferenciados de vórtices ciclônicos, denominados por Servino (2014) de VC1 e VC2 (Figura 9).

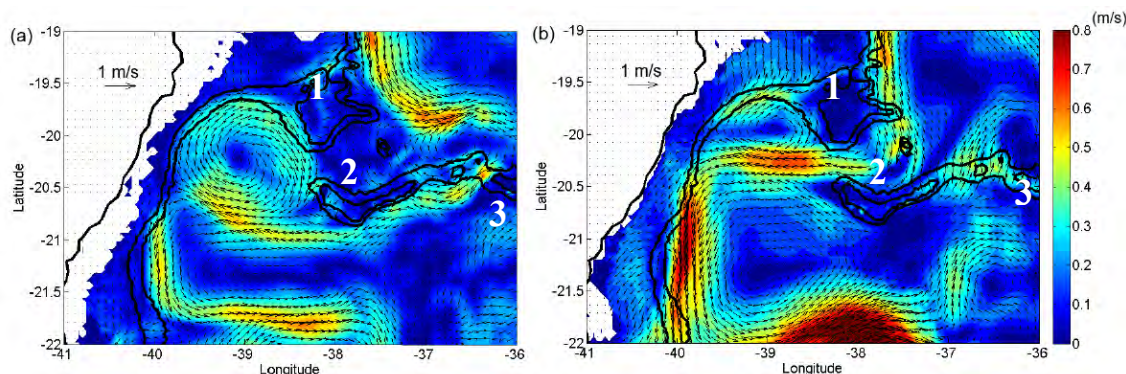


Figura 9: Snapshots de campos horizontais de velocidade do fluxo na camada isopicnal $\sigma_{\theta}=24,7\text{kg/m}^3$ mostrando ocorrências características de (a) um VC1 e (b) um VC2. As linhas pretas contínuas representam as isóbatas de 0 m (linha de costa), 100 m e 1000 m. O módulo da velocidade é representado pela paleta de cores. Os números na figuram referem-se aos canais 1, 2 e 3 entre os bancos da CVT por onde flui a CB. Fonte: Servino (2014).

O VC1 foi caracterizado com uma feição circular com cerca de 140 km de diâmetro, ocupando todo o ET. O VC2, por sua vez, apresentou um formato achatado, confinado na parte mais ao norte do embaçamento, com aproximadamente 100 km de diâmetro em seu maior eixo. Além disso, Servino (2014) observou que o VC1 (em média 35,8 dias) apresentou maior tempo de duração que o VC2 (em média 8,5 dias).

A partir da distinção entre os dois tipos de vórtices, Servino (2014) analisou a sazonalidade de ocorrência das feições, apresentada na Figura 10. Foi observada uma forte tendência de aparecimento do VC1 apenas nos meses de fevereiro a maio. Enquanto que, o VC2 foi mais recorrente entre novembro e janeiro, mas também foi verificado entre junho e outubro em algumas ocasiões.

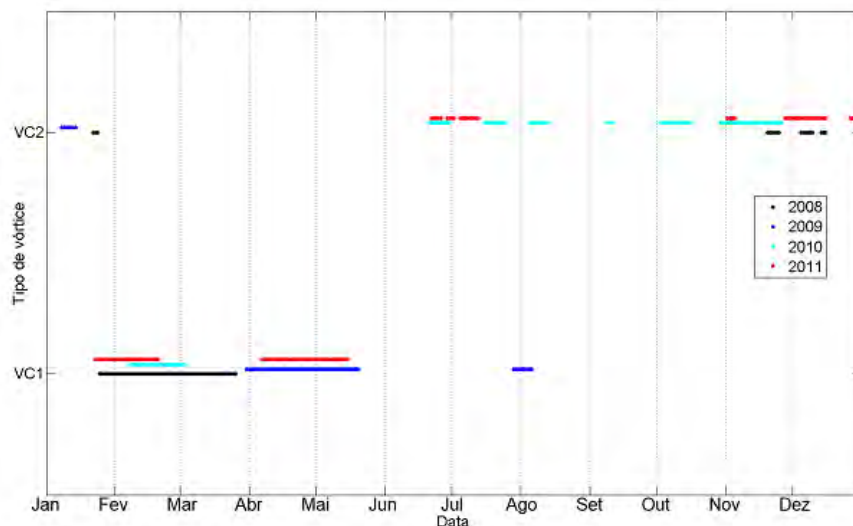


Figura 10: Ocorrência dos dois tipos de vórtices ciclônicos encontrados associados à bifurcação da CB no Embaçamento de Tubarão em relação à sua data de observação. A ocorrência em diferentes anos é marcada pela diferença nas cores dos pontos, conforme legenda. Fonte: Servino (2014).

Essa comparação indica uma possível correlação entre a diminuição do transporte pelo canal 2 com a ocorrência do VC1. Os padrões de transporte de volume pelos canais 2 e 3 mostraram ter importância na ocorrência e determinação do tipo de vórtice ciclônico observado no ET. Em termos médios, a presença do VC1 foi associada a uma redução nos valores de transporte por ambos os canais. O VC2 foi associado a valores especialmente altos pelo canal 2. E a ausência de vórtices a valores altos pelo canal 3 e intermediários pelo canal 2.

Servino (2014) constatou que a formação dos vórtices esteve marcadamente relacionada à combinação entre o ângulo de incidência do jato da CB em relação à costa e o transporte incidente da CB. Os resultados indicaram que ambos os vórtices VC1 e VC2 estão relacionados à presença de um jato para norte no Embaiamento de Tubarão com um transporte de volume consideravelmente maior do que o valor para a ausência de vórtices. A ausência de vórtices foi associada aos períodos de bifurcação nos quais tanto o ângulo como o transporte incidente foram baixos. A presença de VC1 foi associada a períodos de alto ângulo e baixo transporte incidente. Por fim, a presença de VC2 foi associada a baixos ângulos e altos valores de transporte incidente.

Através de dados hidrográficos obtidos durante o Cruzeiro Oceanográfico MCTIII, realizado em dezembro de 2011, Martins (2014) também identificou uma feição ciclônica no ET centrada em 20,45°S e 38,67°O e com diâmetro de 50 km, referida pela autora como VV. O VV foi caracterizado pelas isolinhas de temperatura, salinidade e densidade 50 dbar mais elevadas no centro do vórtice, núcleo 4° C mais frio, 0,83 g/kg menos salino e 0,45 kg/m³ (em 112 dbar) mais denso do que as águas ao seu entorno.

Uma importante característica identificada por Martins (2014), foi que, contrariamente ao observado por Schmid *et al.* (1995) e Passos (2011), as velocidades geostróficas do VV calculadas nesse trabalho mostraram maiores valores de velocidade máxima e transporte em seu lado oeste (0,33 m/s e 1,76 Sv) fluindo para nordeste, do que em seu lado leste (1,41 Sv e 0,23 m/s) fluindo para sudoeste. Martins (2014) então sugeriu que a complexa dinâmica interna do vórtice pode dar origem a movimentos ageostróficos (Koszalka *et al.*, 2010 *apud* Martins (2014)).

Os dados hidrográficos obtidos no trabalho de Martins (2014) evidenciaram que os sinais termal e salino do VV não afloram a superfície, mas os dados de ADCP permitem observar a inversão de velocidade no campo superficial (Figura 11). A autora compara esse resultados com observado por Schmid *et al.* (1995), onde a formação de uma ressurgência deu origem a um meandro de núcleo frio, que se desprende e deu origem a um vórtice e, na sequência, o aquecimento superficial da água formou uma “capa” térmica que impediu a identificação da feição, através da observação superficial da temperatura.

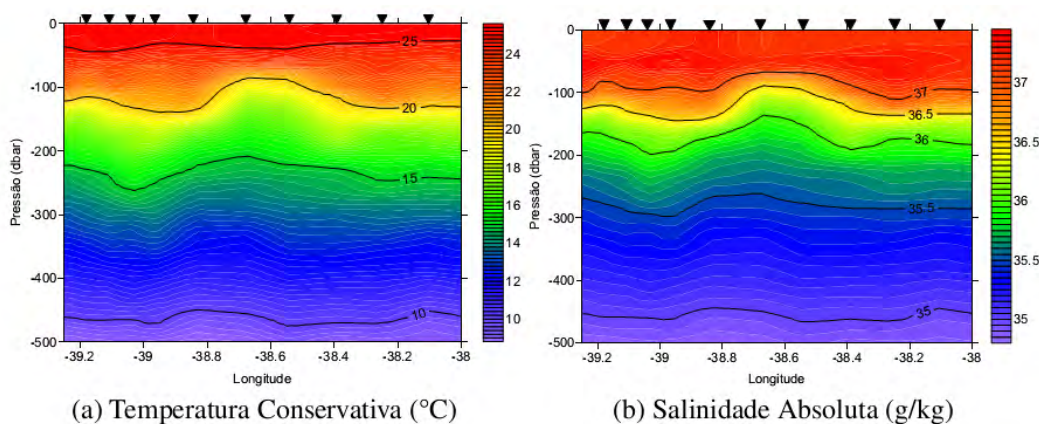


Figura 11: Estrutura vertical dos parâmetros obtidos por CTD na área do Vórtice de Vitória. (a) Temperatura Conservativa (°C). (b) Salinidade Absoluta (g/kg). Fonte: Martins (2014).

2.5 A observação de vórtices no oceano

As observações oceanográficas no oceano têm sido realizadas, principalmente, através de coletas de dados oceanográficos *in situ* e técnicas de sensoriamento remoto. A dificuldade e alto custo das expedições oceanográficas para medições e coleta *in situ* fazem do sensoriamento remoto uma ferramenta complementar que garante uma análise mais abrangente espacial e temporalmente. Isso porque as interpretações de dados sinóticos são mais aprimoradas quando integradas com dados de outros tipos de medidas. Por este motivo tem sido bastante aplicado em estudos oceanográficos de mesoescala (Souza, 2005).

A temperatura na superfície do mar (TSM) tem sido comumente utilizada na identificação de vórtices, devido a alteração da TSM associada essas feições (Kampel e Souza, 2005; Teixeira, 2009; Ciotti e Kampel, 2001; Gaeta *et al.*, 1999). A temperatura mensurada através do sensoriamento remoto é referente a uma camada superficial milimétrica da interface ar-mar, e por isso, denominada temperatura de pele (Souza, 2005). Uma das limitações dessa medida é que em regiões de tropicais, onde a superfície do oceano se encontra exposta ao forte aquecimento superficial, a distinção de tais feições pode ser impedida por esse aquecimento, como observado por Schmid *et al.* (1995) e Martins (2014).

Outro parâmetro que permite a observação remota de feições oceanográficas é a cor do oceano. A determinação da cor do oceano obtida através do sensoriamento é restrita a uma camada subsuperficial da água, conhecida como primeira profundidade óptica, que consiste na camada até onde a radiação chega a 37% da radiação incidente sobre a superfície (Gordon e McCluney, 1985 *apud* Souza, 2005). Isso indica que as concentrações obtidas a partir do sensoriamento remoto não são referentes à camada fótica como um todo, mas sim a primeira profundidade óptica.

A cor do oceano está diretamente relacionada aos materiais e/ou substâncias presentes na água do mar. A matéria orgânica particulada; matéria orgânica dissolvida colorida (ou substância amarela), o material particulado em suspensão, detritos orgânicos, como organismos planctônicos mortos, suas carapaças ou excretas, a densidade fitoplanctônica e respectiva concentração de clorofila-*a* e outros pigmentos conferem a água características ópticas que podem ser imageadas pelos sensores. Devido às propriedades ópticas de cada substância presente na água do mar, é possível identificar aspectos dinâmicos da coluna d'água com base nas alterações dessa propriedade em resposta a fenômenos hidrodinâmicos.

Dado que o movimento vertical ascendente no centro de feições ciclônicas favorece a introdução de águas mais ricas em nutrientes presentes nas camadas mais profundas dos oceanos na camada opticamente ativa, tem sido observado o incremento de biomassa fitoplanctônica associado a essas feições ciclônicas evidenciado pelo aumento da concentração de clorofila-*a* na superfície (Silveira, 2004; Oschlies e Garçon, 1998; Bibby *et al.*, 2008; McGillicuddy Jr. *et al.*, 2007; Gaeta *et al.*, 1999). Esse aumento na concentração de pigmentos fotossintetizantes possibilita a identificação de vórtices ciclônicos a partir da observação remota da concentração de clorofila-*a*.

Brown *et al.* (2008) investigaram variabilidade espacial e mudanças temporais na composição da comunidade de plâncton num vórtice de núcleo frio, denominado ciclone Opal, próximo as ilhas do Havaí e Maui, em fevereiro de 2005. O ciclone Opal se estendeu por 200 km de diâmetro com um domo intenso das isopícnais e um núcleo de água com temperaturas mais baixas atingindo a superfície (Nencioli *et al.*, 2008 *apud* Brown *et al.*, 2008). O domo das isopícnais permitiu o alcance da água mais profunda contendo fitoplâncton limitado pela luz e abundantes em nutrientes para a zona eufótica, criando um ambiente propício ao crescimento

rápido e acúmulo de biomassa no centro do vórtice (Brown *et al.*, 2005). A distribuição vertical de clorofila-*a* refletiu marcadamente esse domo das isopicnais (Figura 12), com o máximo clorofila-*a* em cerca de 125 m nas bordas ciclone Opal e no centro do vórtice, o encontrou-se elevado a cerca de 60 m. Isso resultou numa área de elevada biomassa fotossintética no ciclone Opal restrita a uma região de núcleo central de 40 km diâmetro (Nencioli *et al.*, 2008 *apud* Brown *et al.*, 2008) evidenciada pela distribuição de clorofila-*a* através do vórtice.

Os resultados de Brown *et al.* (2005) mostraram que o desenvolvimento de vórtice ciclônico tem implicações no incremento de biomassa fitoplanctônica, principalmente na região central do vórtice e, portanto, esse efeito pode restringir-se ao núcleo da feição. Devido a esse efeito, o uso da clorofila-*a* para estimar sua dimensão de vórtices ciclônicos no oceano pode subestimar o tamanho real da feição.

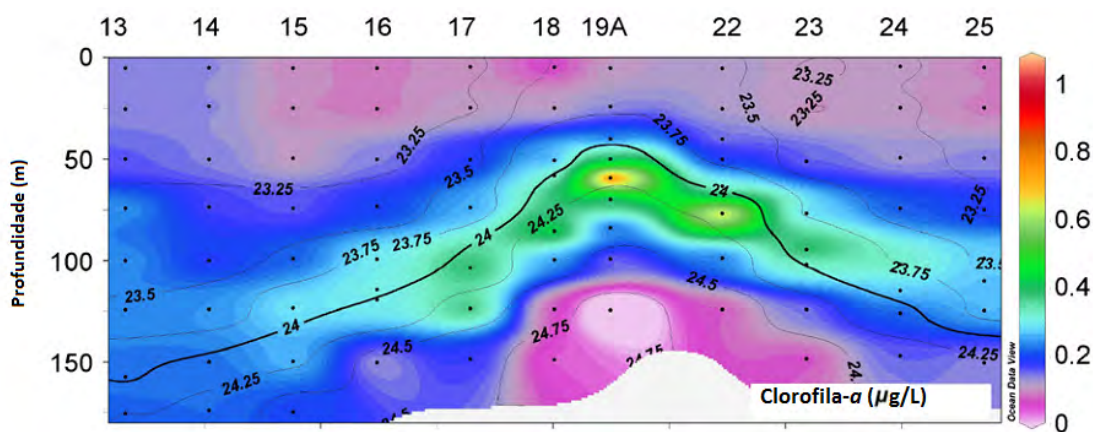


Figura 12: Distribuição de clorofila-*a* (mg / L) através do vórtice. Fonte: Adaptado de Brown *et al.* (2005).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Caracterizar a variação espaço-temporal de feições ciclônicas na área de ocorrência do VV através de imagens de satélite da concentração de clorofila-*a*.

