



INFLUÊNCIA DE VENTOS, MARÉS E MESOESCALA SOBRE OS FLUXOS
SUPERFICIAIS ENTRE O TALUDE E A PLATAFORMA CONTINENTAL SSE DO
BRASIL

Luciano Bazoni Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Oceânica.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Rio de Janeiro

Maio de 2017

INFLUÊNCIA DE VENTOS, MARÉS E MESOESCALA SOBRE OS FLUXOS
SUPERFICIAIS ENTRE O TALUDE E A PLATAFORMA CONTINENTAL SSE DO
BRASIL

Luciano Bazoni Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

Prof. Mauro Cirano, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2017

Bazoni Jr., Luciano

Influência de ventos, marés e mesoescala sobre os fluxos superficiais entre o talude e a plataforma continental SSE do Brasil/ Luciano Bazoni Junior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIII, 116 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 67 – 72.

1. Fluxos entre talude e plataforma continental. 2. Ventos, marés e mesoescala. 3. Modelagem numérica. I. Paiva, Afonso de Moraes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

“Às vezes sentimos que aquilo que fazemos é apenas uma gota no mar, mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir a realização deste sonho.

Agradeço a meus pais, pela confiança, pelo incentivo e por tudo que tenham feito para que eu chegasse até aqui. Agradeço especialmente a meu pai, que não está mais aqui, mas que, com certeza, ficaria muito orgulhoso.

Agradeço ao meu companheiro, Flávio, por estar ao meu lado em todos os momentos. Só ele sabe de tudo. Sem ele teria sido muito mais difícil. Obrigado por tudo meu amor.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos por entenderem os momentos ausentes.

Agradeço ao Professor Afonso, meu orientador, por todas as oportunidades, por todo conhecimento e por sempre se preocupar, conversar e me incentivar. Foi uma grande honra ter sido orientado por você. Muito obrigado!

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Oceânica por todas as aulas, todos os trabalhos, todos os ensinamentos.

Agradeço aos professores Marcos e Mauro, por participarem da minha banca e por contribuírem com a elaboração desta dissertação.

Agradeço aos amigos do Laboratório de Oceanografia Física – LOF, especialmente, ao Guilherme, à Mariela e ao Vladimir.

Agradeço a todas as pessoas que trabalham na COPPE/UFRJ, que conviveram comigo neste período e me ajudaram de alguma forma. Principalmente, agradeço à Marise e à Cristina, por tudo.

Agradeço a todos os novos amigos que conheci na Engenharia Oceânica, especialmente à Ana Lígia, minha grande e fiel companheira, e aos amigos do Rio: Gabriel, Pricila, Celso, Cíntia, Edivan e Tiago.

Agradeço à Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) pela disponibilização dos resultados de simulação numérica.

Agradeço ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) por ter autorizado minha licença para esta capacitação tão importante.

Agradeço aos amigos do órgão pelo incentivo. Vocês foram muito importantes para que eu iniciasse essa jornada.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INFLUÊNCIA DE VENTOS, MARÉS E MESOESCALA SOBRE OS FLUXOS
SUPERFICIAIS ENTRE O TALUDE E A PLATAFORMA CONTINENTAL SSE DO
BRASIL

Luciano Bazoni Junior

Maio/2017

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Programa: Engenharia Oceânica

A influência de ventos, marés e mesoescala sobre os fluxos superficiais entre o talude e a plataforma continental SSE do Brasil foi investigada a partir da utilização de um modelo lagrangeano de transporte de partículas, forçado por resultados de simulações numéricas em alta resolução com o modelo HYCOM. Foram realizados três experimentos: i) com marés, ii) sem marés e iii) com ventos atuando diretamente sobre a advecção das partículas. Partículas foram lançadas em superfície e em diferentes locais da margem continental. O escoamento da Corrente do Brasil (CB) e sua atividade de mesoescala foram mais significativos nos fluxos em direção ao oceano. Neste caso, as regiões preferenciais para transporte de partículas foram aquelas com plataforma continental mais estreita e onde a ocorrência de meandros e vórtices é recorrente – Cabo de São Tomé, Cabo Frio e Santos. A ação direta dos ventos foi mais importante para o transporte em direção à plataforma, capaz de ultrapassar o fluxo da CB, principalmente na parte sul da área de estudo. As marés tiveram pouca influência sobre os fluxos entre talude e plataforma. As variações sazonais da CB e dos ventos, apesar de pouca influência de modo geral, determinaram predominância de fluxos em diferentes regiões.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INFLUENCE OF WINDS, TIDES AND MESOSCALE ON THE SURFACE FLOWS
BETWEEN THE SSE SLOPE AND CONTINENTAL SHELF OF BRAZIL

Luciano Bazoni Junior

May/2017

Advisor: Afonso de Moraes Paiva

Department: Ocean Engineering

The influence of winds, tides and mesoscale on the surface flows between the SSE slope and continental shelf of Brazil was investigated using a Lagrangian model for particle transport, forced by results of numerical simulations in high resolution with HYCOM model. Three experiments were carried out: i) with tides, ii) without tides and iii) with winds acting directly on the advection of the particles. The surface launches were made at different sites on the continental margin. The flow of the Brazil Current (BC) and its mesoscale activity were more significant on the flows towards the ocean. Preferential regions for transport toward slope and ocean were those with a narrower continental shelf and where the occurrence of meanders and vortex is recurrent – Cabo de São Tomé, Cabo Frio and Santos. Direct action of the winds was more important for the transport towards the continental shelf, being able to surpass the flow of the BC, mainly in the southern part of the study area. The tides had little influence on the flows between slope and shelf. Seasonal variations of BC and winds, although little influence in general, have determined the predominance of flows in different regions.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 PRINCIPAIS FORÇANTES DA CIRCULAÇÃO NA REGIÃO DA PLATAFORMA SUL-SUDESTE DO BRASIL.....	9
2.1 Corrente do Brasil.....	10
2.2 Ventos.....	13
2.3 Ondas Confinadas Costeiras.....	17
2.4 Marés.....	18
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 Modelo HYCOM.....	20
3.2 Modelo Lagramp.....	23
3.3 Experimentos.....	24
3.4 Lançamento de partículas.....	25
3.4.1 Lançamento de partículas por área.....	25
3.4.2 Lançamento pontual de partículas.....	28
3.5 Testes de sensibilidade.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Lançamento de partículas por área.....	36
4.1.1 Experimento base (EXP 1).....	36
4.1.2 O efeito da maré (EXP 2).....	39
4.1.3 A ação direta dos ventos (EXP 3).....	39
4.1.4 Síntese.....	44
4.2 Lançamento pontual de partículas.....	47
4.2.1 Lançamentos na plataforma interna.....	48
4.2.2 Lançamentos na quebra da plataforma.....	58
4.2.3 Lançamentos feitos na região oceânica.....	61
4.2.4 Síntese.....	63
5 CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

Lista de Figuras

Figura 1: Imagens de satélite MODIS/AQUA da Temperatura da Superfície do Mar para os meses de janeiro (acima) e junho de 2015.....	6
Figura 2: Região da Plataforma Sul-Sudeste Brasileira, localizada entre a Foz do Rio Doce e o Cabo Santa Marta. As linhas de batimetria sem identificação representam uma evolução a cada 1000m de profundidade.....	10
Figura 3: Média anual (painel inferior) e de verão (painel superior direito) e inverno (painel superior esquerdo) de correntes superficiais obtidas com o modelo HYCOM, com resolução espacial de $1/24^\circ$, para sete anos de resultados (2004-2010).....	12
Figura 4: Climatologia de velocidade dos ventos para os meses considerados como verão (janeiro, fevereiro e março) e inverno (julho, agosto e setembro). Os dados são do CFSR, entre os anos de 1979 e 2009.....	14
Figura 5: Stick plot dos valores de direção e intensidade dos ventos para o ano de 2005, provenientes do CFSR. Os pontos Q1, Q2, Q3 e Q4 se referem a pontos na quebra da plataforma/talude da área de estudo. A direção indicada segue a convenção meteorológica e oceanográfica (de onde o vento vem).....	15
Figura 6: Rosas dos ventos para os pontos na quebra da plataforma (Q1, Q2, Q3 e Q4 – ver localização dos pontos na Figura 5) no período de verão. A confecção das rosas considerou um conjunto de sete anos de dados de velocidade dos ventos do CFSR. A direção indicada segue a convenção meteorológica e oceanográfica (de onde o vento vem).....	16
Figura 7: Rosas dos ventos para os pontos na quebra da plataforma (Q1, Q2, Q3 e Q4 – ver localização dos pontos na Figura 5) no período de inverno. A confecção das rosas considerou um conjunto de sete anos de dados de velocidade dos ventos do CFSR. A direção indicada segue a convenção meteorológica e oceanográfica (de onde o vento vem).....	17
Figura 8: Domínios das simulações numéricas de $1/4$, $1/12$, $1/24^\circ$. A de $1/4$ considerou todo o oceano Atlântico, a de $1/12$, parte do Atlântico Sul e a de $1/24$, parte da costa do Brasil. A escala de cores representa a elevação da superfície do mar (em centímetros), resultante do experimento com $1/4^\circ$	22
Figura 9: Áreas nas quais ocorreram lançamentos de partículas. Os lançamentos na plataforma (entre as isóbatas de 20 e 100m) e no talude (entre as isóbatas de 300 e 2000m) foram feitos em simulações distintas para os mesmos períodos e para os diferentes experimentos (EXP 1, 2 e 3).....	26
Figura 10: Pontos igualmente espaçados a cada 100 km sobre a isolinha de 200 m e segmentos numerados para avaliação dos cruzamentos de partículas entre plataforma e oceano nos lançamentos feitos por área.....	27

Figura 11: Pontos de lançamento de partículas com o modelo Lagramp. Os pontos foram identificados de acordo com o número da seção (1, 2, 3 e 4) e seu com o posicionamento – plataforma (P), quebra da plataforma/talude (Q) e região oceânica (O). As linhas de batimetria sem identificação representam uma evolução a cada 1000 m de profundidade.....	28
Figura 12: Contornos de probabilidade do teste de sensibilidade com variação do coeficiente de difusão (K) para o ponto Q2. Os painéis superiores apresentam resultados para o período de verão e os inferiores para o inverno – os da esquerda apresentam os contornos de 30% e os da direita de 70%. Os testes foram integrados por 60 dias.....	32
Figura 13: Diferenças relativas entre as áreas dos contornos de probabilidade de 70% dos experimentos com os coeficientes de difusão iguais a 0, 100, 400, 700 e 1000 m ² /s no verão e inverno.....	33
Figura 14: Contornos de probabilidade do teste de sensibilidade com e sem difusão para os Testes 1, 2 e 3 – com maré, sem maré e com maré e vento, respectivamente, no ponto P4. Os painéis superiores apresentam resultados para o período de verão e os inferiores para o inverno – os da esquerda apresentam os contornos de 30% e os da direita de 70%. Os testes foram integrados por 60 dias.....	35
Figura 15: Média e desvio padrão do quantitativo de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para o EXP 1 por segmento – ver segmentos na Figura 10. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).....	41
Figura 16: Média e desvio padrão do quantitativo de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para o EXP 2 por segmento – ver segmentos na Figura 10. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).....	42
Figura 17: Média e desvio padrão do quantitativo de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para o EXP 3 por segmento – ver segmentos na Figura 10. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).....	43
Figura 18: Número médio de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para EXP 1, EXP 2 e EXP 3. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).....	45
Figura 19: Relação do número médio de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental no EXP 1 e nos EXP 2 e 3. O painel superior se refere ao período de verão e o inferior ao de inverno.....	46

Figura 20: Mapas de probabilidade para os experimentos EXP 1, 2 e 3 – painéis superiores, intermediários e inferiores, respectivamente, no ponto P1, para os períodos de verão (painéis esquerdos) e de inverno (painéis direitos). O tempo de integração foi de 60 dias.....	50
Figura 21: Contornos de probabilidade de 80% para os experimentos EXP 1 (linha azul), EXP 2 (linha vermelha) e EXP 3 (linha preta tracejada) para os pontos P1 (painéis superiores) e P2 (inferiores) e para os períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). 51	
Figura 22: Localização dos pontos na plataforma interna da área de estudo. As linhas tracejadas representam as isóbatas de 200 e 1000 m.....	53
Figura 23: Espectros das séries temporais das componentes paralelas à costa de velocidade de corrente na superfície obtidas com o modelo HYCOM para diferentes pontos na plataforma interna da área de estudo.....	53
Figura 24: Contornos de probabilidade de 80% para os experimentos EXP 1 (linha azul), EXP 2 (linha vermelha) e EXP 3 (linha preta tracejada) para os pontos P3 (painéis superiores) e P4 (inferiores) e para os períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). 54	
Figura 25: Trajetórias de partículas lançadas no ponto P3 – região em vermelho. As trajetórias ilustram o comportamento de parte das partículas, obtidas com o EXP 1 para o período de verão do ano de 2005. A linha preta representa a isóbata de 200 m.....	55
Figura 26: Mapa de probabilidade (painel esquerdo) e de percentual de partículas (painel direito) no ponto P3, EXP 1, período de inverno. O tempo de integração foi de 60 dias.....	55
Figura 27: Comparação entre as séries temporais de Altura da Superfície do Mar (ASM) e das componentes de velocidade paralela (painel superior) e transversal à costa para o ponto P3, no ano de 2007.....	57
Figura 28: Comparação entre i) a série temporal de Altura da Superfície do Mar (ASM), ii) as séries temporais para os primeiros dez dias após o início do lançamento da componente paralela de velocidade de todas as partículas lançadas no ponto P3, durante o inverno do ano de 2007 e, iii) a velocidade média de todas essas partículas no EXP 1. O valor da ASM foi subtraído em 0,35 m para facilitar a visualização.....	58
Figura 29: Mapas de probabilidade para os experimentos EXP 1 (painéis superiores) e 3 para o ponto Q1, nos períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.....	60
Figura 30: Mapas de probabilidade para os experimentos EXP 1 (painéis superiores) e EXP 3 para o ponto Q4, nos períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.....	61

Figura 31: Mapas de probabilidade para o ponto O2, experimento EXP 1 (2 painéis superiores) e EXP 3 (2 inferiores); períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.....62

Figura 32: Mapas de probabilidade para o ponto O4, experimento EXP 1 (2 painéis superiores) e EXP 3 (2 inferiores); períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.....63

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Experimentos realizados com os modelos HYCOM e Lagramp para analisar as trocas entre talude e plataforma continental sob diferentes forçantes.....24

Tabela 2 – Coordenadas geográficas e profundidades dos pontos de lançamento de partículas com o modelo Lagramp.....29

1 INTRODUÇÃO

A interação entre as águas da plataforma continental e do talude apresenta grande complexidade devido às distintas características geomorfológicas e escalas hidrodinâmicas, contemplando processos de mesoescala, como meandros e vórtices, e a dinâmica de águas rasas, de forma geral dominada por ventos, ondas confinadas costeiras e marés. A compreensão dos processos que influenciam os fluxos de propriedades, nutrientes, poluentes e organismos entre talude e plataforma continental é muito importante, pois subsidia um maior entendimento dos ecossistemas nestas regiões. Esse conhecimento é relevante também para a execução de atividades humanas, tais como pesca e exploração de recursos minerais e para a avaliação dos impactos associados a estas atividades.

Em algumas regiões do mundo já foram realizadas pesquisas cujo foco era investigar a interação entre as circulações entre plataforma e talude, e determinar as principais forçantes. A utilização de resultados de modelos hidrodinâmicos associados ao lançamento e acompanhamento de derivadores virtuais, assim como a análise de dados hidrográficos, imagens de satélite e trajetórias de derivadores reais, têm sido as principais técnicas para estudar a interação entre talude e plataforma continental.

Na região do Golfo do México, após o acidente com a sonda de perfuração *Deepwater Horizon*, em 2010, o óleo vazado no talude alcançou uma região preferencial da plataforma continental. Chang *et al.* (2011) utilizaram um modelo hidrodinâmico (*Princeton Ocean Model*) em conjunto com um esquema que assimila dados de satélite de anomalia de altura da superfície do mar (AVISO – *Archiving, Validation, and Interpretation of Satellites Oceanographic data*) do modelo para obter uma análise de longo prazo das correntes (8 anos). O modelo foi iniciado também com dados de temperatura da superfície do mar, ventos e descargas de rios. Com isso, lançaram e acompanharam as trajetórias de derivadores virtuais durante 120 dias de cada um dos anos modelados e compararam com a trajetória do óleo vazado durante o acidente. Os autores concluíram que os ventos naquela situação foram os principais responsáveis pelas trajetórias superficiais e que o modelo testado é uma boa ferramenta para previsão

de trajetórias de manchas de óleo em futuros vazamentos.

Para a mesma região do Golfo do México e sob a mesma perspectiva do problema de entender como o mancha de óleo no acidente com a *Deepwater Horizon* se comportou, Hamilton *et al.* (2015) estudaram diretamente as trocas entre talude e plataforma continental em diferentes profundidades. Nesse trabalho, os autores avaliaram a circulação entre plataforma e talude com o auxílio de análises estatísticas, a partir de trajetórias de derivadores de superfície e meia água. Os resultados indicaram que há um importante escoamento superficial entre talude e plataforma, tanto na importação de água do talude para a plataforma, quanto na exportação para o talude. Os autores observaram também que, em algumas regiões, as trocas em direção ao talude eram mais significativas. Devido às evidências de imagens de satélite e dados hidrográficos, pontuaram que a causa direta dessas trocas estava associada à passagem de vórtices anticiclônicos, embora os ventos também tenham sido considerados como importantes para tais trocas.

Para investigar os efeitos da topografia, dos ventos e das marés na circulação e na interação entre plataforma e oceano sob diferentes regimes de estratificação na região de Tromsø, na Noruega, Skarjhamar e Svendsen (2005) utilizaram medições de campo e resultados de modelos numéricos, bem como o lançamento e acompanhamento de derivadores virtuais na área de interesse. Os autores destacaram que os efeitos de ventos, marés e topografia nas correntes são fortemente dependentes da estratificação (com significativa variação sazonal). Os efeitos topográficos influenciaram pouco as correntes quando a estratificação era intensificada, ao contrário dos ventos, que nessas condições de estratificação, tiveram um forte impacto na circulação superficial e nas trocas entre plataforma e oceano. Quando a estratificação era fraca, observaram que os efeitos das marés juntamente aos da topografia dominaram a circulação.

No Brasil, de modo geral, os estudos que relataram de alguma forma as interações entre as circulações nos taludes e nas plataformas focaram no entendimento da circulação e de feições individualmente, além de suas variações sazonais (CALADO *et al.*, 2006; AMORIM *et al.*, 2013; PALÓCZY *et al.*, 2014), da estrutura das massas d'água e do transporte da Corrente do Brasil – CB (CAMPOS *et al.*, 1995), ou na busca de solucionar como ocorre a ressurgência na região sudeste do Brasil e a associação

desta com instabilidades da CB (CAMPOS *et al.*, 2000; CASTELAO *et al.*, 2004; PALMA; MATANO, 2009; MATANO *et al.*, 2010).

O fenômeno da ressurgência costeira que ocorre principalmente na região de Cabo Frio e Cabo de São Tomé é fortemente associado ao padrão de ventos. Os ventos ao longo da costa geram um transporte superficial transversal à plataforma continental (transporte de Ekman). Quando os ventos são de E-NE, este transporte superficial é direcionado para o oceano, causando divergência na costa. Por continuidade, gera-se um fluxo abaixo da superfície em direção à costa, levando águas mais frias da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) para a plataforma, que alimentam a circulação da ressurgência. Principalmente durante o outono e o inverno no hemisfério sul, com a passagem mais recorrente de frentes frias e, portanto, mudanças no padrão de ventos, o fenômeno da ressurgência costeira é enfraquecido, pois o transporte superficial transversal à plataforma é em direção à costa e se estabelece um fluxo geostrófico direcionado para norte (VALENTIN *et al.*, 1987; CASTRO; MIRANDA, 1998).

Este fenômeno não é observado somente em regiões costeiras, mas também na quebra da plataforma. Entretanto, a ressurgência que ocorre na quebra da plataforma não depende diretamente da ação dos ventos. A partir da análise de dados hidrográficos e de resultados de modelos numéricos, Campos *et al.* (2000) mostraram que a ocorrência de meandros ciclônicos na região entre Cabo Frio/RJ e Cabo de Santa Marta/SC e a presença da ACAS nas partes mais externas da plataforma continental possuem relação causal. Dessa maneira, no inverno, o bombeamento da ACAS para a plataforma seria devido principalmente à ressurgência na quebra da plataforma induzida pelo meandramento e, no verão, seria uma combinação entre a ressurgência forçada por ventos de nordeste e a ressurgência forçada pelos meandros.

No estudo feito por Castelao *et al.* (2004), com modelagem numérica da mesma região mencionada acima, o foco era investigar a importância de ventos e meandramentos da CB na ressurgência de água para a plataforma continental. Os autores sugeriram a ocorrência de trocas entre talude e plataforma novamente como uma interação entre os meandramentos da CB e os ventos favoráveis à ressurgência no verão. Contudo, ressaltaram também a possibilidade de ocorrência de ressurgência mesmo sem os ventos favoráveis (inverno), apenas como resposta aos meandramentos da CB.

Palóczy *et al.* (2014) estudaram as intrusões de ACAS na plataforma continental na região do Cabo de São Tomé/RJ, a partir da análise de dados de satélite, observações *in situ* e modelagem numérica. Novamente, os ventos foram indicados como a força mais importante na ocorrência de ressurgência costeira. Sugeriram também que a presença de vórtices ciclônicos quase-permanentes e a intrusão de águas tendem a regular o campo de massa na plataforma, de modo que a ação do vento, mesmo que com menor intensidade, seja capaz de retirar água da superfície em direção ao oceano, favorecendo assim a ressurgência.

Além do fenômeno da ressurgência, de modo geral, na região da plataforma sudeste-sul do Brasil a circulação é forçada por ventos locais, Ondas Confinadas Costeiras (OCCs), marés, vazão fluvial e pelo escoamento da CB e atividade de mesoescala (CASTRO; MIRANDA, 1998; PALMA; MATANO, 2009). A influência de cada um desses processos varia com a largura da plataforma continental e a posição de referência na plataforma estudada (plataforma interna, média e externa).

A estrutura termohalina e a circulação na plataforma são controladas pela interação entre os efeitos dos ventos e a influência da CB e também pela interação da CB com a topografia de fundo (CASTRO; MIRANDA, 1998). As velocidades transversais nas regiões de plataforma média e externa são forçadas pelo gradiente de pressão barotrópico associado à CB, enquanto que os ventos influenciam significativamente as velocidades transversais na plataforma interna. Além disso, mudanças na orientação da linha de costa modificam os padrões espaciais das trocas entre talude e plataforma e, a mudança latitudinal de largura da plataforma modula o gradiente de pressão meridional e a magnitude das subidas e descidas de água na quebra da plataforma (PALMA; MATANO, 2009; MATANO *et al.*, 2010). A variabilidade da CB na área de estudo é dominada por oscilações com frequências menores que as de maré (submaregráficas – período de 3-15 dias) e as oscilações de maré, comparativamente menores, contribuem mais para a variância das correntes na componente transversal à plataforma do que na componente longitudinal. Mesmo tendo uma influência pequena sobre o escoamento da CB, sua importância relativa aumenta à medida que se aproxima de regiões mais rasas (CASTRO; MIRANDA, 1998).

A circulação na plataforma interna desta região é forçada principalmente por

ventos locais e OCCs, sendo menor a influência das demais forçantes, já que as amplitudes de marés e vazões fluviais são pequenas (PALMA *et al.*, 2008; LENTZ; FEWINGS, 2012). Durante o verão, na região próxima ao Cabo de São Tomé, a CB ocupa a maior parte da plataforma continental, até mesmo a plataforma interna. Neste período, com ventos predominantemente de nordeste, o escoamento para a direção sudoeste é reforçado. No inverno, a CB se retrai em direção ao talude, de modo que as correntes nas plataformas interna e média sejam forçadas principalmente pela ação dos ventos. Devido à maior incidência de frentes frias e ventos frequentes de sudoeste, o escoamento nas plataformas interna e média pode reverter para a direção nordeste (CASTRO; MIRANDA, 1998).

Na plataforma média e externa a CB é a forçante mais importante, podendo ser notada principalmente em profundidade, com intrusões para a plataforma de águas frias e menos salinas da ACAS (LIMA *et al.*, 1996; CASTRO; MIRANDA, 1998; PALMA; MATANO, 2009). Próximo à quebra da plataforma e no talude, a CB e as feições de mesoescala favorecem a retirada de água da plataforma para o oceano e a intrusão de águas mais frias para a plataforma (CAMPOS *et al.*, 1995; MATANO *et al.*, 2010).

As imagens de satélite de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), adquiridas através do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) instalado no satélite AQUA da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), evidenciam uma água mais fria na região entre o sul do Espírito Santo e a região de Cabo Frio, durante o verão, que é característica do fenômeno de ressurgência (Figura 1). As águas no entorno dessa região apresentam temperaturas na superfície com variação entre 26 e 30°C. No inverno, mesmo com águas mais frias na plataforma, a região entre Cabo Frio e Cabo de São Tomé apresenta temperaturas ainda menores que as do entorno. Em ambos os períodos do ano de 2015 (janeiro – verão; e junho – inverno), observa-se também o padrão meandrante da Corrente do Brasil.

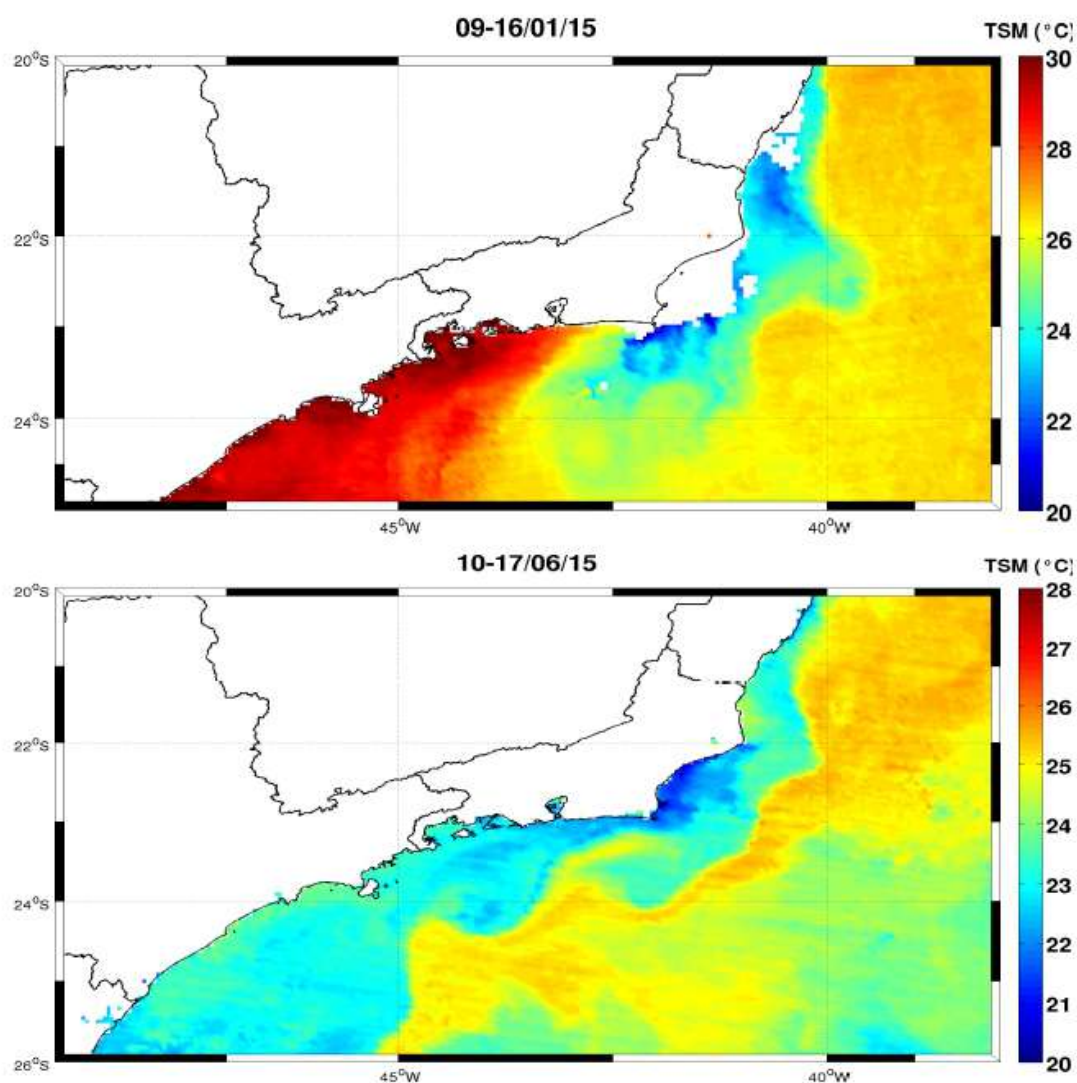


Figura 1: Imagens de satélite MODIS/AQUA da Temperatura da Superfície do Mar para os meses de janeiro (acima) e junho de 2015.

Portanto, o entendimento atual sobre os fluxos entre a plataforma continental e o talude na região sul/sudeste do Brasil permite avaliar que estes podem ser eventuais (associados à variação de intensidade e direção dos ventos e à ocorrência de meandros e vórtices gerados por instabilidades da CB), permanentes (associados à mudanças na orientação da linha de costa, na largura da plataforma e na topografia de fundo), ou uma sinergia entre estes processos. Destaca-se que o foco principal dos estudos já realizados nessa região era entender os processos responsáveis pela ressurgência de águas do

talude na quebra da plataforma e o avanço sobre esta como um escoamento de fundo até a plataforma média/interna, podendo culminar na ressurgência de águas mais frias da ACAS na superfície de regiões mais costeiras.

Contudo, existem ainda questões abertas relacionadas às trocas de água, propriedades e substâncias entre a plataforma e o talude na superfície dos oceanos, como a importância relativa das forçantes que determinam ou influenciam tais trocas, ou em quais regiões ocorrem trocas entre talude e plataforma com maior frequência. Elucidar os mecanismos que determinam estas trocas significa também compreender a dinâmica ecológica e a saúde dos ecossistemas. Nesse contexto, foi criado, em 2012, o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ciências do Mar de Estudos dos Processos Oceanográficos Integrados da Plataforma ao Talude (INCT PRO-OCEANO). Esta iniciativa visa contribuir para a compreensão dos processos oceanográficos da plataforma e talude continental da costa brasileira, de forma integrada, em diferentes escalas espaciais e temporais. O presente trabalho faz parte desse esforço institucional.

Este estudo também pretende auxiliar nas simulações de transporte e dispersão de óleo no mar realizadas para subsidiar atividades de exploração e produção de petróleo no mar. Algumas dessas modelagens, que são exigidas pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) para avaliação de cenários acidentais com vazamento de óleo, são forçadas com resultados de modelagens hidrodinâmicas com baixa resolução espacial e temporal. Tais limitações podem prejudicar a representação dos fluxos entre plataforma e talude, isolando a circulação de ambas as regiões, como se entre elas não houvesse interação. Assim, um lançamento acidental de óleo no talude dificilmente alcançará a plataforma (ou vice-versa).

Portanto, propõe-se com este trabalho não apenas ampliar o entendimento das trocas de água, substâncias e propriedades entre talude e plataforma continental na superfície dos oceanos e da importância relativa de suas principais forçantes (ventos, marés e atividade de mesoescala), mas também contribuir para o avanço dos estudos de modelagem de transporte e dispersão de poluentes.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é investigar as trocas de água, substâncias e propriedades na superfície dos oceanos entre a plataforma continental e o talude da região Sudeste e Sul do Brasil. Para isso, propõem-se os seguintes objetivos

específicos:

1. Investigar a importância relativa de ventos, marés e mesoescala para os fluxos superficiais entre o talude e a plataforma continental;
2. Identificar as regiões preferenciais de ocorrência destes fluxos; e
3. Investigar a importância das variações das forçantes entre verão e inverno nestes fluxos;

Para isso, foram utilizados resultados provenientes de simulações da circulação superficial realizadas com o modelo oceânico *Hybrid Coordinate Ocean Model* – HYCOM (BLECK, 2002), no escopo da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO). A REMO, constituída por pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Federal da Bahia, do Centro de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil e do Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello da Petrobras, representa um esforço na modelagem oceânica nacional, cujos produtos em alta resolução deste grupo visam o desenvolvimento científico em oceanografia e o desenvolvimento de um sistema numérico operacional de previsão oceânica com assimilação de dados (GABIOUX *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2013).

Os resultados do HYCOM forçaram um modelo lagrangeano de transporte (Lagramp), no qual foi feito o lançamento de partículas na camada superficial em diferentes locais da plataforma, do talude e do oceano na região Sudeste e Sul do Brasil, para avaliação do comportamento destas partículas em diferentes cenários. A ação dos ventos diretamente sobre as partículas será considerada em um dos experimentos, já que o movimento de um objeto na superfície do mar é resultado de forças atuando sobre a superfície e sobre o centro de massa do objeto (HACKETT *et al.*, 2006). Uma mancha de óleo, por exemplo, pode se mover numa taxa que é resultante de 100% da velocidade das correntes e aproximadamente 3% da velocidade dos ventos (FINGAS, 2013). Bowden (1983) mencionou resultados de análises que indicaram um fator de deriva de 3,4%. Além disso, o Ibama sugere atualmente que as modelagens de transporte de óleo considerem o fator de deriva do vento como 3,5% – valor utilizado neste trabalho.

2 PRINCIPAIS FORÇANTES DA CIRCULAÇÃO NA REGIÃO DA PLATAFORMA SUL-SUDESTE DO BRASIL

Neste capítulo são apresentadas as características das principais forçantes da circulação na região da plataforma sul-sudeste do Brasil, sendo elas: a Corrente do Brasil, os ventos, as Ondas Confinadas Costeiras e as marés. Esta caracterização se restringiu à área de estudo deste trabalho, que se estende desde a foz do Rio Doce/ES (19°38'S) até o Cabo Santa Marta/SC (28°36'S) – região dentro dos limites de escoamento da CB. Nessa área há concentração significativa de instalações pesqueiras e importantes reservatórios de petróleo sendo explorados e/ou em produção. Além disso, é uma região com uma plataforma diferenciada (Figura 2), sendo mais estreita na proximidade da cidade de Vitória (≈ 50 km) e mais larga na parte central (≈ 230 km), na direção da cidade de Santos, com influência de ventos, marés, ondas confinadas costeiras, vazão fluvial, escoamento da CB e atividade de mesoescala na circulação. A profundidade da quebra da plataforma varia entre 35 e 180 m (CASTRO; MIRANDA, 1998; PEREIRA *et al.*, 2007; PALÓCZY *et al.*, 2014).

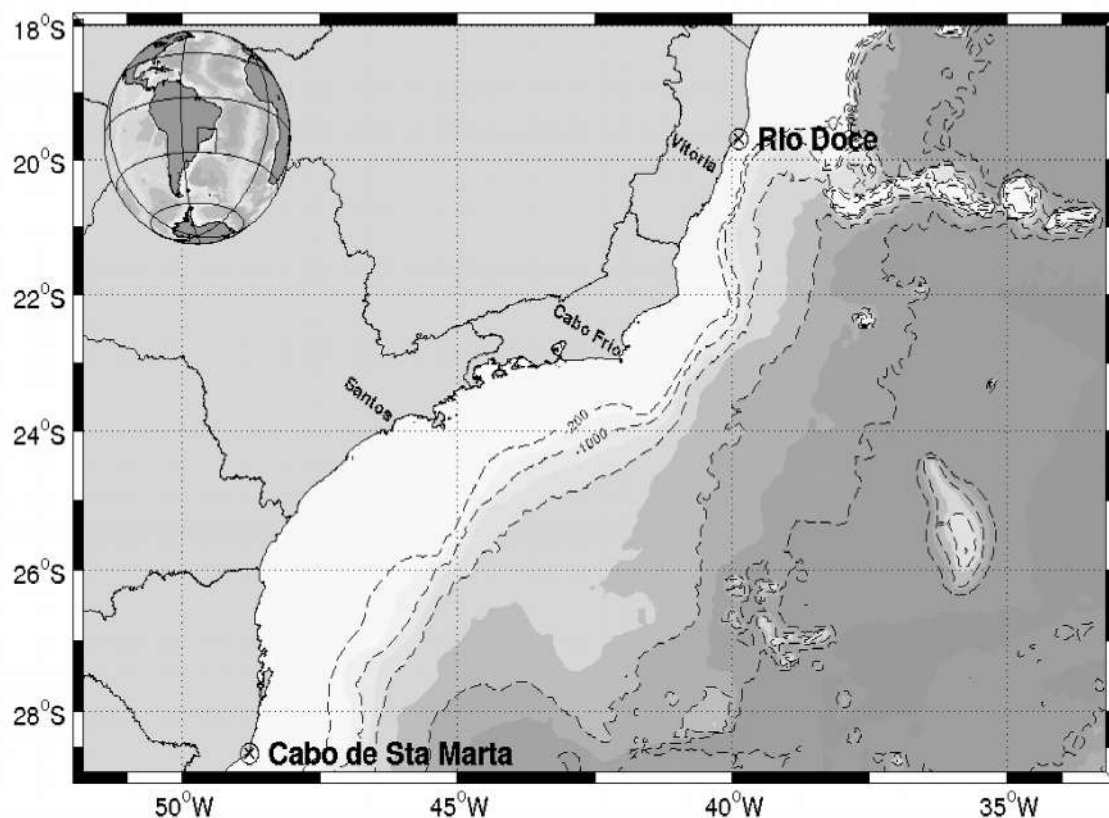


Figura 2: Região da Plataforma Sul-Sudeste Brasileira, localizada entre a Foz do Rio Doce e o Cabo Santa Marta. As linhas de batimetria sem identificação representam uma evolução a cada 1000m de profundidade.

2.1 Corrente do Brasil

A CB é a Corrente de Contorno Oeste (CCO) que fecha o giro subtropical do oceano Atlântico Sul, fluindo em direção a altas latitudes ao longo do talude e da quebra da plataforma. Em seu percurso, a CB, que é uma corrente intensa, rasa e relativamente estreita, interage com a circulação existente na plataforma continental, influenciando-a através de seu fluxo e de sua atividade de mesoescala. Na área de estudo deste trabalho, as velocidades máximas encontradas na literatura variaram entre 0,19 e 0,75 m/s, as estimativas de transporte entre valores de 5 a 10 Sv e a largura da corrente entre 100 e 120 km (SILVEIRA *et al.*, 2000; SILVEIRA *et al.*, 2008). A Figura 3 ilustra o comportamento médio dos campos superficiais de velocidade dentro da área de estudo, obtidos com o modelo HYCOM, e permite a visualização das características

mencionadas.

Ao sul de 20°S, a CB recebe contribuição da ACAS, tornando-a maior em transporte para sul e mais profunda. Após ultrapassar a Cadeia Vitória-Trindade (CVT), em 20,5°S, a CB flui mais bem organizada sobre o talude continental, ocupando desde a superfície até aproximadamente 400 m (CASTRO; MIRANDA, 1998; STRAMMA; ENGLAND, 1999; SILVEIRA *et al.*, 2000). Nesta região, há intensa atividade de mesoescala associada ao escoamento da CB, como o Vórtice de Vitória (VV), o Vórtice do Cabo de São Tomé (VCST) e o Vórtice de Cabo Frio (VCF) (MASCARENHAS *et al.*, 1971; SCHMID *et al.*, 1995; CALADO *et al.*, 2006; MILL *et al.*, 2015). A formação de fortes vórtices ciclônicos e anticiclônicos já foi associada à mudanças na orientação da linha de costa (CAMPOS *et al.*; 1995).

À medida que os vórtices se propagam para sul, a água do talude é bombeada para a plataforma como uma intrusão de fundo, ressurgindo na quebra da plataforma (CASTRO; MIRANDA, 1998; CAMPOS *et al.*, 2000; CASTELAO *et al.*, 2004). A atuação da circulação ciclônica dos vórtices na região aconteceria de modo que a parte frontal promoveria uma subida de água, devido à divergência, enquanto se propaga para sul ao longo da quebra da plataforma e a parte traseira promoveria uma descida de água, devido à convergência. A subida de água e interação dos vórtices com a topografia é capaz de favorecer o bombeamento da ACAS para a plataforma (CAMPOS *et al.*, 2000; PALÓCZY *et al.*, 2014).

A migração para norte do vórtice formado na região do Cabo São Tomé, em direção ao embaçamento de Tubarão, foi reportada em Mill *et al.* (2015). Esta migração é capaz de transportar águas da plataforma e do talude para regiões mais ao norte e influenciar as características das águas na região desse embaçamento e em seu entorno.

Portanto, a atividade de mesoescala da CB pode influenciar a circulação geral do oceano ao largo, como também atuar como forçante na circulação da plataforma continental, já que o transporte deixa de ser paralelo ao talude e à plataforma, tornando-se transversal aos mesmos. Além disso, a presença de meandros e vórtices pode contribuir para a intrusão de águas oceânicas na plataforma continental, bem como para a retirada de água da plataforma em direção ao oceano (CALADO *et al.*, 2006;

PALÓCZY *et al*, 2014; HAMILTON *et al.*, 2015; MILL *et al.*, 2015).

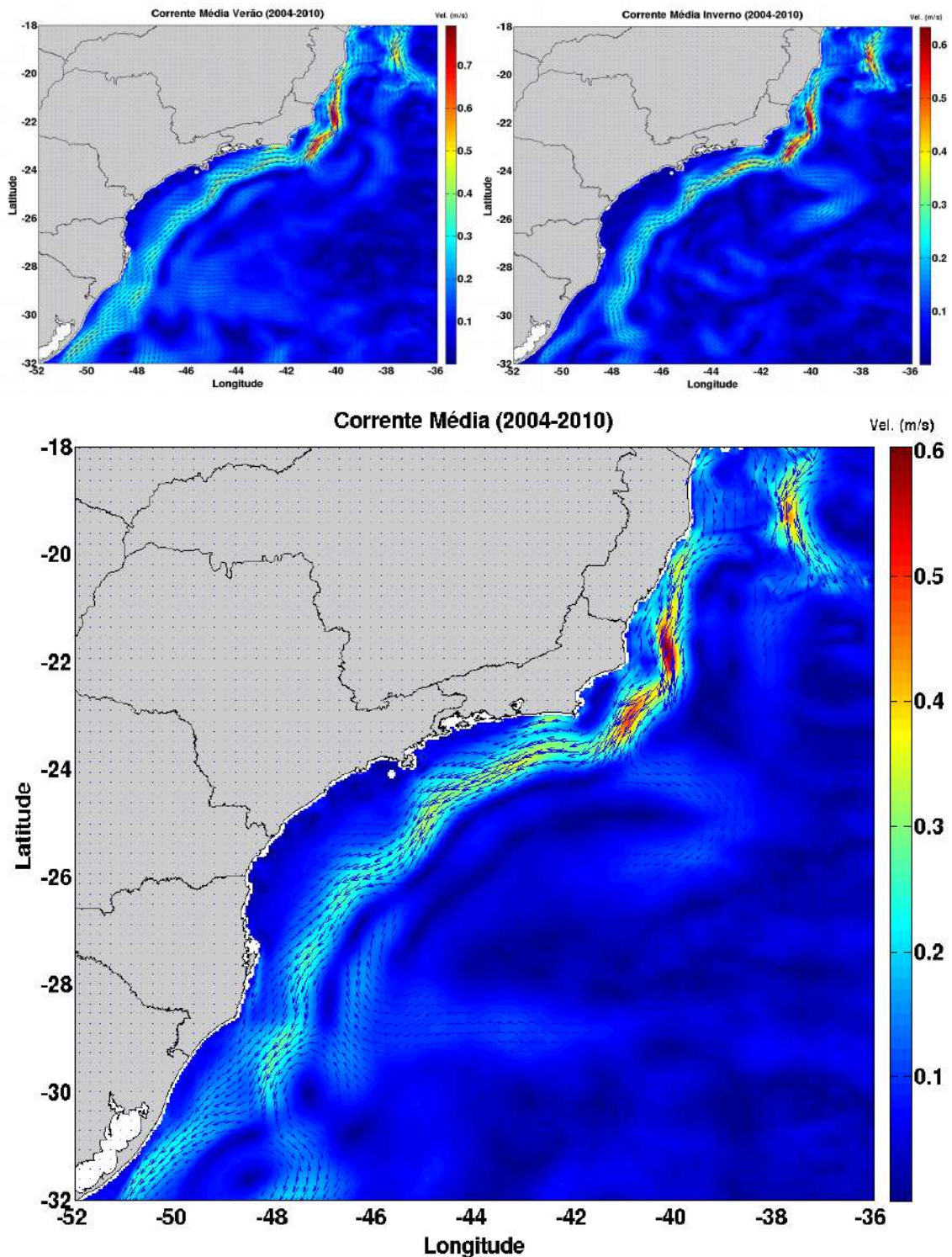


Figura 3: Média anual (painel inferior) e de verão (painel superior direito) e inverno (painel superior esquerdo) de correntes superficiais obtidas com o modelo HYCOM, com resolução espacial de $1/24^\circ$, para sete anos de resultados (2004-2010).

2.2 Ventos

O clima do oceano Atlântico Sul é dominado, em grande parte e durante praticamente todo o ano, por um sistema semipermanente de alta pressão (Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul – ASAS). A variação da posição do centro de alta pressão desse sistema entre verão e inverno e, os gradientes formados entre o centro de alta pressão e as bordas fazem com que o padrão de ventos seja influenciado em intensidade e direção durante o ano. Os ventos predominantes entre 15 e 35°S durante o verão no hemisfério sul são de nordeste-leste e, durante o inverno, os ventos de nordeste-leste associados à alta subtropical se limitam entre as latitudes 20 e 25°S. Ventos de oeste-sudoeste são predominantes durante o inverno abaixo de 25°S (CASTRO; MIRANDA, 1998).

O ASAS, apesar de se movimentar nas direções leste/oeste e norte/sul entre o verão e o inverno, promove uma condição de estabilidade termodinâmica que é interrompida pela chegada de sistemas transientes, tais como sistemas frontais e ciclones extratropicais. Esses sistemas acarretam no aumento da nebulosidade, na ocorrência de precipitação e na intensificação dos ventos (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015).

Com ocorrência média de 3 a 6 frentes por mês ao longo do ano, portanto, o clima típico da área de estudo é dominado também pela passagem contínua de frentes frias. A passagem e persistência dessas frentes durante o inverno, quando a CB normalmente se retrai em direção à quebra da plataforma e ao talude, podem permitir que a circulação nas plataformas interna e média seja forçada pelos ventos, alternando, portanto, a direção do fluxo entre correntes para nordeste e para sudoeste (CASTRO; MIRANDA, 1998). Durante todo o ano, principalmente no embaçamento formado entre os cabos Frio e de Santa Marta, ventos de diferentes direções podem afetar a região. A direção dos ventos durante a passagem de frentes frias dependerá da posição de migração da perturbação atmosférica em relação à costa (CASTRO; LEE, 1995).

A partir de dados de velocidade de ventos provenientes do CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), com resolução temporal de 6h, entre os anos de 1979 a 2009, foi calculada uma média para os meses de janeiro, fevereiro e março e de julho,

agosto e setembro, característicos de verão e inverno, respectivamente (Figura 4). Apesar do padrão entre os meses de verão ser de ventos de nordeste, há na região do embaçamento formado entre o Cabo Frio e o Cabo de Santa Marta uma incidência de ventos de leste. Há também uma redução das velocidades entre janeiro e março, sendo maiores no primeiro mês. Durante os meses de inverno, o padrão médio de direção e intensidade dos ventos é distinto do observado nos meses de verão, com ventos de oeste na parte mais ao sul e de nordeste-leste menos intensos de forma geral na parte central e norte.

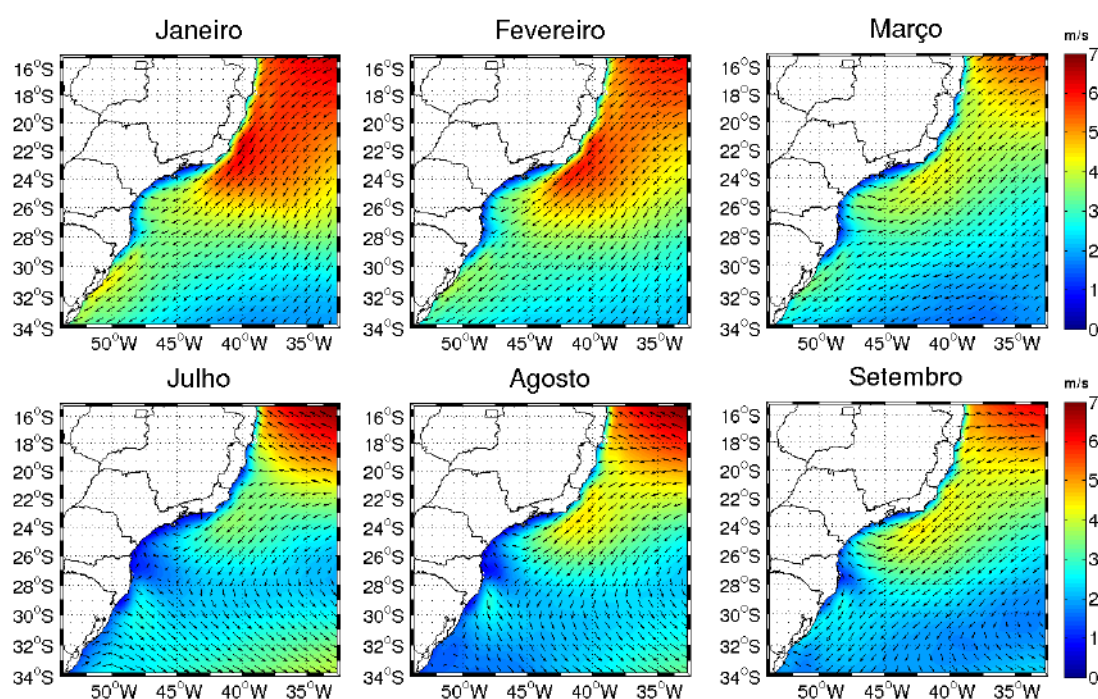


Figura 4: Climatologia de velocidade dos ventos para os meses considerados como verão (janeiro, fevereiro e março) e inverno (julho, agosto e setembro). Os dados são do CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), entre os anos de 1979 e 2009.

Ainda com base nos dados do CFSR (para os anos de 2004 a 2010), foram analisadas as intensidades e direções para quatro pontos distintos na quebra da plataforma da área de estudo (Q1, Q2, Q3 e Q4). Apresentam-se na Figura 5 os dados do ano de 2005 para estes pontos, já que este ano apresentou os menores desvios padrão em torno da média de todos os anos para ambas as componentes zonal e meridional nos

4 pontos (os *stick plots* dos demais anos foram incluídos no Apêndice 1 deste trabalho). A predominância de ventos do quadrante nordeste se mantém ao longo do ano, sendo o ponto mais ao sul da área de estudo (ponto Q4) o que apresenta maior quantidade de inversões, já que este é o ponto mais afetado com a passagem das frentes frias.

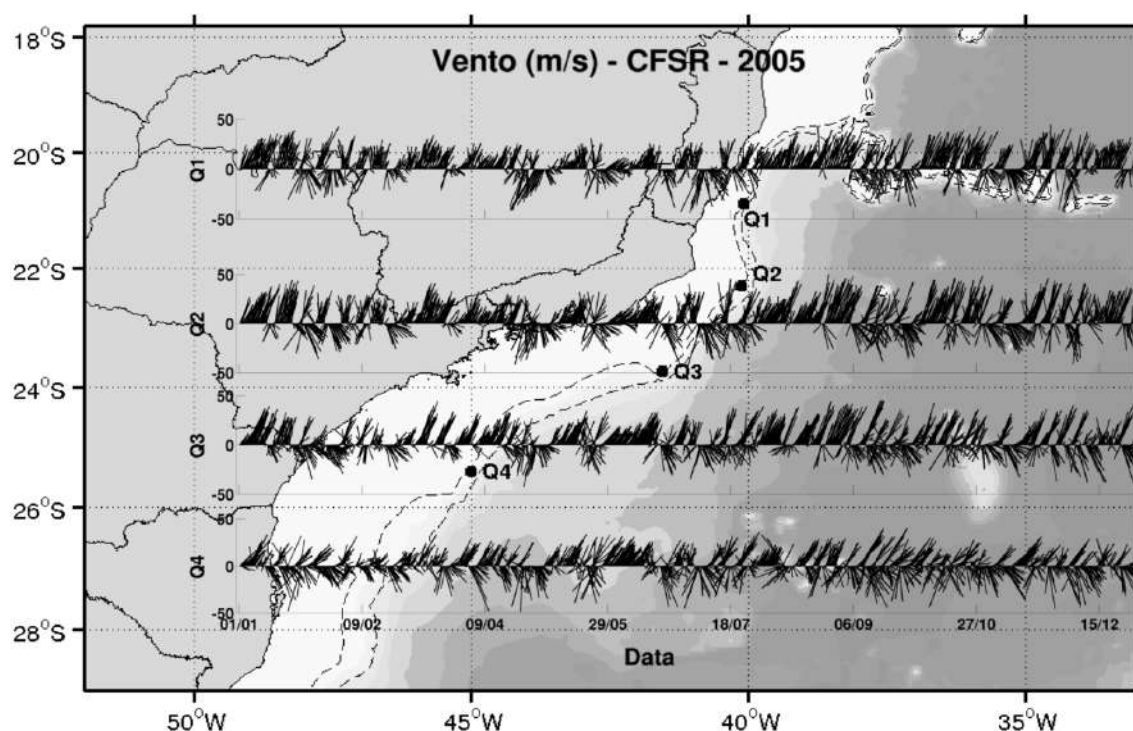


Figura 5: *Stick plot* dos valores de direção e intensidade dos ventos para o ano de 2005, provenientes do CFSR. Os pontos Q1, Q2, Q3 e Q4 se referem a pontos na quebra da plataforma/talude da área de estudo. A direção indicada segue a convenção meteorológica e oceanográfica (de onde o vento vem).

As rosas dos ventos feitas para os períodos de verão e inverno com sete anos de dados do CFSR (2004-2010) mostram que durante todo o ano e em todos os pontos (Q1, Q2, Q3 e Q4), assim como já observado para o ano de 2005, há predominância de ventos de nordeste (Figuras 6 e 7). Tanto no verão como no inverno, esta predominância é maior no ponto Q1 (ponto mais ao norte) e diminui em direção ao ponto Q4 (mais ao sul). Durante verão, as velocidades variaram principalmente entre 6 e 12 m/s, com máximas entre 15 e 18 m/s. As direções são preferencialmente de NE, mas em todos os pontos foram observados ventos com direções de sudeste e sudoeste, cuja frequência

aumenta à medida que se aproxima dos pontos mais ao sul. No inverno, as velocidades dos ventos entre 12 e 18 m/s são mais frequentes em todos os pontos, com velocidades máximas ultrapassando 18 m/s. Neste período é mais frequente que no verão a ocorrência de ventos de SE e SW, em todos os pontos, com destaque para os pontos mais ao sul. As velocidades dos ventos vindos destes quadrantes também podem alcançar valores elevados (superiores à 18 m/s), mas a predominância é de ventos com intensidades entre 6 e 12 m/s.

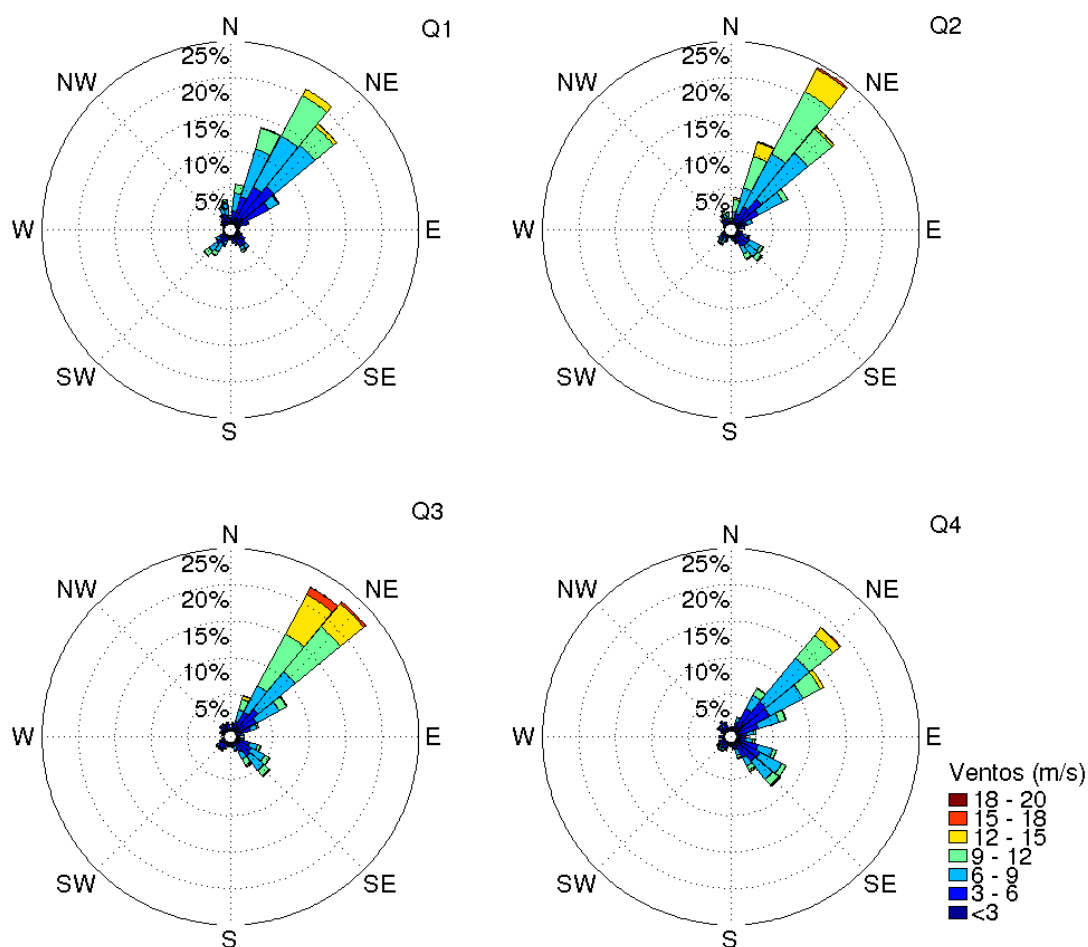


Figura 6: Rosas dos ventos para os pontos na quebra da plataforma (Q1, Q2, Q3 e Q4 – ver localização dos pontos na Figura 5) no período de verão. A confecção das rosas considerou um conjunto de sete anos de dados de velocidade dos ventos do CFSR. A direção indicada segue a convenção meteorológica e oceanográfica (de onde o vento vem).

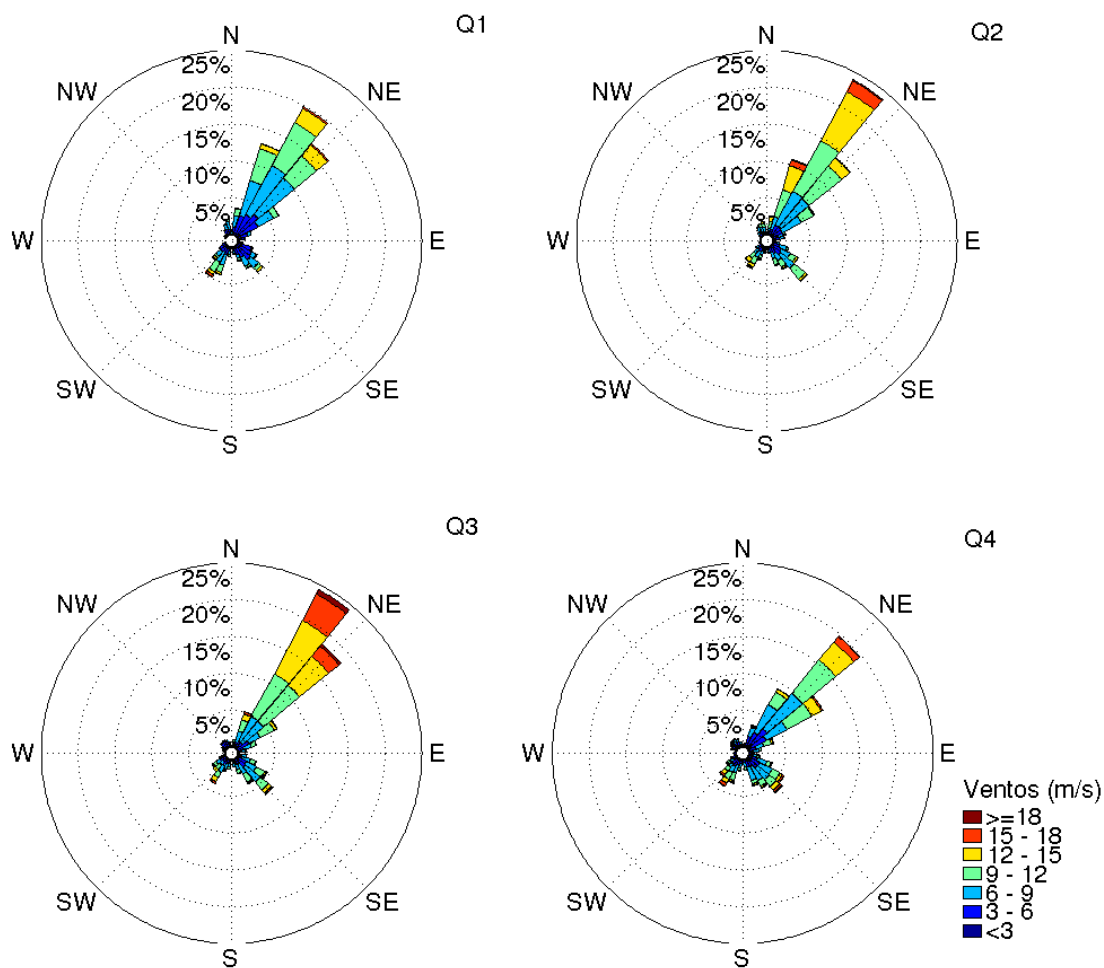


Figura 7: Rosas dos ventos para os pontos na quebra da plataforma (Q1, Q2, Q3 e Q4 – ver localização dos pontos na Figura 5) no período de inverno. A confecção das rosas considerou um conjunto de sete anos de dados de velocidade dos ventos do CFSR. A direção indicada segue a convenção meteorológica e oceanográfica (de onde o vento vem).

2.3 Ondas Confinadas Costeiras

As OCCs, responsáveis por oscilações da elevação do nível do mar na costa e do campo de correntes sobre a plataforma continental, influenciam principalmente as correntes paralelas à costa, de modo a torná-las mais energéticas que as correntes transversais (DOTTORI; CASTRO, 2009; PAIVA *et al.*, 2012).

Estas ondas de baixa frequência, com períodos da ordem de dias a semanas, foram analisadas por Castro e Lee (1995) na região do embaiamento entre Cabo Frio e Cabo

de Santa Marta, plataforma sudeste do Brasil. Foram observadas oscilações de 9-12 dias no nível do mar, na pressão atmosférica e nos ventos se propagando em direção ao equador ao longo da costa, com velocidades da ordem de 10 m/s. Para essas oscilações, o nível do mar respondeu de maneira mais eficiente aos ventos na direção SSW-NNE. Estas perturbações seriam forçadas por sistemas atmosféricos se movendo para nordeste, capazes de cruzar a plataforma em direção à costa na região mais ao sul do embaçamento formado pelos cabos, quando a tempestade ainda é forte.

Também foi observada uma perturbação com período de 6-7 dias que seria forçada por ventos remotos ao sul do Cabo de Santa Marta. Neste caso, o nível do mar respondeu predominantemente a ventos com orientação SSE-NNW. Em ambos os casos, portanto, a geração dessas ondas subinerciais foi associada à forçantes remotas e os autores sugeriram que estas ondas podem explicar razoavelmente bem as variações do nível do mar no inverno desta região.

Dessa forma, a resposta subinercial da plataforma sudeste do Brasil à forçante de vento é principalmente barotrópica. Castro e Lee (1995) e Dottori e Castro (2009), com análises de funções ortogonais empíricas (EOF) indicaram que mais de 80% dos registros de elevação e da variância das correntes, respectivamente, é explicada pelo modo barotrópico.

2.4 Marés

No oceano Atlântico Sul existem dois pontos anfidrômicos da componente da onda de maré M₂, a mais importante e de maior amplitude. Um destes pontos está localizado no meio do oceano (entre as longitudes de 20 e 30°W e aproximadamente na latitude de 30°S) e o outro próximo da região costeira do sul do Brasil. O sentido de giro do ponto costeiro é horário e do outro é anti-horário. Portanto, as marés na plataforma sudeste do Brasil apresentam componentes M₂ e S₂ com duplo sentido de propagação nesta área. Elas induzem as elipses de correntes anticiclônicas quase unidirecionais de SE–NW ao longo da profundidade e na superfície (MESQUITA; HARARI, 2003). A presença destes pontos anfidrômicos faz com que, na região costeira da área de estudo, as amplitudes de marés sejam pequenas e menores que as amplitudes observadas nos

estados mais ao norte da costa brasileira (CAMARGO; HARARI, 2014).

As características das marés na região podem ser inferidas através da razão entre as principais componentes diurnas e semidiurnas. O valor de 0,3 foi observado na região costeira de Santos. Portanto, as marés são classificadas como semidiurnas com desigualdades diurnas. A componente M2 é a de maior amplitude na área em questão, com valores variando de 30 a 36 cm na região costeira. A componente S2 é a segunda maior componente de maré da região, com amplitudes variando entre 18 a 22 cm. Fortes efeitos meteorológicos associados a passagens de frentes frias podem causar variações no nível médio do mar de cerca de 1 m e circulações mais fortes que as geradas pelas marés. Contudo, na ausência de eventos extremos, os efeitos meteorológicos geram correntes e elevações menores que aquelas devido às marés (HARARI; CAMARGO, 2003).

As correntes da M2 na superfície, também na região costeira de Santos, não chegam a atingir 10 cm/s. Para as correntes de superfície da S2 os valores máximos são de 5 cm/s. Considerando as principais componentes harmônicas, em condições de sizígia, as correntes de superfície vazantes mais intensas possuem velocidades de 20,2 cm/s. Em condições de quadratura, as correntes máximas na superfície são menores, não ultrapassando 8,1 cm/s na área costeira mais profunda (HARARI; CAMARGO, 1998).

As marés na área de estudo podem, portanto, ser classificadas como micromarés, já que a variação da amplitude é menor que 2 metros e possuem dominância da componente semidiurna (PALMA *et al.*, 2008).

3 METODOLOGIA

A análise das trocas de substâncias e propriedades entre plataforma e talude continental na camada superficial da região da Plataforma Sul-Sudeste Brasileira foi realizada com o auxílio de simulações com o modelo hidrodinâmico HYCOM sob diferentes forçantes. Além disso, foi utilizado um modelo lagrangeano de transporte de partículas – Lagramp, desenvolvido pelo Professor Afonso de Moraes Paiva, com lançamento de partículas em diferentes áreas e pontos da plataforma, do talude e da região oceânica.

O Lagramp foi forçado com resultados do modelo hidrodinâmico HYCOM e o lançamento de partículas foi feito de diferentes formas, em diferentes locais e diferentes períodos do ano, para que a sazonalidade e variabilidade espacial das forçantes na região fossem consideradas. A estratégia inicial foi adotar uma área de lançamento de partículas na plataforma ou no talude, localizadas entre as latitudes 20°S e 28°S, de modo a contemplar pontos nas plataformas interna, média e externa, assim como pontos no talude. Outra estratégia adotada foi através de lançamentos pontuais de partículas nas diferentes províncias oceanográficas, para diferentes períodos do ano.

3.1 Modelo HYCOM

O modelo *Hybrid Coordinate Ocean Model* – HYCOM (BLECK, 2002) é um modelo de circulação oceânica com sistema generalizado de coordenadas verticais, desenvolvido a partir do modelo *Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model* – MICOM. O modelo HYCOM utiliza discretização horizontal em diferenças finitas, mas não é puramente isopícnal como seu predecessor, pois seu sistema generalizado de coordenadas verticais permite a mudança de coordenadas (isopícnais, sigma e geopotencial ou coordenadas z) dentro do domínio de modelagem. O HYCOM, mesmo permitindo a utilização de diferentes tipos de coordenadas para diferentes condições, é essencialmente um modelo de coordenadas isopícnais em grande parte do domínio, onde a densidade potencial é utilizada como coordenada vertical (GABIOUX *et al.*,

2013).

No interior dos oceanos, onde a estratificação é mais evidente, o modelo é isopícnal. Para regiões do oceano onde há interação do fluxo com o fundo (zonas costeiras e camada limite de fundo), o modelo faz uma transição suave de coordenadas isopícnais para sigma e, para as regiões não-estratificadas ou mais homogêneas, o modelo assume as coordenadas z (BLECK, 2002). O fato de utilizar coordenadas híbridas otimiza a representação do oceano, uma vez que o modelo reconhece as regiões que necessitam de maior resolução (GABIOUX *et al.*, 2013), o que é ainda mais importante para o presente caso, já que as camadas superficiais e a plataforma continental estão entre as áreas de principal enfoque.

A configuração do modelo hidrodinâmico, feita no âmbito da REMO, consiste de um conjunto de simulações numéricas aninhadas, de modo que simulações com resolução espacial de $1/4^\circ$ para todo o oceano Atlântico forçaram simulações com resolução de $1/12^\circ$ para a porção do Atlântico Sul, denominada de Metarea V, e estas forçaram simulações com resolução espacial de $1/24^\circ$ para a região SSE do Brasil nos contornos laterais com campos diários de velocidade (u – componente zonal e v – componente meridional), temperatura, salinidade e espessura de camada (Figura 8). Os resultados da simulação com resolução de $1/24^\circ$, cujo domínio se estendeu entre as latitudes $12-35^\circ\text{S}$ e longitudes $35-54^\circ\text{W}$ e cuja discretização vertical foi de 21 camadas de densidade sigma *theta*, representam uma integração de sete anos (2004-2010), que forneceu as condições iniciais para as simulações do presente estudo.

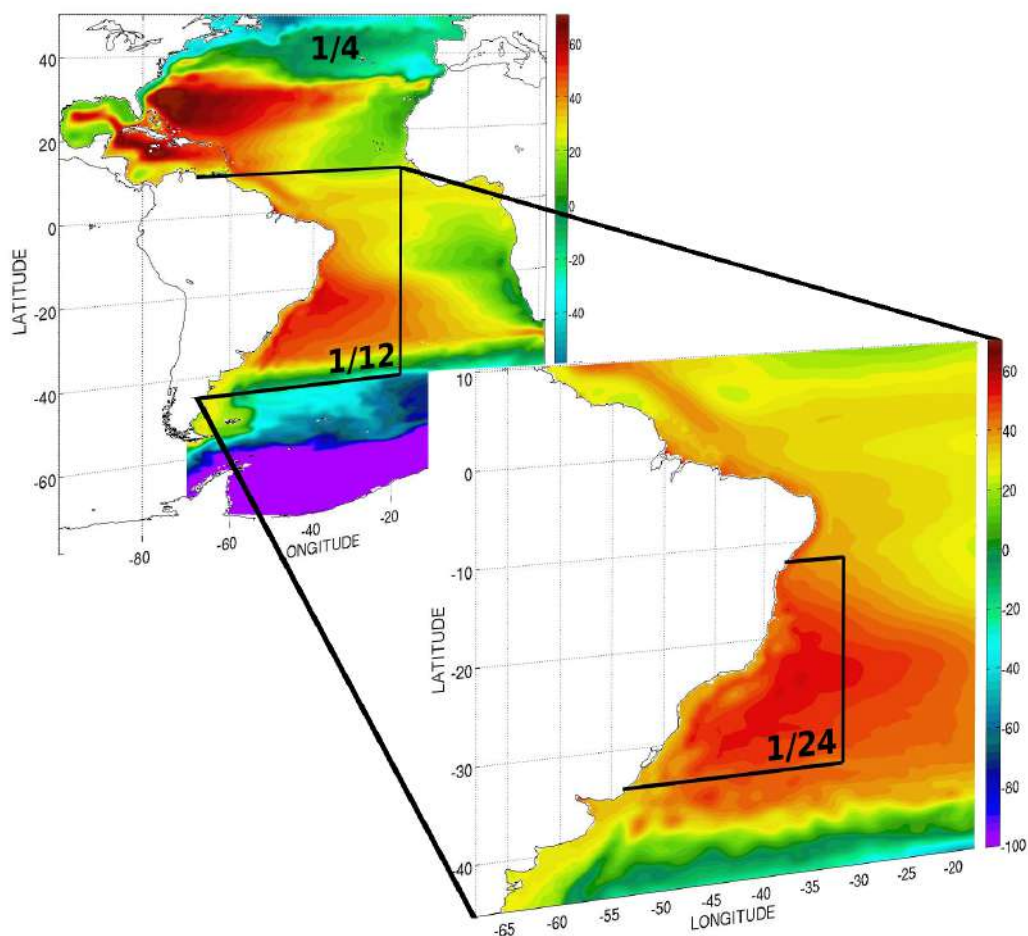


Figura 8: Domínios das simulações numéricas de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{12}$, $\frac{1}{24}^\circ$. A de $\frac{1}{4}$ considerou todo o oceano Atlântico, a de $\frac{1}{12}$, parte do Atlântico Sul e a de $\frac{1}{24}$, parte da costa do Brasil. A escala de cores representa a elevação da superfície do mar (em centímetros), resultante do experimento com $\frac{1}{4}^\circ$.

A configuração do modelo citada já foi validada através da análise de processos, de modo a identificar fenômenos oceanográficos e a representação destes nos dados disponíveis e no modelo. A análise desta modelagem pode ser encontrada em Paiva *et al.* (2012), que mostra que o modelo é capaz de representar de forma realista a circulação na região.

Os resultados das simulações feitas com o HYCOM foram diferenciados no que diz respeito à prescrição de marés nos contornos. Uma das simulações considerou campos atmosféricos sinóticos (6 em 6hs), provenientes do CFSR, com a prescrição de marés nos contornos laterais, e na segunda simulação não houve prescrição de marés.

Quando prescritas, foram levadas em consideração as oito principais constantes harmônicas (M2, S2, N2, K2, O1, P1, Q1, K1), interpoladas a partir dos resultados do modelo TPXO7.2.

3.2 Modelo Lagramp

O Lagramp é um modelo lagrangeano de transporte advectivo-difusivo de partículas em um campo 2D de velocidades de correntes variáveis no tempo, para grades regulares. A posição das partículas é atualizada a cada passo de tempo, sendo aplicados deslocamentos advectivos devido à intensidade e direção das correntes (u e v – velocidades zonal e meridional, respectivamente), bem como deslocamentos causados pelos processos difusivos, como se observa na Equação 1:

$$\begin{aligned} x_{t+\Delta t} - x_t &= [u \Delta t + \varepsilon \sqrt{K_x \Delta t}] / \cos(y_t) \\ y_{t+\Delta t} - y_t &= [v \Delta t + \varepsilon \sqrt{K_y \Delta t}] \end{aligned} \quad (1)$$

onde t é tempo, x e y são as posições das partículas em graus de longitude e latitude, respectivamente; ε é o coeficiente de variação randômica característica (distribuição normal); e K_x e K_y representam os coeficientes de difusão (POLOVINA *et al.*, 1999).

Os resultados das simulações feitas com o modelo hidrodinâmico HYCOM foram utilizados para leitura da grade, da batimetria e dos campos de velocidade. Para o transporte difusivo foram considerados coeficientes de difusão físicos, definidos pelo usuário e, uma variável randômica com distribuição normal. Sobre os valores do coeficiente de difusão, destaca-se que não há consenso na literatura entre valores representativos para o oceano, de modo que estes variam entre valores próximos de zero (0,1 m²/s) – considerados baixos (ZELENKE *et al.*, 2012) –, até valores que variam entre 30, 500 e 1000 m²/s (GABRIC; PARSLOW, 1994; MUNK *et al.*, 1986; BOWDEN, 1983). A utilização do coeficiente de difusão turbulenta e o valor deste foram determinados com base nas informações e nos valores encontrados na literatura,

bem como, nos Testes de Sensibilidade apresentados no item 3.5.

3.3 Experimentos

Os experimentos realizados com o Lagramp consideraram os resultados obtidos nas duas simulações feitas com o HYCOM. O primeiro experimento foi forçado com os resultados das simulações com prescrição de marés (EXP 1). O segundo experimento utilizou os resultados das simulações sem a prescrição de marés (EXP2). O terceiro experimento foi forçado com os resultados das simulações com a prescrição de marés feitas com o HYCOM e com a ação direta dos ventos sobre as partículas lançadas (EXP 3), já que as trajetórias das partículas na superfície são influenciadas pelas correntes e pela ação dos ventos (Tabela 1). Os diferentes experimentos foram feitos para investigar a importância das diferentes forçantes nos fluxos entre talude e plataforma.

Tabela 1 – Experimentos realizados com os modelos HYCOM e Lagramp para analisar as trocas entre talude e plataforma continental sob diferentes forçantes.

Experimentos	HYCOM			LAGRAMP		
	Marés	Ventos (Forçante atmosférica)	Tempo de Integração	Marés	Ventos (ação direta sobre partículas)	Tempo de Integração
EXP 1	Sim	Sinóticos (CFSR)	7 anos (2004-2010)	Sim	Não	60 dias
EXP 2	Não	Sinóticos (CFSR)	7 anos (2004-2010)	Não	Não	60 dias
EXP 3	Sim	Sinóticos (CFSR)	7 anos (2004-2010)	Sim	Sim	60 dias

A tensão dos ventos foi considerada nos dois experimentos feitos com o HYCOM como forçante atmosférica, mas no modelo lagrangeano as velocidades dos ventos foram incluídas para determinar parte do deslocamento das partículas. Portanto, foram adicionados na Equação 1 os termos referentes à advecção das partículas devido à ação direta do vento sobre as mesmas (Equação 2).

$$\begin{aligned}
 x_{t+\Delta t} - x_t &= \left[u \Delta t + Q U_v \Delta t + \varepsilon \sqrt{Kx} \Delta t \right] / \cos(y_t) \\
 y_{t+\Delta t} - y_t &= \left[v \Delta t + Q V_v \Delta t + \varepsilon \sqrt{Ky} \Delta t \right]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

onde U_v é a velocidade zonal do vento, V_v é a velocidade meridional do vento e Q é o fator de deriva do vento. O valor de Q utilizado foi de 0,035 (SOOMERE *et al.*, 2014) e as velocidades dos ventos foram provenientes do CFSR; as mesmas utilizadas nas simulações feitas com o modelo HYCOM.

3.4 Lançamento de partículas

As configurações do modelo Lagrangian permitem que sejam escolhidos diferentes tipos de lançamento das partículas: lançamento pontual instantâneo, lançamento instantâneo numa determinada região e, lançamento intermitente ao longo do período de integração. No presente trabalho, foram feitos lançamentos por área e lançamentos pontuais. O lançamento pontual instantâneo visou atender ao objetivo de investigar a importância relativa das forçantes para os fluxos superficiais entre talude e plataforma continental. Este tipo de lançamento é relevante também do ponto de vista prático, já que se assemelha às modelagens de transporte e dispersão de óleo no mar. As simulações com lançamento de partículas por área, na plataforma e no talude, foram feitas para atender ao objetivo de identificar regiões preferenciais dos fluxos entre plataforma e talude. Para verificar a importância das variações sazonais das forçantes nestes fluxos, os dois tipos de lançamentos foram feitos para os períodos de verão (janeiro) e inverno (julho).