3.2 Objetivos Específicos

- Analisar as feições identificadas pela cor do oceano quanto ao seu período de ocorrência, posicionamento geográfico, suas dimensões e forma apresentadas;
- Identificar os padrões de deslocamento das feições identificadas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo é o Embaiamento de Tubarão, (área em destaque na Figura 13), uma região onde ocorre a formação do VV. A área corresponde ao retângulo definido entre as latitudes entre 19,5 – 21,5° S e entre as longitudes 40 - 38°W.

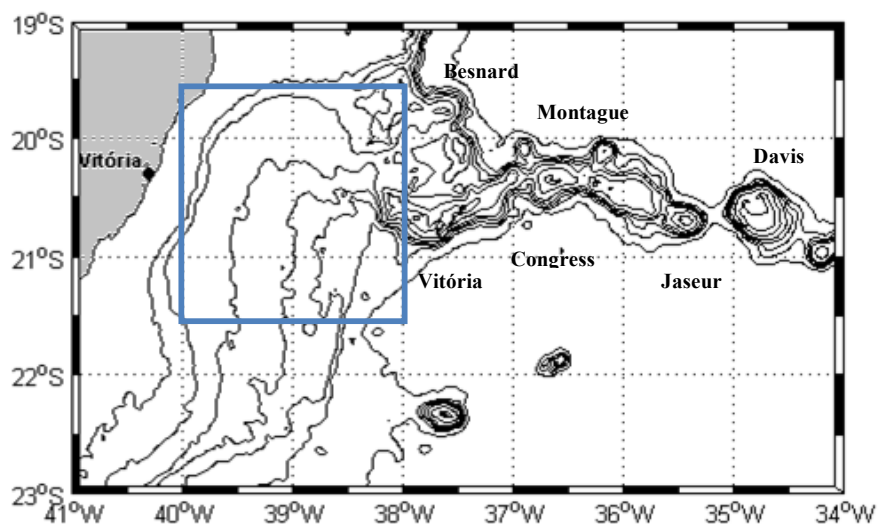


Figura 13: A região em destaque delimita o Embaiamento de Tubarão, a área foco deste estudo. Indicações do nome dos bancos e montes da CVT. Os contornos batimétricos representam as profundidades de 80, 1000, 2000, 2300, 2700, 3000 e 3500 m de profundidade.

A margem continental ao largo do Espírito Santo se mostra bastante distinta no litoral brasileiro e é marcada pela grande variação da extensão da plataforma continental. A porção ao norte do Embaiamento de Tubarão, entre as latitudes 17°30'S e 19°20'S é marcada pela presença do BA, onde a plataforma continental mostra-se bastante extensa, com mais de 200 km a partir da linha de costa (Motoki *et al.*, 2012). No Embaiamento de Tubarão, próximo à cidade de Vitória, a plataforma continental é estreita, em torno de 40 km (Motoki *et al.*, 2012). No sentido sul, a plataforma continental aumenta gradativamente, apresentando uma largura média de 80 km (Zembruski, 1979 *apud* Figueiredo Jr. *et al.*, 2011).

Com relação às massas d'água, a região foco de estudo é caracterizada pela presença Água Tropical (AT) em superfície sobrepondo-se a ACAS e ambas formando a CB. Abaixo destas, encontram-se a Água Intermediária Antártica (AIA) e Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (Silveira, 2000).

A circulação superficial nesta região é dominada pela CB, a CCO que é associada ao giro subtropical do Atlântico Sul (Peterson e Stramma, 1991). Originada devido a bifurcação da Corrente Sul-Equatorial no encontro com o continente americano (ao sul de 10°S) (Silveira *et al.*, 2000), a CB flui para sul ao longo da margem continental da América do Sul até o encontro com a Corrente das Malvinas próximo a 36°S onde forma a confluência Brasil-Malvinas (Olson, 1988).

4.2 Metodologia

4.2.2 Dados

No presente estudo foram usadas 5 anos de imagens diárias (janeiro de 2008 a dezembro de 2012) de clorofila-a nível 2 de processamento obtidas pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) instalado no satélite AQUA. As imagens de clorofila-a foram obtidas no Portal OceanColor (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). As imagens possuem resolução espacial de 1 km x1 km e os arquivos são disponibilizados em HDF (*Hierarchical Data Format*). O processamento para a obtenção de dados de concentração de clorofila-a é realizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e nenhum processamento posterior foi realizado em laboratório, a não ser o ajuste da imagem a uma projeção de Mercator.

4.2.2 Manipulação das imagens

Para a manipulação e visualização das imagens foram utilizados os programas computacionais SeaDAS™ 7.0.2, MATLAB™ 7.12.0 e Google Earth™ 7.1.2.2041. O SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS) é um software de análise de imagem para o processamento, visualização, análise e controle de qualidade dos dados da cor do oceano (OceanColor, 2014). O MATLAB é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico que integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos (MATHWORKS, 2014). O Google Earth é um programa desenvolvido para apresentar um modelo tridimensional do globo terrestre, construído a partir de mosaico de imagens de satélite obtidas de fontes diversas, imagens aéreas e GIS 3D.

A primeira etapa da manipulação das imagens foi realizada no MATLAB e consistiu das seguintes etapas:

- ✓ Projeção de Mercator;
- ✓ Recorte da área de estudo de interesse;
- ✓ Aplicação de linha de costa e contorno batimétrico;
- ✓ Observação do padrão de concentração de clorofila-a e reescalonamento e manipulação do mapa de cores para o realce de contraste das feições de interesse.

Como resultado desta manipulação, foi obtida uma série de 1881 imagens da distribuição espacial de concentração de clorofila-a. Com o intuito de melhor organizar um grupo tão numeroso de imagens, todas elas foram visualizadas e triadas de acordo com os critérios adotados descritos a seguir.

4.2.3 Presença-ausência de feições identificáveis

Nesta etapa foi avaliado o percentual de cobertura de nuvens na área de interesse. Foram descartadas as imagens com cobertura total de nuvens ou aquelas que apresentaram algum tipo de erro de processamento. Nessa etapa não foi estipulado nenhum percentual mínimo de cobertura de nuvens para o descarte de uma imagem específica. Assim, uma imagem com 90% de cobertura de nuvens pode ter sido classificada como útil se na pequena área descoberta foi possível identificar nitidamente uma feição. Por exemplo, na Figura 14 a imagem da esquerda foi considerada uma imagem útil, enquanto que aquela à direita, embora com menor cobertura de nuvens, foi descartada.

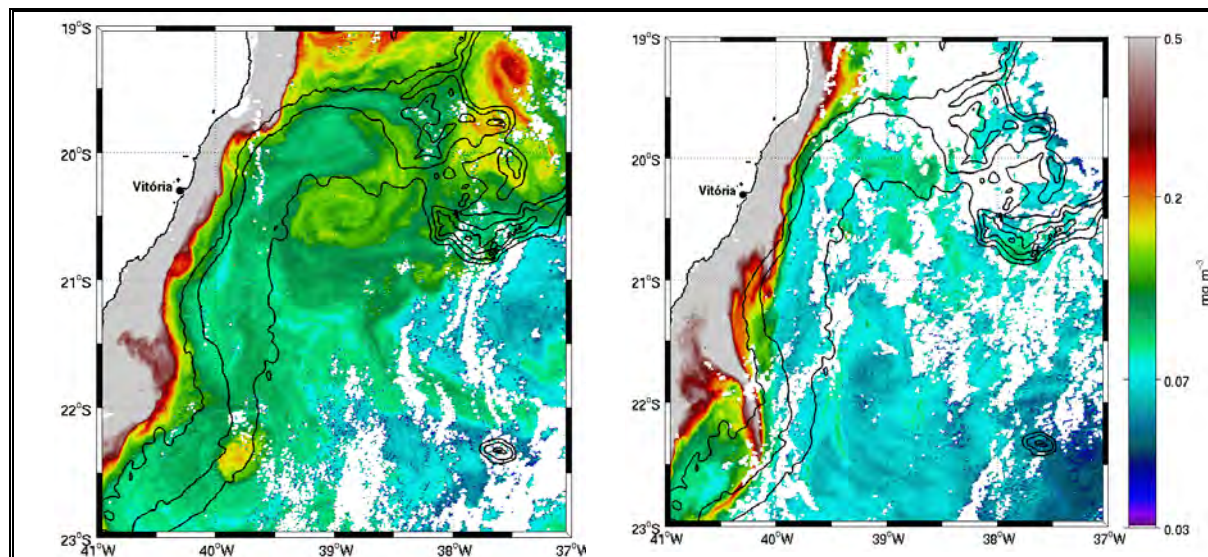


Figura 14: Exemplos de imagem útil (esquerda) e imagem inútil (direita) com relação a presença de feição oceanográfica. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

4.2.4 Tipo de feição identificada

Uma vez selecionadas as imagens, iniciou-se a etapa de classificação das feições identificadas. Ao todo foram reconhecidos 3 tipos de feições cujos efeitos foram observados na concentração de clorofila-*a*. Só foram consideradas imagens parciais de uma feição quando a imagem posterior ou anterior permitia a identificação total da feição. Os tipos de feições encontradas foram são apresentados a seguir.

A) Formação de feições vorticais formadas próximas à quebra de plataforma ou localizadas em área oceânica, mas conectado às águas da plataforma continental.

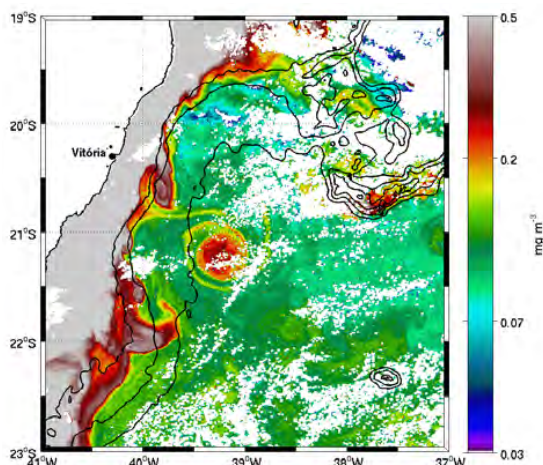


Figura 15: Exemplo de feições do tipo A. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

B) Vórtice ciclônico localizado no interior do ET.

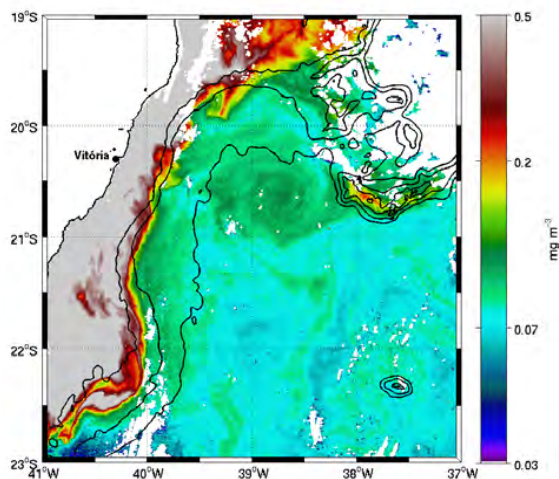


Figura 16: Exemplo de feições do tipo B. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

C) Vórtices associados no ET.

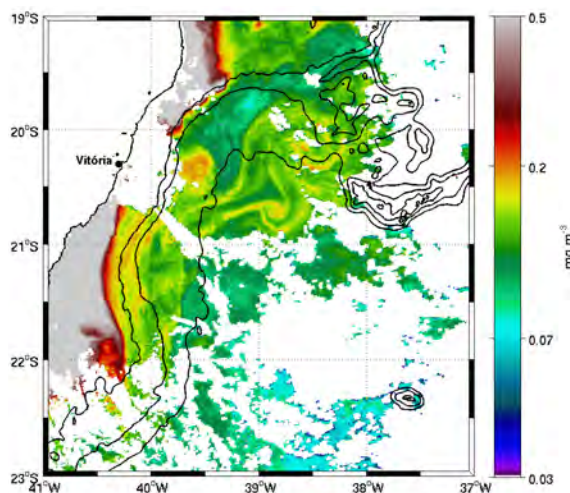


Figura 17: Exemplo de feições do tipo D. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

4.2.5 Tamanho das feições

Tendo sido identificadas as feições ciclônicas, passou-se para a fase de medição das feições, que foi realizada com o auxílio do software SeaDAS. As medições foram realizadas com o uso da ferramenta *Range finder* no programa SeaDAS, através da qual é possível mensurar a distâncias entre dois pontos definidos na imagem.

As medições foram realizadas ao longo do eixo maior e do eixo menor de cada feição elíptica ou o diâmetro nas feições circulares. A partir de então, foi calculada a área da feição. No caso de uma elipse, a área foi estimada segundo a Equação 3.

$$A = \pi \left(\frac{R}{2}\right) \left(\frac{r}{2}\right)$$

Equação 3

Onde R representa o eixo maior e r o eixo menor da feição. Para uma feição circular, a área foi estimada de acordo com a Equação 4.

As feições medidas foram categorizadas em pequenas, médias ou grandes, cujas classes de tamanho foram estabelecidas conforme a área superficial da feição identificada. Os limites das classes de tamanho foram:

Pequena: 470 a 2.300 Km²

Média: > 2.300 a 10.800 Km²

Grande: >10.800 a 26.300 Km²

Ainda no programa SeaDAS, foram identificadas as coordenadas centrais das feições ciclônicas para, quando possível, estimar-se sua translação em uma sequência de imagens.

4.2.6 Velocidade Média de Translação

Por fim, foi utilizado o programa Google Earth para realizar a medição entre os pontos subsequentes da localização do centro das feições ciclônicas ao transladarem. A medição dessas distâncias permitiu a realização das estimativas da velocidade média de translação dessas feições.

4.2.7 Estudos de caso

Neste item, são descritos os eventos que apresentaram feições características e feições distintas ou cujo comportamento foi relevante para descrever processos dinâmicos. Neste sentido, são apresentados os casos de observação de vórtices em que foi possível acompanhar os processos de formação, translação, interação com outras feições e/ou dissipação das feições ciclônicas.

5. RESULTADOS

Os primeiros resultados obtidos consistem numa série de imagens diárias referentes ao período de 01 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2012, totalizando 1881 imagens.

5.1 Presença-ausência de feições identificáveis

Na Figura 18, são apresentados os resultados referentes à triagem inicial. Neste cômputo, foram consideradas as imagens nas quais foi possível identificar algum tipo de feição ciclônica no campo da concentração de clorofila-*a*. Os números expressam valores absolutos de imagens por estação e por ano.

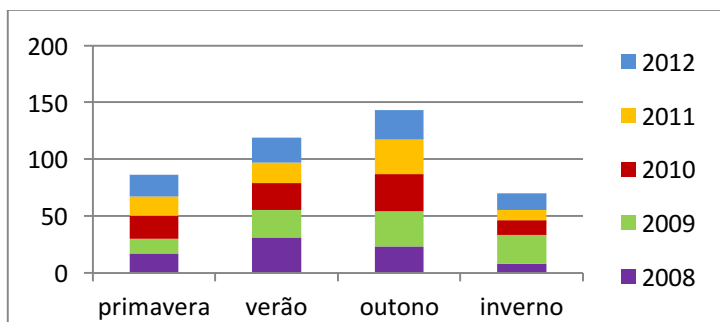


Figura 18: Representação gráfica no número de imagens úteis por estação de cada ano. Primavera (23 de setembro a 20 de dezembro), verão (21 dezembro a 19 de março), outono (20 de março a 20 de junho) e inverno (21 de junho a 22 de setembro).

A primeira observação que se faz a partir desse gráfico é que, de maneira geral, nos períodos de verão e outono o maior número de imagens úteis foi obtido. No inverno e primavera houve o descarte de um grande número de imagens devido, principalmente, a ausência de vórtices ciclônicos, já que os períodos de maior nebulosidade foram a primavera e o verão.