3.4.1 Lançamento de partículas por área

O lançamento instantâneo de partículas por região consistiu na adoção de duas grandes áreas: a plataforma continental e o talude (Figura 9). Nesse caso, o número de partículas lançadas foi equivalente ao número de pontos de grade do modelo hidrodinâmico para a região determinada. Entre as latitudes de 20 e 28°S, a área na plataforma foi delimitada entre as isóbatas de 20 e 100 m, o que representou um total de 4250 pontos de grade/partículas. No talude, a área foi delimitada entre as isóbatas de 300 e 2000 m. Essa delimitação resultou num total de 4905 partículas. Os lançamentos em cada área foram feitos individualmente, ambos para os dias 1, 11 e 21 de janeiro e de

julho de cada ano (2004-2010) e todos integrados por 60 dias. Em cada área, portanto, foram feitas 42 simulações – verão e inverno dos sete anos; esse número de simulações foi feito para cada experimento (EXP 1, 2 e 3), totalizando 126 simulações.

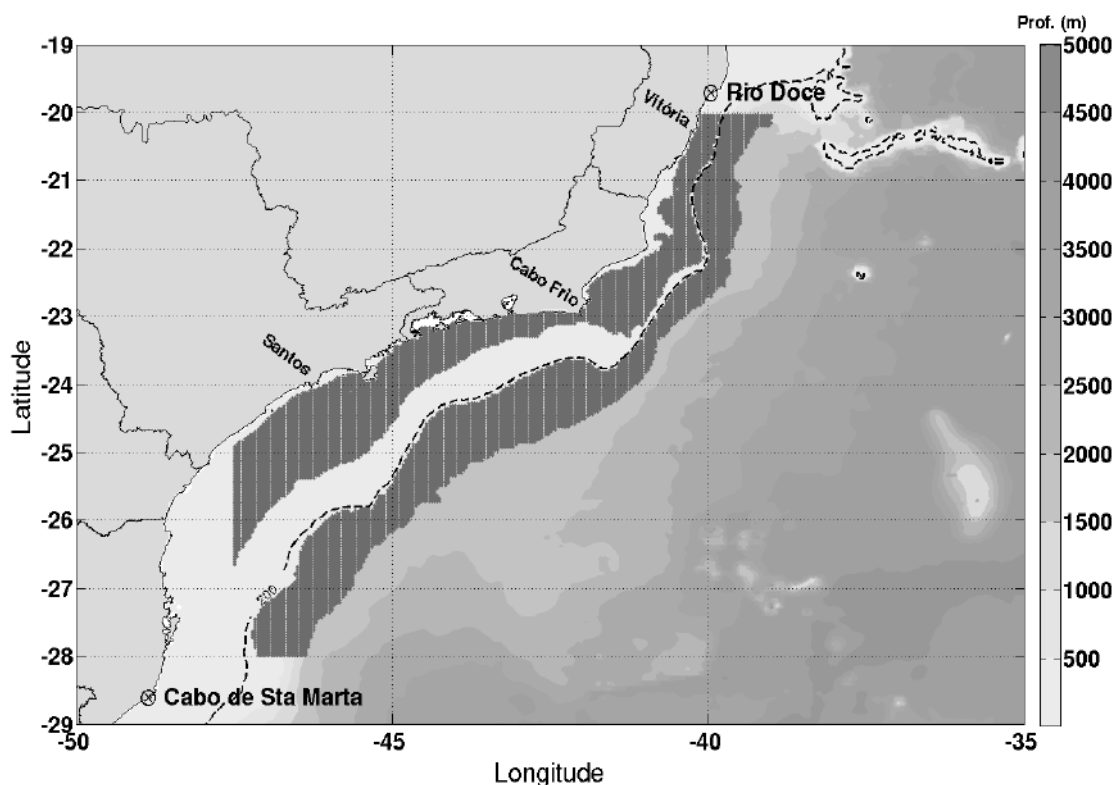


Figura 9: Áreas nas quais ocorreram lançamentos de partículas. Os lançamentos na plataforma (entre as isóbatas de 20 e 100m) e no talude (entre as isóbatas de 300 e 2000m) foram feitos em simulações distintas para os mesmos períodos e para os diferentes experimentos (EXP 1, 2 e 3).

Os resultados obtidos com os lançamentos por área foram analisados quanto ao quantitativo de partículas que cruzavam a quebra da plataforma (isóbata de 200 metros), tanto no sentido plataforma-oceano quanto o sentido contrário. Esta análise permitiu ainda analisar se havia regiões preferenciais para os cruzamentos de partículas, assim como se estes cruzamentos variariam sob o efeito de diferentes forçantes e períodos do ano. Para isso, a isóbata de 200 m dentro da área de estudo foi dividida em 17 segmentos com espaçamento de 100 km entre cada ponto (Figura 10).

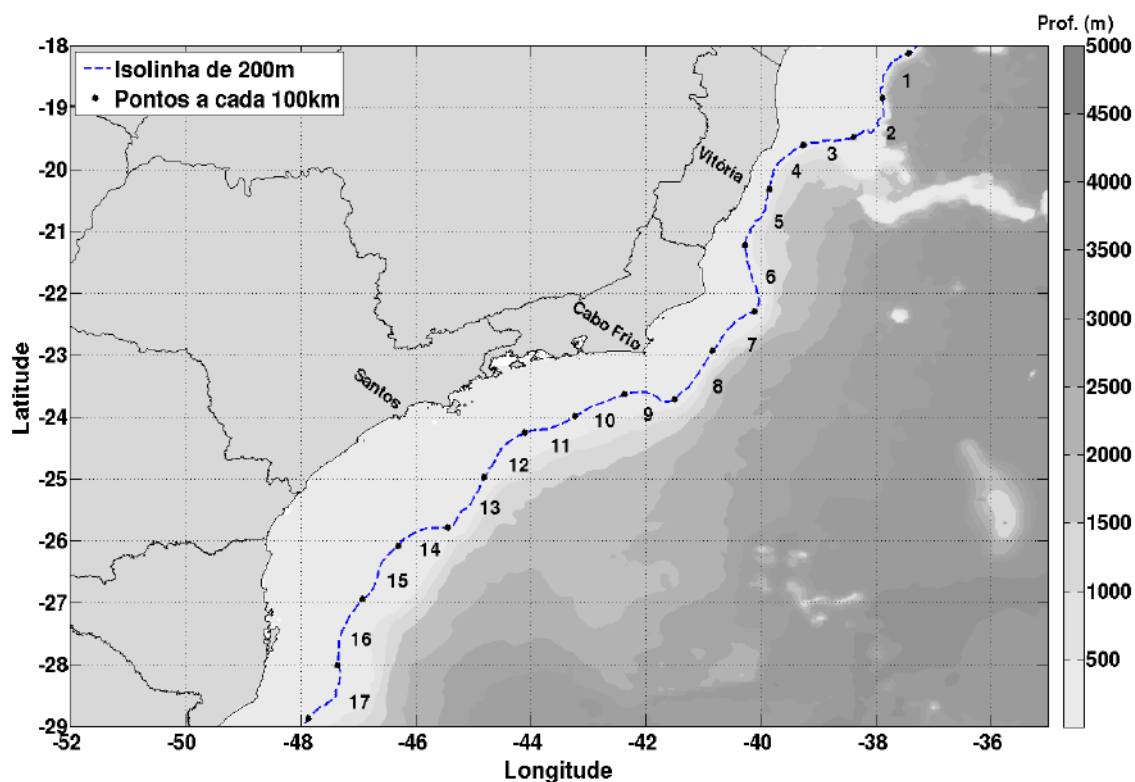


Figura 10: Pontos igualmente espaçados a cada 100 km sobre a isolinha de 200 m e segmentos numerados para avaliação dos cruzamentos de partículas entre plataforma e oceano nos lançamentos feitos por área.

Uma vez que os lançamentos na plataforma e no talude foram feitos individualmente, um lançamento na plataforma permitia que partículas cruzassem em direção ao oceano e depois retornassem para a plataforma. O mesmo era observado para os lançamentos feitos no talude. Dessa forma, foi adotado um critério objetivo para evitar cruzamentos que não representavam, de fato, fluxos em direção à plataforma ou em direção ao talude, mas sim um zigue-zague em torno da isolinha de 200 m. Este critério se baseou na resolução do modelo hidrodinâmico e na velocidade média da região da quebra da plataforma (entre 0,2 e 0,4 m/s). Com o menor valor de velocidade, as partículas percorreriam a resolução do modelo em aproximadamente 6 h. Portanto, somente cruzamentos com tempos de permanência na plataforma ou no talude superiores a 8h foram considerados.

3.4.2 Lançamento pontual de partículas

No lançamento pontual de partículas foram escolhidos pontos na área de estudo em quatro seções, sendo a seção 1 na parte mais ao norte e a seção 4 na parte mais ao sul. Em cada seção foram definidos três pontos: plataforma, quebra da plataforma/talude e região oceânica. A localização da seção 1, no sul do Espírito Santo, foi definida por esta região possuir a plataforma continental mais estreita. As seções 2 e 3 encontram-se na região de ocorrência dos vórtices de Cabo de São Tomé e Cabo Frio, respectivamente. A seção 4 foi posicionada na região com plataforma mais larga. A Figura 10 apresenta os pontos de cada seção e na Tabela 2 estão as coordenadas geográficas e as profundidades dos pontos de lançamento de partículas.

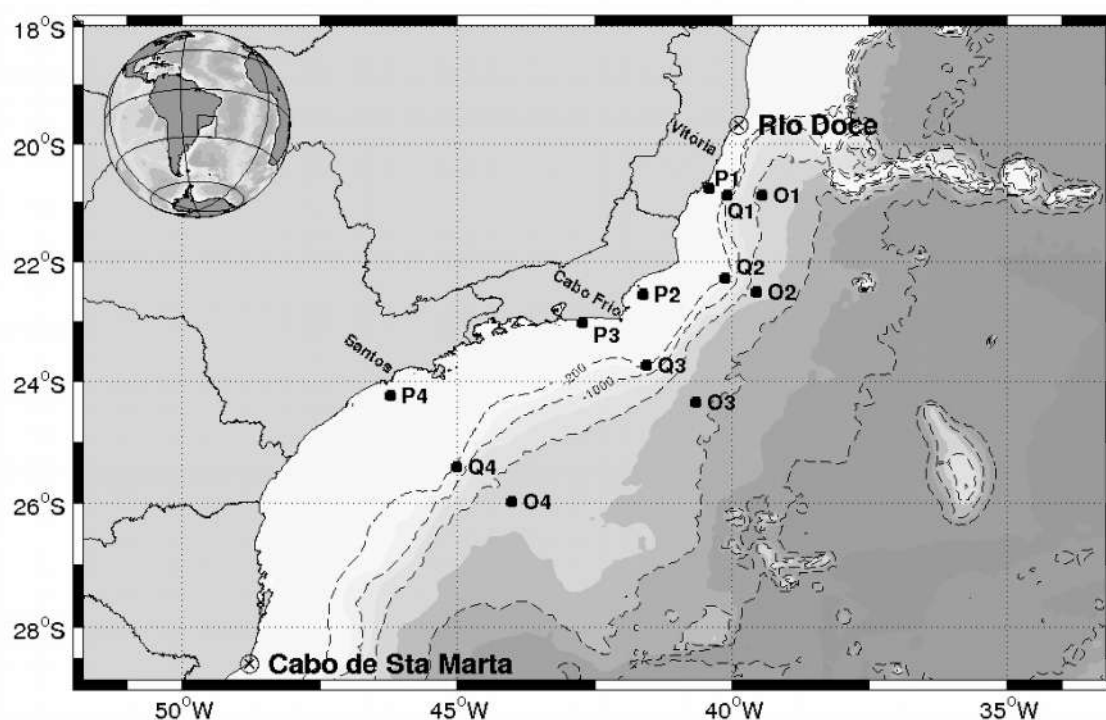


Figura 11: Pontos de lançamento de partículas com o modelo Lagramp. Os pontos foram identificados de acordo com o número da seção (1, 2, 3 e 4) e seu com o posicionamento – plataforma (P), quebra da plataforma/talude (Q) e região oceânica (O). As linhas de batimetria sem identificação representam uma evolução a cada 1000 m de profundidade.

Tabela 2 – Coordenadas geográficas e profundidades dos pontos de lançamento de partículas com o modelo Lagramp.

	Longitude	Latitude	Profundidade (m)
P1	-40,41	-20,77	24,5
P2	-41,62	-22,56	46,7
P3	-42,71	-23,02	46,6
P4	-46,20	-24,24	33,2
Q1	-40,08	-20,89	467,9
Q2	-40,12	-22,29	163,7
Q3	-41,54	-23,74	208,7
Q4	-45,00	-25,41	268,4
O1	-39,45	-20,89	2055,5
O2	-39,54	-22,52	2329,7
O3	-40,66	-24,35	2860,1
O4	-44,00	-25,98	2193,7

Os lançamentos em cada ponto foram feitos individualmente, sendo lançadas 100 partículas por dia, durante 30 dias no verão (janeiro) e no inverno (julho) de cada ano (2004-2010). Todos os lançamentos foram integrados por 60 dias. Em cada ponto, portanto, foram feitos 420 lançamentos – verão e inverno dos sete anos; esse número de simulações foi feito para cada experimento (EXP1, EXP 2 e EXP3), totalizando 1260 simulações. Para cada lançamento foi adotada uma dispersão inicial de 0,04° em torno de cada ponto, sendo este valor levemente menor que a resolução horizontal do modelo hidrodinâmico (1/24°).

A análise dos resultados dos lançamentos pontuais de partículas foi feita através de mapas de probabilidade e mapas de percentual de partículas. Para o cálculo da probabilidade, levou-se em consideração a presença de partículas ou não (1 ou 0) em todos os lançamentos de um determinado ponto. O somatório desses dados dividido pelo número total de lançamentos (210 lançamentos – 30/ano/período) forneceu a probabilidade de presença de partículas em cada célula de grade. Já para o cálculo do percentual de partículas, considerou-se o total de partículas que passava em cada célula de grade no final de cada lançamento.

Os mapas de probabilidade forneceram informações mais estratégicas, no que diz respeito à possibilidade de presença de partículas numa determinada área. Os mapas de percentual de partículas permitiram observar as trajetórias que a maior parte das

partículas adotava. Com ambos estes produtos foi possível realizar algumas comparações, principalmente entre os experimentos realizados, como também foram realizados alguns testes de sensibilidade. Para análise dos mapas de probabilidade e comparação entre os diferentes experimentos foram agrupados contornos de probabilidade específicos. Os mapas de percentual de partículas foram analisados apenas visualmente.

3.5 Testes de sensibilidade

Foram realizados dois testes de sensibilidade com o Lagramp para avaliar os experimentos realizados neste trabalho. Nos dois testes foram utilizados os resultados de probabilidade de presença de partículas, pois os resultados obtidos com os mapas de percentual de partículas não forneceram informações adequadas a estas análises. Os mapas de percentual de partículas consideraram o total de partículas lançadas e, portanto, a análise destes resultados não permitiu avaliar com clareza as diferenças observadas entre os parâmetros e processos testados.

O primeiro teste de sensibilidade foi feito para avaliar as diferenças entre possíveis valores de coeficientes de difusão turbulenta encontrados na literatura: 0, 100, 400, 700 e 1000 m²/s. Para isso, foi escolhido um dos pontos apresentados na Tabela 2, e lançadas 100 partículas por dia durante 30 dias, com período de integração de 60 dias, para todos os anos simulados – o mesmo procedimento foi realizado para os lançamentos pontuais de partículas. Nos testes de sensibilidade, contudo, não foram realizados lançamentos para os Experimentos 2 e 3 (Tabela 1). Escolheu-se apenas o Experimento 1 para a realização dessas análises, já que a ação dos ventos poderia interferir na dispersão das partículas e mascarar os efeitos da difusão. O ponto Q2 foi escolhido por ser um ponto representativo da região de percurso da Corrente do Brasil.

O coeficiente de difusão (K) foi inserido no Lagramp através da Equação 3. O valor de D se refere, portanto, ao deslocamento difusivo no transporte das partículas.

$$D = \epsilon \sqrt{K \Delta t} \quad (3)$$

Nas modelagens de transporte e dispersão de óleo no mar, é comum a utilização de equações para a inclusão dos deslocamentos associados à difusão que utilizam multiplicadores aplicados diretamente ao valor do coeficiente. No documento técnico disponibilizado pela NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration – Administração Nacional Oceânica e Atmosférica*) sobre o modelo GNOME – ferramenta gratuita de simulação ambiental para modelagem de trajetórias de poluentes no mar –, por exemplo, o coeficiente de difusão é multiplicado por 6 (ZELENKE *et al.*, 2012).

Os coeficientes de difusão, contudo, se limitam normalmente nessas modelagens a valores máximos de 100 m²/s, que variam em função do tempo de simulação. De acordo com as observações feitas por Okubo (1971), a difusão, de modo geral, aumenta com o tempo e espaço. De certa maneira, o fato de a formulação utilizada neste trabalho não aplicar nenhum multiplicador ao coeficiente de difusão aproxima os valores mínimos e máximos encontrados na literatura do valor utilizado com a equação do modelo mencionado.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 12, o efeito da difusão aumenta à medida que se aumenta o valor do coeficiente. Esse aumento, contudo, não apresentou linearidade. Os resultados para os coeficientes superiores a 100 m²/s apresentaram áreas bastante próximas, tanto para os contornos de probabilidade de 30% como para os de 70%. A maior variação nos resultados dos diferentes coeficientes foi entre os testes sem difusão e com difusão igual a 100 m²/s, em ambos os períodos testados, apesar de serem os valores testados mais próximos. Na sequência, as diferenças mais significativas foram observadas entre a utilização de coeficientes de 100 e 400 m²/s, as quais são mais evidentes e maiores no verão que no inverno, já que no inverno há maior ocorrência de ventos de diferentes direções e com maiores intensidades. Entre 400 e 1000 m²/s as diferenças são pequenas e o efeito observado da difusão aumenta com o aumento do valor do coeficiente.

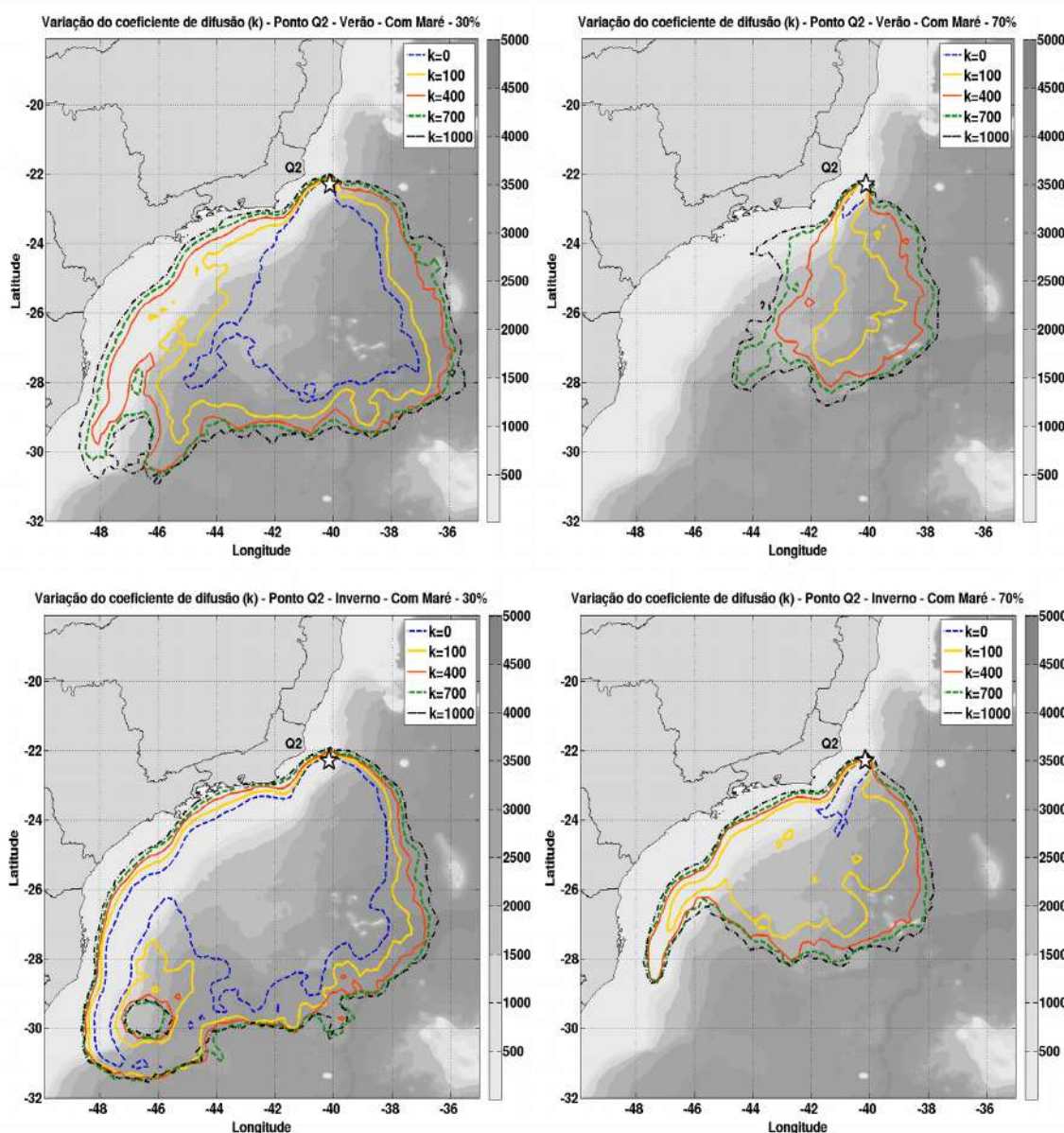


Figura 12: Contornos de probabilidade do teste de sensibilidade com variação do coeficiente de difusão (K) para o ponto Q2. Os painéis superiores apresentam resultados para o período de verão e os inferiores para o inverno – os da esquerda apresentam os contornos de 30% e os da direita de 70%. Os testes foram integrados por 60 dias.

A não utilização do coeficiente de difusão fez com que as partículas se dispersassem menos que àquelas com difusão. As menores áreas de probabilidade foram observadas com o coeficiente igual a zero, tanto no verão quanto no inverno. A variação da área entre os coeficientes foi menor à medida que os valores dos coeficientes aumentaram. Esta diferença é relativamente próxima para os coeficientes entre 400 e

1000 m²/s, principalmente no período de inverno (Figura 13).

A utilização do coeficiente de difusão igual a 400 m²/s forneceu resultados similares àqueles obtidos através da utilização dos demais coeficientes, com exceção do teste sem difusão. Como um valor intermediário dentre aqueles encontrados na literatura e dentre os resultados deste teste de sensibilidade, este valor foi escolhido para a realização dos experimentos deste trabalho.

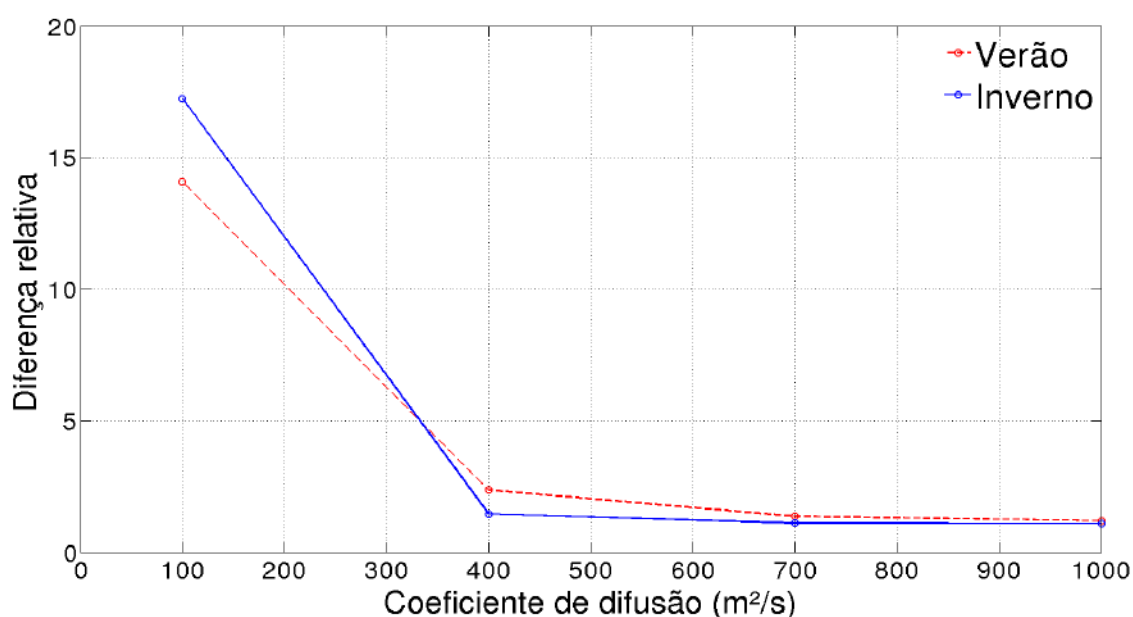


Figura 13: Diferenças relativas entre as áreas dos contornos de probabilidade de 70% dos experimentos com os coeficientes de difusão iguais a 0, 100, 400, 700 e 1000 m²/s no verão e inverno.

O segundo teste de sensibilidade foi feito para avaliar individualmente os efeitos das marés e dos ventos atuando diretamente sobre as partículas, assim como o efeito da difusão associado a estes processos. Foi escolhido o ponto P4, região com plataforma mais larga onde os efeitos das marés e dos ventos pudessem ser igualmente bem representados, e nele foi realizado o mesmo procedimento metodológico dos demais lançamentos pontuais. Neste teste, os lançamentos foram feitos com difusão (400 m²/s) e sem difusão para os três experimentos (EXP 1, 2 e 3 – expostos na Tabela 1).

A inclusão da maré não impactou significativamente a dispersão das partículas, logo, a área dos contornos de probabilidade não apresentou grande variação entre os testes com e sem maré. A área obtida no Teste 2 (sem maré e com difusão) foi 1,7% maior que a área no Teste 1 (com maré e com difusão) no período de verão e 1,3% maior no inverno. As principais diferenças observadas, quando analisados os testes com e sem maré somente, ocorreram através da inclusão da difusão, tanto no verão quanto no inverno. Nestes casos, os contornos de probabilidade para os testes com difusão apresentaram áreas até 73% maiores que os testes sem difusão, no verão, e até 88% maiores no inverno (Figura 14).

Nos testes em que foi incluída a ação dos ventos diretamente sobre as partículas, os efeitos da difusão geraram áreas próximas daquelas sem difusão no período de inverno (aproximadamente 11% maior no teste sem difusão). Mesmo sem difusão, a ação dos ventos de diferentes direções contribuiu para maior dispersão das partículas. No verão, a diferença entre os testes com e sem difusão é mais nítida, sendo que a área do teste com ventos atuando diretamente sobre as partículas e com a inclusão da difusão é 73% maior que a área do mesmo teste sem difusão.

De maneira geral, neste teste de sensibilidade o vento foi a forçante mais importante na dispersão das partículas, pois foi capaz de alterar consideravelmente as áreas dos contornos de probabilidade, no verão e no inverno, mesmo quando a difusão não foi incluída. Se a maré atua como fator de difusão, este efeito é menor que a própria difusão incluída no modelo lagrangeano. O efeito da difusão é maior que o efeito das marés, independentemente do período analisado. Logo, todos os experimentos realizados neste trabalho considerarão a inclusão da difusão.

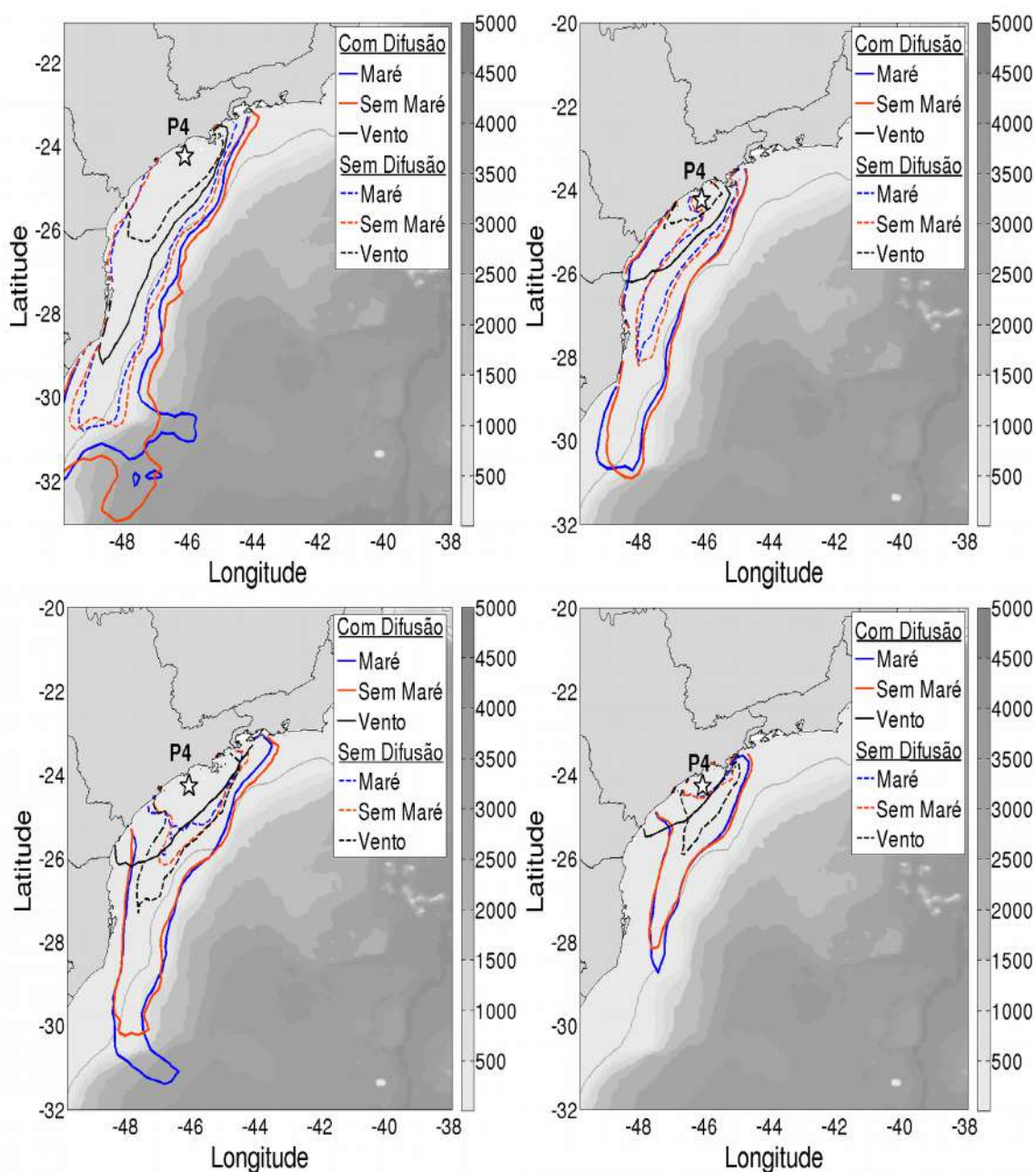


Figura 14: Contornos de probabilidade do teste de sensibilidade com e sem difusão para os Testes 1, 2 e 3 – com maré, sem maré e com maré e vento, respectivamente, no ponto P4. Os painéis superiores apresentam resultados para o período de verão e os inferiores para o inverno – os da esquerda apresentam os contornos de 30% e os da direita de 70%. Os testes foram integrados por 60 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Lançamento de partículas por área

Através do lançamento de partículas por área, associado à análise do número de cruzamentos, foi possível identificar regiões preferenciais de trocas entre a plataforma e o talude continental. As principais regiões com transporte em direção ao oceano foram as regiões de principal atividade de mesoescala da CB, como Cabo de São Tomé, Cabo Frio, Santos e Florianópolis (segmentos 7, 10, 13 e 16 – ver segmentos na Figura 10). O transporte em direção à plataforma ocorreu principalmente na região central do embaimento formado entre Cabo Frio e Cabo de Santa Marta (segmentos 11, 12, 13 e 14), em todos os experimentos.

Os lançamentos feitos durante o inverno incrementaram o transporte de partículas em direção ao oceano e em direção à plataforma em praticamente todos os segmentos e todos os experimentos. A comparação entre os Experimentos 1, 2 e 3 permitiu analisar que a ação direta dos ventos sobre as partículas, considerada apenas no EXP 3, influenciou o transporte das mesmas, já que os lançamentos feitos na plataforma tiveram uma redução no número cruzamentos em direção ao oceano e que os lançamentos feitos no talude tiveram um aumento no número de cruzamentos em direção à plataforma. Principalmente durante o verão, a ação dos ventos sobre as partículas reduziu a ação da CB na retirada de partículas da plataforma, inclusive nas regiões de intensa atividade de mesoescala. Além disso, as diferenças entre os experimentos 1 e 2 foram pequenas, evidenciando, portanto, pouca influência dos efeitos associados às marés no transporte de partículas nessa região e, consequentemente, nas interações entre plataforma e talude.

4.1.1 Experimento base (EXP 1)

No primeiro experimento (EXP 1 – Tabela 1), que considerou o efeito das marés na modelagem hidrodinâmica e sem a ação direta dos ventos na modelagem lagrangeana, os lançamentos feitos na plataforma e no talude resultaram, de modo geral, em valores

médios de cruzamentos pela isóbata de 200m maiores em direção ao oceano que em direção à plataforma (Figura 15). Este padrão é mais evidente para os resultados do período de verão, já que no inverno há regiões com fluxo maior em direção à plataforma, como a região entre o sul do estado do Rio de Janeiro e norte do Paraná (entre os segmentos 11 a 15 – ver segmentos na Figura 10). No inverno, os valores médios dos cruzamentos em direção ao oceano de quase toda a área de estudo foram maiores que no verão. Apenas o segmento 15 teve cruzamentos em direção ao oceano maiores no verão que no inverno, apesar da grande variabilidade em torno dos valores médios. Nos cruzamentos em direção à plataforma, a única região com valores médios de cruzamentos maiores no verão que no inverno foi a região mais ao sul da área de estudo (segmentos 15, 16 e 17).

Foi possível observar também um padrão entre a região desde a foz do Rio Doce até a cidade do Rio de Janeiro (entre os segmentos 4 e 9), tanto no verão como no inverno. A partir da região norte do Espírito Santo até a região do Cabo de São Tomé (segmento 4 até o 7), o número de cruzamentos em direção ao oceano aumentou. A região próxima a Cabo Frio (segmentos 8 e 9) apresentaram uma redução na sequência, porém ainda com valores significativos quando comparados aos cruzamentos em direção à plataforma, em ambos os períodos analisados. Este padrão resultou da influência do escoamento da CB, avançando sobre a plataforma estreita da parte norte da área de estudo após passar pela Cadeia Vitória-Trindade e, na sequência, ao voltar para o talude, promovendo um transporte superficial de partículas nessa direção. O transporte de partículas em direção ao oceano devido à ação da CB ocorreu principalmente para as partículas lançadas nas partes mais externas da plataforma, próximas a regiões de ocorrência de meandros e vórtices, como na região do Cabo de São Tomé (segmento 7), Cabo Frio (segmento 10) e Santos (segmento 13).

Na parte sul da área de estudo, na direção da cidade de Florianópolis (segmento 16), o número médio de cruzamentos em direção ao oceano foi superior ao de cruzamentos em direção à plataforma, tanto no verão quanto no inverno. Na análise dos resultados de correntes superficiais obtidos com o HYCOM é comum visualizar a presença de sistemas vorticais nessa região. Esse padrão da circulação, tanto em circulações ciclônicas como em anticiclônicas, promoveu a retirada de partículas da

plataforma em direção ao oceano em algumas regiões. O transporte em direção à plataforma, promovido por estes sistemas, no entanto, não foi tão evidente, pois sofreu a influência do escoamento da CB no talude, limitando a entrada de partículas.

Mesmo tendo influência mais restrita sobre as partículas lançadas nas regiões com plataforma mais larga (região do embaçamento entre os cabos Frio e de Santa Marta) ou mesmo sobre as partículas lançadas em regiões mais rasas da parte com plataforma mais estreita, a ação da CB foi a forçante mais importante para a retirada de partículas da plataforma neste experimento. O mesmo não foi observado para o transporte de partículas em direção à plataforma. Além de o número de cruzamentos em direção à plataforma ter sido menor que os em direção ao oceano, de maneira geral, foi observado que os meandramentos e vórtices da CB tiveram menor efeito em capturar partículas do talude e transportá-las em direção à plataforma. A CB funcionou muitas vezes como uma barreira física, de modo a conduzir as partículas a serem transportadas ao longo de seu eixo. O percentual médio de partículas que não cruzaram a isóbata de 200m em direção à plataforma em nenhum segmento foi de 69,3% ($\pm 7,8$) e 65,9% ($\pm 7,2$) nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O maior número de cruzamentos em direção à plataforma foi observado entre o sul do Rio de Janeiro e o norte do Paraná (entre os segmentos 11 e 15).

Neste experimento, mais de um terço das partículas lançadas na plataforma tendeu a permanecer na plataforma. Estas partículas foram gradativamente transportadas em direção à região sul da área de estudo, na parte sul do embaçamento formado entre os cabos Frio e de Santa Marta, onde permaneceram sendo influenciadas principalmente pela dinâmica da plataforma, até, por fim, saírem do embaçamento, seguindo a plataforma em direção à costa sul do Brasil ou cruzando a isóbata de 200 m em direção ao oceano (região dos segmentos 16 e 17). O percentual médio de partículas que não cruzaram a isóbata de 200 m em direção ao talude em nenhum segmento foi de 36,9% ($\pm 4,4$) e 37,8% ($\pm 3,1$) nos períodos de verão e inverno, respectivamente.

Há, de fato, regiões onde as partículas preferencialmente foram transportadas em direção ao oceano, como nas regiões do Cabo de São Tomé, Cabo Frio, Santos e Florianópolis (segmentos 7, 10, 13 e 16), ou em direção à plataforma, região entre o sul

do estado do Rio de Janeiro e o norte do Paraná (segmentos de 11 a 15). Contudo, no que diz respeito aos lançamentos feitos na plataforma, parte dos cruzamentos pela isóbata de 200 m estava associada ao transporte em direção ao talude das partículas lançadas nas áreas mais externas e que, eventualmente, cruzavam a isóbata de 200m nos dois sentidos. Estes cruzamentos não necessariamente caracterizaram uma região preferencial, mas sim o comportamento da circulação na região, influenciada também por marés e ventos locais.

4.1.2 O efeito da maré (EXP 2)

Os resultados obtidos para o segundo experimento (EXP 2), em que as marés não foram prescritas no modelo hidrodinâmico, são similares aos resultados do EXP 1. Estes resultados se assemelham quanto ao número médio de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m, bem como quanto às regiões preferenciais. A maior diferença foi observada na região da plataforma da cidade do Rio de Janeiro (segmento 10), no período de verão e para cruzamentos em direção ao oceano (Figura 16). O número médio de cruzamentos para o EXP 2 nesta região foi quase duas vezes maior que os cruzamentos no experimento com maré. Contudo, o desvio padrão nesse experimento foi mais de duas vezes maior que o experimento com maré. As demais regiões possuem uma variação pequena, o que era esperado para os lançamentos feitos tanto na plataforma e quanto no talude, uma vez que as marés na região possuem pequenas amplitudes e são caracterizadas como micromarés.