A cobertura de nuvens é um fator limitante na identificação das feições ciclônicas. Observou-se que o período com maior cobertura de nuvens se deu entre a primavera e o verão, períodos com elevada ocorrência de feições ciclônicas. O inverno por sua vez, foi o período com melhores condições de observação devido à cobertura de nuvens e, no entanto, foi o período com menor número de imagens onde se observava a ocorrência de vórtices. Esses resultados mostram que o inverno é de fato o período com menor recorrência de vórtices, e que a cobertura de nuvens pode ter maior influência nos demais períodos.

5.2 Tipo de feição identificada

Os vórtices associados à quebra de plataforma (A) e os localizados dentro do Embaiamento de Tubarão (B) foram os mais observados no período analisado. Vórtices associados no ET (C) menos frequentes. Na Figura 19 é apresentada o número de ocorrência das feições identificadas conforme o tipo de feição e a estação do ano.

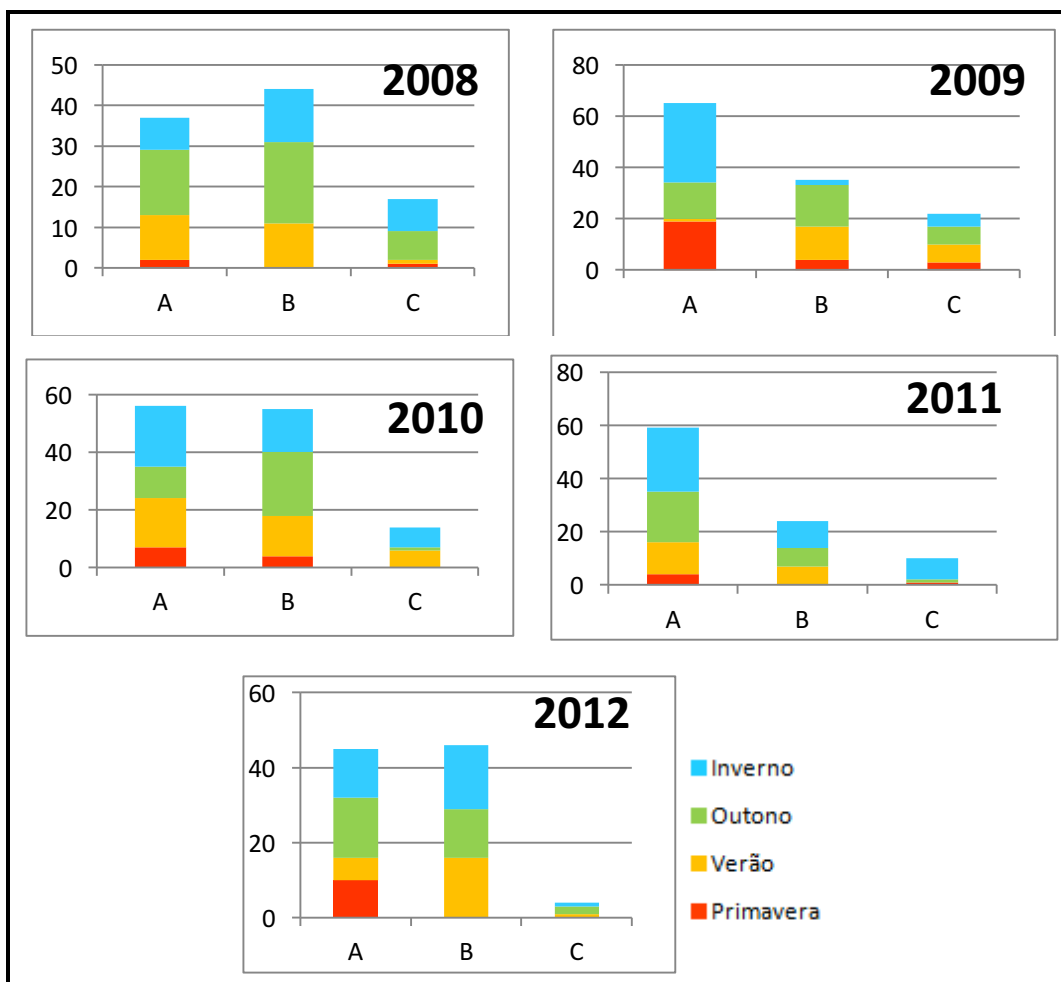


Figura 19 : Representação gráfica do número de feições identificadas por tipo e estação do ano de ocorrência.

5.3 Tamanho das feições

Figura 20, são apresentados os resultados da medição dos vórtices ciclônicos encontrados no interior do ET, conforme a classificação de tamanho. Os exemplos das classes de tamanho são mostrados na Figura 21.

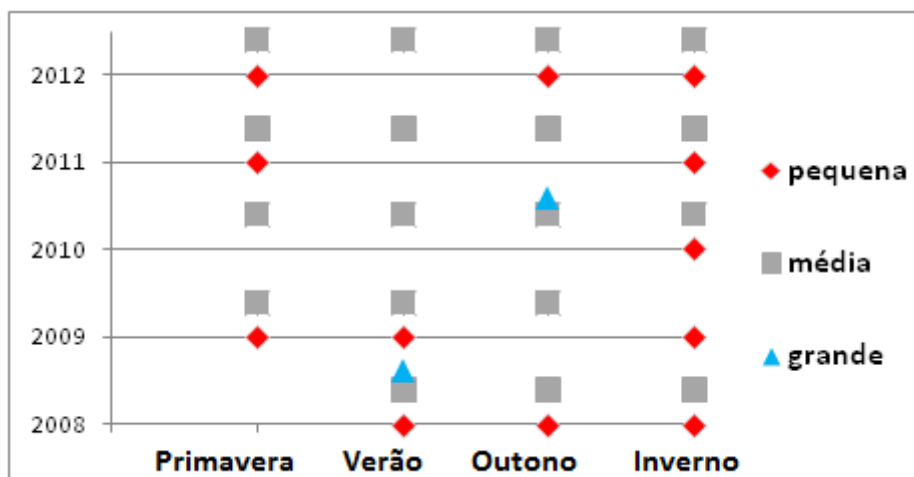


Figura 20: Tamanho das feições ciclônicas encontradas por estação e ano.

Observou-se que as feições de tamanho pequeno e médio ocorrem durante praticamente o ano todo, muitas das vezes conjuntamente, enquanto que vórtices ciclônicos grandes ocupando todo

o Embaiamento de Tubarão somente foram encontrados apenas em dois episódios, um no verão (21 de fevereiro de 2008) e outra no outono (26 de maio a 03 de junho de 2011).

As feições de tamanho médio foram encontradas em sua maioria na porção E e NE do ET, podendo estar ou não associadas ao quebra da plataforma. Nas feições de tamanho pequeno, observou-se que elas, majoritariamente, tratavam-se de feições cuja formação esteve associada a quebra de plataforma e, ora se desprendiam e transladavam para fora do ET, ora acompanhavam o contorno batimétrico dentro do ET migrando para N-NE, e ora se dissipavam no local de sua formação.

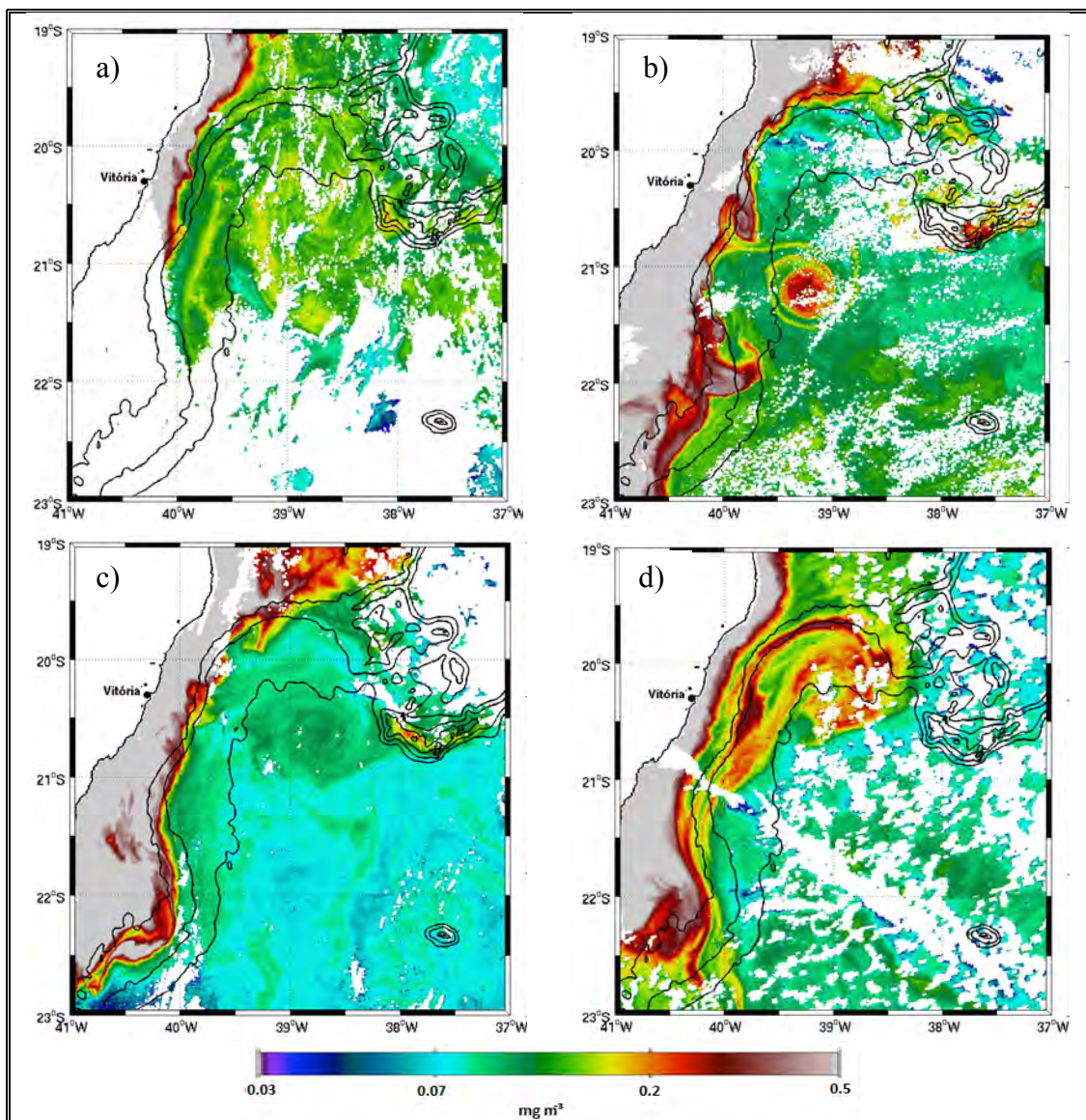


Figura 21: Exemplos de tamanho de feições ciclônicas encontradas no Embaiamento de Tubarão. a) Feição grande referente ao dia 21 de fevereiro de 2008; b) exemplo de feições pequenas referente ao dia 05 de junho de 2009; c) e d) exemplos de feições médias referentes aos dias 08 de setembro de 2008 e 22 de fevereiro de 2010, respectivamente.

5.4 Estudos de caso

5.4.1: Translação acompanhando o contorno batimétrico

Evento 1-1: Maio a Junho de 2008

No mês de maio, começou a originar uma feição que se desprende da região de sua formação próximo a 20,5°S (Figura 22a). Na sequência, essa feição adquire padrão ciclônico, com um diâmetro médio de 35 km, isolando-se por completo da massa d'água de origem.

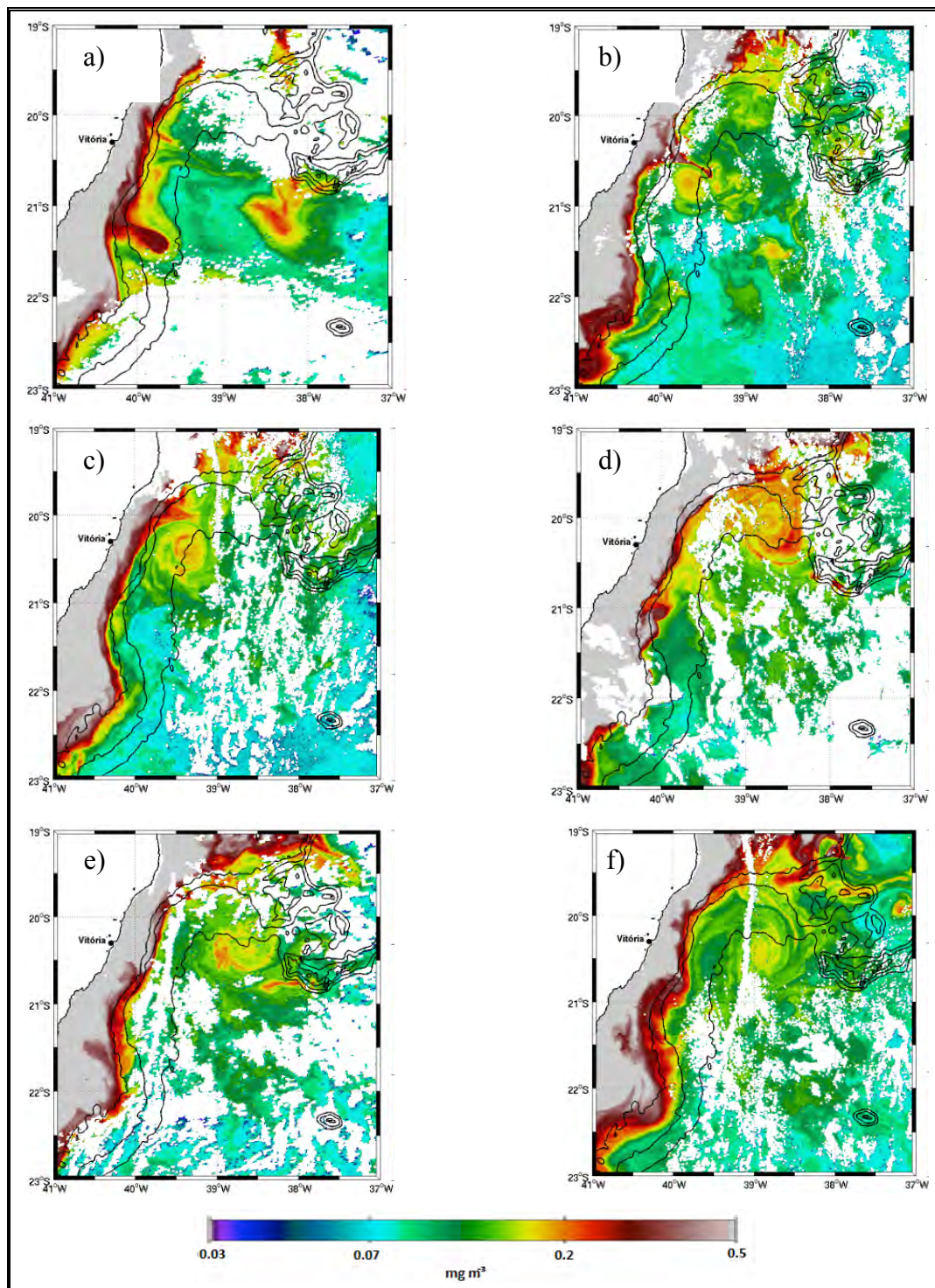


Figura 22: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-a durante o período do Evento 1-1. a) 08 de maio; b) 21 de maio, c) 30 de maio, d) 06 de junho; e) 09 de junho e f) 15 de junho de 2008. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

A feição então migra para NE, acompanhando o contorno batimétrico na porção oeste do ET. Nessa translação, a porção norte do vórtice ciclônico (velocidades direcionadas para leste) advecta águas da plataforma continental para a região oceânica. Esse fluxo ficou bem evidenciado na Figura 22c, devido a alta concentração de clorofila-*a* das águas de plataforma drenadas pelo vórtice. Esse processo de translação se estendeu por 23 dias, até que a feição alcançou a latitude de 20,3°S (Figura 22c)

Apesar da nebulosidade que impediu o acompanhamento desta feição nos 5 dias seguintes, a Figura 22d mostra a feição ciclônica localizada agora na porção NE do ET, sugerindo que a translação tenha continuado nesse período. Nos 3 dias subsequentes, o vórtice se transladou pelo contorno do ET, até se encontrar no centro do embaixamento (Figura 22e) onde permaneceu, sem deslocamento aparente, por pelo menos 8 dias (Figura 22f). Ao longo de sua trajetória ao largo da quebra de plataforma (Figura 23), essa feição apresentou velocidade média de 7 km/dia.

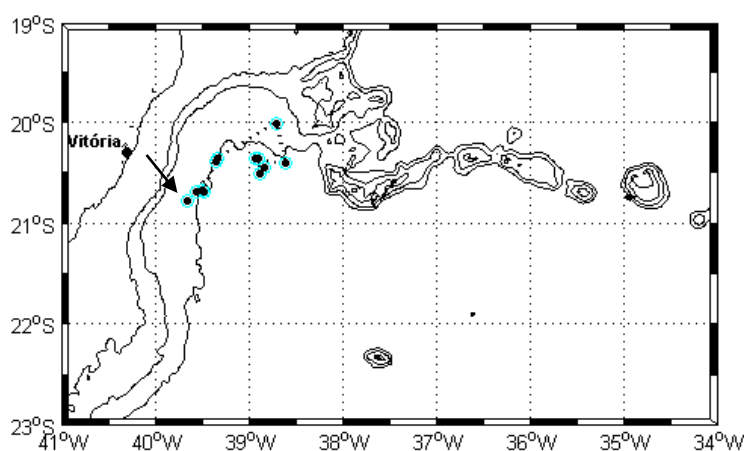


Figura 23: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 1-1 de maio a junho de 2008. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade. A seta indica a posição inicial do centro do vórtice.

Evento 1-2: Junho a Agosto de 2009

No ano de 2009, uma feição bastante semelhante àquela do caso 1-1 se formou novamente associada à quebra de plataforma, próxima de 21,5°S (Figura 24). A diferença entre este caso e o anterior é que, após assumir um padrão circular ciclônico (Figura 24b), esta feição foi impulsionada para fora região de formação advectando-se para leste (Figura 24c). Ainda nesta imagem, nota-se que outra feição ciclônica se formou a partir de uma instabilidade associada a quebra de plataforma, agora um pouco mais ao norte (aproximadamente 20,7°S) do sítio no qual a primeira feição se formou. Esse vórtice teve deslocamento semelhante ao descrito no Evento 1-1.

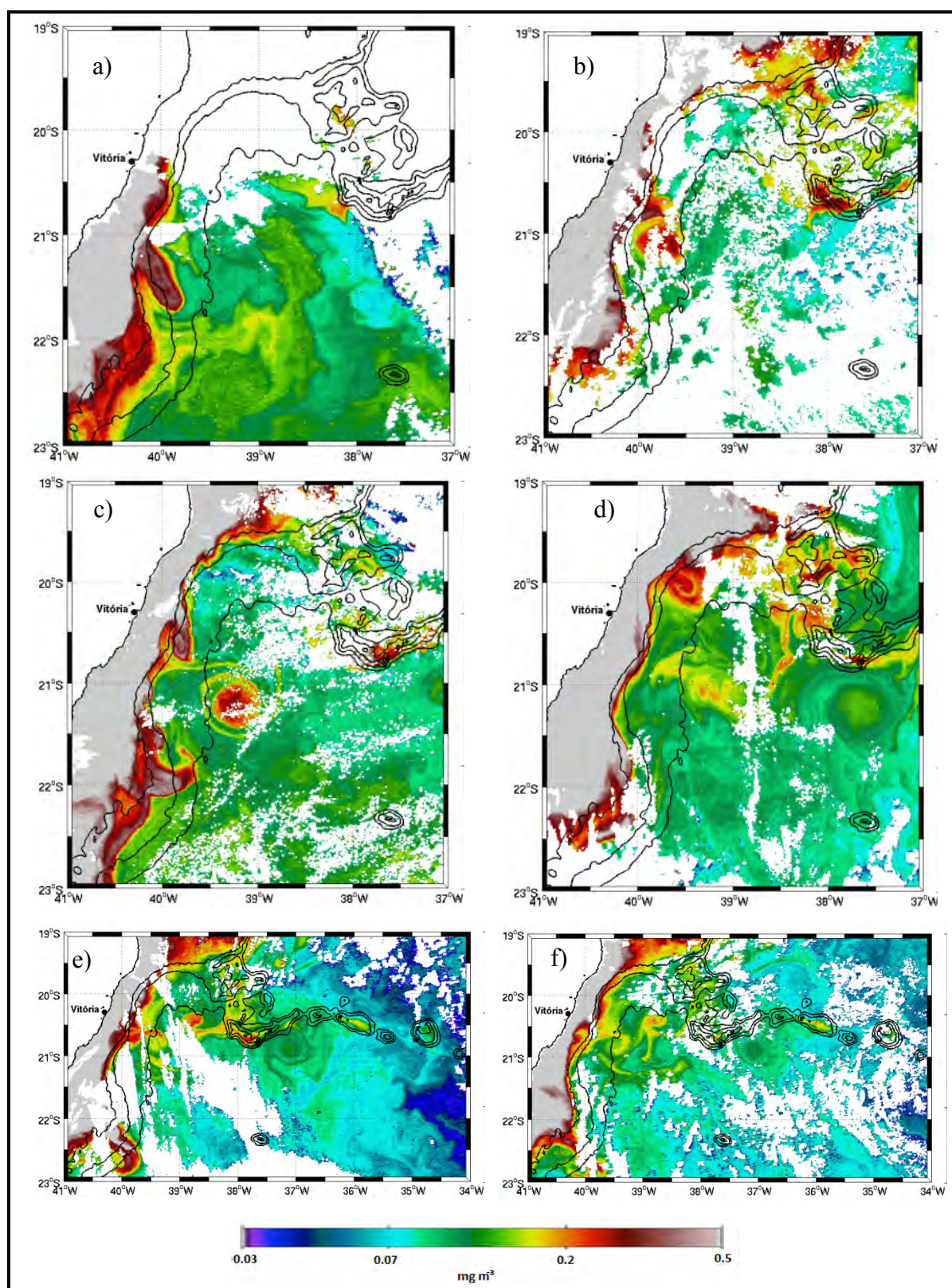


Figura 24: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-a durante o período do Evento 1-2. a) 04 de junho; b) 08 de junho; c) 15 de junho; d) 01 de julho; e) 26 de julho e f) 08 de agosto. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade. As imagens e) e f) apresentam maior área para mostrar a translação do vórtice a leste de 34°W.

O primeiro vórtice descrito, inicialmente, é propulsionado para leste (Figura 24 d). Exatamente na longitude de 39°W, o as isóbatas se direcionam ao longo do eixo NO-SE, quando o vórtice assume translação na direção SE por cerca de mais 18 dias (Figura 24 d). Em 38°W, a orientação da CVT apresenta outra inflexão, agora direcionando de SO-NE e, mais uma vez, o

vórtice ajusta a direção de sua translação de modo a se deslocar paralelamente a CVT, se aproximando dos bancos mais externos da cadeia (Figura 24e). A última observação se deu quando o vórtice encontrava-se em 21°S e 37°W, entre os bancos Vitória e Jaseur (Figura 24f). Ao longo do período de observação, a feição apresentou velocidade média de translação igual a 12 km/dia (Figura 25).

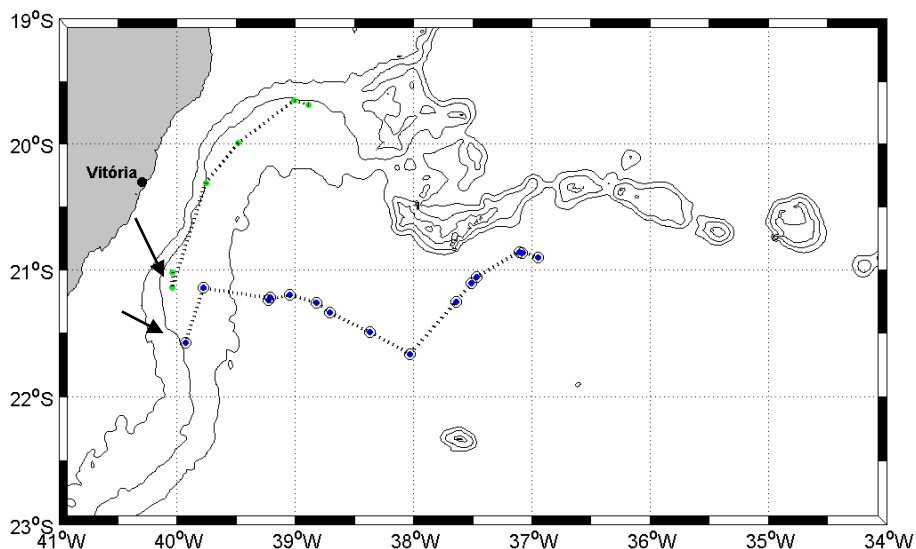


Figura 25: Trajetória dos centros dos vórtices identificados nos Eventos 1-2 e 1-3. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade. As setas indicam as posições iniciais dos centros dos vórtices.

Evento 1-3: Julho de 2009

Em julho de 2009, notou-se a formação de uma feição ciclônica associada à quebra de plataforma (Figura 26a), próximo a latitude de 21,5°S. Por cerca 20 dias (Figura 26 b a f), a feição deslocou-se para norte, de modo a acompanhar o contorno batimétrico no interior do ET, com concentrações de clorofila-*a* similares a da plataforma continental, como nos casos 1 e 2. Essa feição também apresentou velocidade média de 11 km/dia (Figura 25).

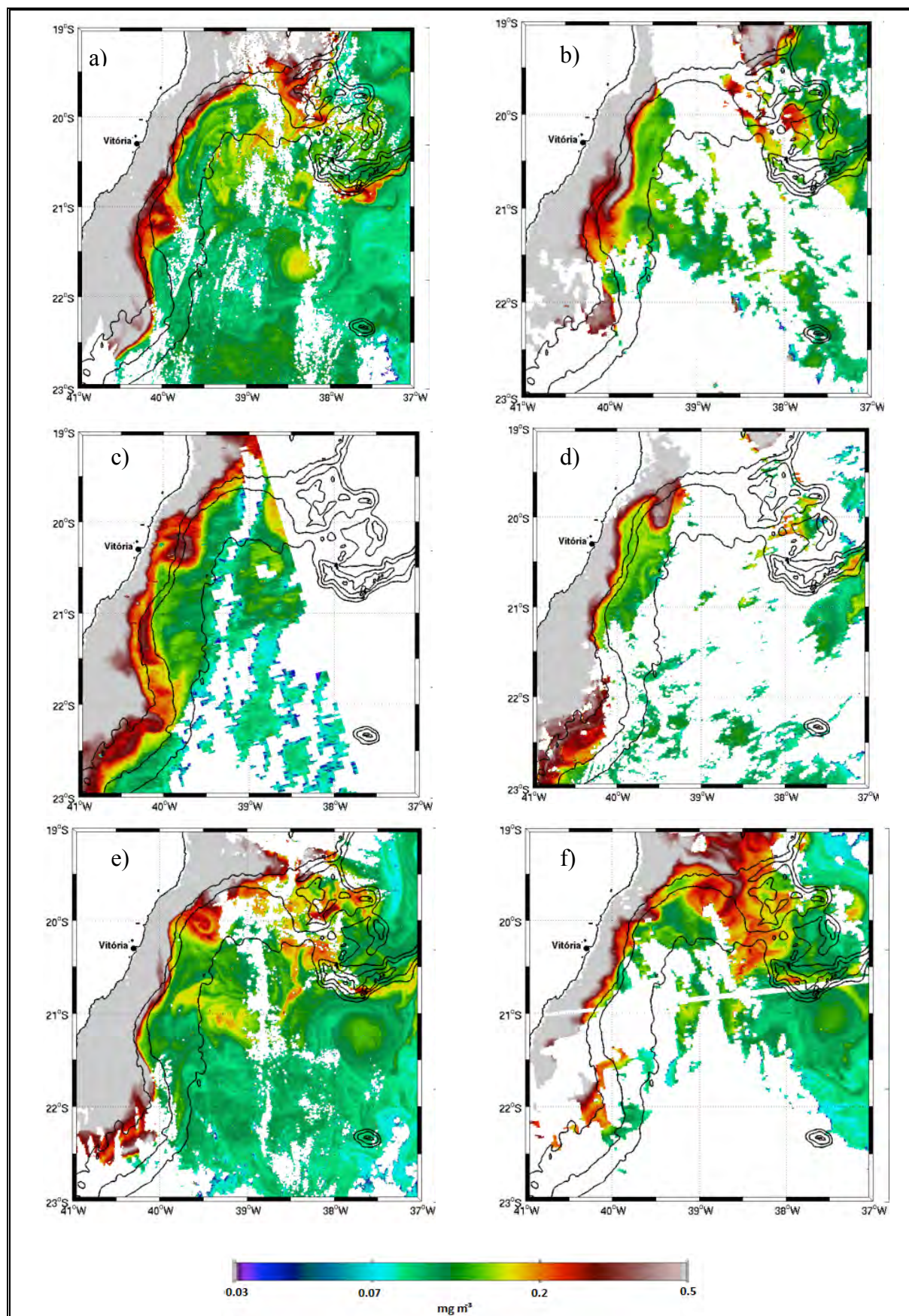


Figura 26: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-a durante o período do Evento 1-3. a) 10 de julho; b) 14 de julho; c) 18 de julho; d) 22 de julho; e) 26 de julho e f) 30 de julho de 2009. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

5.4.2: Vórtices gerando filamentos com elevadas concentrações de clorofila-*a* em suas bordas

Evento 2-1: Abril de 2010

Em meados de abril de 2010, observa-se um fluxo da plataforma para dentro do ET com alta concentração de clorofila-*a* (Figura 27a). Esse processo levou a formação de um filamento com pelo menos 90 km de extensão e elevadas concentrações de clorofila-*a*. Na sequência (Figura 27b), é possível observar o vórtice formado no ET.