Neste experimento, o percentual médio de partículas lançadas na plataforma que não cruzaram a isóbata de 200 m em direção ao talude em nenhum segmento foi de 35,2% ($\pm 4,9$) e 39,8% ($\pm 2,8$) nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Para os lançamentos no talude, os percentuais médios de partículas que não cruzaram em direção à plataforma foram de 70,9% ($\pm 7,7$) no verão e de 68% ($\pm 7,9$) no inverno. Os valores encontrados foram muito similares, de modo a indicar novamente que as marés não exercem muita influência sobre as trocas entre talude e plataforma na área estudada.

4.1.3 A ação direta dos ventos (EXP 3)

Os resultados obtidos no terceiro experimento (EXP 3) apresentaram um padrão

bastante diferenciado dos demais experimentos (Figura 17). De modo geral, os cruzamentos em direção ao oceano foram menores que aqueles em direção à plataforma. O percentual médio de partículas lançadas na plataforma que não cruzaram a isóbata de 200 m em direção ao talude em nenhum segmento foi de 64,6% ($\pm 7,7$) e 57,3% ($\pm 7,9$) nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Para os lançamentos no talude, os percentuais médios de partículas que não cruzaram em direção à plataforma foram de 18,5% ($\pm 9,4$) no verão e de 29,4% ($\pm 9,5$) no inverno. Além disso, destaca-se que os valores médios dos cruzamentos em direção ao oceano de quase todos os segmentos foram maiores no inverno que no verão. Apenas na região de Cabo Frio o número médio de cruzamentos em direção ao oceano foi maior no verão. Os valores médios de cruzamentos em direção à plataforma foram maiores no verão apenas para os segmentos mais ao sul da área de estudo – 14, 15, 16 e 17.

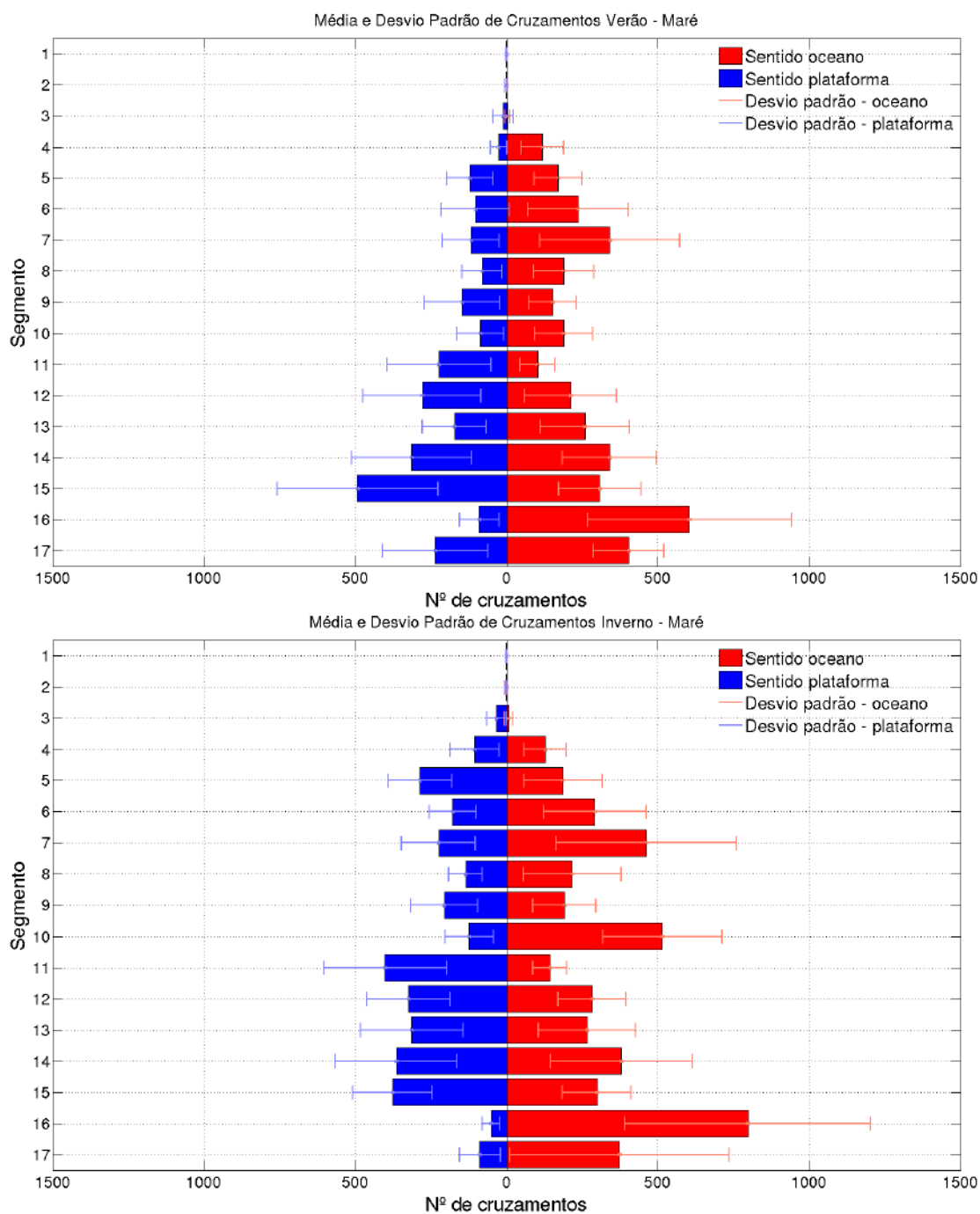


Figura 15: Média e desvio padrão do quantitativo de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para o EXP 1 por segmento – ver segmentos na Figura 10. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).

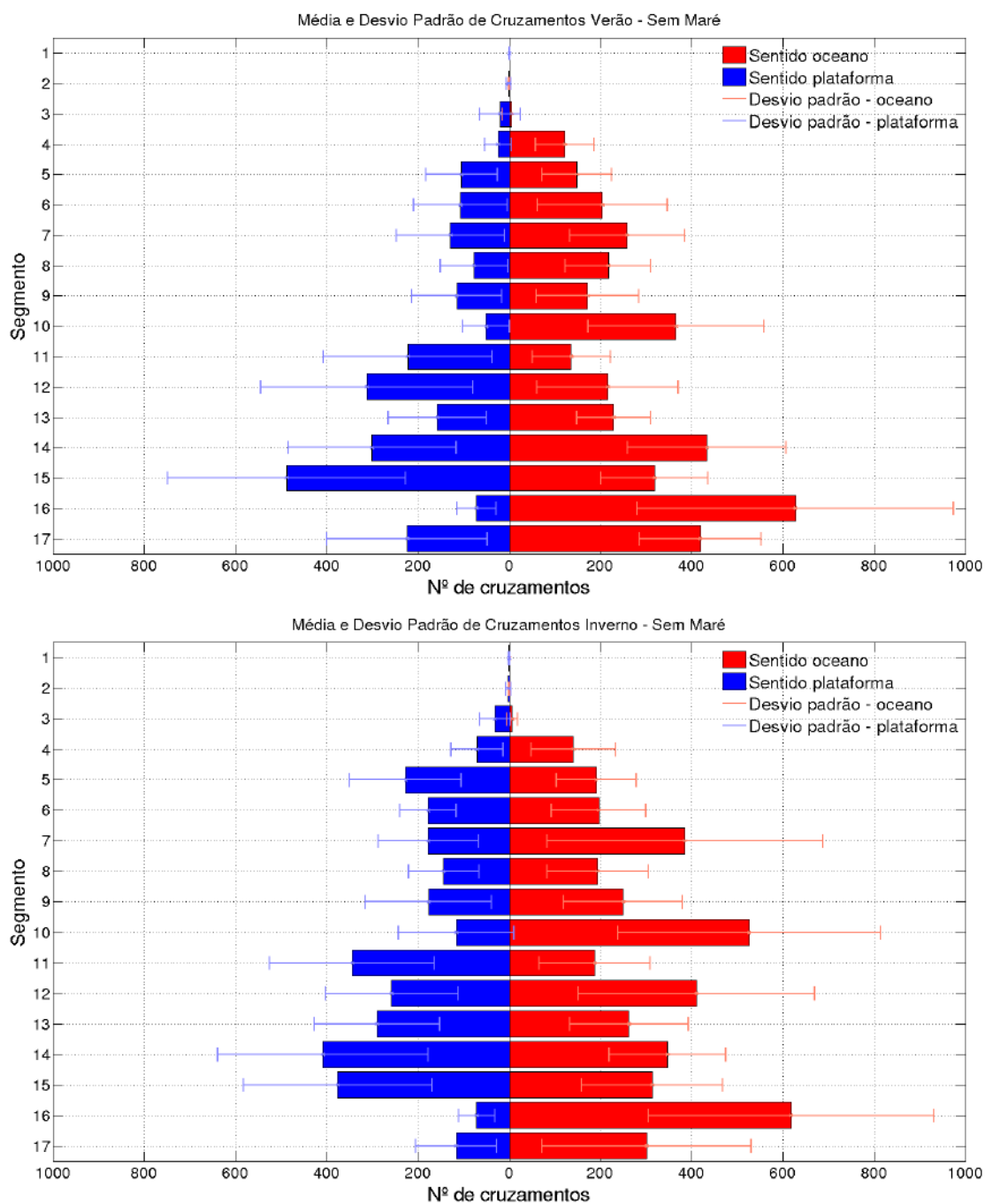


Figura 16: Média e desvio padrão do quantitativo de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para o EXP 2 por segmento – ver segmentos na Figura 10. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).

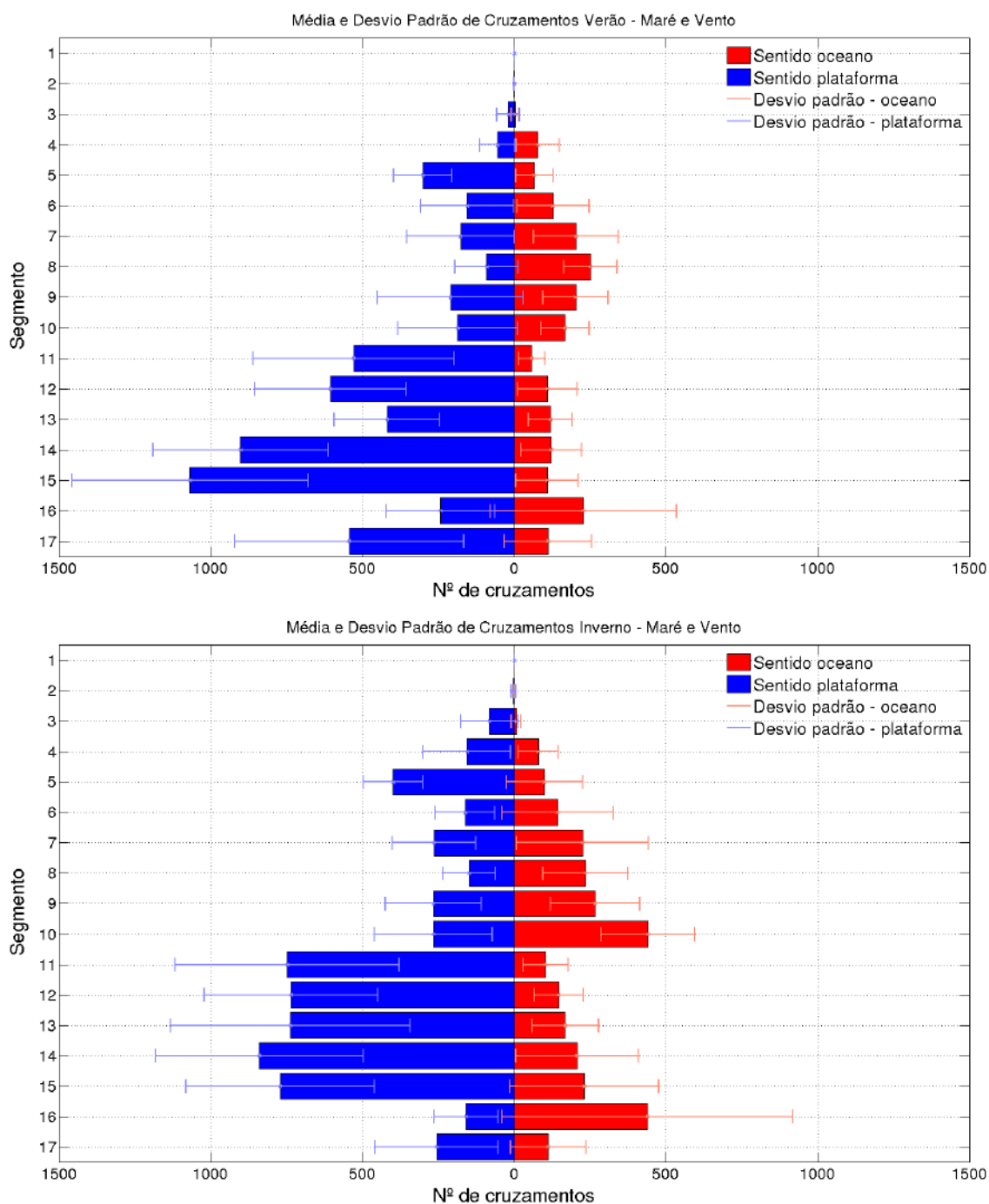


Figura 17: Média e desvio padrão do quantitativo de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para o EXP 3 por segmento – ver segmentos na Figura 10. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).

Os cruzamentos em direção ao oceano, mesmo com a ação dos ventos diretamente

sobre as partículas, apresentaram alguma similaridade com os resultados dos demais experimentos. Principalmente no período de inverno, foi possível observar cruzamentos mais expressivos nas regiões do Cabo de São Tomé, Cabo Frio e Florianópolis (segmentos 7, 10 e 16). Estes resultados indicaram que a influência da CB na retirada de partículas da plataforma em direção ao oceano ocorreu mesmo quando a advecção das partículas foi submetida também à ação dos ventos.

4.1.4 Síntese

A Figura 18 apresenta os resultados agrupados dos três experimentos (EXP 1, 2 e 3) e, a Figura 19 apresenta a diferença relativa entre os resultados do EXP 1 e os demais experimentos. Para os lançamentos feitos na plataforma, a ação dos ventos restringiu os cruzamentos em direção ao oceano, tanto no verão quanto no inverno. Dessa forma, em quase todos os segmentos, o número de cruzamentos em direção ao oceano é menor no EXP 3 que nos outros dois experimentos. As únicas exceções a este padrão observado, em que o número de cruzamentos em direção ao oceano é maior no experimento com a ação dos ventos que nos outros experimentos, ocorreram na região de Cabo Frio (segmentos 8 e 9).

Já para os lançamentos feitos no talude, a ação dos ventos favoreceu o transporte de partículas em direção à plataforma. Em toda área de estudo, tanto para o período de verão como para o período de inverno, o transporte de partículas em direção à plataforma é maior no EXP 3, com a ação direta dos ventos sobre as partículas. Além disso, destaca-se que alguns padrões se repetiram, mesmo que o número de cruzamentos tenha sido maior no EXP 3 que nos demais (em 10 dos 17 segmentos, o número médio de cruzamentos em direção à plataforma foi mais que o dobro dos cruzamentos com os EXP 1 e 2). Entre o sul do Rio de Janeiro e norte do Paraná (segmentos de 11 a 15), o que para os EXP 1 e 2 era mais evidente no inverno, pôde-se verificar com a comparação dos três experimentos que, em ambos os períodos, esta região apresentou transporte preferencial de partículas em direção à plataforma no EXP 3. Este resultado está associado aos ventos que alcançam a região mais ao sul do embaçamento formado por Cabo Frio e Cabo de Santa Marta com direções de sudeste e sudoeste.

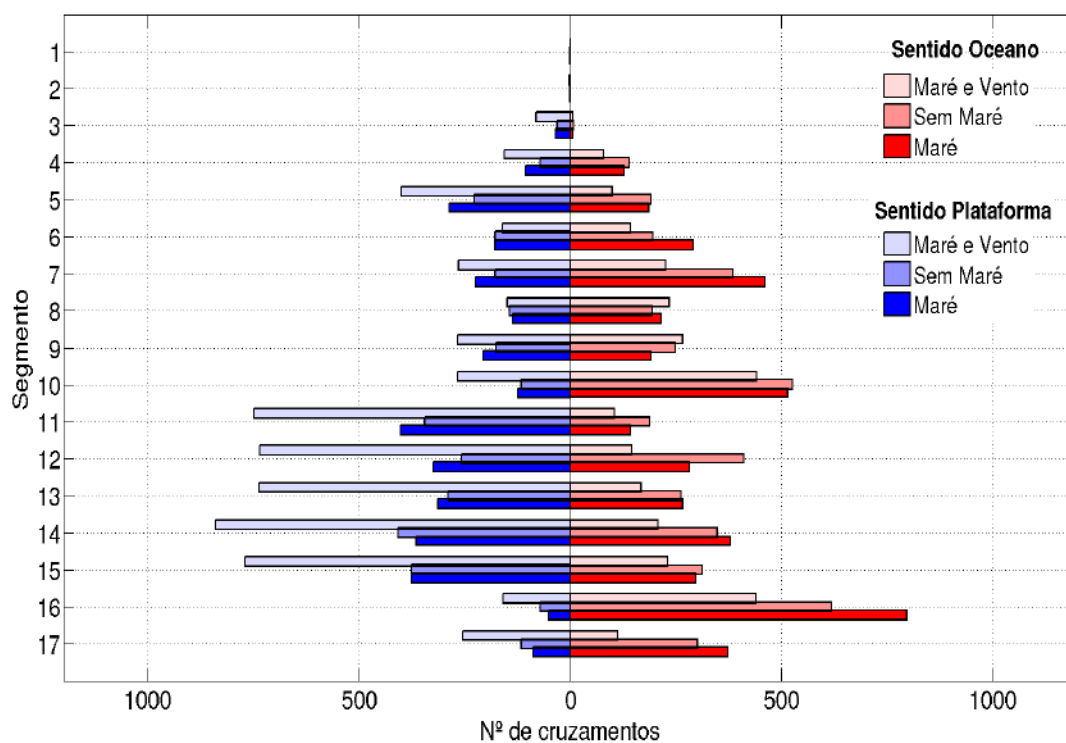
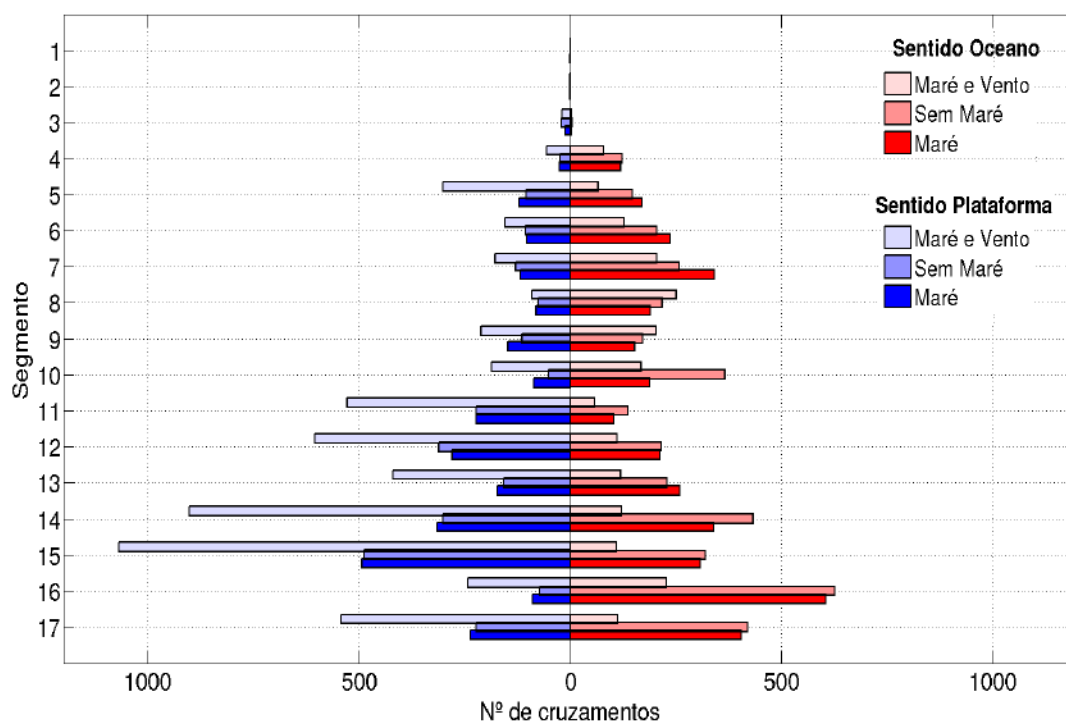


Figura 18: Número médio de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental para EXP 1, EXP 2 e EXP 3. Lançamentos feitos para os sete anos de resultados de correntes superficiais do HYCOM e para os períodos de verão (painel superior) e inverno (painel inferior).

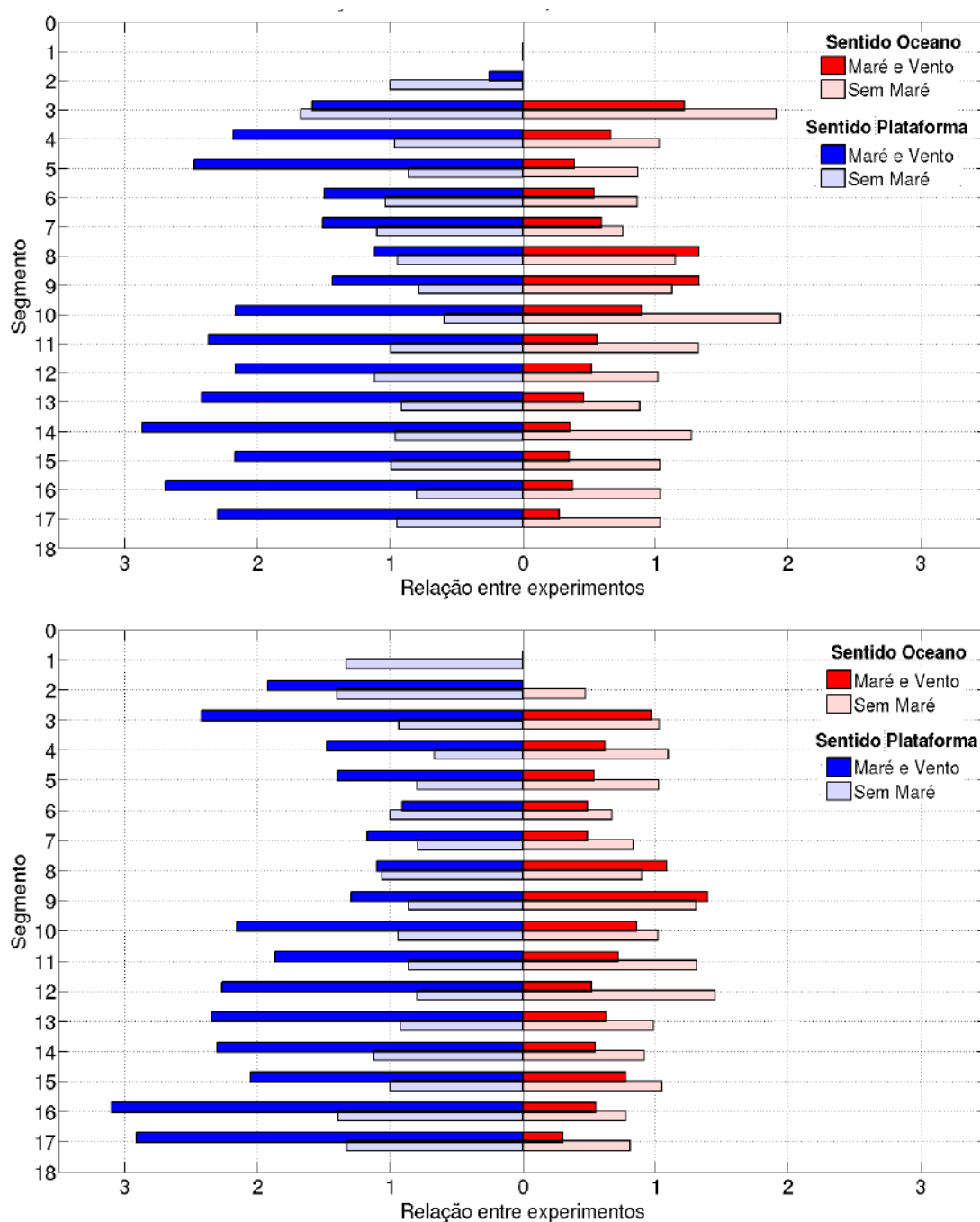


Figura 19: Relação do número médio de cruzamentos de partículas pela isóbata de 200 m para lançamentos feitos na plataforma e no talude continental no EXP 1 e nos EXP 2 e 3. O painel superior se refere ao período de verão e o inferior ao de inverno.

Os valores médios de cruzamentos em direção ao oceano para os três experimentos na parte mais ao norte da área de estudo (segmentos 1, 2 e 3) foram praticamente todos nulos, ou com desvio padrão superior à média. O mesmo se repetiu para os segmentos 1

e 2 nos cruzamentos em direção à plataforma, mas para o segmento 3 foram observados cruzamentos em direção à plataforma maiores no inverno que no verão. Neste período, os cruzamentos feitos no EXP 3 foram superiores aos demais experimentos. Pela orientação da quebra da plataforma na região norte do Espírito Santo (segmento 3), quase perpendicular à linha de costa, os cruzamentos em direção à plataforma ali podem ser explicados pela reversão do fluxo das correntes devido à circulação ciclônica já observada na região do embaçamento de Tubarão, ou pela bifurcação da CB ao encontrar o talude após escoamento pelos canais da CVT.

Destaca-se que os resultados do EXP 3, de modo geral, foram os que tiveram a maior quantidade de segmentos com desvio padrão superior à média, principalmente nas regiões com maior variabilidade de direção e intensidade dos ventos. As tabelas com os valores médios e desvios padrão dos cruzamentos de partículas em direção à plataforma e ao oceano por segmento, para os experimentos 1, 2 e 3 e para os períodos de verão e inverno foram incluídas no Apêndice 2.

4.2 Lançamento pontual de partículas

O lançamento pontual de partículas permitiu investigar a importância relativa de ventos, marés e mesoescala para os fluxos superficiais entre o talude e a plataforma continental, assim como as diferenças entre os períodos de verão e inverno.

Nos lançamentos feitos na plataforma interna, em pontos da área de estudo onde a plataforma é mais estreita (da foz do Rio Doce até Cabo Frio) – pontos P1 e P2 (pontos de lançamento na Figura 11), as partículas alcançaram a região do talude e foram transportadas para sul, principalmente sob influência do escoamento da CB. Nos experimentos sem a ação direta dos ventos sobre as partículas (EXP 1 e 2), foram observadas regiões com maior transporte em direção ao oceano, onde a atividade de mesoescala da CB é mais intensa, como em Cabo Frio e em Santos. No experimento com a ação dos ventos sobre o transporte das partículas (EXP 3), houve uma intensificação do número de partículas retidas na plataforma e, consequentemente, uma diminuição no transporte em direção ao oceano. Para as partículas lançadas na parte central e sul da área de estudo (de Cabo Frio ao Cabo de Santa Marta) – pontos P3 e P4,

onde a plataforma continental é mais larga, também houve redução do transporte em direção ao oceano associado a mesoescala. Além disso, em função da passagem de Ondas Confinadas Costeiras, as partículas lançadas na plataforma foram transportadas em ambos os sentidos. O efeito destas ondas foi observado principalmente no inverno e para os lançamentos mais ao sul na área de estudo. A importância dessas ondas foi observada também na formação de canais de comunicação entre a plataforma e o talude.

Para os lançamentos feitos na quebra da plataforma e no talude, nos três experimentos e em ambos os períodos do ano, a CB foi a forçante mais importante para os fluxos entre talude e oceano. As partículas foram conduzidas principalmente ao longo do eixo da CB na quebra da plataforma e no talude e retiradas em direção ao oceano nas regiões com intensa atividade de mesoescala. A atividade de mesoescala da CB não desempenhou papel importante no transporte em direção à plataforma, já que o escoamento da corrente funcionou como barreira física ao transporte nesse sentido. Os fluxos em direção à plataforma para partículas lançadas na quebra da plataforma ou no talude foram observados apenas no experimento com ação dos ventos sobre o transporte, na parte sul da área de estudo, basicamente onde ventos e CB tinham direções concorrentes. O efeito da sazonalidade da CB pode ser percebido nos resultados, uma vez que nos três experimentos, no período de verão, há maiores probabilidades de partículas que foram transportadas ao longo do eixo da CB e ultrapassaram a latitude de 30°S.

4.2.1 Lançamentos na plataforma interna

Os mapas de probabilidade de presença de partículas para os lançamentos feitos no litoral do Espírito Santo (ponto P1) são apresentados na Figura 20. Neste caso, a influência do escoamento da CB foi notada como a forçante mais importante. Associada à ação dos ventos de nordeste predominantes na região, a CB transportou a maior parte das partículas para sul ao longo das regiões de quebra de plataforma e talude nos três experimentos. No que diz respeito ao efeito das marés nos fluxos entre talude e plataforma, não foram observadas diferenças significativas entre os experimentos com e sem maré (EXP 1 e 2). No EXP 3, a influência da ação direta dos ventos fez com que a importância relativa da CB no transporte de partículas em direção ao oceano fosse

reduzida e que as partículas fossem mantidas principalmente na plataforma continental. Dessa maneira, foi possível observar uma advecção muito próxima nos experimentos EXP 1 e 2, mas no EXP 3 a ação dos ventos se sobrepôs à atividade de mesoescala da CB, reduzindo o número de partículas transportadas em direção ao oceano e proporcionando um maior transporte em direção à costa.

Para os lançamentos na parte norte da área de estudo, onde plataforma é mais estreita (P1 e P2), destaca-se que, no inverno, o contorno de probabilidade de presença de 80% das partículas apresentou área similar nos experimentos EXP 1, 2 e 3 (Figura 21). No verão, há um transporte maior de partículas em direção à costa no EXP 3, principalmente entre os estados de São Paulo e Santa Catarina. Este fato está associado às variações de intensidade e direção dos ventos entre verão e inverno nessa região, pois apesar de serem mais intensos no inverno, os ventos de SE são mais frequentes no verão, conforme pode ser observado nas Figuras 6 e 7. Outros destaques para estes resultados são o transporte de partículas para nordeste e sudoeste, mais evidente no inverno, e a retirada de partículas em direção ao oceano na região do vórtice de Cabo Frio e do litoral de Santos, principalmente para os experimentos com e sem maré, EXP 1 e 2.

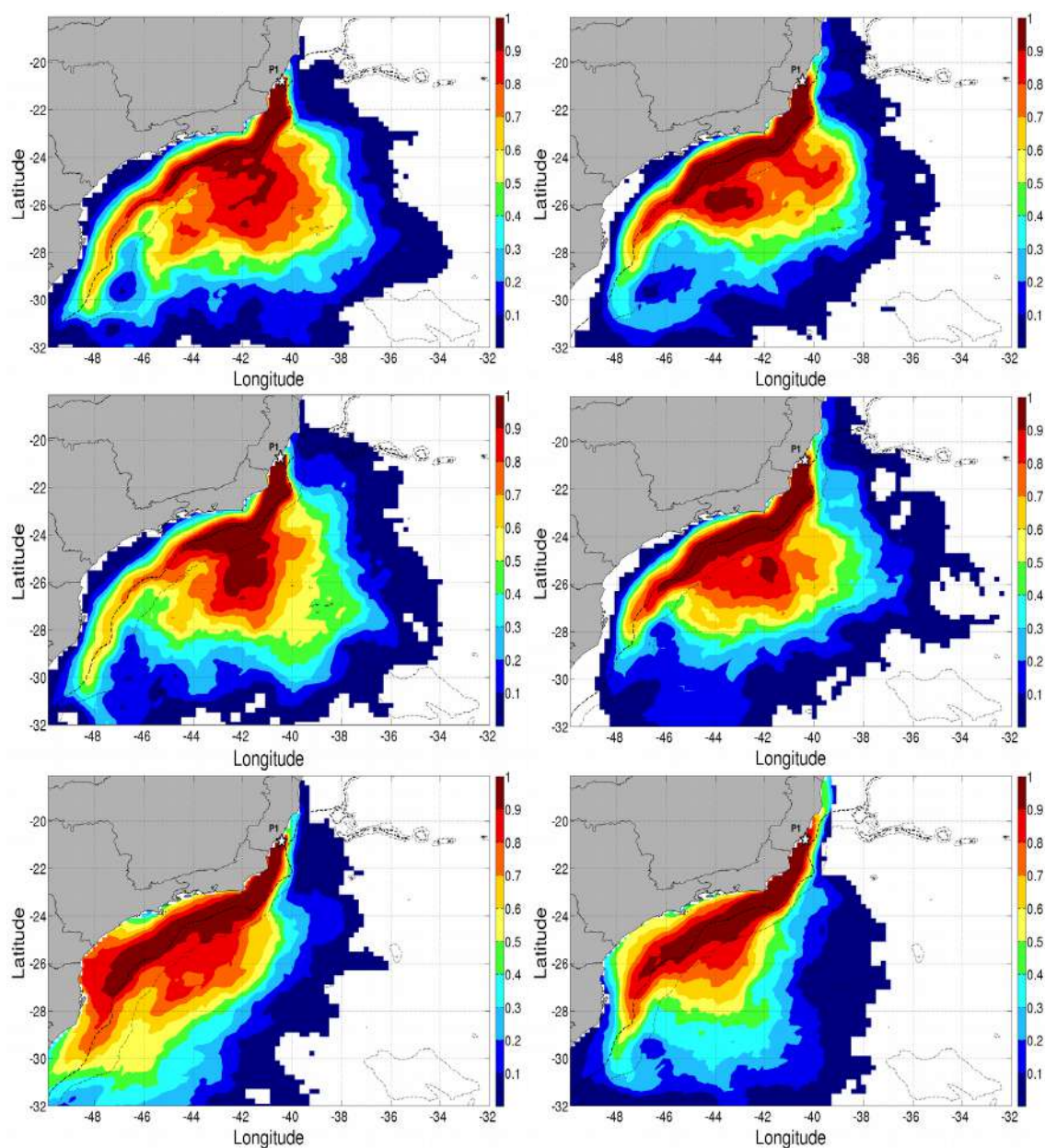


Figura 20: Mapas de probabilidade para os experimentos EXP 1, 2 e 3 – painéis superiores, intermediários e inferiores, respectivamente, no ponto P1, para os períodos de verão (painéis esquerdos) e de inverno (painéis direitos). O tempo de integração foi de 60 dias.

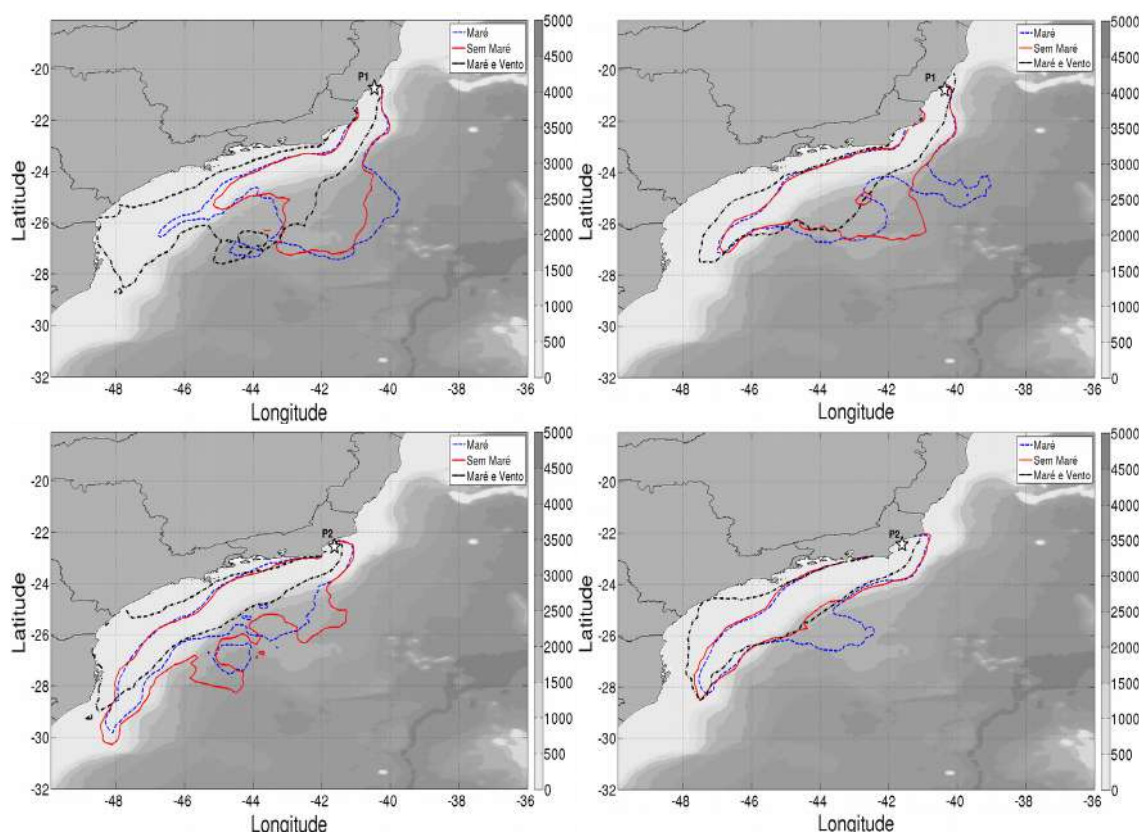


Figura 21: Contornos de probabilidade de 80% para os experimentos EXP 1 (linha azul), EXP 2 (linha vermelha) e EXP 3 (linha preta tracejada) para os pontos P1 (painéis superiores) e P2 (inferiores) e para os períodos de verão (esquerda) e inverno (direita).

Tanto no verão como no inverno, para todos os pontos lançados na plataforma, esta dominância da influência do escoamento da Corrente do Brasil na dispersão de grande parte das partículas é verificada para os experimentos EXP 1 e 2. Nos pontos P1 e P2, o transporte em direção à plataforma externa e ao talude, promovido pela CB, permitiu o transporte das partículas ao longo de seu eixo, bem como o transporte em direção ao oceano, criando canais de transporte nesse sentido. Foram feitos espectros das séries temporais de velocidade de corrente na superfície das componentes paralelas à costa, dos sete anos simulados com o modelo HYCOM (2004-2010), na plataforma interna (profundidade local até 30 m) dos pontos apresentados na Figura 22 (Espírito Santo – ES, Cabo de São Tomé – ST e Ubatuba – UB). Na Figura 23, onde esses espectros foram apresentados, pode-se observar que a influência da mesoescala (entre 30 e 90 dias) é mais importante nos pontos da área de estudo onde a plataforma é mais estreita: ES e ST. Este resultado corroborou a maior influência da CB no transporte das

partículas lançadas nos pontos P1 e P2 em direção ao oceano. Foi possível observar também nesses espectros energia associada às marés, à variabilidade diária e às OCCs. A Tabela com as profundidades locais de todos os pontos encontra-se no Apêndice 2.

Nos pontos P3 e P4, devido ao aumento na largura da plataforma e ao posicionamento desses pontos, apesar de as partículas terem sido conduzidas em direção à quebra da plataforma, as feições de mesoescala da CB tiveram impacto menor na interação entre plataforma e talude (Figura 24). Inicialmente, as partículas nesses pontos foram influenciadas pela circulação na plataforma interna, mas ao alcançarem a plataforma média e externa o escoamento da CB conduziu as partículas em direção ao talude e fez com que elas permanecessem preferencialmente ali. A influência da CB foi mais eficaz na retirada de partículas em direção ao talude desde a parte norte da área de estudo até a região da Ilha de São Sebastião. Nessa região, a CB pode invadir a plataforma e induzir o transporte para sul, desde Cabo Frio até a Ilha de São Sebastião, onde retorna para o talude.