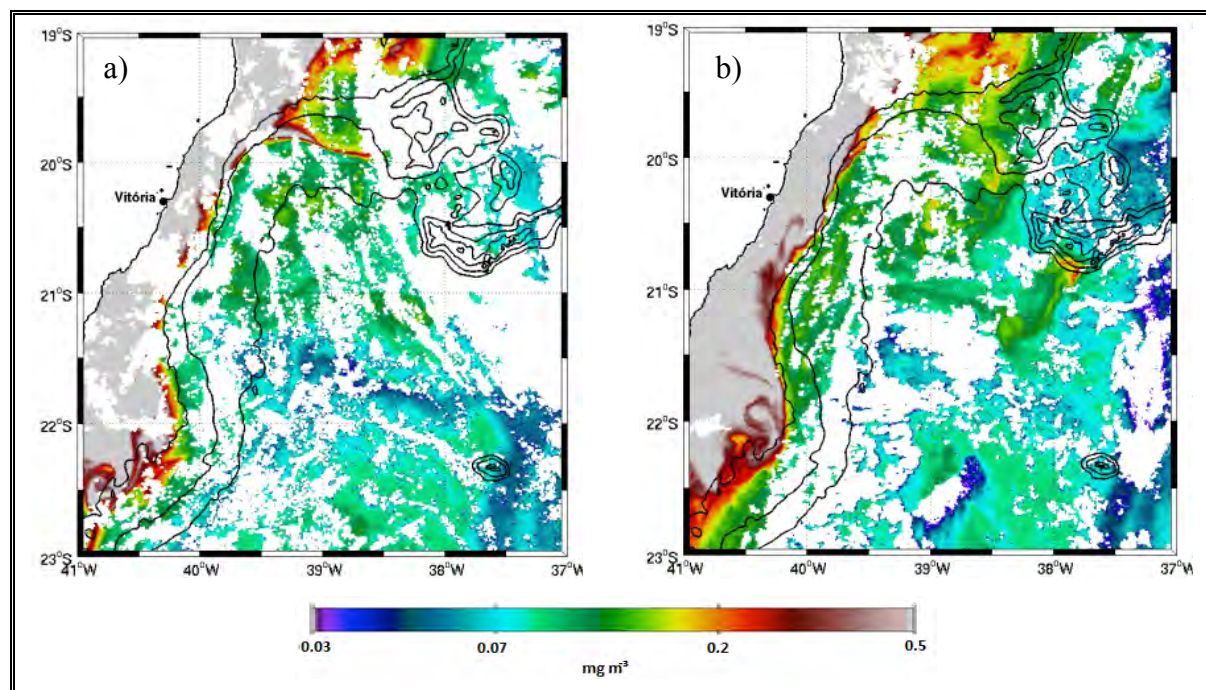
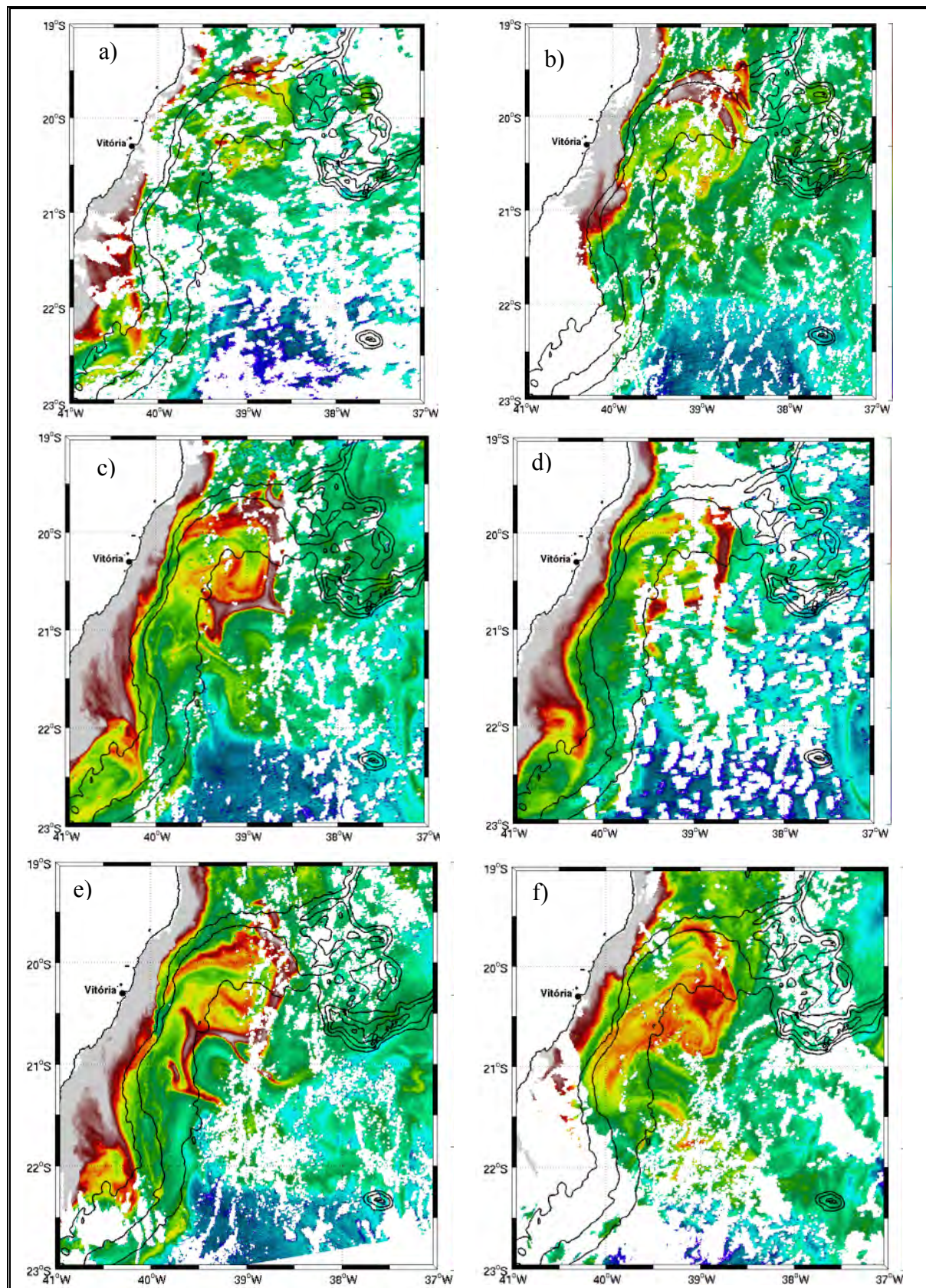


Figura 27: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-*a* durante o período do Evento 2-1. a) 15 de abril e b) 17 de abril de 2010. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

Evento 2-2: Fevereiro a Março de 2009

Entre os meses de fevereiro e março de 2009, observou-se a formação de uma feição com forte gradiente na concentração de clorofila-*a* no ET. No início do processo, um pequeno núcleo com alta concentração de clorofila-*a* se formou (Figura 28a) em 19,5°S e 30°W enquanto que, ao sul desse núcleo, parece haver um vórtice ciclônico bem no centro do ET (20°S e 39°W) (Figura 28b). A característica que mais se destacou na Figura 23c foi a ocorrência de elevadas concentrações de clorofila-*a* na borda norte do vórtice. Com o passar dos dias, essa frente de clorofila-*a*, que antes se mantinha em apenas um lado do vórtice, agora assume praticamente todo o contorno dessa feição (Figura 28c). Observa-se ainda que alguns filamentos de clorofila-*a* saem dessa circunferência na direção externa do vórtice, sugerindo a ocorrência de outras feições vorticais associadas (Figura 28d e e). A última imagem deste período mostra uma feição sem um formato definido, não permitindo associá-la claramente a um tipo de vórtice, mas um possível resultado da interação entre eles (Figura 28f).



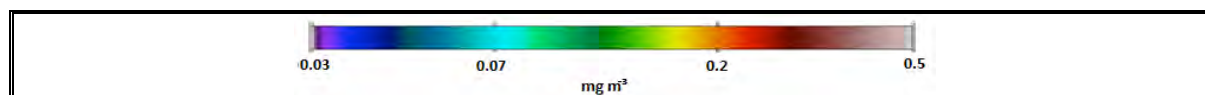


Figura 28: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-*a* durante o período do Evento 2-2. a) 23 de fevereiro; b) 24 de fevereiro; c) 28 de fevereiro; d) 01 de março; e) 02 de março; e f) 09 de março de 2009. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

5.4.3: Formação de vórtice no lado leste do ET

Evento 3-1: Março de 2010

Outro processo de translação de vórtice foi observado no mês de março de 2010 (Figura 29). Nesse período, observa-se uma feição ciclônica na ponta leste do ET (Figura 29a). Por cerca de 10 dias, o vórtice foi impulsionado para sul (Figura 29b a d), até que assumiu um deslocamento na direção oposta rumo ao centro do ET, ou seja, se movimentou para norte (Figura 29e), deixando um rastro da trajetória realizada. Outra característica marcante observada neste processo foi a formação de uma feição simetricamente oposta ao vórtice com concentrações de clorofila-*a* menores que a região do entorno (Figura 29f). A feição trasladou para o centro do ET com velocidade média de 13 km/dia (Figura 30).

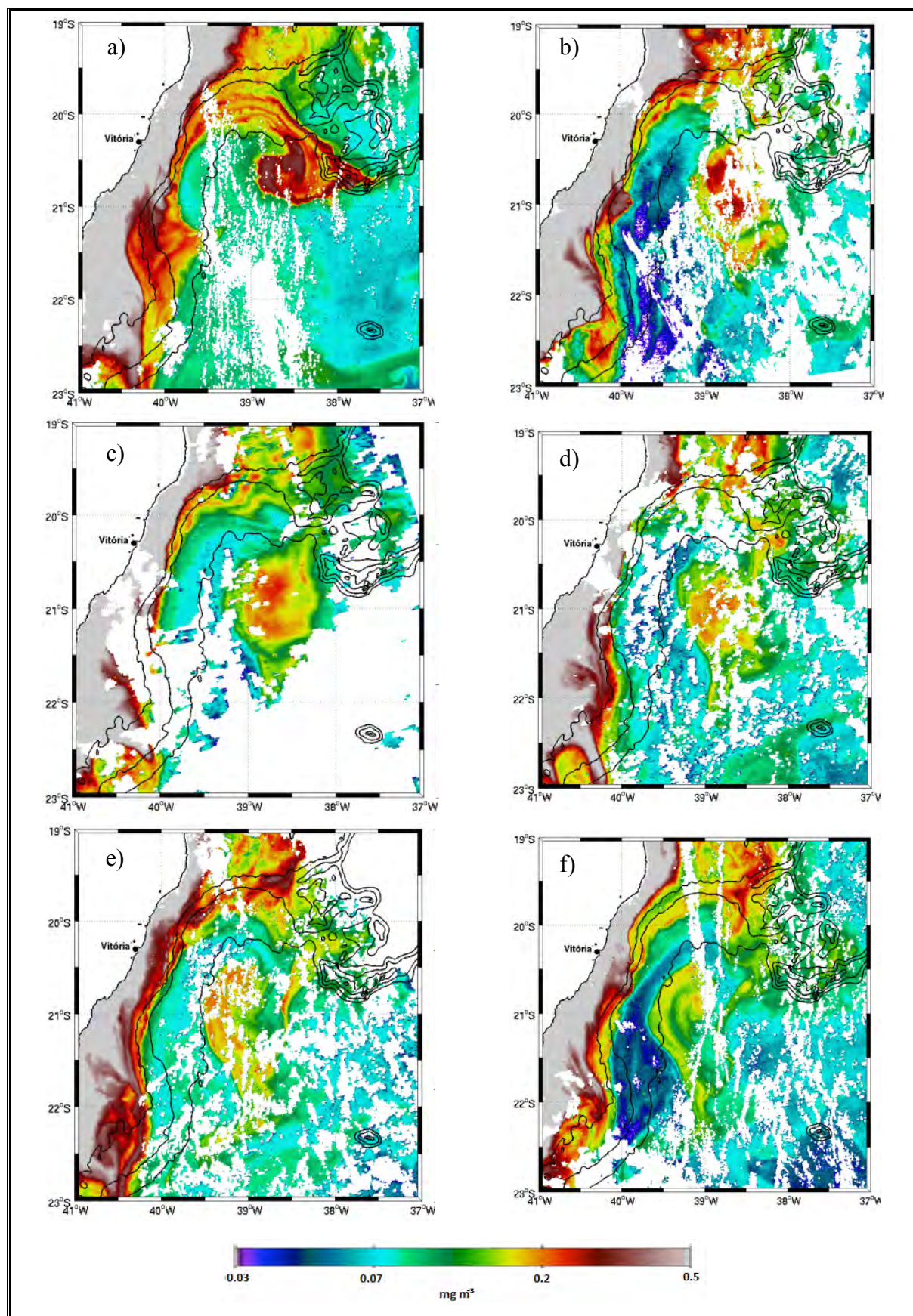


Figura 29: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-a durante o período do Evento 3-1. a) 14 de março; b) 23 de março; c) 24 de março; d) 25 de março; e) 28 de março e f) 30 de março de 2010. As isóbatas representam a linha de costa e os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

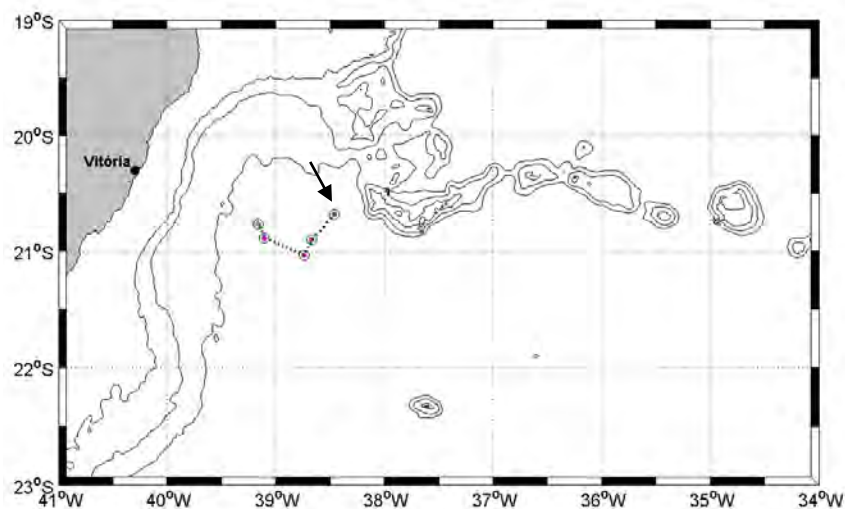


Figura 30: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 3-1 de março de 2010. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade. A seta indica a posição inicial do centro do vórtice.

Evento 3-2: Julho de 2011

Em meados de julho de 2011 (Figura 31a), foi observada a presença de uma feição ciclônica na saída do ET, a sudoeste do banco Vitória. Essa feição vortical foi observada por 5 dias aproximadamente na mesma posição (Figura 31b e c). A partir de então, ela se deslocou para sul (Figura 31d e e) até dissipar-se (Figura 31f). A Figura 32 apresenta trajetória dessa feição.