No EXP 3, contudo, a ação dos ventos limitou a retirada de partículas da plataforma em direção ao talude pela CB, em todos os pontos da plataforma e em ambos os períodos analisados. Além disso, as partículas alcançaram a costa com mais facilidade neste experimento que nos demais, principalmente na região do embaiamento entre Cabo Frio e Cabo de Santa Marta. Novamente, a largura da plataforma e a incidência de ventos soprando em direção à costa nessa região fizeram com que as partículas fossem mais influenciadas pela dinâmica da plataforma que pela ação da CB.

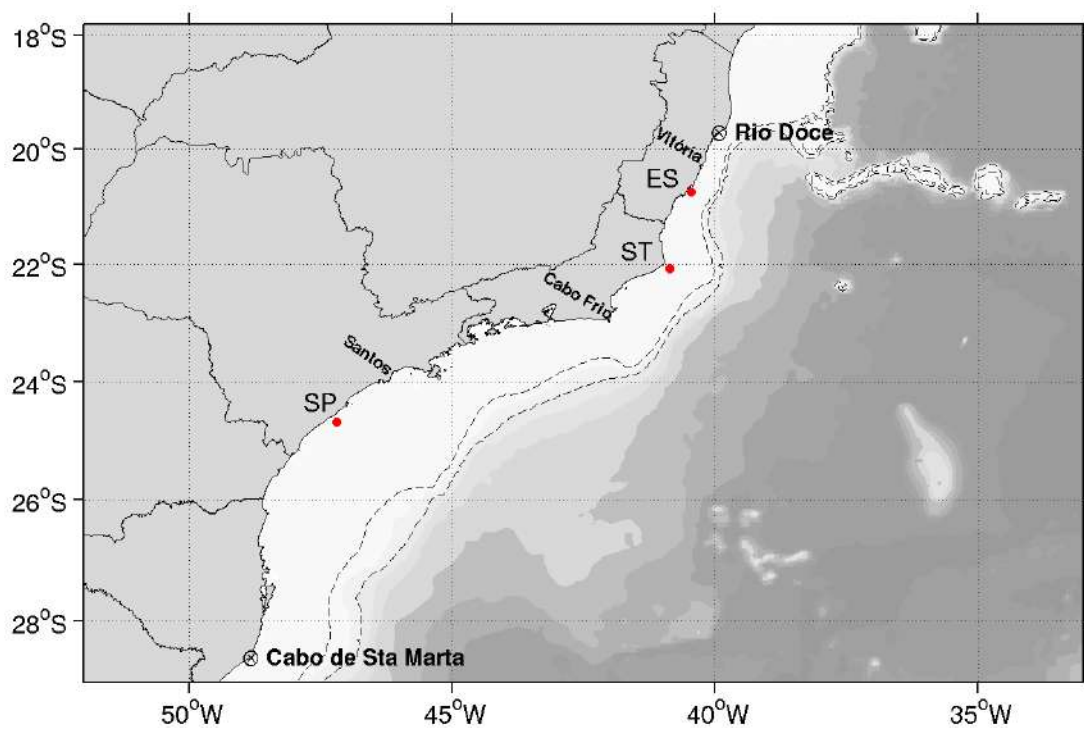


Figura 22: Localização dos pontos na plataforma interna da área de estudo. As linhas tracejadas representam as isóbatas de 200 e 1000 m.

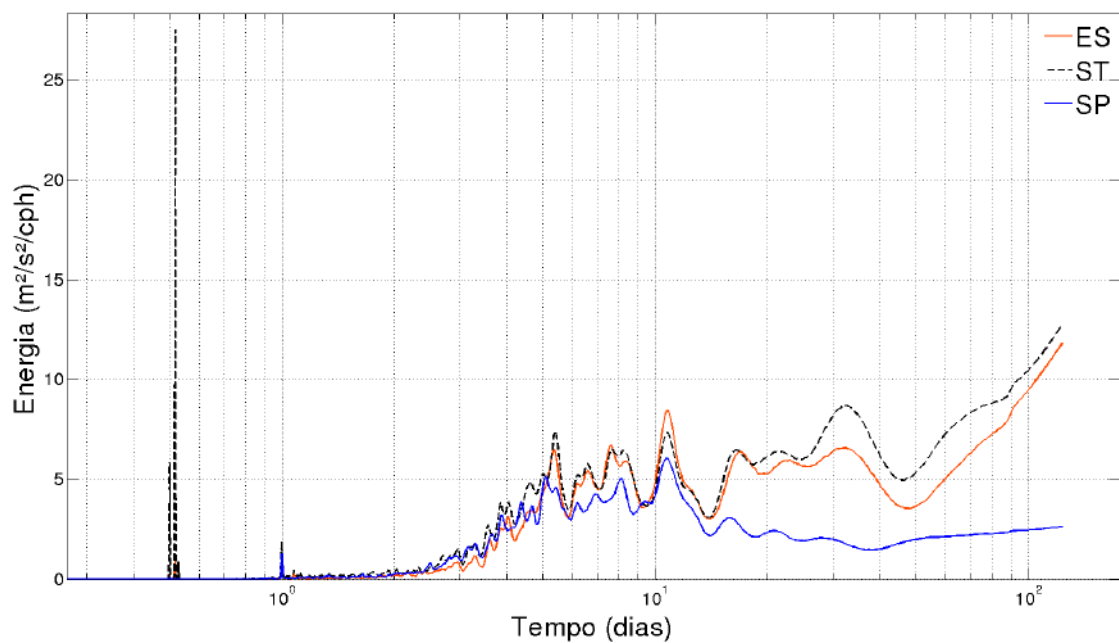


Figura 23: Espectros das séries temporais das componentes paralelas à costa de velocidade de corrente na superfície obtidas com o modelo HYCOM para diferentes pontos na plataforma interna da área de estudo.

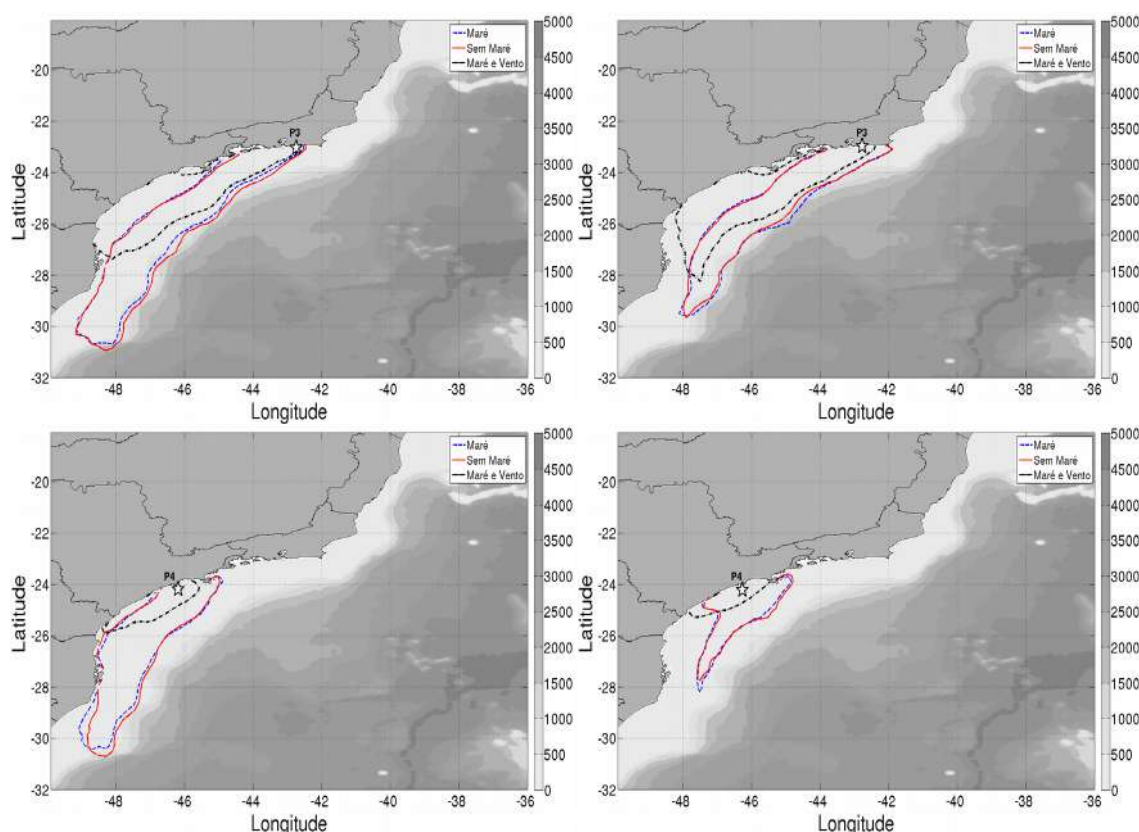


Figura 24: Contornos de probabilidade de 80% para os experimentos EXP 1 (linha azul), EXP 2 (linha vermelha) e EXP 3 (linha preta tracejada) para os pontos P3 (painéis superiores) e P4 (inferiores) e para os períodos de verão (esquerda) e inverno (direita).

Uma vez que os resultados obtidos para lançamentos por área feitos na plataforma evidenciaram um importante transporte de partículas em direção ao talude na região de Cabo Frio, foi realizada uma análise dos lançamentos pontuais na plataforma dessa região com o intuito de averiguar estes resultados. Ao acompanhar a trajetória das partículas lançadas na plataforma adjacente a Cabo Frio (Ponto P3), verificou-se que algumas partículas foram transportadas para leste em direção ao talude no período de verão (Figura 25). Este percurso, adotado por parte das partículas, atravessando a plataforma em direção ao talude, já era visível nos mapas de probabilidade e de percentual de partículas dos pontos na plataforma, em ambos os períodos do ano, mas com maiores percentuais durante o inverno. Nos mapas do ponto P3, foi possível observar também que as partículas foram transportadas para sul em direção ao talude, influenciadas pelo escoamento da CB (Figura 26).

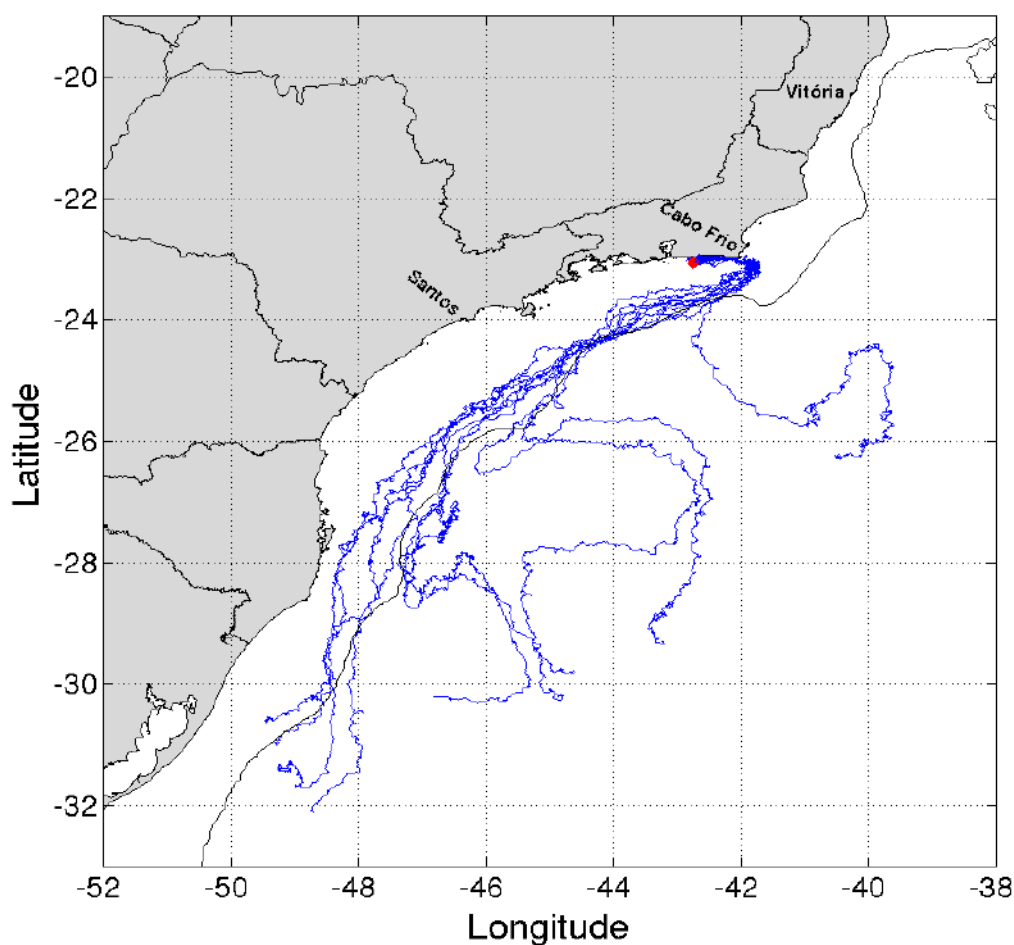


Figura 25: Trajetórias de partículas lançadas no ponto P3 – região em vermelho. As trajetórias ilustram o comportamento de parte das partículas, obtidas com o EXP 1 para o período de verão do ano de 2005. A linha preta representa a isóbata de 200 m.

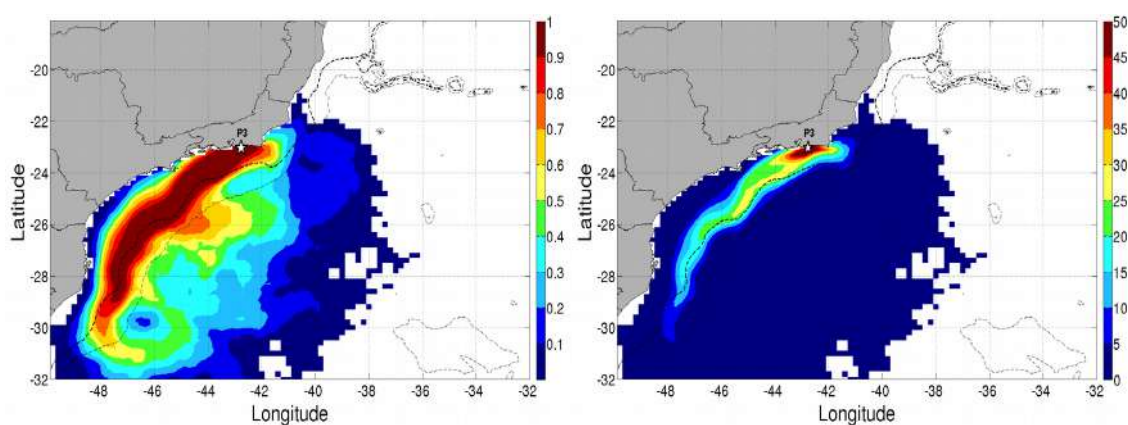


Figura 26: Mapa de probabilidade (painel esquerdo) e de percentual de partículas (painel direito) no ponto P3, EXP 1, período de inverno. O tempo de integração foi de 60 dias.

Os lançamentos na plataforma adjacente a Cabo Frio (Ponto P3) foram analisados individualmente para determinação do quantitativo de partículas que alcançaram o talude, para todos os experimentos (EXP 1, 2 e 3) e para os períodos de verão e inverno. A média para o período de inverno dos sete anos analisados com o EXP 1 resultou em 36,9% das partículas fazendo esse percurso. O ano com maior número de partículas foi o de 2007 com 2594 (86,5%) partículas das 3000 lançadas durante o mês de julho. O ano de 2008 foi o que teve menos partículas (272 – 9,1%) sendo transportadas naquele sentido. Os resultados com o EXP 1 foram os que tiveram o maior percentual médio de partículas subindo a plataforma dentre os três experimentos. No EXP 2, os valores foram, de maneira geral, próximos e o percentual médio encontrado foi de 34,1%. No EXP 3, entretanto, o percentual médio foi de 16,1%, mais de duas vezes menor que os demais, uma vez que a ação dos ventos restringiu a retirada de partículas da plataforma em direção ao talude. Para o período de verão, os máximos percentuais observados foram nos anos de 2007 para o EXP 1 (10%), 2010 para o EXP 2 (34,7%) e 2009 para o EXP 3 (2,7%).

Para avaliar a importância das OCCs nesse transporte em direção ao talude foram feitas comparações dos resultados de Altura da Superfície do Mar (ASM) com as séries temporais das componentes de velocidade paralelas e transversais à costa para o ano de 2007 no ponto P3. Após aplicação de filtro passa baixa com frequência de corte de 0,0139 (72 horas), é possível observar que a série de ASM tem correlação maior com a componente de velocidade paralela à costa que com a transversal (Figura 27). Os valores do coeficiente de correlação calculado entre as séries de ASM e componentes paralela e transversal foi de 0,72 e -0,41, respectivamente. Este resultado permitiu associar a componente de velocidade paralela à costa das correntes, que responde pela maior parte da energia nesse ponto, aos eventos de passagem das OCCs. Estas ondas movendo-se progressivamente ao longo da costa fazem com que a velocidade das correntes fique em fase com as variações do nível do mar e mudanças de orientação da linha de costa ao longo do percurso dessas ondas, como a Ilha de São Sebastião e Cabo Frio, podem, portanto, criar canais de transporte em direção ao talude.

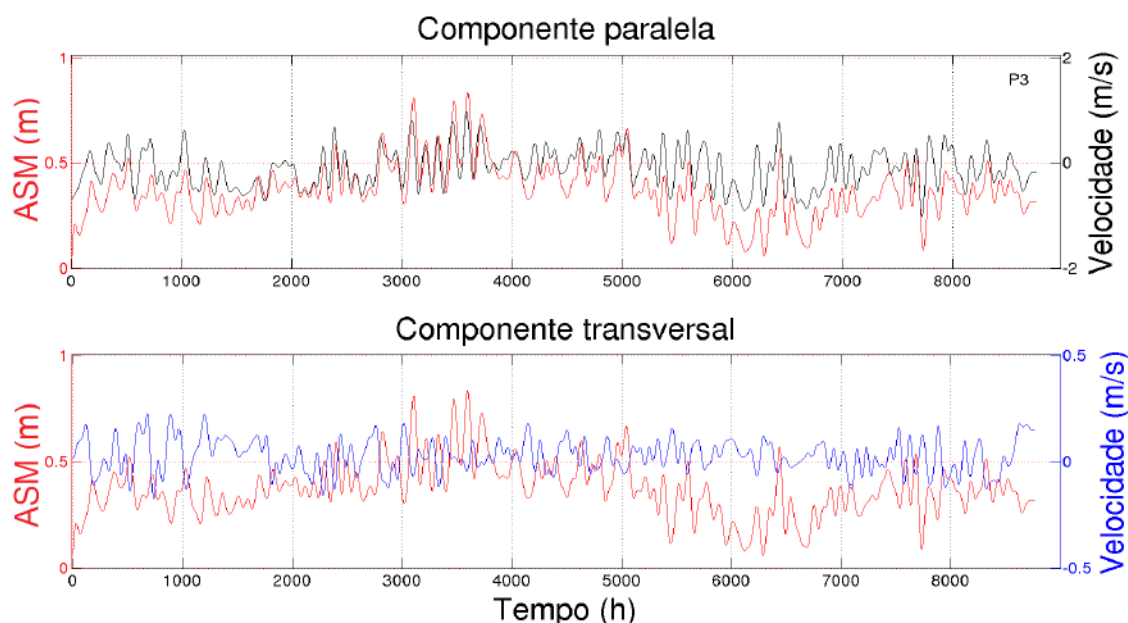


Figura 27: Comparação entre as séries temporais de Altura da Superfície do Mar (ASM) e das componentes de velocidade paralela (painel superior) e transversal à costa para o ponto P3, no ano de 2007.

Além disso, para corroborar a importância das OCCs no transporte superficial de partículas foram analisadas também as velocidades das partículas lançadas no ponto P3. A comparação da componente paralela de velocidade das partículas com a série de ASM no ponto P3 apresentou forte correlação (0,723). A Figura 28 apresenta as séries temporais de componente zonal de velocidade das 3000 partículas (100 partículas por dia) lançadas no ponto P3 no ano de 2007, a média de todas essas séries e a série temporal de ASM (subtraído de 0,35 m para facilitar a visualização). As velocidades das partículas foram submetidas a uma média móvel com janela de dois dias e seus valores foram considerados somente enquanto estas partículas permaneceram entre a costa e a isóbata de 150 m. Outro critério foi a adoção de um limite temporal, de modo que apenas são apresentados os 10 (dez) primeiros dias após o lançamento. A influência das OCCs foi observada durante praticamente toda a simulação no transporte de partículas, principalmente na região próxima ao lançamento.

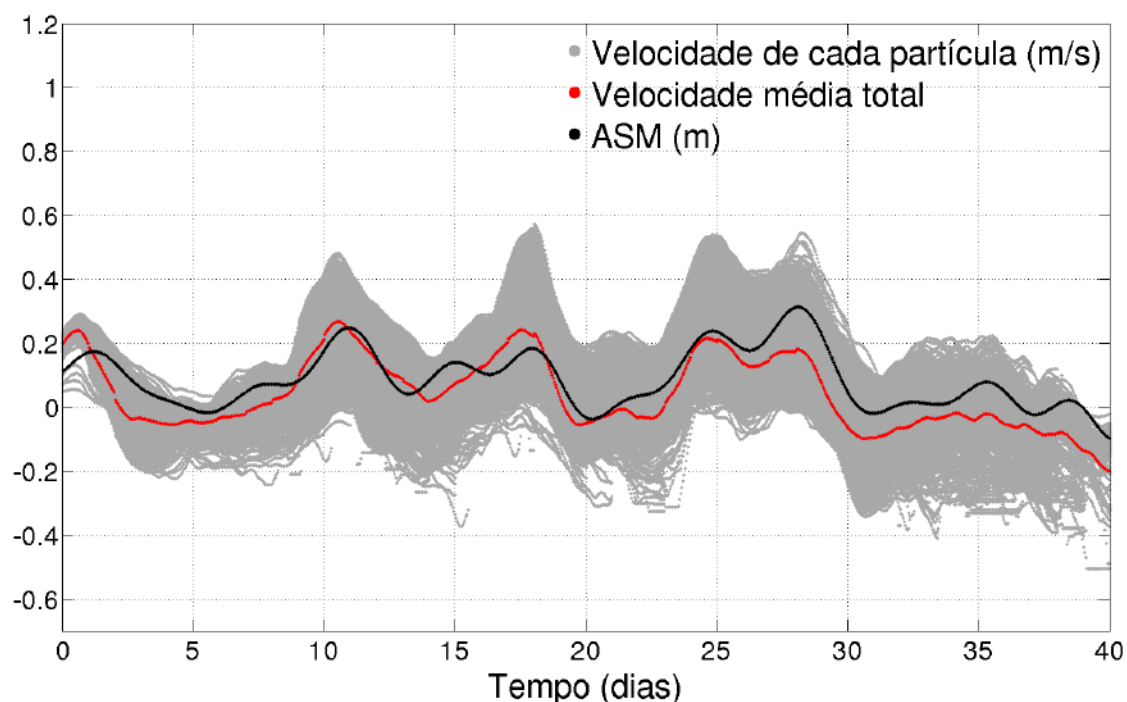


Figura 28: Comparação entre i) a série temporal de Altura da Superfície do Mar (ASM), ii) as séries temporais para os primeiros dez dias após o início do lançamento da componente paralela de velocidade de todas as partículas lançadas no ponto P3, durante o inverno do ano de 2007 e, iii) a velocidade média de todas essas partículas no EXP 1. O valor da ASM foi subtraído em 0,35 m para facilitar a visualização.

4.2.2 Lançamentos na quebra da plataforma

A partir da análise do transporte das partículas lançadas na quebra da plataforma e no talude continental para todos os pontos (Q1, Q2, Q3 e Q4 – localização dos pontos na Figura 11) e ambos os períodos do ano, observou-se que a importância relativa da CB e sua atividade de mesoescala em transportar partículas em direção ao oceano é maior nos experimentos sem a ação dos ventos na advecção das partículas (EXP 1 e 2). Nas Figuras 29 e 30, no EXP 1 – com maré, tanto no verão quanto no inverno, observa-se que em grande parte das simulações houve partículas sendo transportadas em direção ao oceano, devido ao meandramento da CB, principalmente para os lançamentos na parte norte e central da área de estudo (pontos Q1, Q2 e Q3). Em alguns destes mapas é possível observar sinais difusos do que seria a influência de sistemas vorticiais na região de Cabo Frio e de Santos. A partir deste ponto, os resultados para o EXP 2 não foram apresentados devido à similaridade com os resultados do EXP 1. Contudo, ressalta-se que todos os mapas foram incluídos no Apêndice 3.

Também nestes resultados, verificou-se nos experimentos sem a ação direta dos ventos sobre as partículas que a atividade de mesoescala da CB tende a funcionar mais exportando partículas da plataforma e do talude para o oceano que o processo contrário. Nestes casos, o escoamento da CB atuou, de fato, como uma barreira física à entrada de partículas na plataforma, fazendo as mesmas recircularem entre talude e região oceânica ao largo.

No EXP 3, com ventos atuando sobre o transporte, as partículas lançadas em todos os pontos da quebra da plataforma e do talude tenderam a seguir o escoamento da CB, mas a retirada de partículas devido às feições de mesoescala foi menos significativo. Apesar de conduzir a maior parte das partículas para sul na quebra da plataforma e no talude, o escoamento da CB não funcionou como uma barreira física ao transporte de partículas em direção à plataforma para as situações em que a direção do vento e das correntes era concorrente, como na região do embaçamento formado entre Cabo Frio e Cabo de Santa Marta. Nesta região há ocorrência de ventos que sopram em direção à costa e o transporte resultante é uma combinação entre as duas forçantes. Tanto no verão como no inverno a ação dos ventos contribuiu para que parte das partículas saíssem da região de influência direta da CB, entrassem na plataforma continental e fossem conduzidas em direção à costa com probabilidades consideráveis – acima de 50%.

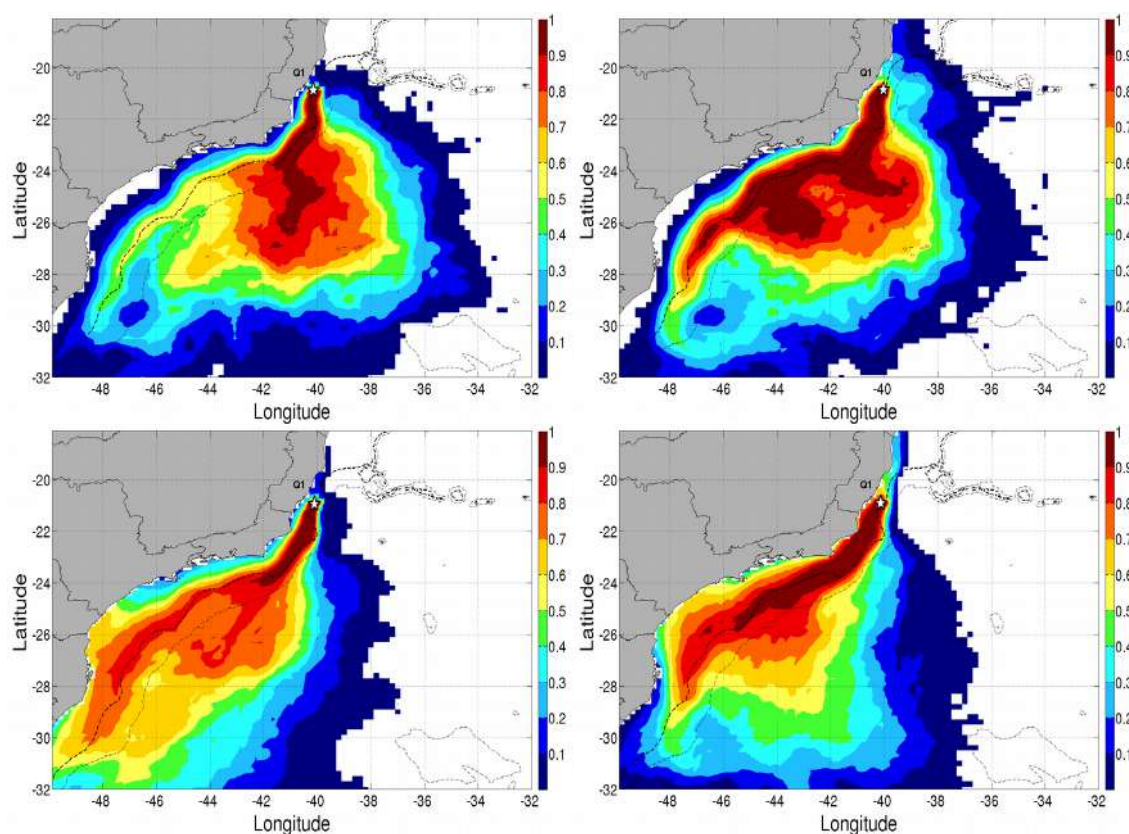


Figura 29: Mapas de probabilidade para os experimentos EXP 1 (painéis superiores) e 3 para o ponto Q1, nos períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.

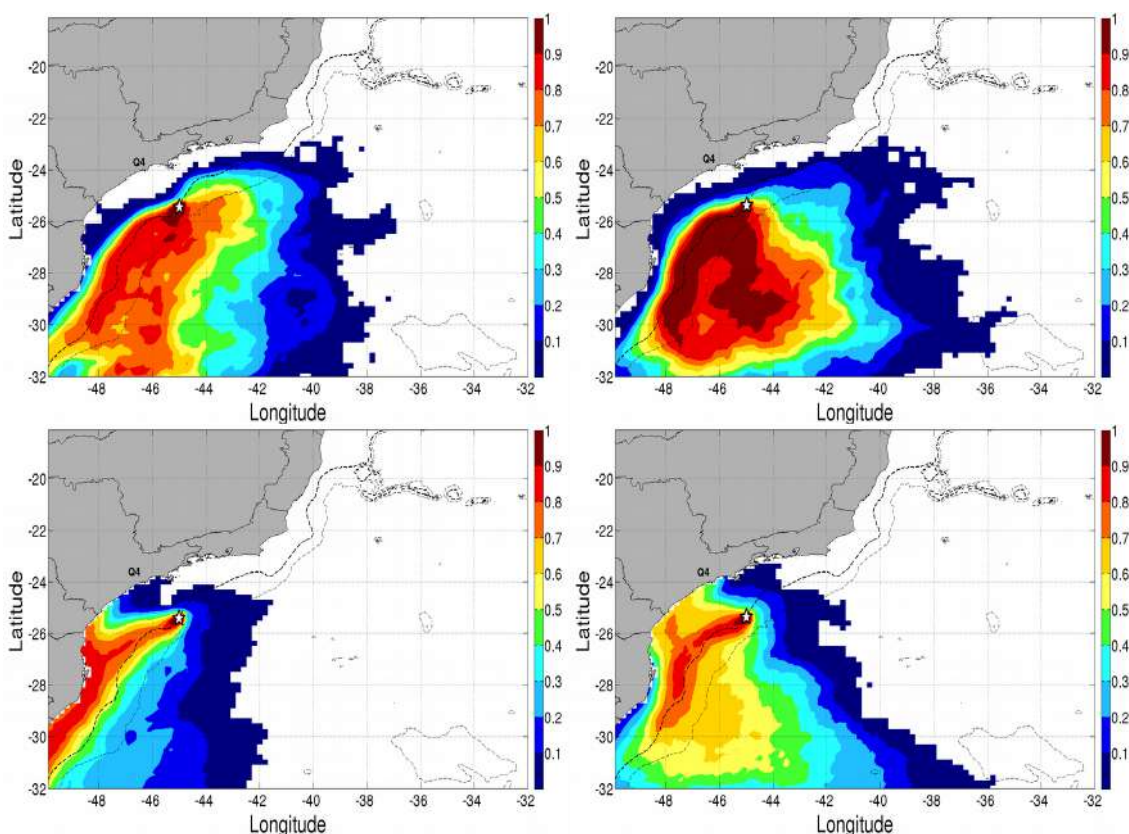


Figura 30: Mapas de probabilidade para os experimentos EXP 1 (painéis superiores) e EXP 3 para o ponto Q4, nos períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.

4.2.3 Lançamentos feitos na região oceânica

Para os pontos de lançamento localizados na região oceânica ao largo da CB (O1, O2, O3 e O4 – localização dos pontos na Figura 11), observou-se nos experimentos EXP 1 e 2 – com e sem maré, respectivamente, que as partículas foram transportadas principalmente por correntes alheias às circulações do talude e da plataforma. A influência da CB foi percebida em parte das simulações principalmente para lançamentos nos pontos O1 e O2, já que estes pontos estavam mais próximos dos limites de influência desta corrente de contorno. Destaca-se, contudo, que a maior influência da Corrente do Brasil nos pontos de lançamento no oceano foi através das feições de mesoescala, no sentido de retirar as partículas para regiões oceânicas ainda mais ao largo na área de estudo. De modo geral, para as partículas lançadas nos pontos mais oceânicos, nem as marés nem o escoamento da CB foram muito importantes para influenciar as trocas superficiais entre talude e plataforma.

Já no experimento EXP 3, a ação dos ventos sobre as partículas para os lançamentos nos pontos O1 e O2 fez com que as partículas seguissem preferencialmente o escoamento da CB em boa parte das simulações. Nestes lançamentos foram observadas partículas que foram influenciadas pela atividade de mesoescala da CB, no sentido de afastá-las da região do talude e que retornaram ao longo do período de integração, na parte mais ao sul da área de estudo, para a região do escoamento desta corrente, possivelmente por influência dos ventos, uma vez que esse retorno não foi observado nos demais experimentos. Já nos pontos O3 e O4 as partículas tenderam a ser transportadas em direção à plataforma, atravessando a região de escoamento da CB e alcançando a região costeira. As Figuras 31 e 32 apresentam os resultados dos lançamentos feitos nos pontos O2 e O4, para os experimentos EXP 1 e 3, nos períodos de verão e inverno, e exemplificam o comportamento descrito para os lançamentos feitos nessa região.

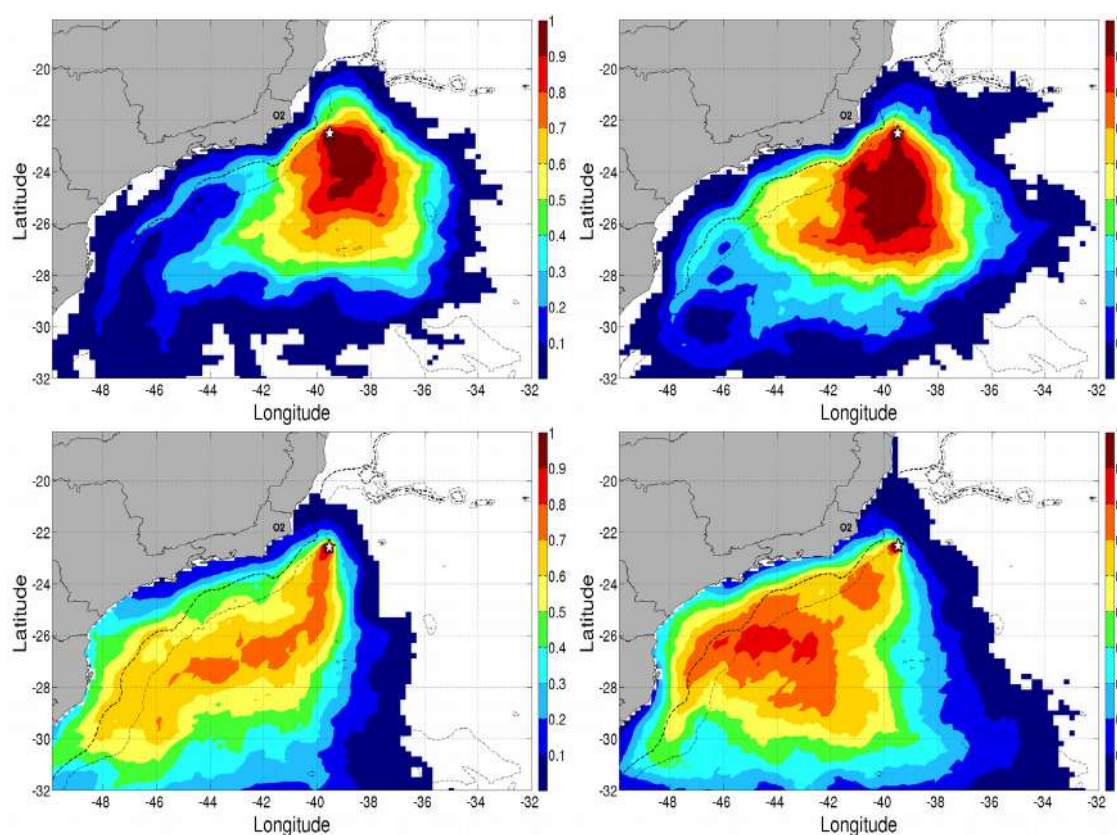


Figura 31: Mapas de probabilidade para o ponto O2, experimento EXP 1 (2 painéis superiores) e EXP 3 (2 inferiores); períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O

tempo de integração foi de 60 dias.

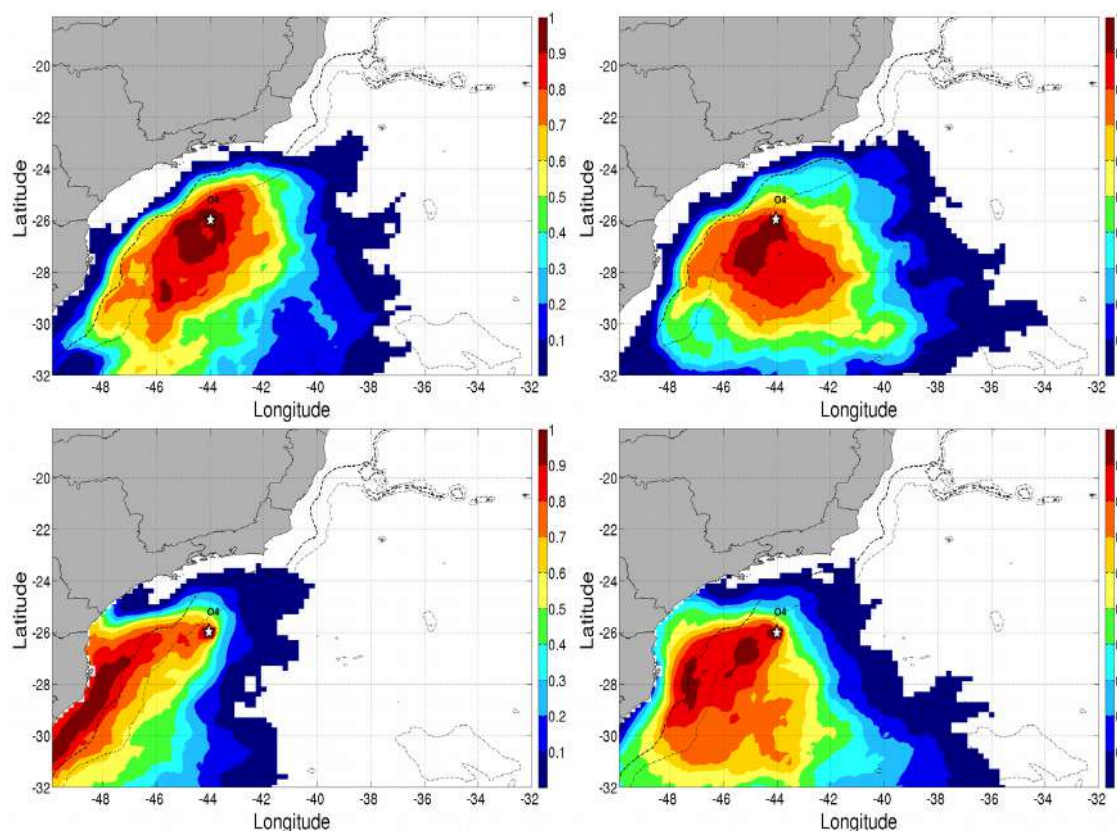


Figura 32: Mapas de probabilidade para o ponto O4, experimento EXP 1 (2 painéis superiores) e EXP 3 (2 inferiores); períodos de verão (esquerda) e inverno (direita). O tempo de integração foi de 60 dias.