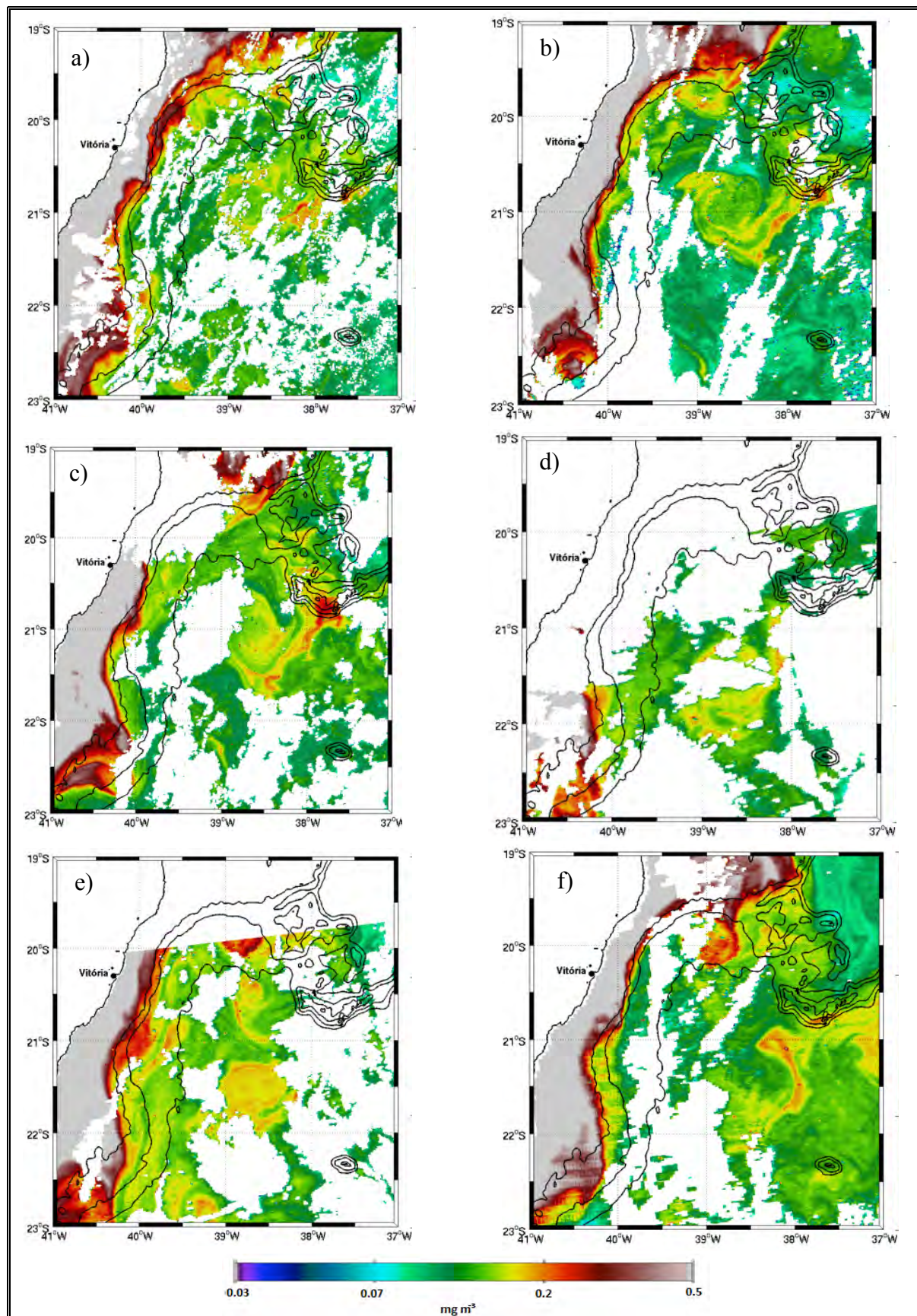


Figura 31: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-a durante o período do Evento 3-2. a) 16 de julho; b) 19 de julho; c) 20 de julho; d) 22 de julho; e) 26 de julho e f) 27 de julho 2011. Ao fim a escala de cores utilizada representa as concentrações de clorofila-a. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

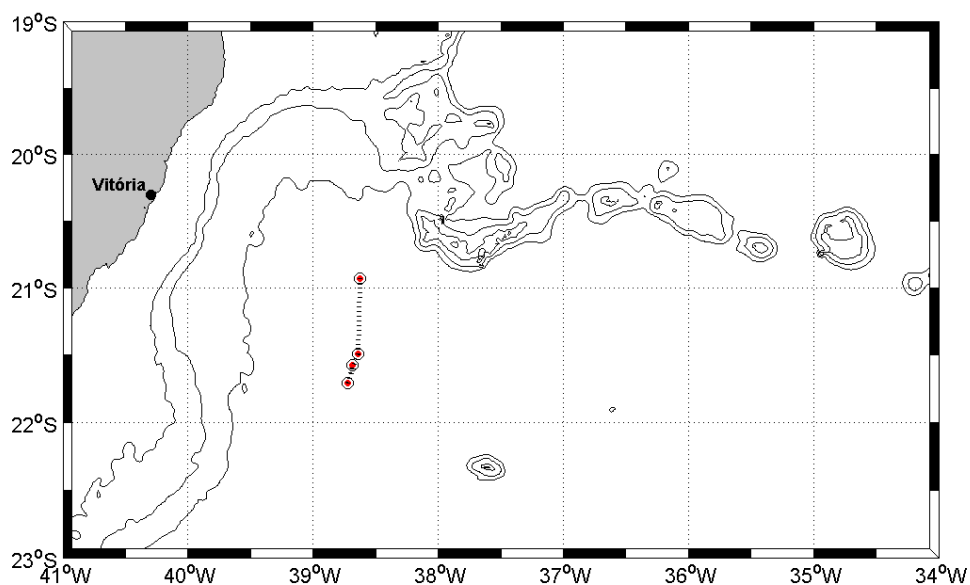


Figura 32: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 3-2 de julho de 2011. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

Evento 3-3: Fevereiro a Março de 2012

No mês de fevereiro de 2012, ocorreu a formação de uma feição ciclônica no ET em 20,5°S e 38,7°W (Figura 33a). O vórtice se deslocou por cerca de 10 dias, acompanhando a batimetria, até se posicionar no centro do ET (Figura 33d). Na sequência, o vórtice apresentou uma segmentação horizontal de sua estrutura, com vários filamentos de clorofila-a em seu centro, perdurando por, pelo menos, mais 3 dias (Figura 33f). Em média, a velocidade de translação dessa feição foi de 8 km/dia (Figura 34).

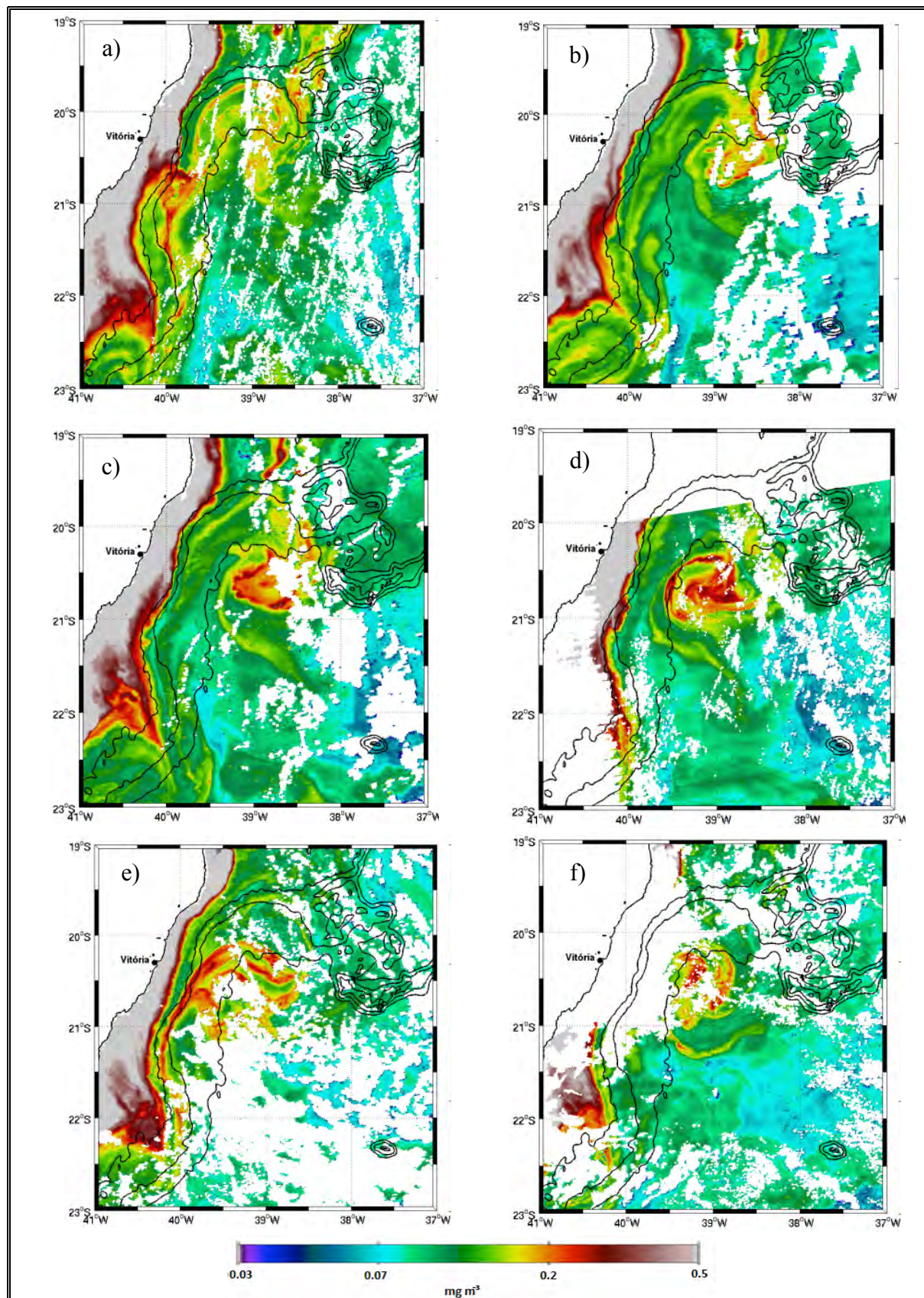


Figura 33: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-a durante o período do Evento 3-3. a) 23 de fevereiro; b) 26 de fevereiro; c) 28 de fevereiro; d) 04 de março; e) 09 de março e f) 11 de março de 2012. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

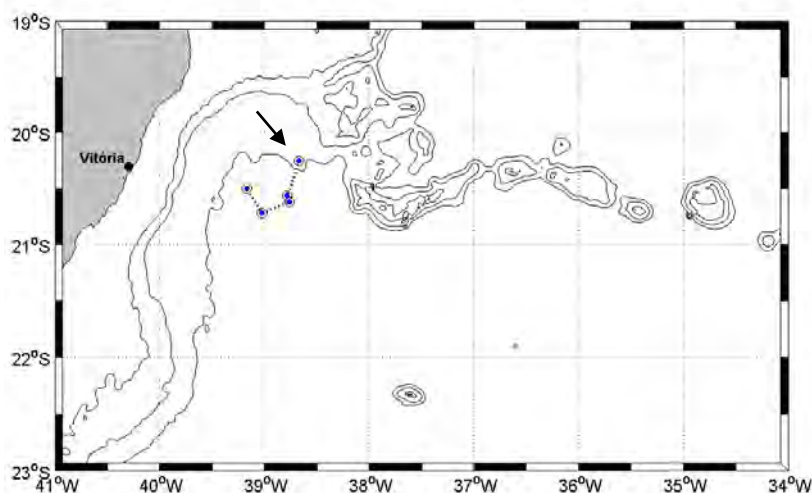


Figura 34: Trajetória do centro do vórtice identificado no Evento 3-3 de fevereiro a março de 2011. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade. A seta indica a posição inicial do centro do vórtice.

5.4.4: Interação entre vórtices ciclônicos no ET

Evento 4-1: Abril a Junho de 2011

Na observação das imagens do mês de abril de 2011 (Figura 35a) identificou-se a ocorrência de dois vórtices ciclônicos na área de estudo, sendo um dentro do ET (20°S) e outro ao largo da região de Cabo Frio (23°S). Analisando-se a sequência de imagens, a feição, que inicialmente encontrava-se em 22,5° e 30,5°WS, deslocou-se para norte, rumo ao interior do ET (Figura 35b). Ao mesmo tempo, outra feição ciclônica se desenvolveu ao sul da cidade de Vitória (20,7°S e 39,5°W), resultando na presença de três feições ciclônicas e uma anticiclônica (21,5°S e 30,7°W) na área de estudo (Figura 35c).

A feição anticiclônica encontra-se entre dois dos vórtices ciclônicos e parece impulsionar a o vórtice ciclônico central para direção leste, fazendo com que um grande filamento com elevadas concentrações de clorofila-*a* se formasse dentro do ET (Figura 33d). Em seguida, os vórtices parecem interagir de tal forma resultando em uma única feição maior localizada na porção sul do ET e circundada por um filamento com maior concentração de clorofila-*a* (Figura 35e). Na sequência, uma região com baixa concentração de clorofila-*a* se forma entre a grande feição circular (no centro do ET) e a plataforma continental, sugerindo uma translação para leste dos três vórtices ciclônicos (Figura 35f). A feição localizada na porção norte do ET apresentou a maior velocidade de translação (15 km/dia) (Figura 36), enquanto que as feições no rumo de Vitória e ao sul do ET apresentaram 4 km/dia e 5 km/dia, respectivamente.

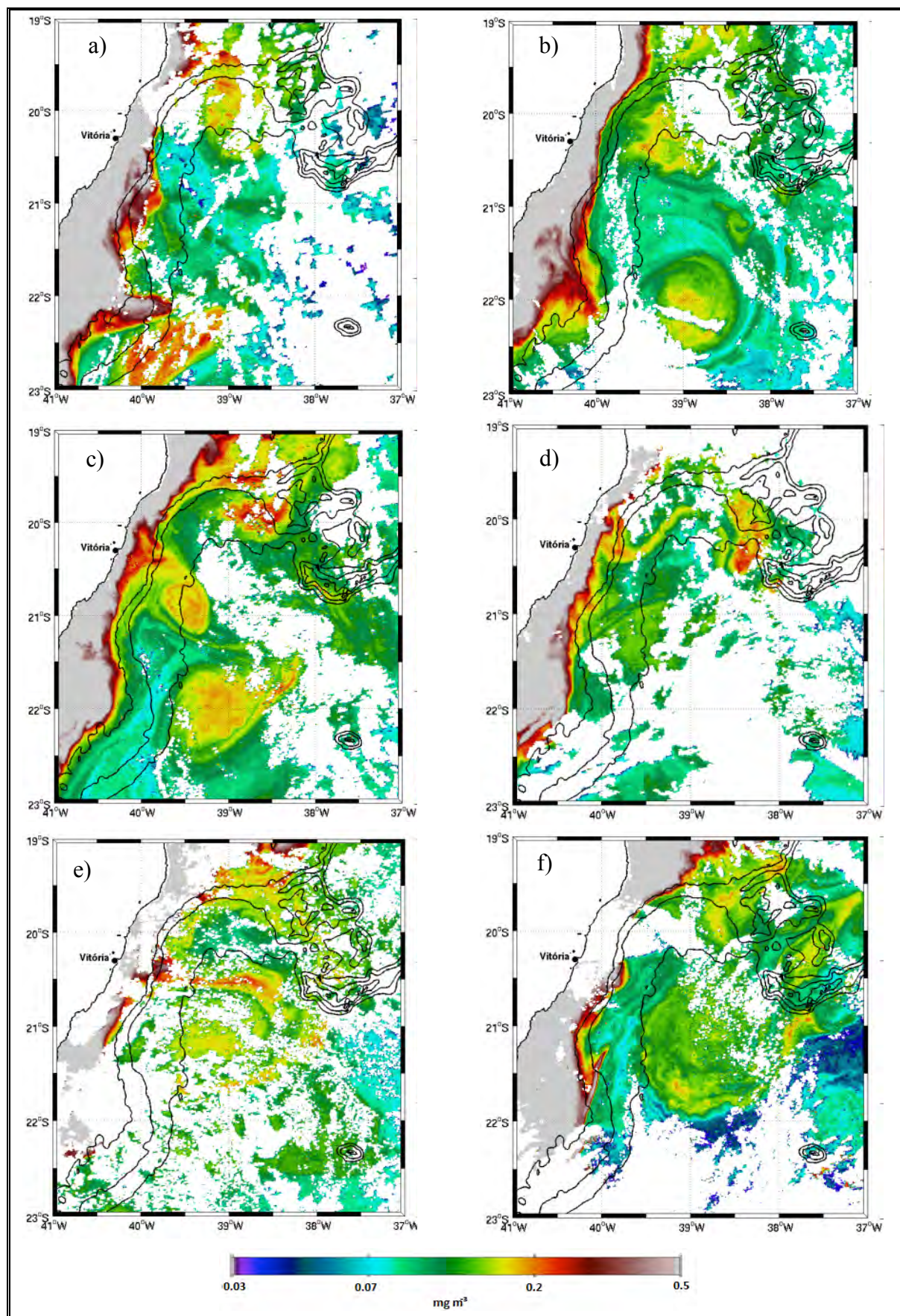


Figura 35: Sequência de imagens diárias da concentração de clorofila-*a* durante o período do Evento 4-1. a) 14 de abril; b) 25 de abril; c) 09 de maio; d) 15 de maio; e) 22 de maio e f) 03 de junho de 2011. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade.