4.2.4 Síntese

Considerando todos os pontos e seções de lançamento, as forçantes mais importantes para as trocas entre talude e plataforma foram os ventos e a ação de mesoescala da CB. Nas três regiões de lançamentos – plataforma, quebra de plataforma e talude e oceano, e nas quatro seções ao longo da área de estudo, os resultados do lançamento pontual de partículas mostraram que a ação dos ventos é capaz de promover e influenciar o transporte de partículas em direção à plataforma, ou ainda, de manter as partículas por mais tempo nesta província. A ação dos ventos diretamente sobre o transporte limitou, mas não impediu a exportação de partículas para o oceano, sendo a ação da mesoescala da CB sempre importante para este transporte em direção ao oceano. Os lançamentos nos pontos oceânicos mostraram que os ventos podem também

favorecer o transporte de partículas para regiões sob influência da CB.

Os experimentos EXP 1 e 2 permitiram avaliar o transporte de partículas como a própria circulação na área de estudo, apesar dos deslocamentos difusivos inseridos através do modelo lagrangeano. Dessa maneira, a influência da CB foi a forçante mais importante, sendo responsável pela retirada de partículas da plataforma em direção ao talude, principalmente em regiões onde ela era mais estreita. Uma vez no talude, as partículas foram transportadas pela CB, podendo permanecer nessa região ou ser transportadas em direção ao oceano pela atividade de mesoescala desta corrente.

A partir do EXP 3, com efeito da ação dos ventos diretamente sobre a trajetória das partículas, foi possível perceber que a combinação dos efeitos dos ventos e das correntes variou dentro da área de estudo. Para os lançamentos na plataforma mais estreita, parte mais ao norte da área de estudo, CB e ventos atuaram conjuntamente na retirada de partículas em direção ao talude. Na plataforma mais larga, parte central e sul da área de estudo, o efeito da CB foi menos intenso e a ação dos ventos tendeu a manter as partículas na plataforma. Para os lançamentos no talude, este padrão foi observado novamente. Quando os ventos e a CB tiveram direções concorrentes, o efeito combinado destas forçantes induziu a retirada de partículas do eixo da corrente, transportando-as em direção à plataforma.

5 CONCLUSÕES

Com o intuito de investigar os fluxos de propriedades e substâncias entre a plataforma e o talude continental da região SSE do Brasil, foi implementado um modelo lagrangeano de transporte de partículas (Lagrapm). Para forçar este modelo com campos de correntes superficiais foram utilizados resultados de sete anos (2004-2010) de duas modelagens numéricas oceânicas desenvolvidas pela REMO com o modelo HYCOM, com diferentes cenários de circulação. Avaliaram-se a importância das forçantes e a distribuição espacial dessas trocas, bem como as variações sazonais, sendo realizados experimentos em diferentes regiões e pontos da área de estudo e nos períodos de verão e inverno.

A inclusão da ação direta dos ventos sobre o transporte de partículas em superfície mostrou-se determinante nos fluxos entre talude e plataforma continental. Houve, neste caso, aumento no transporte em direção à plataforma, mesmo com uma barreira física imposta pela CB, e redução no transporte em direção ao oceano. Sem a ação direta dos ventos sobre as partículas, o transporte em direção ao oceano foi mais significativo que em direção à plataforma. Neste caso, o escoamento da CB foi determinante nos fluxos em direção ao oceano, criando canais de transporte nesse sentido, e em direção à plataforma, bloqueando o transporte. A ação das marés atuou como efeito de dispersão mas não impactou significativamente o transporte entre talude e plataforma continental.

As trocas superficiais em direção ao oceano ocorreram preferencialmente nas regiões do Cabo de São Tomé, de Cabo Frio, de Santos, de Florianópolis, onde há intensa atividade de mesoescala da CB. Verificou-se também que, nas regiões com plataforma estreita, a influência da CB foi mais significativa para os fluxos em direção ao oceano que naquelas com plataforma mais larga. Os fluxos em direção à plataforma foram mais expressivos nas regiões com maior variabilidade de intensidade e direção dos ventos, como na região central do embaçamento entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta (PR).

A variação sazonal foi mais perceptível na plataforma continental da parte central e

sul da plataforma SSE do Brasil, pois houve um espalhamento ao longo da costa em torno dos pontos de lançamento, mais evidentes no inverno. Nos lançamentos realizados na plataforma interna, as OCCs, mais recorrentes no inverno, tiveram papel preponderante no transporte das partículas e na criação de canais de transporte destas em direção ao talude. Além disso, em todos os experimentos e, tanto no sentido plataforma, como no sentido oceano, houve um transporte maior no inverno que no verão em praticamente toda a área de estudo. Principalmente no embaçamento formado entre Cabo frio e Cabo de Santa Marta, a maior ocorrência (verão) e maior intensidade (inverno) de ventos de sudeste nessa região proporcionou um maior transporte em direção à plataforma.

A utilização de modelagem lagrangeana, forçada com resultados de simulações hidrodinâmicas de alta resolução, mostrou-se relevante para análise dos fluxos entre plataforma continental, talude e oceano. Este trabalho possibilitou ampliar o entendimento desses fluxos e poderá, portanto, contribuir para o avanço dos estudos de modelagem e dispersão de poluentes, assim como para os objetivos do INCT PRO-OCEANO, em relação a estruturação de ecossistemas na região. Além disso, os resultados apresentados indicaram que simulações mais realistas, como a realizada nesta dissertação, são essenciais para representar de forma satisfatória a circulação na plataforma e no talude, bem como as trocas entre estas regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F. N.; CIRANO, M.; MARTA-ALMEIDA, M.; MIDDLETON, J. F.; CAMPOS, E. J. D. “The seasonal circulation of the Eastern Brazilian shelf between 10°S and 16°S: A modelling approach”. *Continental Shelf Research*, v. 65, p. 121-140, 2013.

BLECK, R. “An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates”. *Ocean Modelling*, v. 37, p. 55–88, 2002.

BOWDEN, K.F. *Physical Oceanography of Coastal Waters*. Nova Iorque, Ellis Harwood Limited, 1983, 302 p.

CALADO, L.; GANGOPADHYAY, A.; SILVEIRA, I. C. A. “A parametric model for the Brazil Current meanders and eddies off southeastern Brasil”. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. LI2602, 2006. DOI: 10.1029/2006GL026092.

CAMARGO, R.; HARARI, J. “Tides and Wind-Driven Circulation in the Tropical and Southern Atlantic Ocean: The BRAZCOAST System”. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, v. 7, n. 5, p. 476-480, 2014.

CAMPOS, E. J. D., GONÇALVES, J. E., IKEDA, Y. “Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil bight—summer of 1991”. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. c9, p. 18,537–18,550, 1995.

CAMPOS, E. J. D.; VELHOTE, D.; SILVEIRA, I. C. A. “Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders”. *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 6, p. 751–754, 2000.

CASTELAO, R. M., CAMPOS, E. J. D., MILLER, J. L. “A modeling study of coastal

upwelling driven by wind and meanders of the Brazil current”. *Journal of Coastal Research*, v. 20, n. 3, p. 662–671, 2004.

CASTRO, B. M.; LEE, T. N. “Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf”. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 16045-16056, 1995.

CASTRO FILHO, B. M.; MIRANDA, L. B. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. Coastal segment (4,W). In: Robinson, A R.; Brink, K. H. *The Sea*. Chapter 8, V. 11, Oxford, John Wiley & Sons, 1998, p.209-251.

CHANG, Y.; OEY, L.; XU, F.; LU, H.; FUJISAKI, A. “2010 oil spill: trajectory projections based on ensemble drifter analyses”. *Ocean Dynamics*, v. 61, p. 829-839, 2011.

DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. “METEOROLOGIA DA BACIA DE CAMPOS”. In: Martins, R. P.; Grossmann-Matheson, G. S. (eds), *Meteorologia e Oceanografia*, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, Brasil, Elsevier, 2015.

DOTTORI, M., CASTRO, B. M. “The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds”, *Ocean Dynamics*, v. 59, pp. 603–614, 2009.

FINGAS, M. *The basics of oil spill cleanup*. 3 ed. Boca Raton, CRC Press – Grupo Taylor & Francis, 2013.

GABIOUX, M.; COSTA, V. S.; SOUZA, J. M. A. C.; OLIVEIRA, B. F.; PAIVA, A.M. “Modeling the South Atlantic Ocean from medium to high-resolution”. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 31, n. 2, p. 229-242, 2013.

GABRIC, A. J.; PARSLow, J. “Factors affecting larval dispersion in the central Great

Barrier Reef”. In: Sammarco, P. W., Herson, M. L. (eds), *The bio-physics of marine larval dispersal*, 1 ed., chapter 8, Washington D.C., USA, American Geophysical Union, 1994.

HACKETT, B.; BREIVIK, O.; WETTRE, C. “Forecasting the drift of objects and substances in the ocean”. In: Chassignet, E. P., Verron, J. (eds), *Ocean weather forecasting: An integrated view of oceanography*, 1 ed., chapter 23, Springer, 2006.

HAMILTON, P.; SPEER, K.; SNYDER, R.; WIENDERS, N.; LEBEN, R. R. “Shelf break exchange events near the De Soto Canyon”. *Continental Shelf Research*, v. 110, p. 25 – 38, 2015.

HARARI, J.; CAMARGO, R. “Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré”. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 46, n. 2, p. 135-156, 1998.

HARARI, J.; CAMARGO, R. “Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24°S 46°W)”. *Continental Shelf Research*, v. 23, n. 16, p.1597-1613, 2003.

LENTZ, S. J.; FEWINGS, M. R. “The wind and wave-driven inner-shelf circulation”. *Annual Review of Marine Science*, v. 4, p. 317-343, 2012.

LIMA, I. D.; GARCIA, C. A. E.; MOLLER, O. O. “Ocean surface processes on the Southern Brazilian shelf: characterization and seasonal variability”. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 10, p. 1307-1317, 1996.

LIMA, J. A. M.; MARTINS, R. P.; TANAJURA, C. A. S.; PAIVA, A. M.; CIRANO, M.; CAMPOS, E. J.D.; SOARES, I. D.; FRANÇA, G. B.; OBINO, R. S.; ALVARENGA, J. B. R. “Design and implementation of the oceanographic modeling and observation

network (REMO) for operational oceanography and ocean forecasting”. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 31, p. 209–228, 2013.

MASCARENHAS, A. S.; MIRANDA, L. B.; ROCK, N. J. A study of oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. In: Costlow J. D. *Fertility of the sea*. V. 1, Nova Iorque, Gordon and Breach Science Publishers, 1971, p. 285-295.

MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; PIOLA, A. R. “The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the southwestern Atlantic shelf circulation”. *Ocean Science*, v. 6, p. 983-995, 2010.

MESQUITA, A. R. D.; HARARI, J. “On the harmonic constants of tides and tidal currents of the Southeastern Brazilian shelf”. *Continental Shelf Research*, v. 23, p. 1227–1237, 2003.

MILL, G. N.; COSTA, V. S.; LIMA, N. D.; GABIOUX, M.; GUERRA, L. A. A.; PAIVA, A. M. “Northward migration of Cape São Tomé rings, Brazil”. *Continental Shelf Research*, v. 106, p. 27-37, 2015.

MUNK, P.; CHRISTENSEN, V.; PAULSEN, H. “Studies of a larval herring (*Clupea harengus* L.) patch in the Buchan area. II. Growth, mortality and drift of larvae”. *Dana*, v. 6, p. 11-24, 1986.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>. Data de acesso: 01/04/2016.

OKUBO, A. “Oceanic diffusion diagrams”. *Deep Sea Research*, v. 18, p.789-802, 1971

PAIVA, A. M.; GABIOUX, M.; COSTA, V. S.; OLIVEIRA, B. F. 2012. Base Hidrodinâmica SSE. REMO – Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica. Relatório técnico, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de

Engenharia - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

PALMA, E. D.; MATANO, R. P. “Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight”. *Continental Shelf Research*, v. 29, p. 1525–1534, 2009.

PALMA, E. D.; MATANO, R. P.; PIOLA, A. R. “A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing”. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. C11010, 2008.

PALÓCZY, A.; SILVEIRA, I. C. A.; CASTRO, B. M.; CALADO, L. “Coastal upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil): The supporting role of deep ocean processes”. *Continental Shelf Research*, v. 89, p. 38-50, 2014.

POLOVINA, J. J.; KLEIBER, P.; KOBAYASHI, D. R. “Application of TOPEX-POSEIDON satellite altimetry to simulate transport dynamics of larvae of spiny lobster, *Panulirus marginatus*, in the Northwestern Hawaiian Islands, 1993–1996”. *Fishery Bulletin*, v. 97, n. 1, 1999.

SCHMID, C. H.; SCHAFFER, H.; PODESTA, G.; ZENK, W. “The Vitória Eddy and its relation to the Brazil Current”. *Journal Physical Oceanography*, v. 25, n. 11, 1995.

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”. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 48, n. 2, 2000.

SKARJHAMAR, J.; SVENDSEN, H. “Circulation and shelf–ocean interaction off North Norway”. *Continental Shelf Research*, v. 25, p. 1541–1560, 2005.

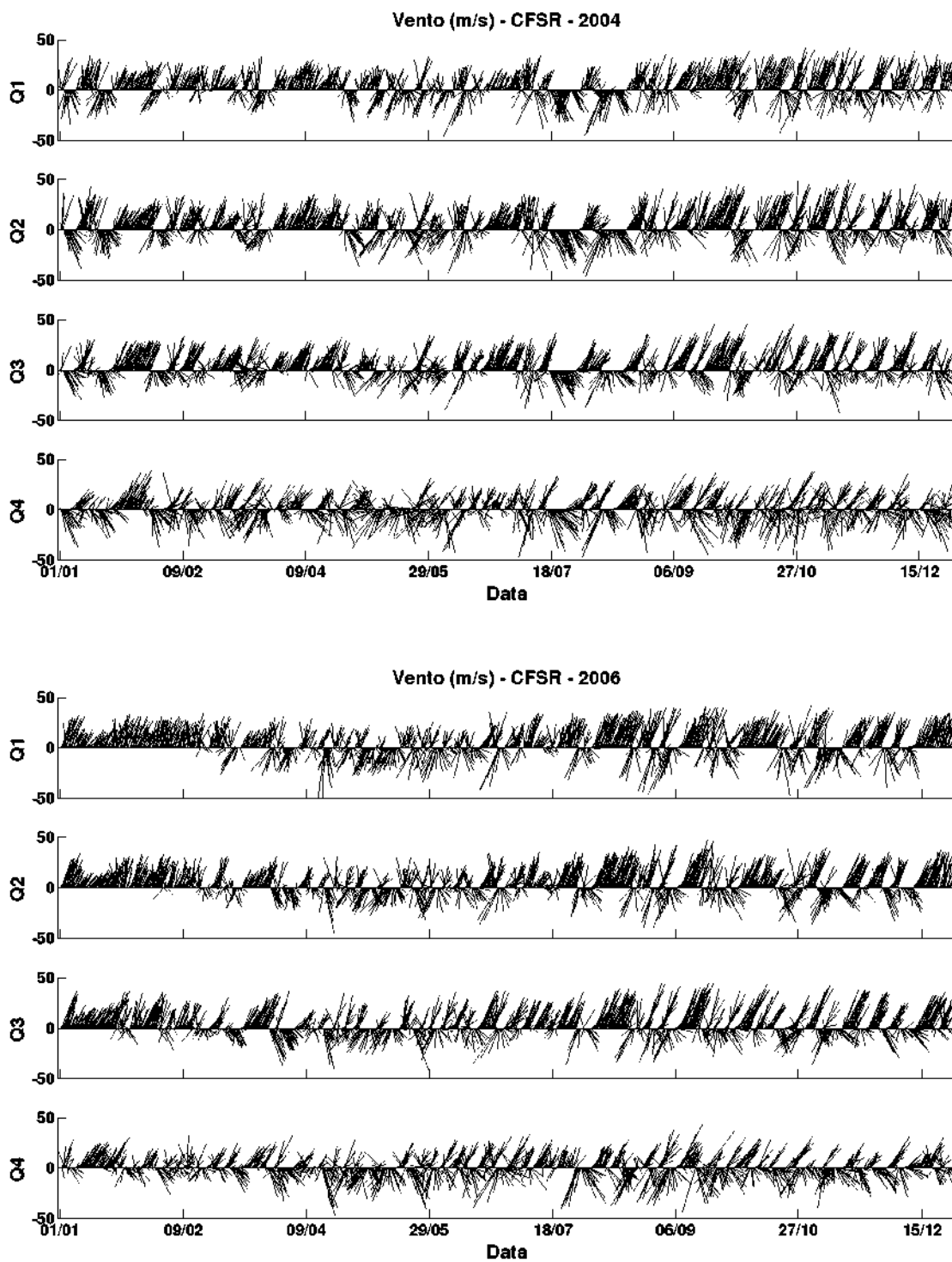
SOOMERE, T., DÖÖS, K., LEHMANN, A., MEIER, H.E.M., MURAWSKI, J., MYRBERG, K., STANEV, E. “The potential of current- and wind-driven transport for environmental management of the Baltic Sea”. *Ambio*, v. 43, 94–104, 2014.

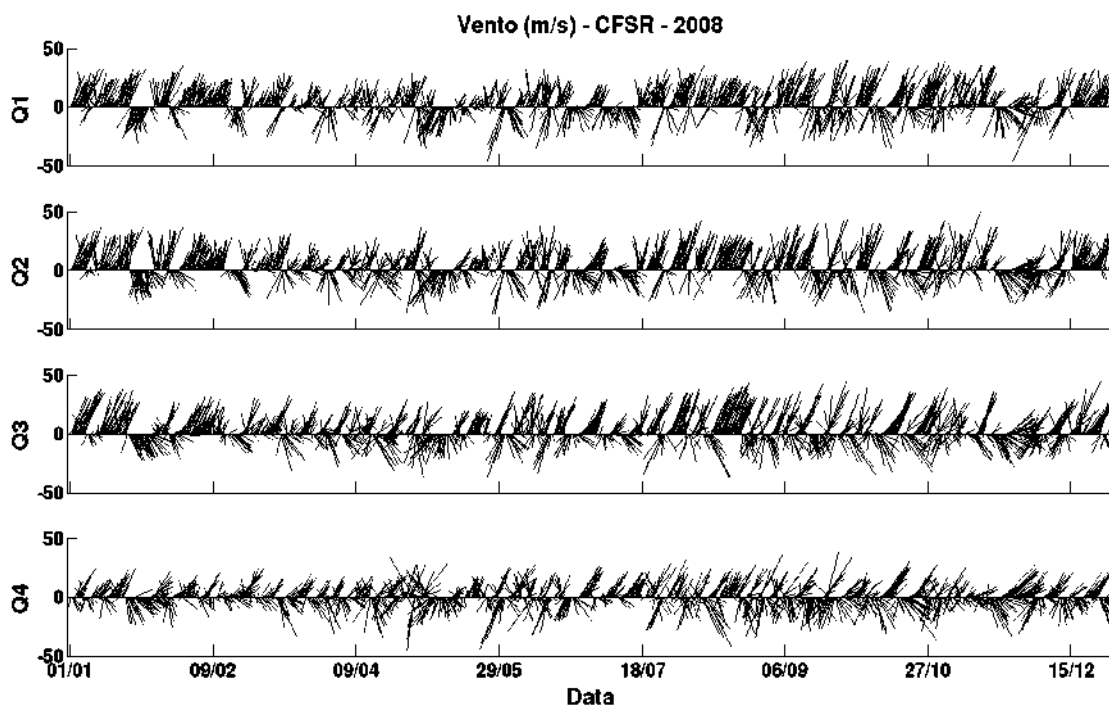
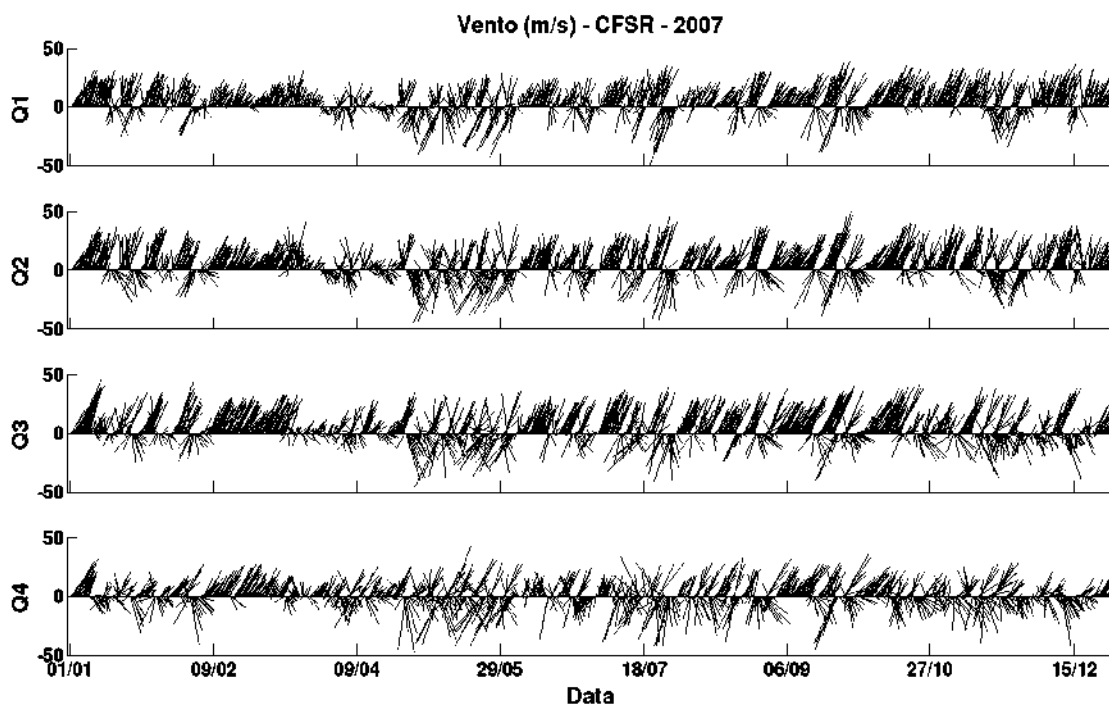
STRAMMA, L.; M. ENGLAND. "On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean". *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C9, 1999.

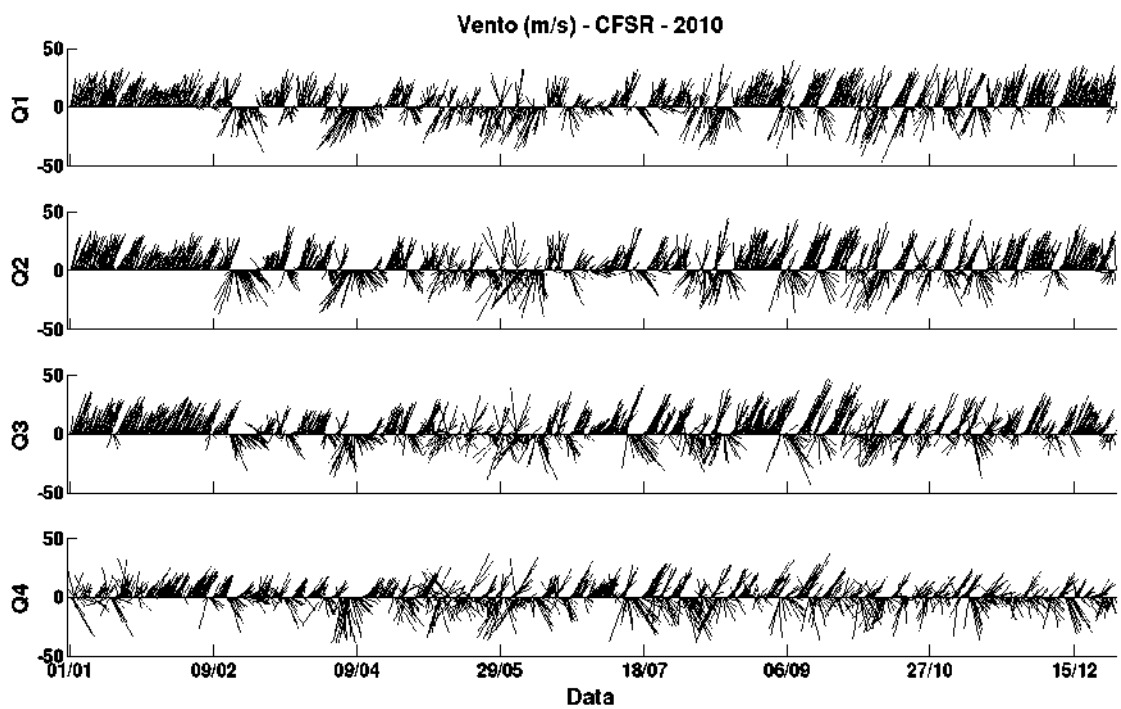
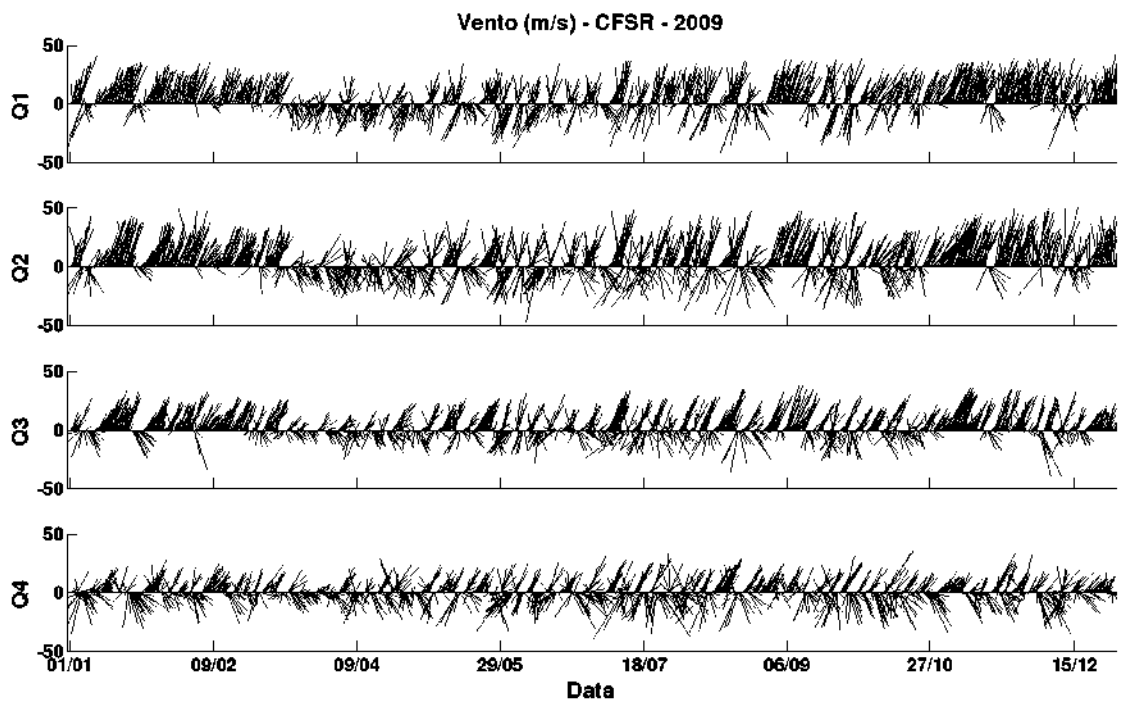
VALENTIN, J. L.; ANDRE, D. L.; JACOB, S. A. "Hydrobiology in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: two-dimensional structure and variability during a wind cycle". *Continental Shelf Research*, v. 7, n. 1, p. 77-88, 1987.

ZELENKE, B.; O'CONNOR, C.; BARKER, C.; BEEGLE-KRAUSE, C. J.; ECLIPSE, L. (eds). *General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation*. U.S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 40. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA, 2012, 105 pp. Disponível em: http://response.restoration.noaa.gov/gnome_manual. Data de acesso: 20/11/2016.

APÊNDICE 1 – *Stick plots* dos dados de vento do CFSR para os anos de 2004 a 2010. A figura para o ano de 2005 foi apresentada no corpo do trabalho.







APÊNDICE 2 – Tabelas confeccionadas durante a realização deste trabalho para facilitar a análise dos resultados

a) Número de cruzamentos e desvio padrão – Experimentos na plataforma e no talude.

Tabela 3 – Número médio (Méd.) e desvio padrão (Desv.) dos cruzamentos de partículas em direção ao oceano por segmento (Seg.), para os Experimentos 1, 2 e 3 e para os períodos de verão e inverno. As linhas vermelhas marcam os resultados em que o desvio padrão foi superior ao valor médio.

Cruzamentos em direção ao oceano												
Seg.	EXP 1 – Maré				EXP2 – Sem Maré				EXP 3 – Maré e Vento			
	Verão		Inverno		Verão		Inverno		Verão		Inverno	
	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.
1	0,0	0,0	0,3	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,9	2,3	0,1	0,4	0,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
3	2,6	7,9	6,7	13,2	5,0	20,0	6,9	11,8	3,2	12,6	6,5	15,0
4	118,7	70,3	127,6	69,9	122,3	64,1	139,9	92,5	78,6	70,9	79,3	66,6
5	170,2	78,7	186,7	129,9	148,1	76,0	191,0	87,8	66,7	61,1	100,1	127,0
6	236,5	166,1	292,0	170,8	204,1	142,3	196,2	103,8	127,7	119,2	143,5	183,2
7	341,7	231,8	462,2	299,0	258,4	125,8	385,0	302,2	203,8	140,3	225,9	218,2
8	189,0	100,9	216,4	161,4	217,2	94,2	193,9	111,8	251,4	88,1	235,3	139,8
9	152,3	77,4	191,1	103,6	171,8	112,1	249,9	130,5	202,8	107,4	266,4	146,8
10	188,0	96,2	514,9	197,2	365,7	193,1	526,0	287,8	167,9	79,7	441,8	154,2
11	102,5	57,1	143,0	56,0	135,9	85,3	187,6	121,9	57,8	42,8	103,7	73,8
12	212,5	152,4	283,0	113,0	216,2	155,1	410,7	259,2	110,4	98,0	146,4	81,0
13	258,9	147,6	266,2	161,2	229,1	81,7	262,8	129,7	119,3	72,1	168,3	109,6
14	340,3	155,8	379,4	235,3	433,6	173,6	347,4	127,7	121,3	99,9	207,2	202,3
15	308,7	135,9	298,7	114,3	318,9	117,4	313,8	154,7	108,7	103,5	231,2	245,7
16	604,4	337,3	797,2	405,5	627,5	347,4	618,0	312,5	228,6	306,3	439,4	479,6
17	403,9	116,2	373,0	361,6	419,1	133,4	301,5	229,6	112,0	144,2	112,6	124,7

Tabela 4 – Número médio (Méd.) e desvio padrão (Desv.) dos cruzamentos de partículas em direção à plataforma por segmento (Seg.), para os experimentos 1, 2 e 3 e para os períodos de verão e inverno. As linhas vermelhas marcam os resultados em que o desvio padrão foi superior ao valor médio.

Cruzamentos em direção à plataforma												
Seg.	Maré				Sem Maré				Maré e Vento			
	Verão		Inverno		Verão		Inverno		Verão		Inverno	
	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.	Méd.	Desv.
1	0,1	0,3	0,1	0,5	0,0	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,1	3,4	1,2	3,2	1,1	4,6	1,7	5,6	0,3	1,3	2,3	8,0
3	12,4	33,3	33,7	32,9	20,7	44,6	31,4	33,6	19,6	37,5	81,6	95,5
4	25,3	27,2	105,9	81,4	24,4	29,3	70,6	57,1	55,2	58,4	156,4	145,1
5	121,6	75,7	285,9	105,5	104,7	78,5	227,1	122,2	300,8	95,6	399,3	98,4
6	103,2	112,3	177,9	76,9	106,8	103,1	178,0	61,6	154,7	153,7	161,4	98,8
7	117,3	93,9	225,1	121,4	128,6	118,3	177,6	110,0	177,0	177,3	264,0	138,3
8	81,0	66,0	135,6	54,8	76,5	74,3	143,8	77,1	90,5	103,8	148,6	86,9
9	147,0	124,8	205,7	110,5	115,1	98,8	176,6	138,5	210,6	241,0	266,1	157,8
10	86,0	77,0	123,7	80,2	50,7	51,5	115,8	126,5	186,1	197,4	266,7	194,3
11	223,5	171,6	400,7	203,1	222,2	184,9	344,0	180,4	528,9	332,1	747,9	369,0
12	279,5	195,6	324,3	137,6	312,1	232,2	257,5	145,5	605,4	249,0	735,4	284,9
13	173,0	106,1	313,5	170,1	157,7	107,9	289,5	137,8	419,2	174,2	736,8	394,1
14	313,9	197,4	364,5	200,9	301,0	184,2	408,2	230,9	901,4	288,8	839,7	343,1
15	492,9	266,0	376,0	131,7	488,1	261,1	375,8	206,2	1068,4	388,3	771,0	310,5
16	90,0	66,0	51,2	28,7	72,2	43,0	71,1	39,5	242,5	178,9	158,8	104,8
17	236,1	174,3	87,7	67,2	223,6	175,8	116,2	89,1	543,6	377,6	255,3	202,5

Tabela 5 – Profundidade local (m) dos pontos em diferentes setores da plataforma (interna – PI).

	PI
ES	21,23
ST	15,64
SP	19,65

b) Quantitativo e percentual de partículas lançadas na plataforma e no talude, que permaneceram na plataforma sem cruzar a isóbata de 200 m. Os resultados dos Experimentos 1, 2 e 3 são apresentados.

Tabela 6 – Quantitativo e percentual de partículas lançadas na plataforma, que permaneceram na plataforma sem cruzar a isóbata de 200 m. Resultados para o Experimento 1, todos os anos e para os períodos de verão e inverno.

Quantitativo de partículas que não saíram da plataforma - Total lançado/dia: 4250 partículas								
EXP 1 – MARÉ	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
	Dias de lançamento – Plataforma						Média anual	
Ano	1		11		21		1,11,21	1,11,21
2004	1335	1325	1653	1943	1804	1940	1597,3	1736,0
2005	1119	1289	2039	1938	1485	2012	1547,7	1746,3
2006	1218	919	1701	1742	1535	1461	1484,7	1374,0
2007	1681	1418	1511	1782	1721	1374	1637,7	1524,7
2008	2729	1364	1449	1503	791	1857	1656,3	1574,7
2009	2690	1637	2173	1274	633	2121	1832,0	1677,3
2010	1078	1748	1591	1442	1004	1617	1224,3	1602,3
Média	1692,9	1385,7	1731,0	1660,6	1281,9	1768,9	1568,6	1605,0
Desv. Padrão	722,1	266,7	272,3	258,2	467,3	286,9	186,5	131,1
Percentual	39,8	32,6	40,7	39,1	30,2	41,6	36,9	37,8

Tabela 7 – Quantitativo e percentual de partículas lançadas no talude, que permaneceram no talude sem cruzar a isóbata de 200 m. Resultados para o Experimento 1, todos os anos e para os períodos de verão e inverno.

Quantitativo de partículas que não saíram do talude - Total lançado/dia: 4905 partículas								
EXP 1 – MARÉ	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
	Dias de lançamento – Plataforma						Média anual	
Ano	1		11		21		1,11,21	1,11,21
2004	2795	2875	3821	3554	1831	3539	2815,7	3322,7
2005	2758	2203	3520	3050	3585	3008	3287,7	2753,7
2006	3840	2354	3628	3539	4238	2736	3902,0	2876,3
2007	3506	2544	2986	3231	3007	3239	3166,3	3004,7
2008	2615	3305	3098	3588	4042	3693	3251,7	3528,7
2009	2417	3576	3961	3942	4196	3368	3524,7	3628,7
2010	3952	3678	3460	3566	4093	3314	3835,0	3519,3
Média	3126,1	2933,6	3496,3	3495,7	3570,3	3271,0	3397,6	3233,4
Desv. Padrão	625,2	595,8	355,8	284,8	882,8	320,8	384,6	351,9
Percentual	63,7	59,8	71,3	71,3	72,8	66,7	69,3	65,9

Tabela 8 – Quantitativo e percentual de partículas lançadas na plataforma, que permaneceram na plataforma sem cruzar a isóbata de 200 m. Resultados para o Experimento 2, todos os anos e para os períodos de verão e inverno.

Quantitativo de partículas que não saíram da plataforma - Total lançado/dia: 4250 partículas								
EXP 2 – SEM	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
MARÉ	Dias de lançamento – Plataforma						Média anual	
Ano	1		11		21		1,11,21	1,11,21
2004	1223	1553	1411	1919	1651	1973	1428,3	1815,0
2005	1056	1470	1915	1617	1398	1955	1456,3	1680,7
2006	1118	1149	1840	1753	1489	1474	1482,3	1458,7
2007	1838	1460	1435	1904	1658	1548	1643,7	1637,3
2008	2656	1482	1442	1586	638	2184	1578,7	1750,7
2009	2632	1594	2058	1496	617	2298	1769,0	1796,0
2010	874	1791	1539	1558	919	1746	1110,7	1698,3
Média	1628,1	1499,9	1662,9	1690,4	1195,7	1882,6	1495,6	1691,0
Desv. Padrão	755,9	192,5	267,9	170,0	460,2	309,4	207,4	120,4
Percentual	38,3	35,3	39,1	39,8	28,1	44,3	35,2	39,8

Tabela 9 – Quantitativo e percentual de partículas lançadas no talude, que permaneceram no talude sem cruzar a isóbata de 200 m. Resultados para o Experimento 2, todos os anos e para os períodos de verão e inverno.

Quantitativo de partículas que não saíram do talude - Total lançado/dia: 4905 partículas								
EXP 2 – SEM	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
MARÉ	Dias de lançamento – Plataforma						Média anual	
Ano	1		11		21		1,11,21	1,11,21
2004	2885	3205	4072	3889	1810	3551	2922,3	3548,3
2005	2855	1810	3483	3781	3316	2995	3218,0	2862,0
2006	3878	2704	3872	3239	4390	3198	4046,7	3047,0
2007	3696	2569	3298	2868	3072	3284	3355,3	2907,0
2008	2703	3518	3268	3411	4210	3690	3393,7	3539,7
2009	2425	3853	3718	4159	4496	3323	3546,3	3778,3
2010	4318	3975	3137	3651	4086	3416	3847,0	3680,7
Média	3251,4	3090,6	3549,7	3571,1	3625,7	3351,0	3475,6	3337,6
Desv. Padrão	707,5	776,8	347,0	433,5	965,6	229,0	379,2	385,8
Percentual	66,3	63,0	72,4	72,8	73,9	68,3	70,9	68,0

Tabela 10 – Quantitativo e percentual de partículas lançadas na plataforma, que permaneceram na plataforma sem cruzar a isóbata de 200 m. Resultados para o Experimento 3, todos os anos e para os períodos de verão e inverno.

Quantitativo de partículas que não saíram da plataforma - Total lançado/dia: 4250 partículas								
EXP3 – VENTO	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
	Dias de lançamento – Plataforma						Média anual	
Ano	1		11		21		1,11,21	1,11,21
2004	3364	2809	2771	2197	3209	2966	3114,7	2657,3
2005	3181	3395	3082	2815	3111	2891	3124,7	3033,7
2006	2494	2316	2652	1721	2811	2554	2652,3	2197,0
2007	2858	2499	2919	2097	3039	2987	2938,7	2527,7
2008	3440	1910	3054	2570	1223	2603	2572,3	2361,0
2009	3568	2159	2959	1195	1197	3318	2574,7	2224,0
2010	2565	1629	2908	1494	1246	2986	2239,7	2036,3
Média	3067,1	2388,1	2906,4	2012,7	2262,3	2900,7	2745,3	2433,9
Desv. Padrão	431,2	586,8	152,0	580,0	980,5	258,9	326,9	337,1
Percentual	72,2	56,2	68,4	47,4	53,2	68,3	64,6	57,3

Tabela 11 – Quantitativo e percentual de partículas lançadas no talude, que permaneceram no talude sem cruzar a isóbata de 200 m. Resultados para o Experimento 3, todos os anos e para os períodos de verão e inverno.

Quantitativo de partículas que não saíram do talude - Total lançado/dia: 4905 partículas								
EXP3 – VENTO	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
	Dias de lançamento – Plataforma						Média anual	
Ano	1		11		21		1,11,21	1,11,21
2004	76	339	471	2330	18	1701	188,3	1456,7
2005	115	14	1487	1710	911	775	837,7	833,0
2006	970	225	271	2600	1067	891	769,3	1238,7
2007	314	820	1254	1477	232	516	600,0	937,7
2008	218	2565	717	1733	2465	805	1133,3	1701,0
2009	328	2537	420	2936	2890	35	1212,7	1836,0
2010	1596	3200	549	2190	2705	878	1616,7	2089,3
Média	516,7	1385,7	738,4	2139,4	1469,7	800,1	908,3	1441,8
Desv. Padrão	561,5	1332,4	457,2	528,2	1200,5	498,8	462,4	466,9
Percentual	10,5	28,3	15,1	43,6	30,0	16,3	18,5	29,4

c) Quantitativo e percentual de partículas, lançadas no ponto P3, de acordo com a direção de propagação para os Experimentos 1, 2 e 3.

Tabela 12 – Quantitativo e percentual de partículas, lançadas no ponto P3, de acordo com a direção de propagação para o Experimento 1.

Quantitativo de partículas P3 – CF								
EXP 1 – MARÉ	JAN				JUL			
	SSW	%	NNE	%	SSW	%	NNE	%
2004	2971	99,03	29	0,97	1824	60,80	1176	39,20
2005	2998	99,93	2	0,07	2200	73,33	780	26,00
2006	3000	100	0	0,00	2459	81,97	541	18,03
2007	2699	89,97	301	10,03	406	13,53	2594	86,47
2008	2997	99,90	3	0,10	2728	90,93	272	9,07
2009	2781	92,70	219	7,30	1357	45,23	1643	54,77
2010	2999	99,97	1	0,03	2249	74,97	751	25,03
MÉDIA	2920,71	97,36	79,29	2,64	1889	62,97	1108,14	36,94
DP	126,10	4,20	126,10	4,20	789,69	26,32	791,04	26,37

Tabela 13 – Quantitativo e percentual de partículas, lançadas no ponto P3, de acordo com a direção de propagação para o Experimento 2.

Quantitativo de partículas P3 – CF								
EXP 2 – SEM MARÉ	JAN				JUL			
	SSW	%	NNE	%	SSW	%	NNE	%
2004	2987	99,57	13	0,43	1987	66,23	1013	33,77
2005	2991	99,70	9	0,30	2274	75,80	726	24,20
2006	3000	100	0	0,00	2222	74,07	778	25,93
2007	2944	98,13	56	1,87	434	14,47	2566	85,53
2008	3000	100,00	0	0,00	2768	92,27	232	7,73
2009	2943	98,10	57	1,90	1340	44,67	1660	55,33
2010	1959	65,30	1041	34,70	2815	93,83	185	6,17
MÉDIA	2832,00	94,40	168,00	5,60	1977,14	65,90	1356,29	34,10
DP	385,73	12,86	385,73	12,86	842,90	28,10	842,90	28,10

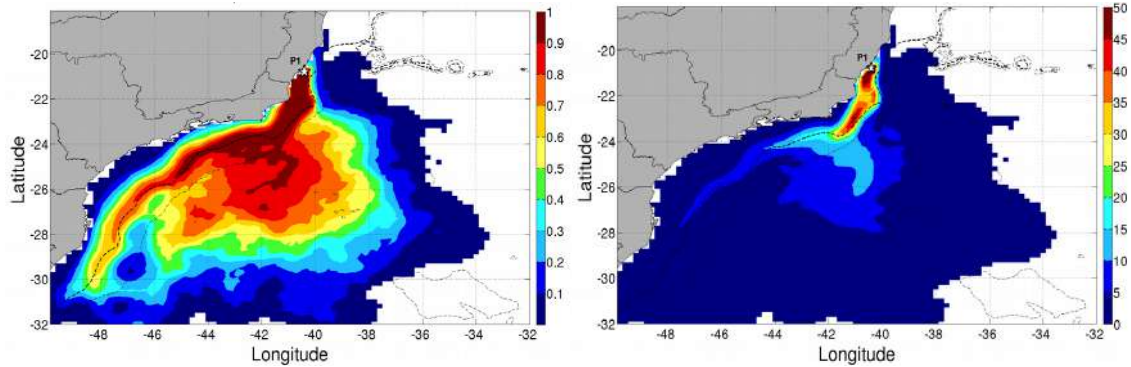
Tabela 14 – Quantitativo e percentual de partículas, lançadas no ponto P3, de acordo com a direção de propagação para o Experimento 3.

Quantitativo de partículas P3 – CF								
EXP 3 – MARÉ E VENTO	JAN				JUL			
	SSW	%	NNE	%	SSW	%	NNE	%
2004	2974	99,13	26	0,87	2671	89,03	329	10,97
2005	2996	99,87	4	0,13	2938	97,93	62	2,07
2006	2998	100	2	0,07	2932	97,73	68	2,27
2007	2995	99,83	5	0,17	1324	44,13	1676	55,87
2008	3000	100,00	0	0,00	2885	96,17	115	3,83
2009	2920	97,33	80	2,67	2021	67,37	979	32,63
2010	3000	100,00	0	0,00	2841	94,70	159	5,30
MÉDIA	2983,29	99,44	16,71	0,56	2516,00	83,87	707,00	16,13
DP	29,34	0,98	29,34	0,98	616,83	20,56	616,83	20,56

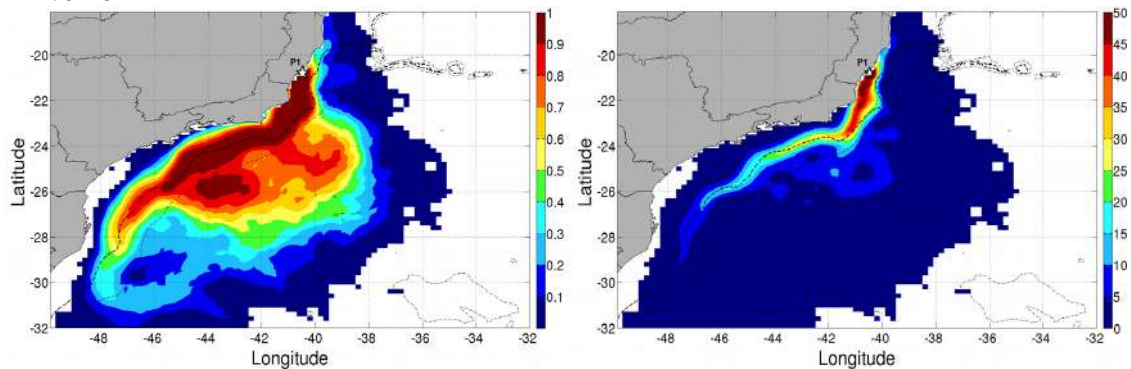
APÊNDICE 3 – Mapas de probabilidade e percentual de partículas.

a) Resultados de Probabilidade (painéis à esquerda) e Percentual de Partículas (painéis à direita) – EXP 1.

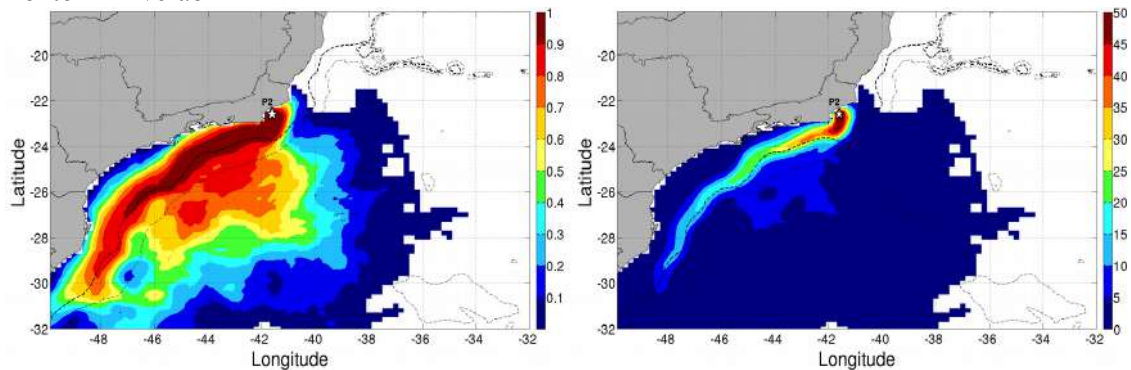
Plataforma Continental - Ponto P1 - Verão



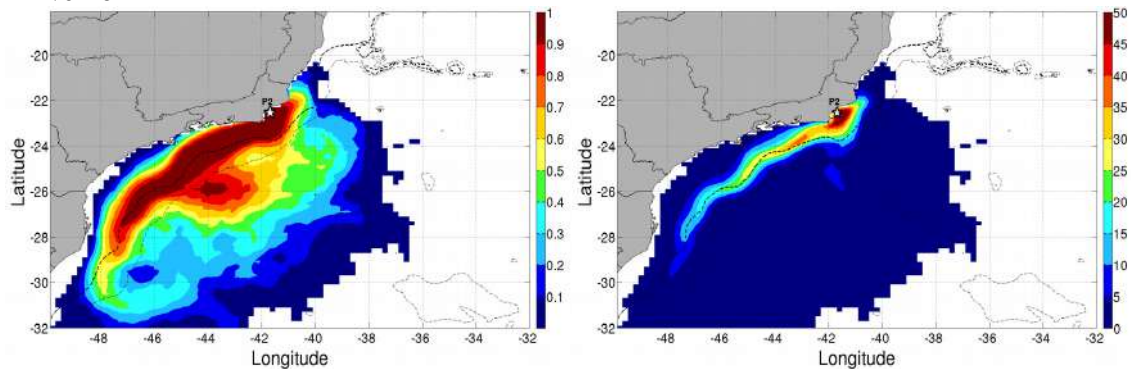
- Inverno



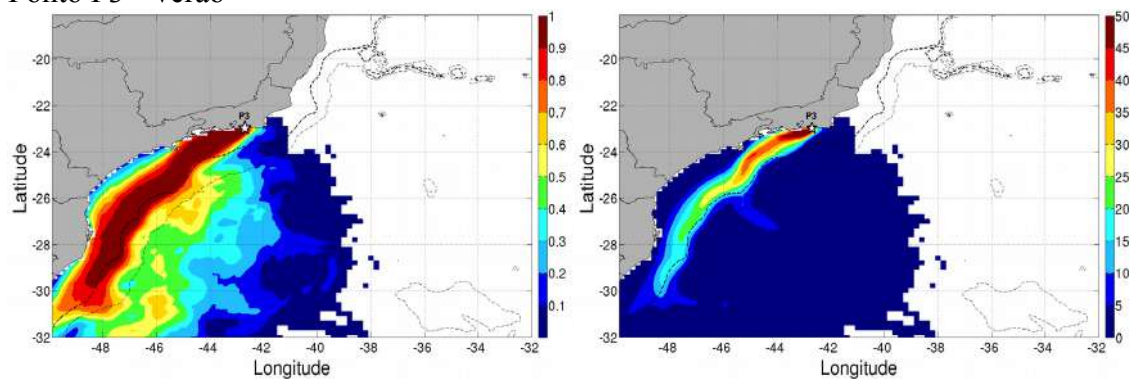
Ponto P2 - Verão



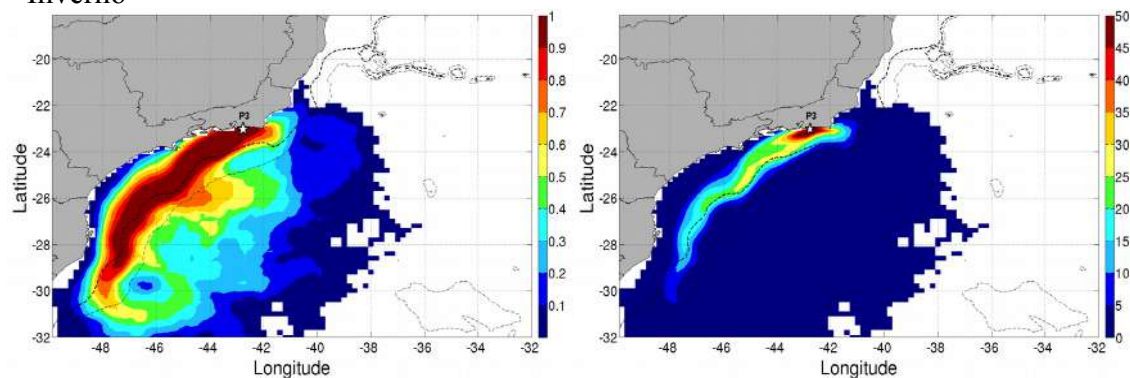
- Inverno



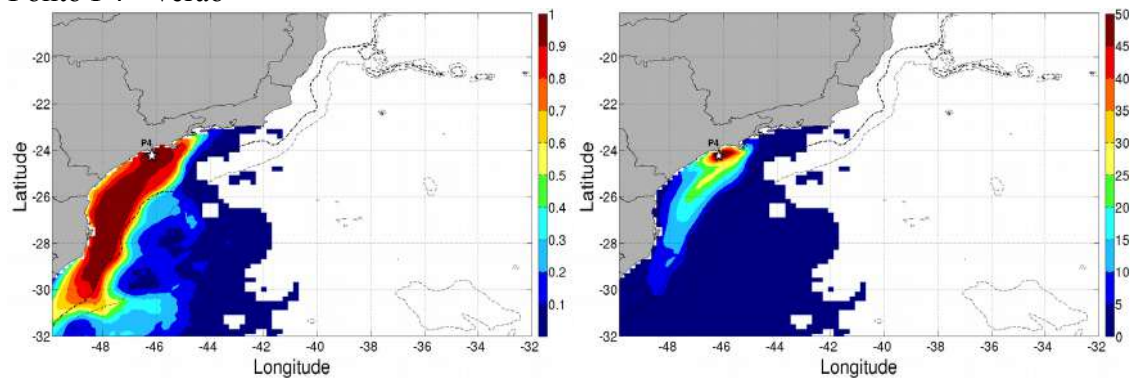
Ponto P3 - Verão



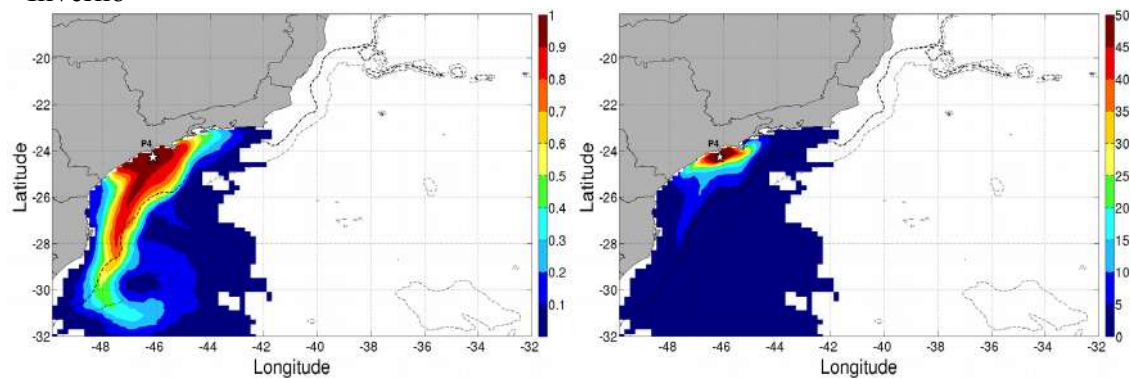
- Inverno



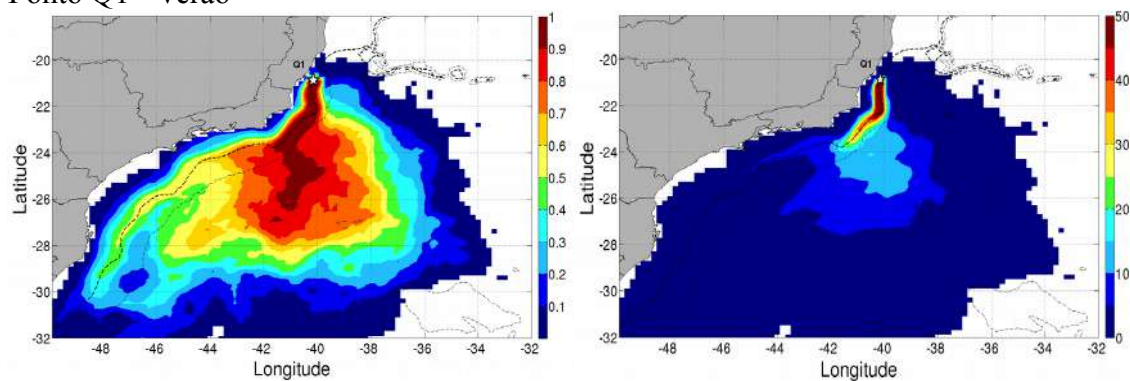
Ponto P4 - Verão



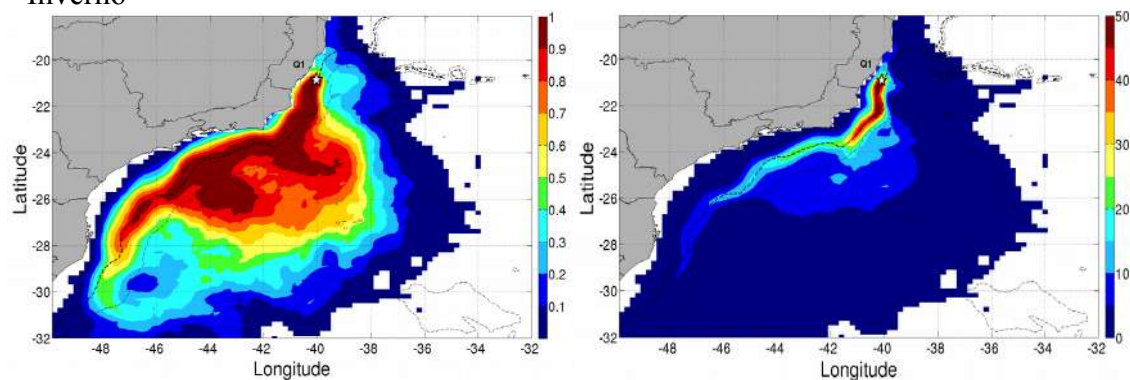
- Inverno



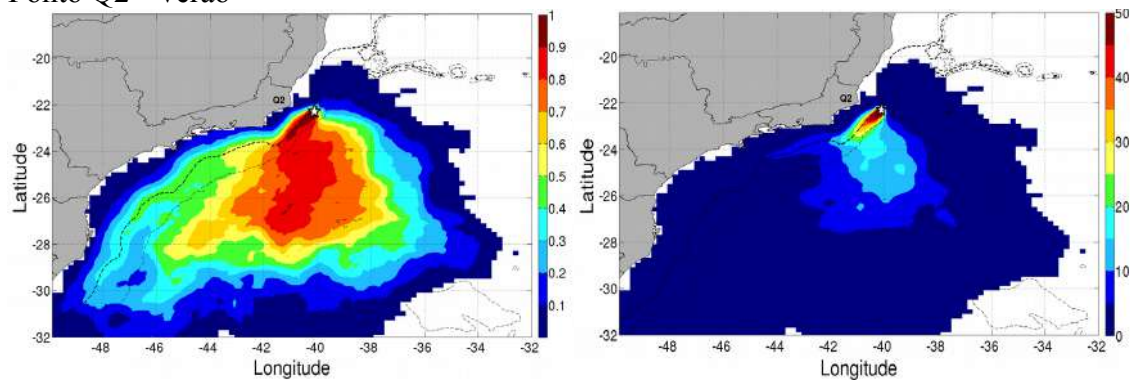
Quebra da Plataforma/Talude Continental
Ponto Q1 - Verão



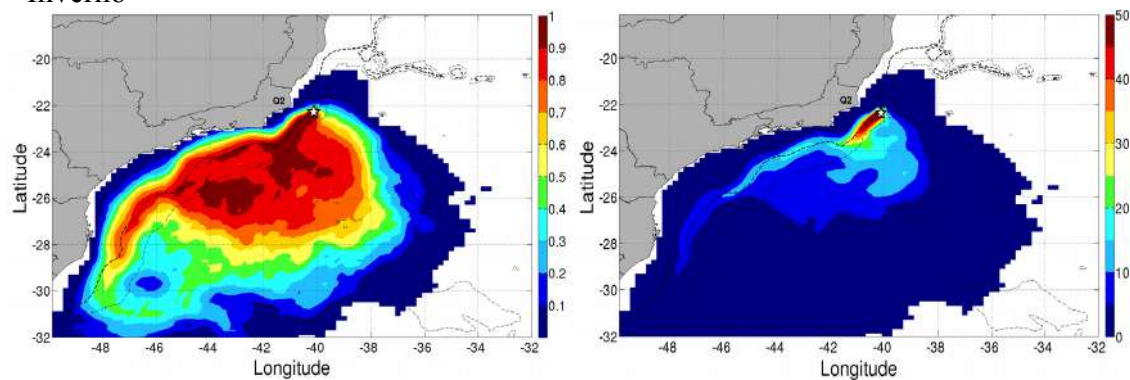
- Inverno



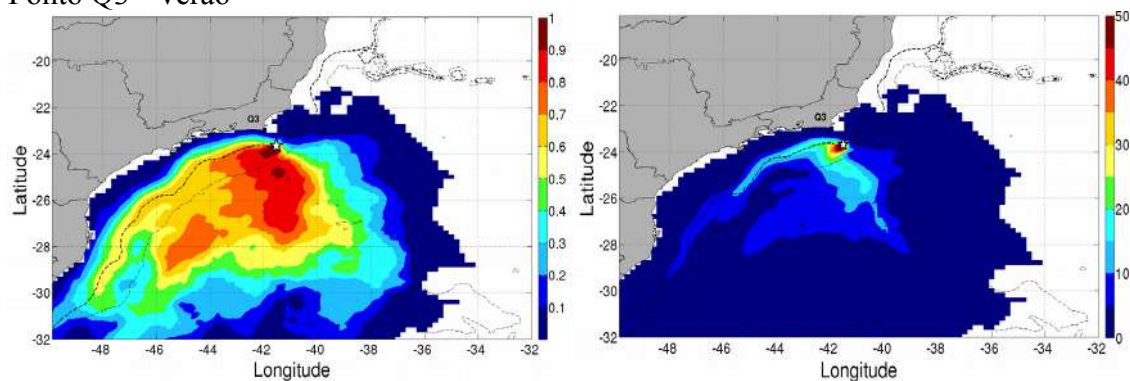
Ponto Q2 - Verão



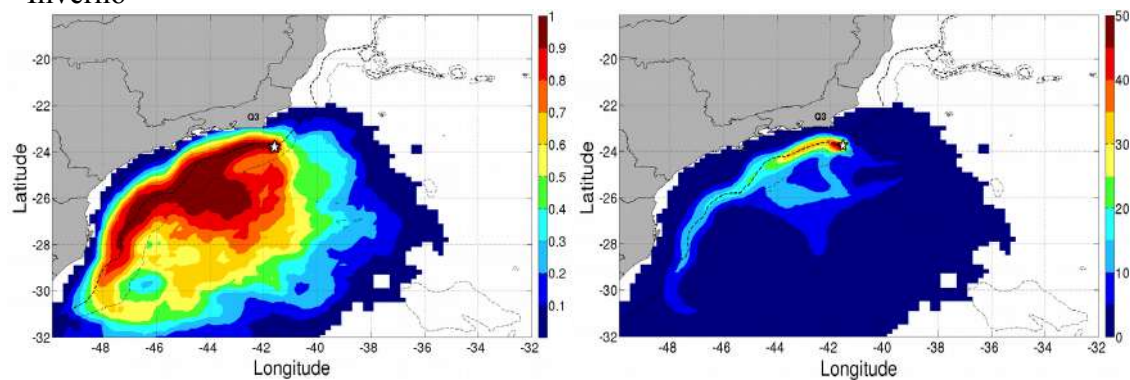
- Inverno



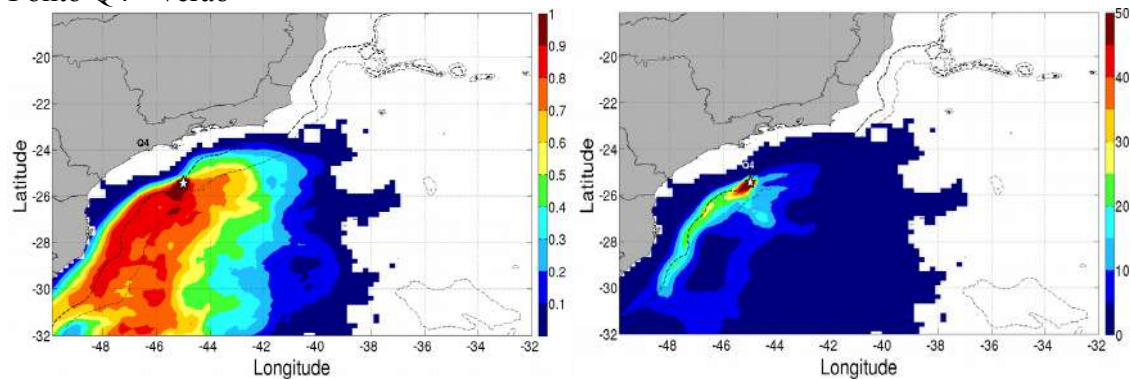
Ponto Q3 - Verão



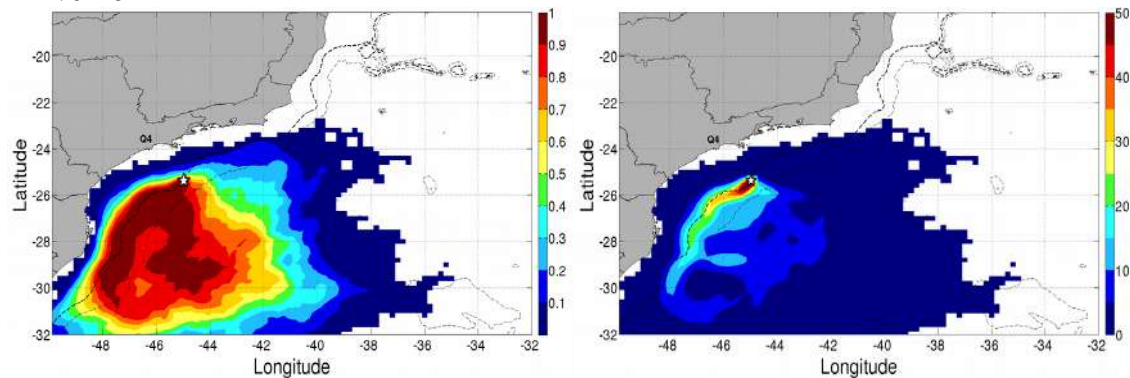
- Inverno



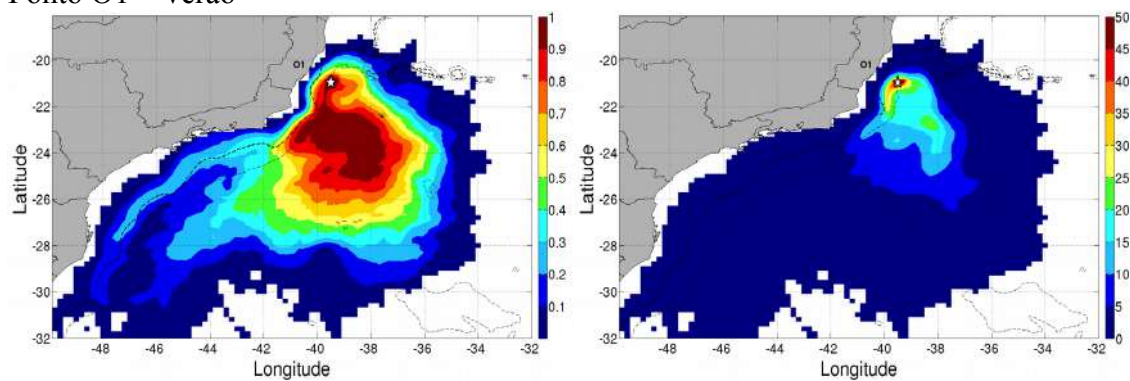
Ponto Q4 - Verão



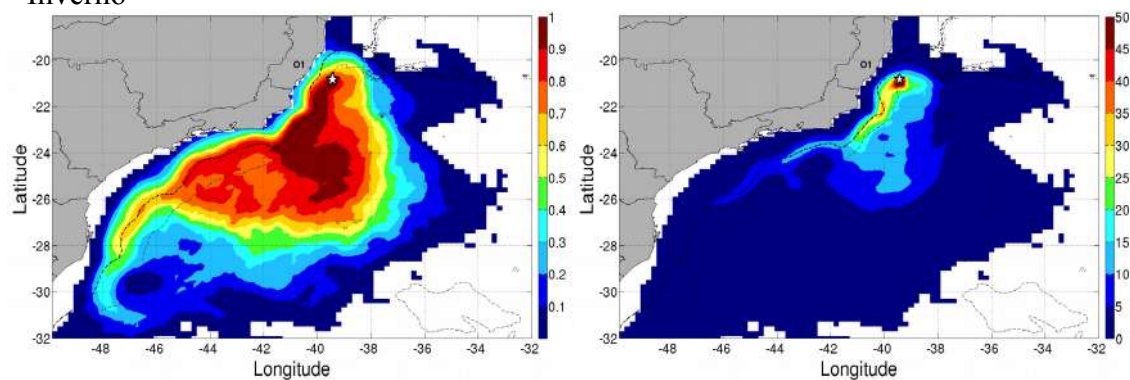
- Inverno



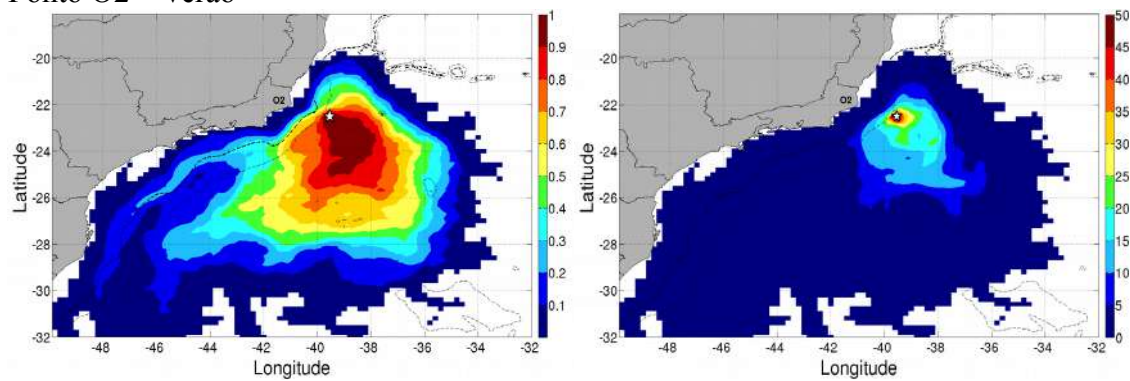
Oceano
Ponto O1 – Verão



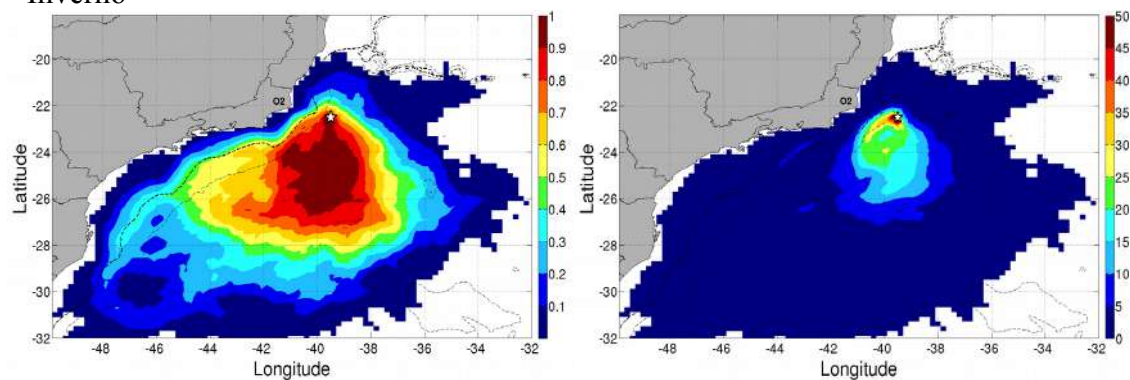
- Inverno



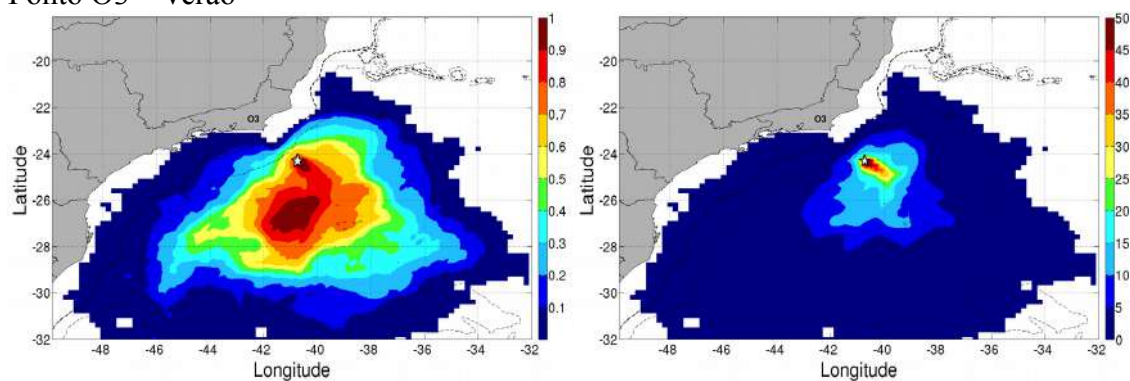
Ponto O2 – Verão



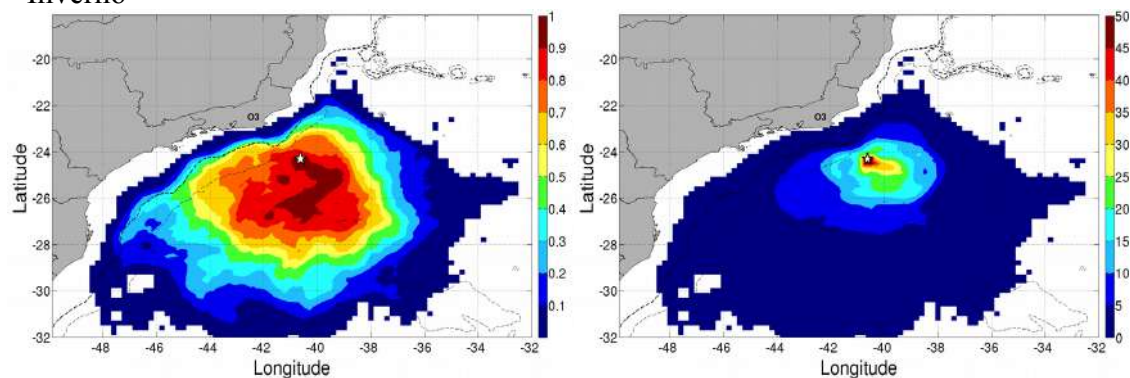
- Inverno



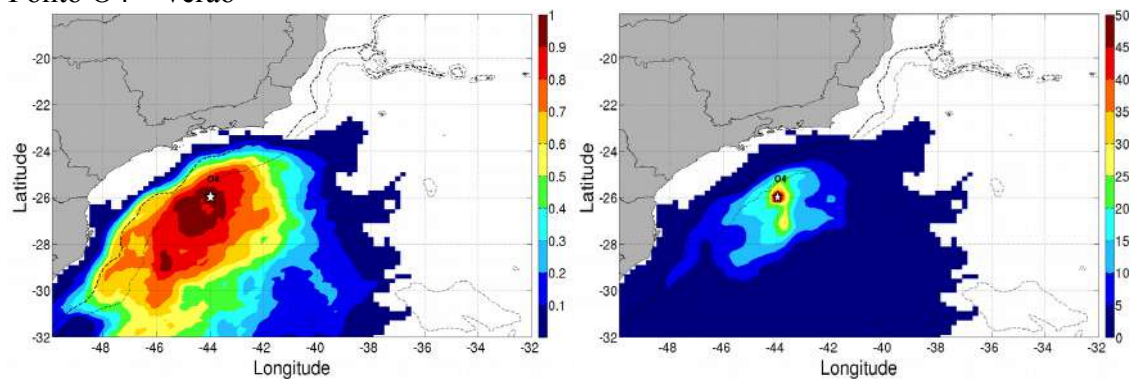
Ponto O3 – Verão



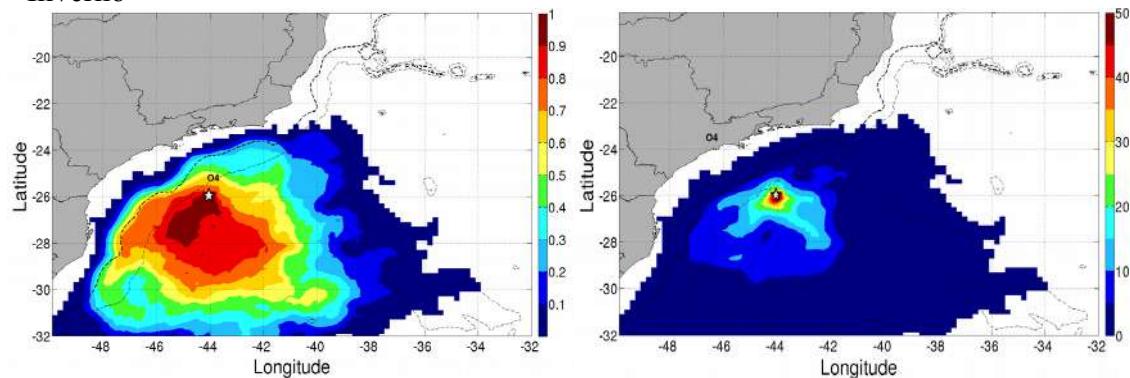
- Inverno



Ponto O4 – Verão

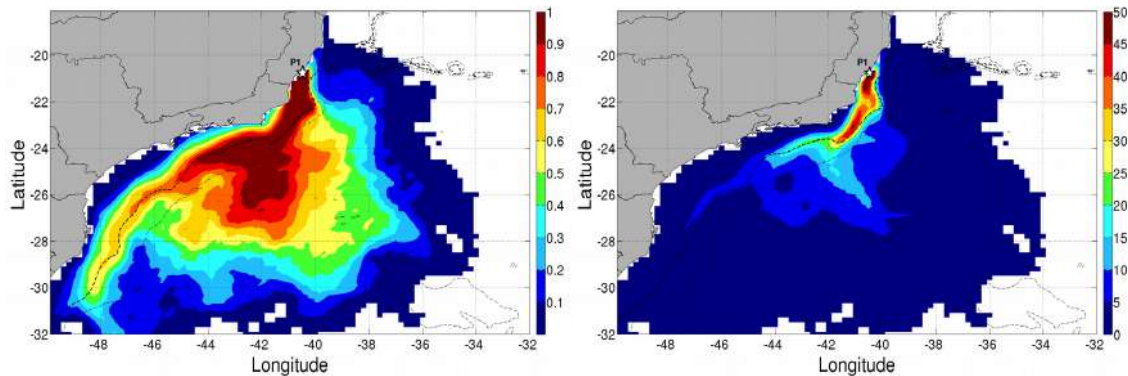


- Inverno

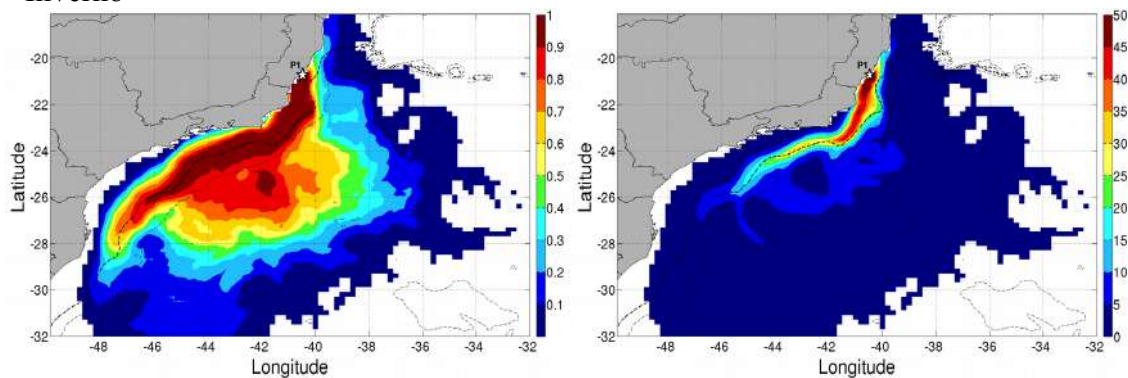


b) Resultados de Probabilidade e Percentual de Partículas – EXP 2.