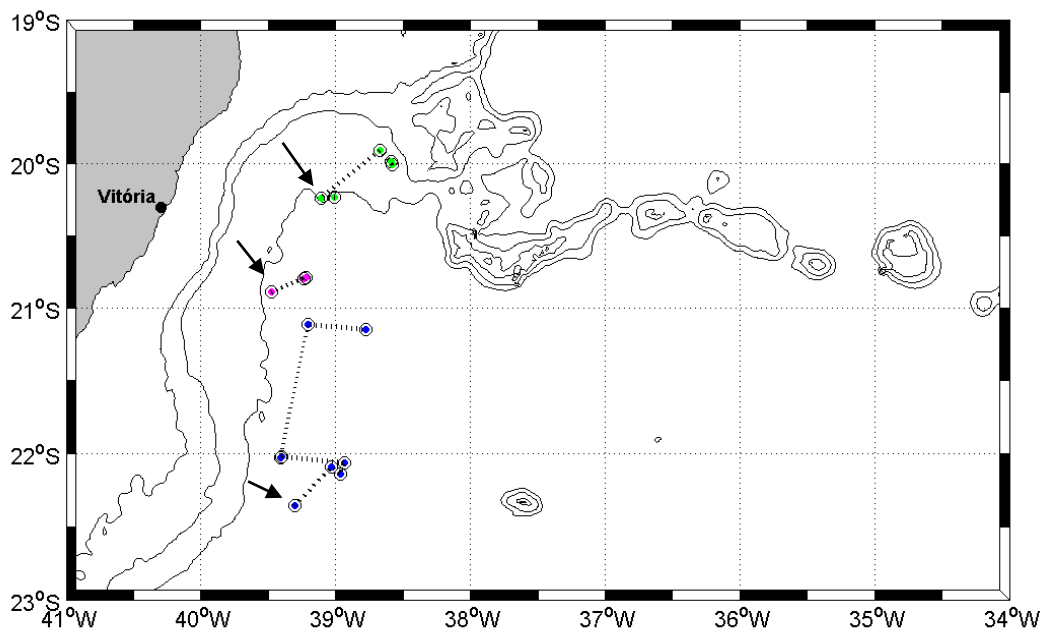


Figura 36: Trajetórias dos centros dos vórtices identificados no Eventos 4-1 de abril a junho de 2011. As isóbatas representam da linha e de costa, os contornos de 80, 1000 e 2000 m de profundidade. As setas indicam as posições iniciais dos centros dos vórtices.

6. DISCUSSÃO

6.1 Presença-ausência de feições identificáveis

O ET apresentou elevadas concentrações de clorofila-*a* ($>0,2 \text{ mg/m}^3$) ao longo de todo o ano. Em boa parte do ano este incremento esteve associado a ocorrência de feições ciclônicas, principalmente no outono e no verão. A maior recorrência de feições ciclônicas nestes períodos coincide com o relatado por Servino (2014), que observou maior recorrência de vórtices entre fevereiro e maio (verão e outono) e de novembro a janeiro (primavera e verão).

Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que a dinâmica física tem papel fundamental na distribuição da biomassa do fitoplâncton na região do ET. Uma característica bem notável na sequência de imagens analisadas é uma diferenciação bem marcada entre a área de ocorrência de feições ciclônicas e as áreas adjacentes dentro do ET no que tange a distribuição da concentração de clorofila-*a* (ex. Figura 29). O embaiamento apresentou características oligotróficas, típicas de região oceânica, intercalados por eventos de significativo incremento de biomassa fitoplanctônica, devido, principalmente, a ocorrência de vórtices ciclônicos, promovendo incrementos da biomassa de produtores primários e consequente aumento dos níveis de clorofila-*a* alcançando concentrações comparáveis à das águas da plataforma continental.

Oschlies e Garçon (1998) investigaram o fornecimento de nutrientes induzido por vórtices no Oceano Atlântico Norte com base em dados sinóticos assimilados em um modelo numérico de acoplamento físico-biológico. Os resultados indicaram que, mesmo sendo pulsos intermitentes de fluxos de nutrientes para a superfície, a atividade vortical de mesoescala é responsável por cerca de 1/3 do fluxo total de nitrato, para a camada fótica em regiões subtropicais e médias latitudes. Estudos como os de Bibby *et al.* (2008) tem evidenciado a

contribuição significativa dessas feições ciclônicas em ambientes oceânicos oligotróficos, devido ao aumento das concentrações de clorofila, mesmo que restrito a profundidade do máximo de clorofila, além do potencial aumento da eficiência fotossintética e alteração sobre o estrutura de tamanho da comunidade de produtores primários. Outros estudos apontam para a importância de processos oceanográficos de pequena e mesoescala como principais responsáveis pelo incremento na produção nova na região oceânica em diversas localidades (Oschlies e Garçon, 1998).

6.2 Tipo de feição identificada

A região entre as latitudes de 20,0°S e 21,5°S mostrou-se como a mais dinâmica e importante no processo de formação de feições ciclônicas associadas à quebra de plataforma. De acordo com o primeiro relato de ocorrência do Vórtice de Vitória, realizado por Schmid *et al.* (1995), sua formação se deveu possivelmente a um evento de forte ressurgência costeira e sua interação com a CB, se desenvolvendo para um vórtice ciclônico.

As feições do tipo (A) observadas neste trabalho, em termos de tamanho e localização se assemelham aos VV observados por Martins (2014) e Schmid *et al.* (1995). Tanto o vórtice descrito por Schmid *et al.* (1995) (20,5°S e 38,5°W) como aquele relatado por Martins (2014) (20,45°S e 38,67°W) apresentaram diâmetro de ≈ 50 km, já os vórtices ciclônicos observados no presente trabalho apresentaram diâmetro aproximado de ≈ 25 a 55 km.

Outra característica marcante observada no presente trabalho foi que o desenvolvimento de feições do tipo (A) esteve frequentemente relacionado à ocorrência de ressurgência costeira. Essa observação também foi relatada de Schmid *et al.* (1995), sugerindo que as feições deste tipo tenham o mesmo processo de formação que o VV.

Cabe destacar que esses autores utilizaram dados hidrográficos para medir a feição, enquanto que no presente trabalho optou-se pela concentração de clorofila-*a*. A ocorrência de feições ciclônicas de menores diâmetros que o observado nos trabalhos supracitados sugere que tenha ocorrido o efeito observado por Brown *et al.* (2008), onde a concentração de clorofila-*a* no vórtice ciclônico é significativamente maior numa área central da feição. Embora os parâmetros utilizados como critério de caracterização dos vórtices ciclônicos tenham sido diferentes neste trabalho, a concordância com os resultados de Schmid *et al.* (1995) e de Martins (2014) indicam que o parâmetro clorofila-*a* pode ser um bom indicador da ocorrência de feições ciclônicas, mas deve ser usado com cautela quando se trata da dimensão de tais feições.

As feições do tipo (B) foram as mais frequentemente encontradas no ano de 2008 e 2012. Os vórtices inseridos nessa categoria se encaixam nos dois tipos de mecanismos de formação descritos por Servino (2014) e ainda contempla os dois tipos de vórtices, VC1 e VC2, descrito pelo mesmo autor.

O Tipo (C) de feições incluiu vórtices ciclônicos associados à anticiclônicos ou ciclônicos. Essas feições foram encontradas durante períodos de intensa atividade vortical, quando se observou a formação de várias feições ciclônicas no ET. O estudo de caso Tipo 4 é apresentada a descrição de um evento onde ocorreram feições do tipo (C).

6.3 Tamanho das feições

O tamanho das feições ciclônicas identificadas esteve marcadamente relacionado com sua região de formação. De maneira geral, as feições ciclônicas classificadas como pequenas tiveram sua formação associada à quebra de plataforma. Dentre os trabalhos sobre o vórtice de

Vitória, aqueles baseados em modelagem numérica (Passos, 2011; Pimentel, 2012; Servino, 2014;) não relatam feições ciclônicas deste tamanho, tampouco nessa região de formação. Já os trabalhos baseados em dados hidrográficos na região do ET, como o de Schmid *et al.* (1995), Gaeta *et al.* (1999) e Martins (2014), devido a localização e tamanho da feição, parece relatar a ocorrência dessa mesma feição, apresentando diâmetro (50 km) similar aos encontrados no presente estudo (≈ 40 km).

Os vórtices ciclônicos de tamanho médio foram encontrados principalmente na região central ou no lado leste do ET, próximo ao Banco Vitória. Em um único evento, foi possível observar a translação de um vórtice ciclônico de tamanho médio, formado ao sul do ET, para dentro do embaiamento. Não foi identificado período de maior recorrência de um ou outro tipo de vórtices, sendo encontradas, inclusive, feições dos dois tipos em um mesmo evento (Figura 34c).

Devido a sua ocorrência em períodos de grande nebulosidade, somente foi possível acompanhar o processo de formação do vórtice grande em um dos casos (Evento 4-1). Na imagem de 21 de fevereiro de 2008 (Figura 21a) observa-se um vórtice similar ao VC1 descrito por Servino (2014), porém com diâmetro bem maior (210 km).

Segundo Servino (2014), períodos de outono e verão apresentam condições mais favoráveis à formação de um vórtice grande no ET, do tipo VC1. O autor explica que este processo está associado à diminuição dos transportes da CB, quando o fluxo da corrente próximo a CVT ocorre preferencialmente mais afastado da plataforma continental, fazendo com que o jato desta corrente ao retornar para a costa, provoque o fechamento do embaiamento favorecendo a formação de um grande giro ciclônico, conforme representado na Figura 9a.

6.4 Estudos de caso

Tipo 1: Translação acompanhando o contorno batimétrico

Devido ao pequeno tamanho de alguns vórtices, estas feições estão sujeitas ao efeito da batimetria sobre sua translação, conhecido como efeito β topográfico. Este efeito é análogo ao efeito da variação de Coriolis no plano- β , mas neste caso os vórtices tendem a transladar sempre de maneira que, no hemisfério sul, a região com menor profundidade esteja sempre a esquerda do movimento de translação da feição (Azevedo e Mata, 2010).

Em termos de padrão de deslocamentos, em três eventos foi possível identificar que a translação de vórtices ciclônicos foi coerente com o efeito β topográfico, ou seja, acompanhando contorno batimétrico do ET na direção NE.

Por outro lado, esses pequenos vórtices poderiam também estar sendo advectados por um fluxo na direção NE. O trabalho de Servino (2014) mostrou que a bifurcação da CB a partir de sua interação com o talude continental na região do ET origina um jato norte dessa corrente que flui acompanhando o contorno da quebra de plataforma na direção NE (Figura 9), justamente por onde se observou a translação desses vórtices.

Nos três eventos, os pequenos vórtices ciclônicos inicialmente associados à quebra de plataforma se formaram. A diferença entre os três eventos foi que o primeiro não foi ejetado para fora da costa e, portanto, seu deslocamento manteve-se mais próximo da quebra de plataforma, fazendo o contorno bem na margem no ET, terminando bem no centro do embaiamento ao final de 57 dias de observação.

No segundo evento, a observação da feição foi realizada por 72 dias, onde se nota que a feição ciclônica foi impulsionada para fora da região de formação, ganhando neste impulso velocidade no sentido leste. Foi possível notar que a partir de 38°W, o vórtice se aproxima da CVT e começa a transladar paralelamente ao contorno batimétrico.

O terceiro evento foi mais semelhante ao primeiro, embora não tenha sido possível identificar se o vórtice chegou ao centro do embaiamento ou se dissipou mesmo associado à quebra de plataforma, pois essa observação durou apenas 23 dias.

De acordo com Liu, Tang e Chen (2014), em feições ciclônicas de pequena escala (< 50 km de diâmetro) a velocidades verticais presentes no interior dos vórtices não é grande o suficiente para promover aumento significativo na concentração de nutrientes em seu núcleo. Isso por que a extensão vertical dessas feições não alcança profundidades com maior teor de nutrientes nos oceanos e, por isso, essas feições tendem a apresentar o entorno com maior incremento de clorofila-*a* (drenados de regiões com maior densidade fitoplanctônicas, no caso costeiras). Esses autores explicam que o incremento de fitoplâncton no interior do vórtice, possivelmente ocorre devido ao movimento horizontal, causando acúmulo de fitoplâncton ou nutrientes da borda para o centro em função do movimento de rotação. Ainda segundo esses autores, vórtices ciclônicos são principalmente observados em regiões de frentes, onde as fortes diferenças nas propriedades de massas d'água resultam em altas taxas de cisalhamento e instabilidades, assim como observado no presente trabalho.

Esse efeito descrito por Liu, Tang e Chen (2014), parece explicar por que os vórtices pequenos deste trabalho apresentaram concentrações de clorofila-*a* significativamente maiores que os vórtices médios e grandes.

Tipo 2: Vórtices gerando filamento com elevadas concentrações de clorofila-*a*

A presença de filamento de clorofila-*a* pode ser usada como um indício da presença de vórtice. Nas imagens analisadas foram encontradas elevadas concentrações de clorofila-*a* nestes filamentos dentro do ET (>0.5 mg/m³) comparativamente àquelas encontradas sobre a plataforma (> 0.2 mg/m³). Esses filamentos podem aparecer devido à proximidade de feições ciclônicas com a plataforma continental ou com os bancos da CVT, permitindo a drenagem dessas águas mais enriquecidas com biomassa fitoplanctônica, fazendo com que essas águas fossem incorporadas às feições ciclônicas geradas incrementando sua concentração de clorofila-*a*.

A observação das imagens de satélite não permite quantificar a importância do movimento vertical ascendente no núcleo dos vórtices ciclônicos para o fluxo de nutrientes e consequente incremento da biomassa fitoplanctônica, mas permitiu concluir que essas feições têm um papel fundamental no transporte de águas da plataforma continental mais ricas em nutrientes e com maior concentração de clorofila para a região oligotrófica do embaiamento .

Tipo 3: Formação de vórtice no lado leste do ET

A região entre o Banco Vitória e o Monte Submarino Congress foi umas das regiões com maior recorrência de vórtices ciclônicos de tamanho médio no ET para o período analisado. Pimentel (2012) usou resultados de modelagem numérica para avaliar a variabilidade da CB e a ocorrência de vórtices ciclônicos associados. Neste estudo, a autora encontrou que a formação do Vórtice de Vitória dentro do ET está relacionada principalmente a eventos em que a CB sofre forte meandramento antes de chegar à CVT. Nesses eventos, Pimentel (2012) identificou que, ao norte da CVT, a CB seguiu para leste se afastando da costa e depois, quando retornou

para oeste, se bifurcou no Monte Submarino Vitória, passando quase em sua totalidade ao sul do monte (Figura 37a) ou com parte do fluxo passando a leste e parte a oeste deste monte (Figura 37b). Após a cadeia, observa-se o meandramento da corrente até retornar seu fluxo para próximo à costa, seguindo o talude continental.

Servino (2014) também demonstrou que essa região possui intensa atividade vortical, tanto pela formação de vórtices a partir do meandramento da CB, como pela recirculação do fluxo parcial dessa corrente quando bifurcada na região do talude a oeste do ET.

Embora tenham sido observados diversos padrões de comportamento desta corrente no momento de geração do vórtice, nenhum foi considerado dominante pela autora. No entanto, os vórtices ciclônicos associados a esses dois padrões de escoamento da CB parecem estar em acordo com as feições encontradas no presente estudo de caso.

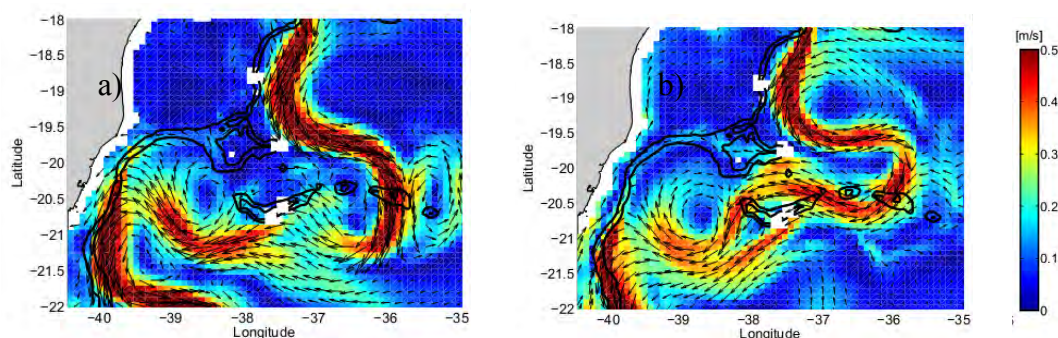


Figura 37: Exemplos do comportamento da CB ao passar pela CVT observados nos resultados da simulação regional ao longo do período analisado (2004 a 2009). Mapas instantâneos de velocidades na camada de densidade $\sigma_t=24$, com destaque para as isóbatas de 200 e 1000 m. Fonte: Adaptado de Pimentel (2012).

Tipo 4: Interação entre vórtices ciclônicos no ET

O Evento 4-1 explicita a ocorrência de três tipos de feições ciclônicas. Com base na análise dos resultados do modelo regional Pimentel (2012), identificou duas formas de ocorrência do Vórtice de Vitória na região do Embaiamento de Tubarão: uma na qual a formação do vórtice ocorre no local onde é observado, no Embaiamento de Tubarão, em torno de $20,9^{\circ}\text{S}$; e outra na qual o vórtice forma-se ao sul de $22,5^{\circ}\text{S}$, a partir do meandramento da CB e migra para a região do Embaiamento de Tubarão.

O vórtice encontrado, próximo a 21°S (Figura 35c), em muito se assemelha ao vórtice descrito por Schmid *et al.*, (1995) e um dos tipos descritos por Pimentel (2014). Já a feição próxima a 22°S parece ser o outro tipo de vórtice ciclônico descrito por Pimentel (2014), que pode apresentar translação para dentro do ET.

Arruda *et al.* (2013) propuseram que após seu desprendimento da CB, o deslocamento do VV para o norte é incitado pela presença de um vórtice anticiclônico localizado a sul da feição. Na Figura 35e, foi observado na sequência de imagens que uma feição anticiclônica, em $21,3^{\circ}\text{S}$ e $39,7^{\circ}\text{W}$, aparentemente impulsiona a feição ciclônica para o centro do embaiamento. Passos (2011) também identificou a ocorrência de feições anticiclônicas no ET, por ela denominada Vórtice de Tubarão (VT). No cenário de verão, a autora notou a assinatura de um vórtice anticiclônico centrado em $21,5^{\circ}\text{S}$ com eixo maior de 147 km e eixo menor de 65 km pareado com a estrutura ciclônica do VV, tendo a CB como eixo de simetria.

A sequência das imagens confirma o efeito de translação de um vórtice ciclônico formado em 22,5°S para dentro do ET. Neste caso, interagindo com outras feições vorticais e resultando numa grande feição circular no ET.

7. CONCLUSÕES

A observação da sequência de imagens diárias permitiu concluir que os meses de inverno são os que permitem uma melhor observação de feições aparentes sobre o campo da clorofila-*a*. Isso se deveu, principalmente, por que nesse período há a menor cobertura de nuvens, no entanto, esse se mostrou ser o período com a menor recorrência de feições ciclônicas. Apesar da maior cobertura de nuvens nos períodos de verão e outono, a observação de feições ciclônicas nessas épocas do ano foram maiores que no período de inverno.

Ficou evidenciado que os processos físicos de mesoescala tem papel fundamental na distribuição de densidade fitoplanctônica na região do ET, já que essa região encontra-se enriquecida durante a formação de vórtices ciclônicos e em eventos subsequentes a ocorrência dessas feições, tanto pelo movimento vertical intrínseco dos vórtices ciclônicos quanto pela drenagem de águas da plataforma pelos fluxos dessas feições para dentro do embaçamento.

Do ponto de vista da observação sinótica no campo da clorofila-*a*, pode-se constatar que não houve uma feição ciclônica permanente no ET, mas sim a ocorrência de várias feições ciclônicas distintas que se formaram na região. Essas feições ciclônicas foram encontradas no ET ao longo de todo o ano. No entanto, nem todas elas tiveram a mesma origem, nem comportamento ou processos de formação comuns. Neste sentido, é questionável a denominação Vórtice de Vitória a qualquer feição ciclônica encontrada na região do ET.

O tamanho das feições ciclônicas identificadas esteve marcadamente relacionado com sua região de formação. De maneira geral, as feições ciclônicas classificadas como pequenas tiveram sua formação relacionada à região de quebra de plataforma. Neste contexto, ficou claro que a região da quebra de plataforma no entorno de 21°S é extremamente dinâmica e de grande relevância para processos de formação de feições ciclônicas mesoescala, muito embora essas feições não tenham sido identificadas em trabalhos de modelagem hidrodinâmica. Também foi observado que as feições médias foram observadas principalmente na porção nordeste e leste do ET, feições estas descritas por diversos autores a partir de resultados de modelagem numérica. (Servino, 2014; Passos, 2011; Pimentel, 2012). Os vórtices classificados como grandes somente foram encontrados em dois episódios, um originado a partir da interação entre outros vórtices ciclônicos e outro similar ao VC2 descrito por Servino (2014).

Embora alguns vórtices tenham se deslocado para fora do ET, não foram identificadas feições ciclônicas que transladassem para norte da CVT, como descrito em Arruda *et al.* (2013).

Ficou evidente que o tamanho das feições ciclônicas tem relevância sobre sua direção preferencial de deslocamento. Também ficou clara a importância de outras forças ambientais no processo de translação dessas feições, como a interação com a CB ou com outras feições vorticais e o impulso gerado na formação da feição, na translação de pequenos vórtices encontrados no ET.

Por fim, conclui-se que o parâmetro clorofila-*a* é um bom indicador da ocorrência de feições ciclônicas, mas deve ser usado com cautela quando se trata da dimensão de tais feições.

8. REFERÊNCIAS

- Apel, J. R. Principles of Ocean Physics. International Geophysics Series. V.38. Ed. Dmowska, R. e Holton, J. R. Academic Press: Suffolk, 1999.
- Arruda, W. Z.; Campos, E. J. D.; Zharkov, v.; Soutelino, R. G.; Silveira, I. C. A. Events of equatorward translation of the Vitoria Eddy. Continental Shelf Research. Volume 70, 1 November 2013, p. 61–73. 2013.
- Azevedo, J. L. L.; Mata, M. M. O mecanismo de Autopropulsão de Vórtices Oceânicos: Uma Revisão. Revista Brasileira de Geofísica, v. 28, pp. 331-347, 2010.
- Bibby, T. S.; Gorbunov, M. Y.; Wyman, K. W.; Falkowski, P. G. Photosynthetic community responses to upwelling in mesoscale eddies in the subtropical North Atlantic and Pacific Oceans. Deep-Sea Research II 55 (2008) 1310–1320. 2008;
- Brown, S. L.; Landry, M. R.; Selph, K. E.; Yang, E. J.; Rii, Y. M. e Bidigare, R. R. (2008). Diatoms in the desert: Plankton community response to a mesoscale eddy in the subtropical North Pacific. *Deep-Sea Research II* 55 1321–1333.
- Calado, L., Dinâmica da Formação dos Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil ao Largo do Sudeste Brasileiro, Dissertação de Mestrado, IOUSP, 95pp, 2001.
- Calado, L. Dinâmica da interação da atividade de mesoescala da Corrente do Brasil com o fenômeno de ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e São Tomé, RJ. Tese (Doutorado). São Paulo, 2006.
- Campos, E. J. D. 1995. Estudos da circulação oceânica no Atlântico tropical e região oeste do Atlântico Subtropical Sul. Tese de livre docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 114p.
- Caspel, M. R.. *A variabilidade temporal do transporte de volume da Corrente do Brasil nas imediações da Cadeia Submarina Vitória-Trindade*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Rio Grande, 2009.
- Ciotti, A. M. e Kampel, M. 2001. Concurrent Observations of Ocean Color and Sea Surface Temperature between Cabo Frio e Cabo São Tomé. Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, 21-26 abril 2001, INPE, p. 785-791, Sessão Técnica Oral – Workshops.
- Costa, T. P. Existe um Vórtice de Vitória Climatológico?. Monografia (Bacharel em Oceanografia, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo). São Paulo, 2007.
- Cushman-Roisin, B. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall, 1994.
- Cushman-Roisin, B. e Beckers, J-M. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*. Academic Press, 2006.
- Emery, W. J.; Talley, L. D.; Pickard, G. L. *Descriptive Physical Oceanography*. Elsevier, 2005.
- Evans, D. L. e Signorini, S. R. Vertical structure of the Brazil Current. Nature, 315(6014):48-50. 1985.
- Fragoso, M. R. e Torres Jr, A. R. Estudo preliminar sobre a circulação de mesoescala na bacia do Espírito Santo. Relatório Técnico. Pró-Oceano. Rio de Janeiro, 2009.
- Fernandes, A. M. Dinâmica baroclínica da Corrente do Brasil na região sudeste. Dissertação (Mestrado em Ciências). São Paulo, 2001.

Gabioux, M. Estudo Numérico Dos Meandros E Vórtices Da Corrente Do Brasil Entre 22°S E 30°S. Tese (Programas de Pós-Graduação Engenharia da Universidade Federal do Rio De Janeiro - Ciências em Engenharia Oceânica.) 2008.

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

Garfield, N. The Brazil Current at Subtropical Latitudes. Ph.D. Thesis, University of Rhode Island, 121 pp. 1990.

Figueiredo Jr., A.G.; Pacheco, C.E.P. e Vasconcelos, S.C. Geomorfologia da plataforma continental da Bacia de Campos. XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA. III Encontro do Quaternário Sulamericano: Challenges and Perspectives. Búzios, 2011.

Kampel, M; Gaeta, S. A.; Lorenzetti, J. A.; Pompeu, M. Estimativa por satélite da concentração de clorofila-asuperficial na costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul: Comparação dos algoritmos SeaWiFS. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiania, Brasil, 16-21 abril de 2005, INPE. p. 3633-3641.

Kampel, M e Souza, R. B. Observação por satélite de um vórtice de núcleo quente na Zona de Confluência Brasil-Malvinas durante a Operação Antártica XXI. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril de 2005, INPE. p.3646-3650.

Liu, F.; Tang, S.; Chen, C. 2014. Satellite observations of the small-scale cyclonic eddies in the western South China Sea. *Biogeosciences Discuss.*, 11, 13515–13532, 2014. doi:10.5194/bg-11-13515-2014

Lorenzetti, J. A. O sensoriamento remoto aplicado na estimativa da concentração de clorofila no mar. *Bolm Inst. oceanogr.*, S. Paulo, 29 (2), 223-225, 1980.

Martins, T. R. 2014. A Corrente do Brasil no Embaiamento de Tubarão - Oceano Atlântico Sudoeste. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental. UFES, Vitória.

Mathworks, Guide to MATLAB. Department of Mathematics. University of Maryland. Disponível em: <<http://www.math.umd.edu/undergraduate/schol/matlab/>>. Acesso em: jan. 2014.

Mattos, R. A. Feições de meso e grande escalas da Corrente do Brasil ao largo do sudeste brasileiro. Dissertação (Mestrado em Ciências). São Paulo, 2006.

McGillicuddy Jr., D. J.; Anderson, L.A.; Bates, N. R.; Bibby, T.; Buesseler, K.O.; Carlson, C. A.; Davis, C. S.; Ewart, C.; Falkowski, P. G. Goldthwait, S. A.; Hansell, D. A.; Jenkins, W. J.; Johnson, R.; Kosnyrev, V. K.; Ledwell, J. R.; Li, Q. P.; Siegel, D. A.; Steinberg, D. K. Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science* 316, 1021. 2007.

Motoki, A., Motoki, K. F. e Melo, D. P.. Caracterização da morfologia submarina da Cadeia Vitória-Trindade e áreas adjacentes-es, com base na batimetria predita do topo versão 14.1. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v. 13, nº 2 (2012).

Oceancolor. OceanColor Web. NASA. Disponível em: <<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/>>. Acesso em: Nov. 2014.

- Olson, B. O.; Podestá, G. P.; Evans, R. H.; Brown, O. B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas Currents. *Deep-Sea Research*, Vol. 35, No. 12, pp. 1971-1990, 1988.
- Olson, D. B., 1991, "Rings in the ocean", *Annual Reviews Earth Planetary Science*, v. 19, pp. 283-311.
- Oschlies, A. e Garçon, V. Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the North Atlantic Ocean. *Nature*. VOL 394. 1998.
- Passos, L. G. 2011. Padrões de Escoamento Baroclínico de mesoescala ao largo do Embaiamento de Tubarão e do Banco de Abrolhos. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física). Instituto Oceanográfico. USP, São Paulo.
- Pimentel, F. P. (2012). A Corrente do Brasil e a Corrente de Contorno Intermediário na região da Cadeia Vitória-Trindade. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Vitória.
- Pereira, D. P. C. Caracterização da estrutura termohalina e de velocidades dos dipolos vorticais da Corrente do Brasil. Monografia (Bacharel em Oceanografia, Instituto de Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro), 2005.
- Peterson, R. G. e Stramma, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean, *Progress in Oceanography*, v. 26, pp. 1-73. Robinson, A. R. 1983. *Eddies in Marine Science*. Springer-Verlag, 1991. 616 p.
- Rodríguez, J.; Tintoré, J. Allen, J. T.; Blanco, J. M.; Gomis, D.; Reul, A.; Ruiz, J.; Rodríguez, V.; Echevarría, F.; Jiménez-Gómez, F. Mesoscale vertical motion and the size structure of phytoplankton in the ocean. *Nature*. v. 410. (2001).
- Servino, R. N. 2014. A bifurcação da Corrente do Brasil no Embaiamento de Tubarão e seu papel na formação de vórtices ciclônicos. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental. UFES, Vitória.
- Schmid, C.H.; Schafer, H.; Podesta, G. e Zenk, W. The Vitoria Eddy and its relation to the Brazil Current. *J. Phys. Oceanogr.* 25(11), 2532-2546. 1995.
- Signorini, S. R., 1978: On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep-Sea Res.*,25 (5), 481-490.
- Silveira, I. C. A.; Schmidt, A. C. K.; Campos, E. J. D.; Godoi, S. S.; Ikeda, Y. A Corrente do Brasil ao largo da Costa Leste Brasileira, *Rev. bras oceanogr.*, 48(2):171-183 (C11), 2000.
- Silveira, I. C. A. Protótipo de sistema de previsão oceânica e costeira para o leste brasileiro. São Paulo: IOUSP, 2004. 30 p.
- Souza, R. B. Introdução à Oceanografia por satélite. In: ____ (Ed.), *Oceanografia por Satélite*. São Paulo: Oficina de textos, 2005 p. 15-19.
- Souza, J. F. A.; Oliveira, L. R.; Azevedo, J. L. L.; Soares, I. D.; Mata, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Revista Brasileira de Geofísica*. 29(1): 21-4. 2011.
- Teixeira, G. L. G. Análise das feições oceanográficas de mesoescala na plataforma continental ao largo do Espírito Santo – Brasil, utilizando sensoriamento remoto. Monografia (bacharel em Oceanografia). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- Tomczak, M. e Godfrey, J. S. 2003. *Regional Oceanography: an Introduction*. 2 ed. Disponível em: <[http://gyre.umeoce.maine.edu/physicalocean/Tomczak/reg oc/pdfversion.html](http://gyre.umeoce.maine.edu/physicalocean/Tomczak/reg_oc/pdfversion.html)>. Acesso em: jan. 2014.