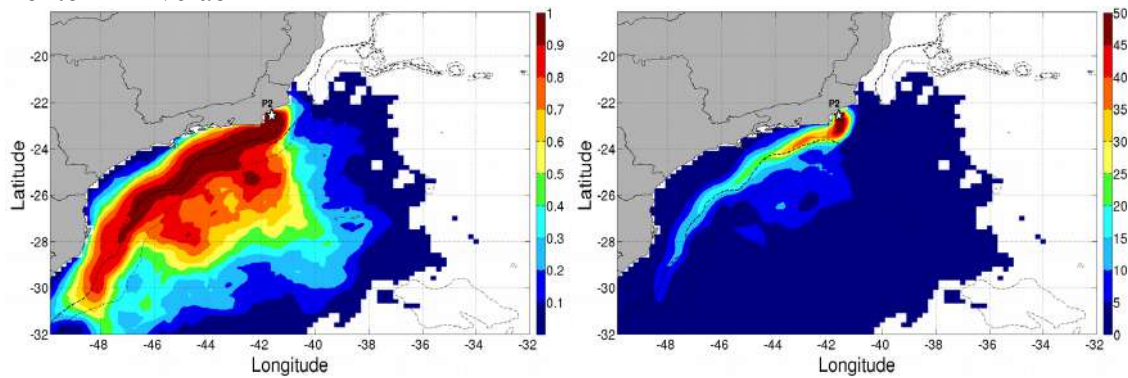
Plataforma Continental - Ponto P1 – Verão



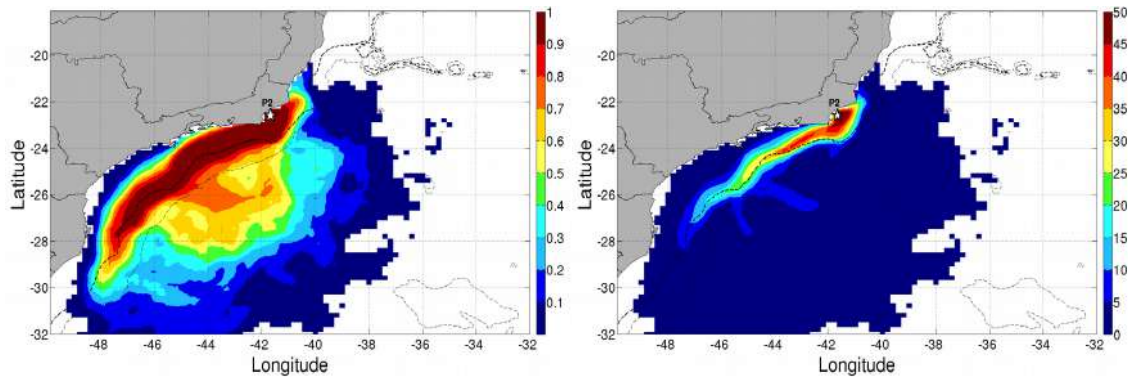
- Inverno



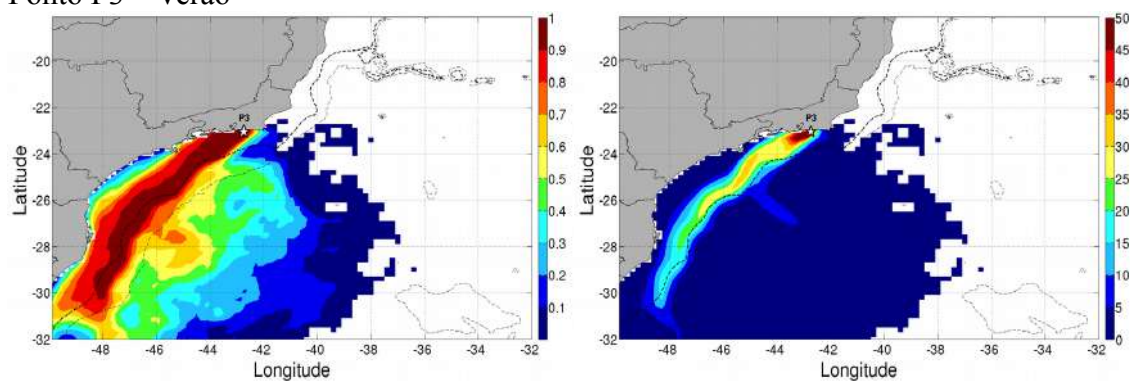
Ponto P2 – Verão



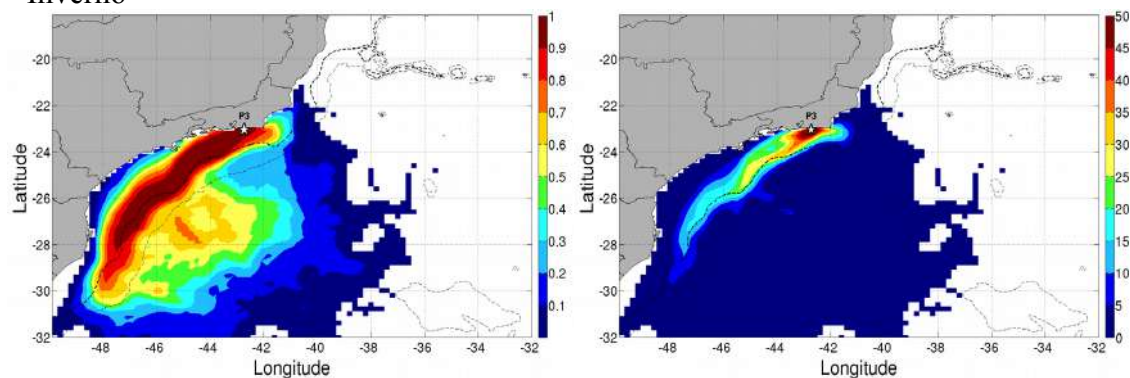
- Inverno



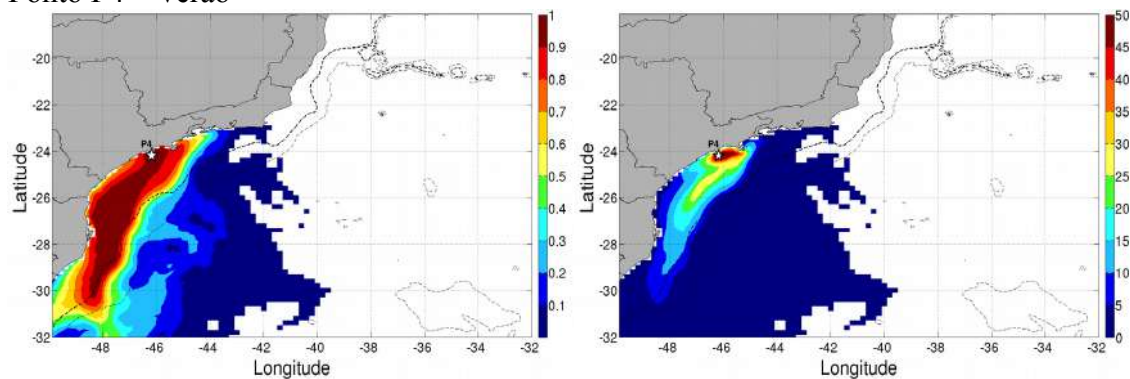
Ponto P3 – Verão



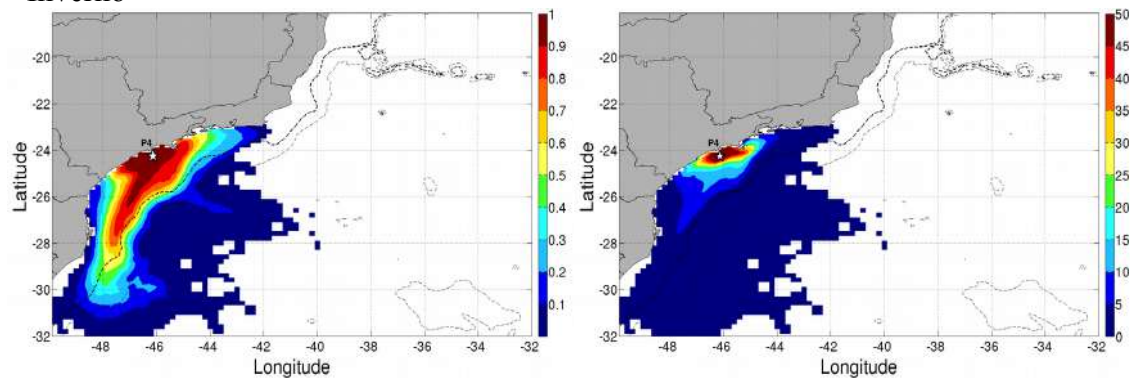
- Inverno



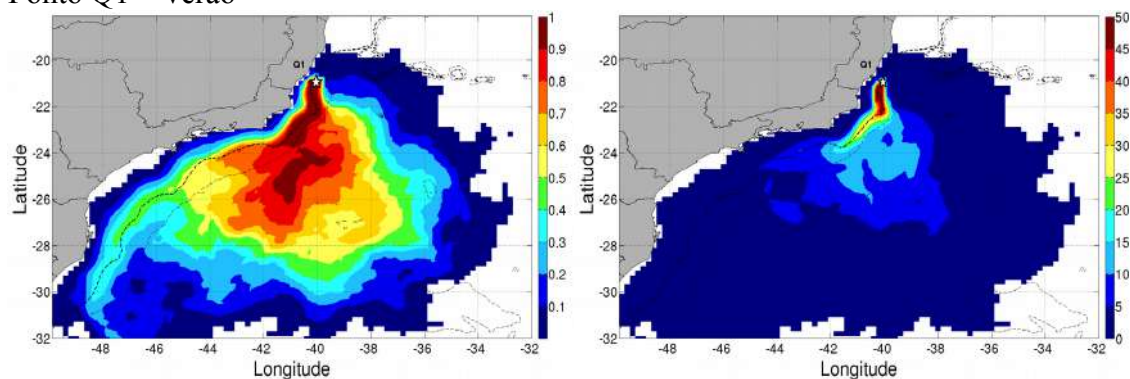
Ponto P4 – Verão



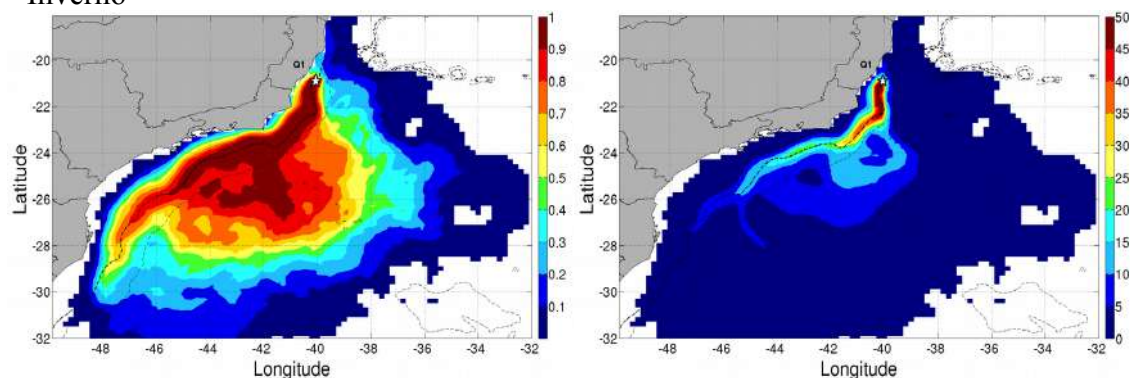
- Inverno



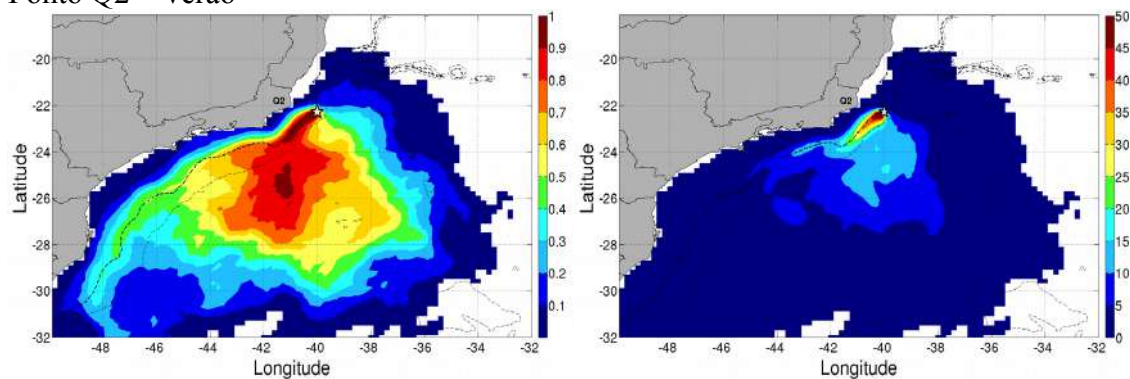
Quebra da Plataforma/Talude Continental
Ponto Q1 – Verão



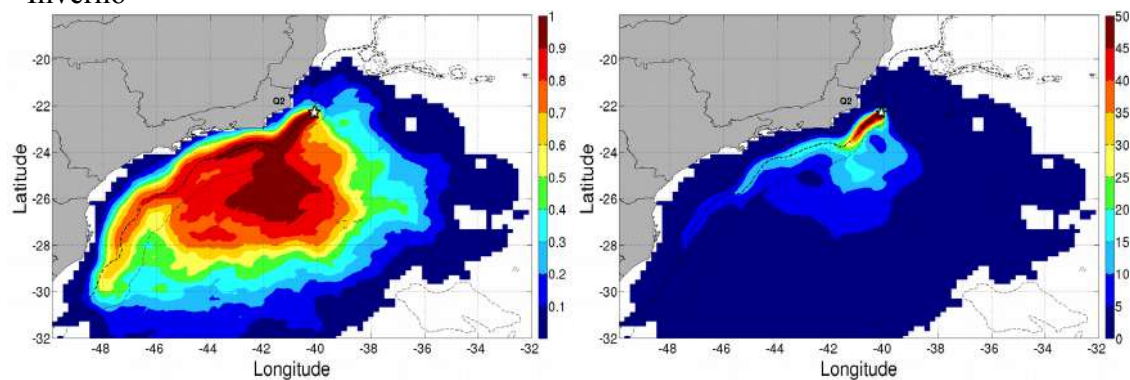
- Inverno



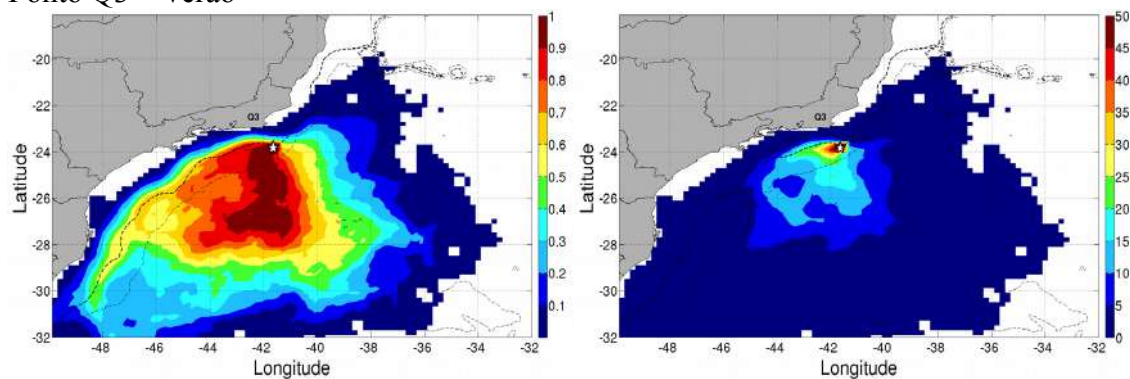
Ponto Q2 – Verão



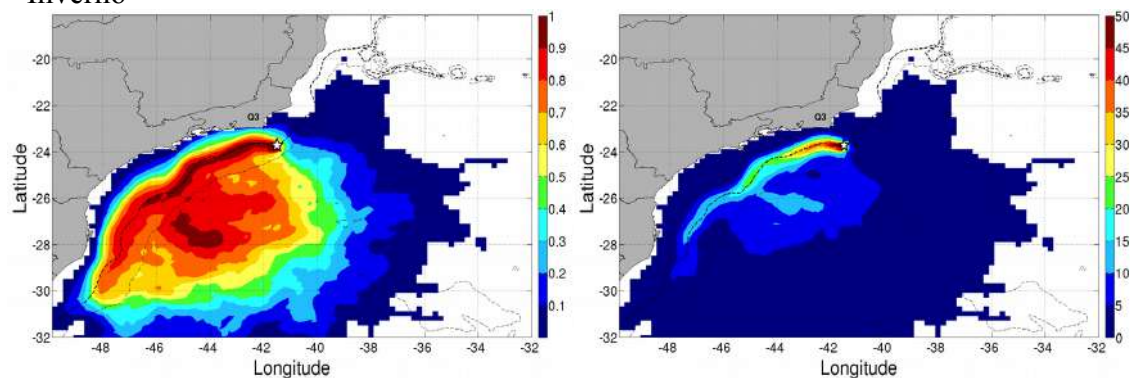
- Inverno



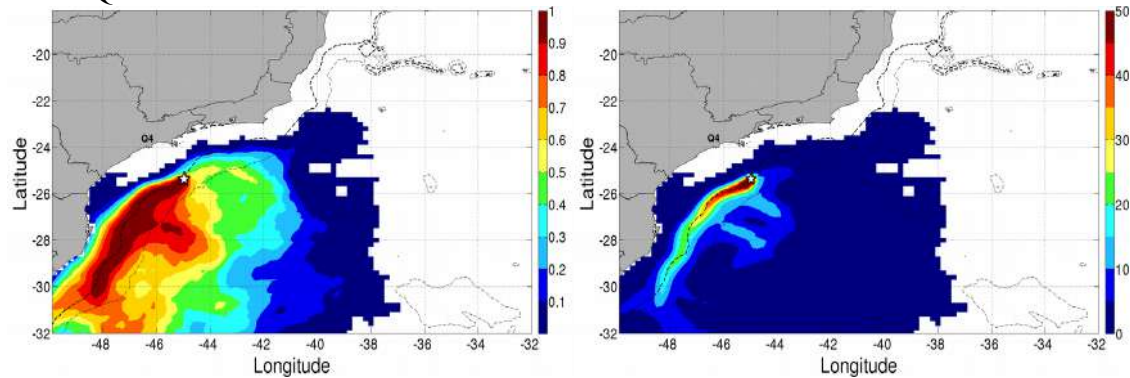
Ponto Q3 – Verão



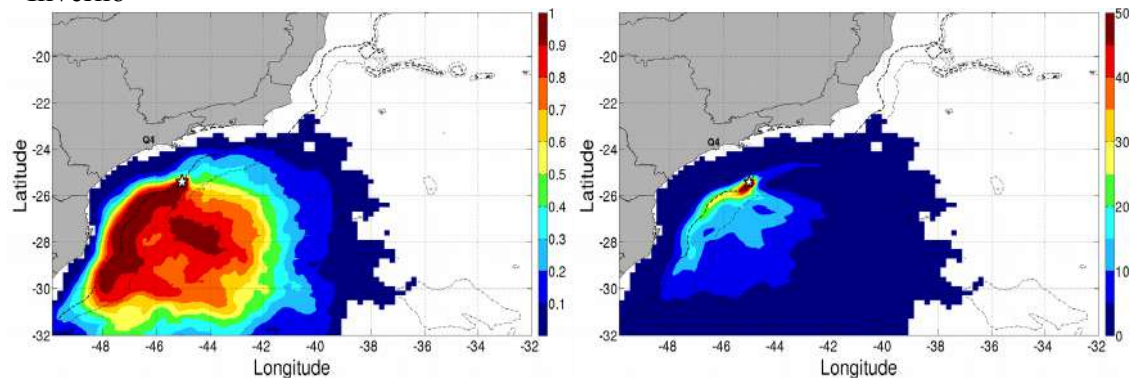
- Inverno



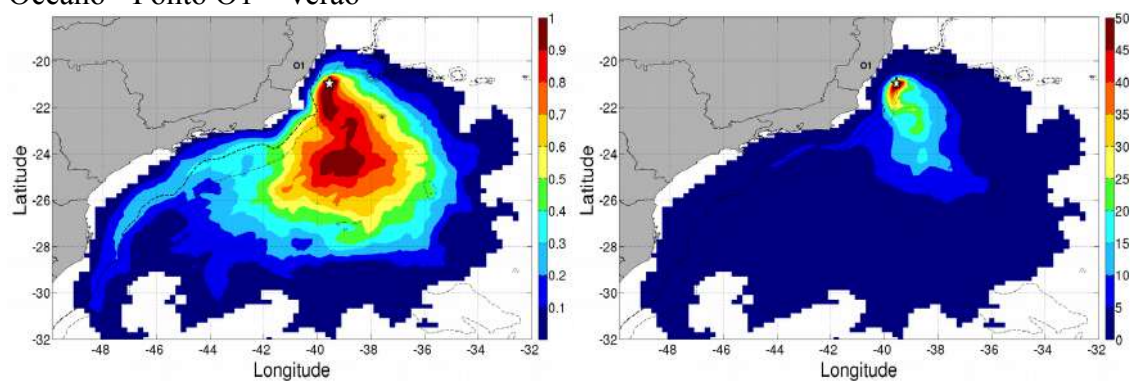
Ponto Q4 – Verão



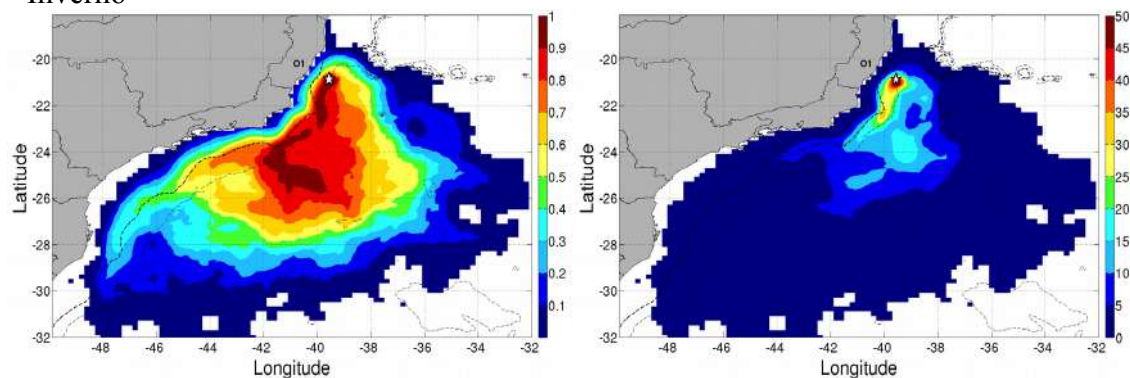
- Inverno



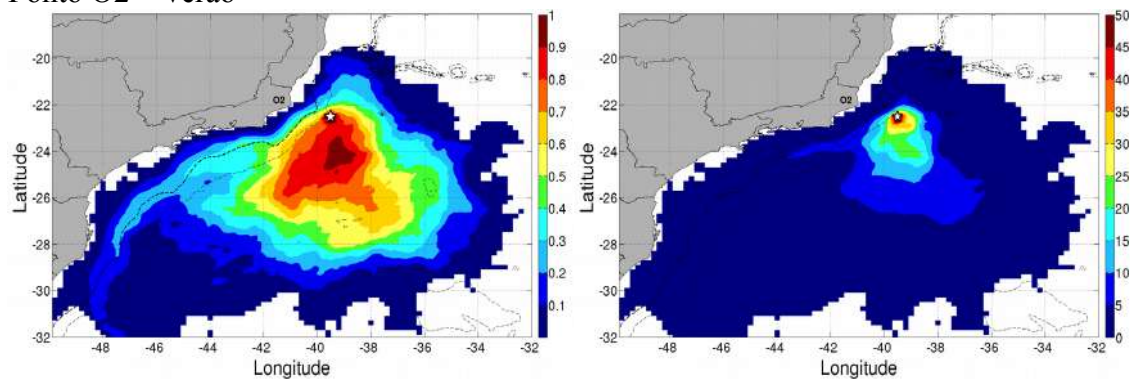
Oceano - Ponto O1 – Verão



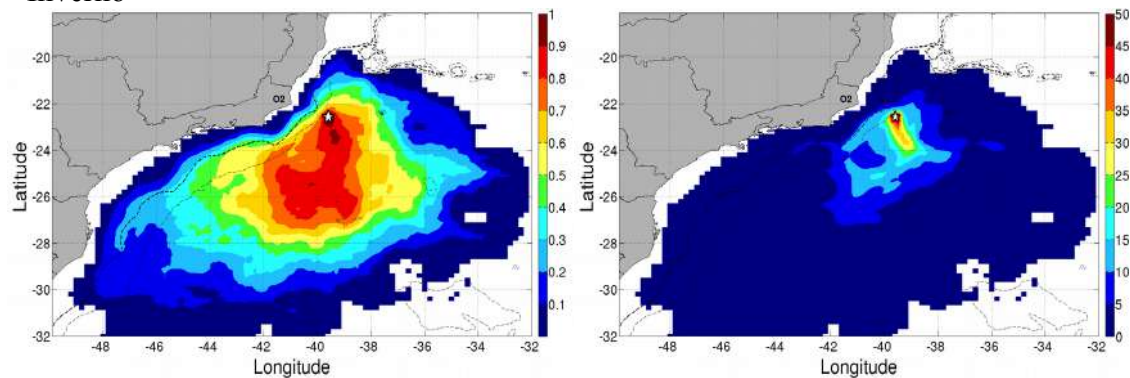
- Inverno



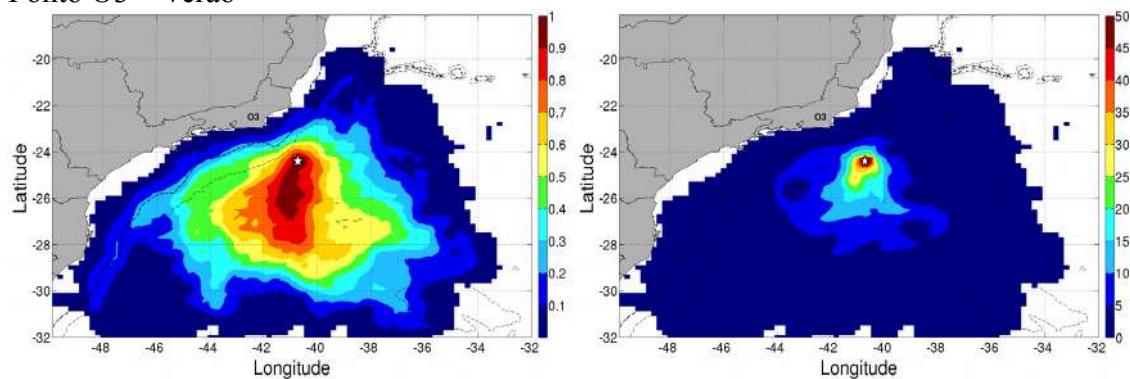
Ponto O2 – Verão



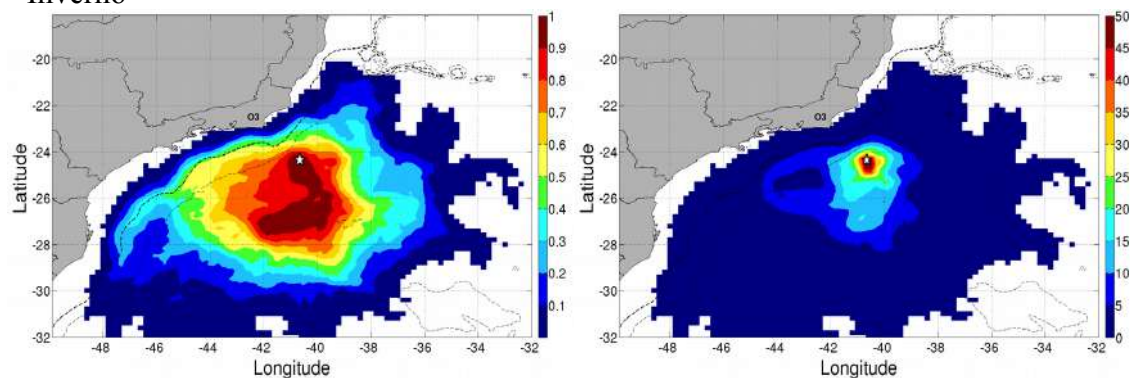
- Inverno



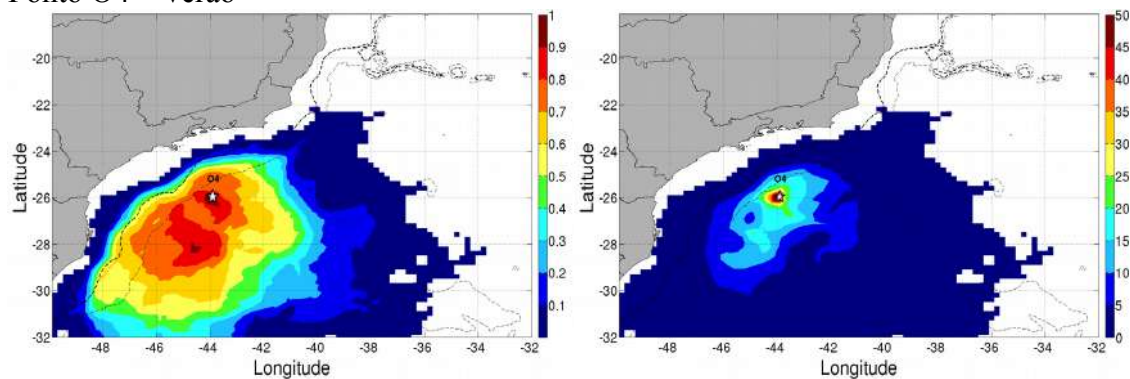
Ponto O3 – Verão



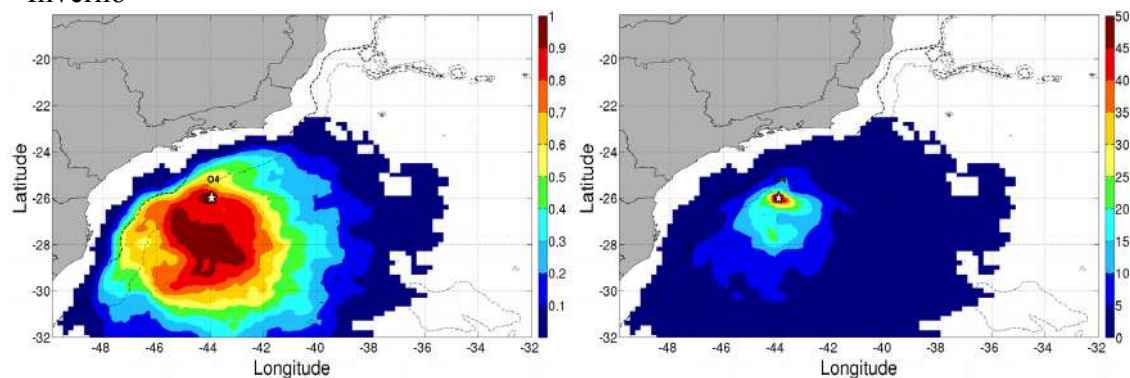
- Inverno



Ponto O4 – Verão

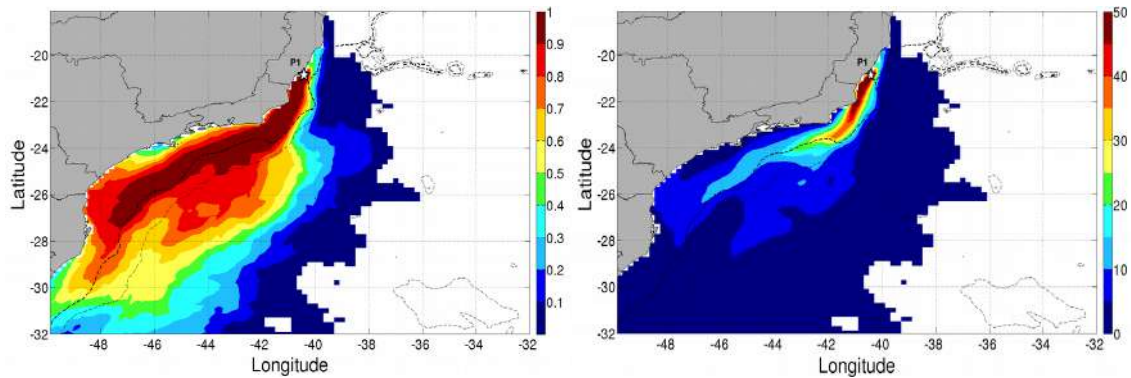


- Inverno

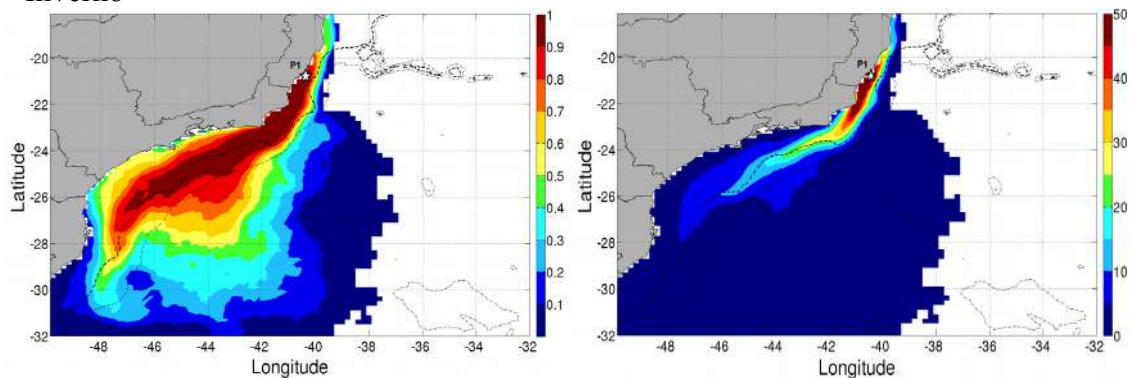


c) Resultados de Probabilidade e Percentual de Partículas – EXP 3.

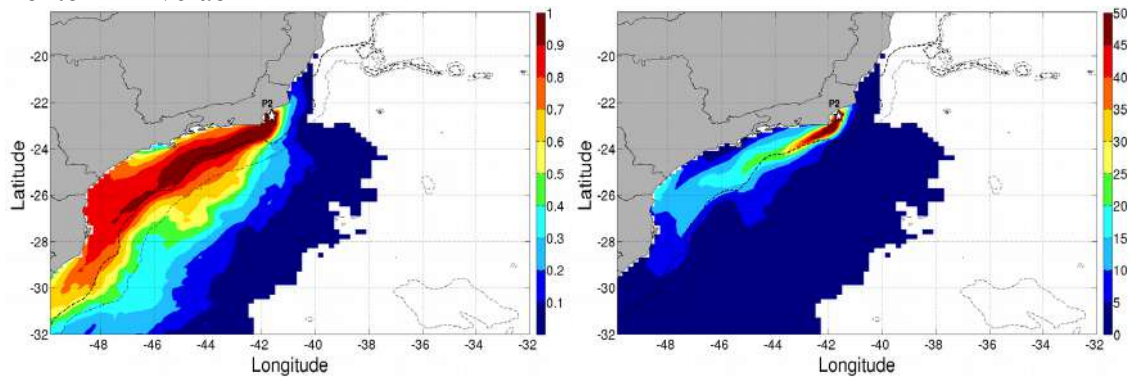
Plataforma Continental - Ponto P1 – Verão



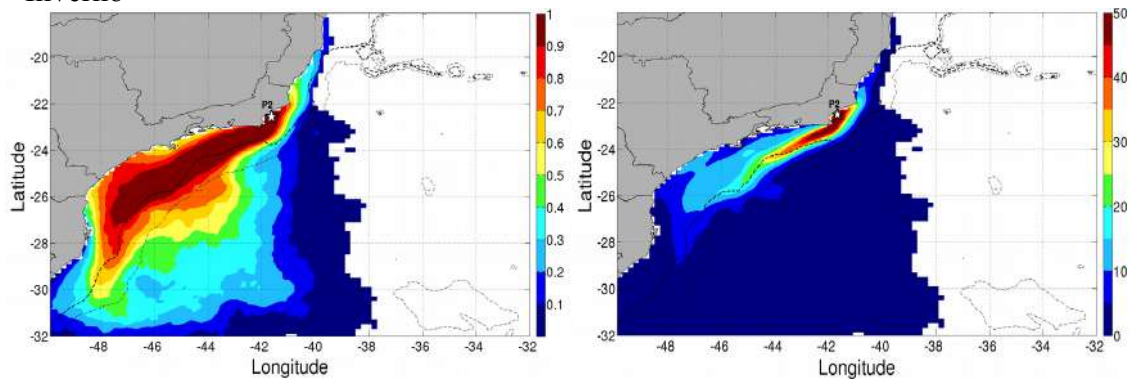
- Inverno



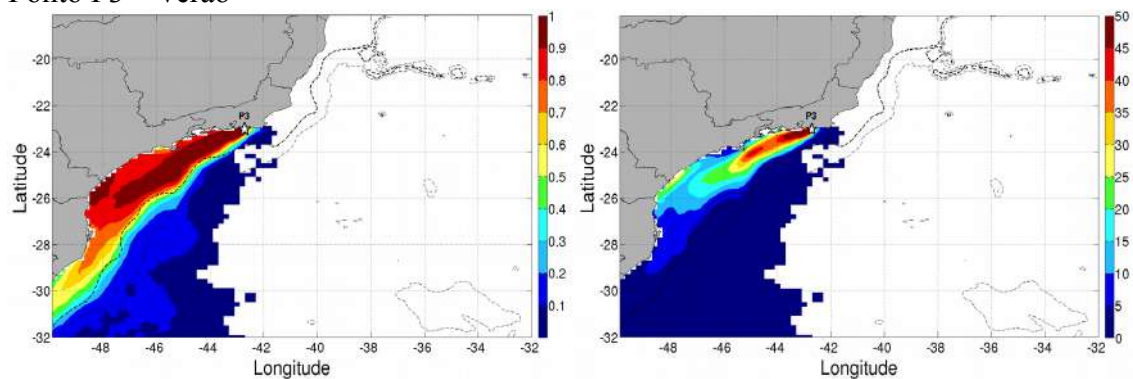
Ponto P2 – Verão



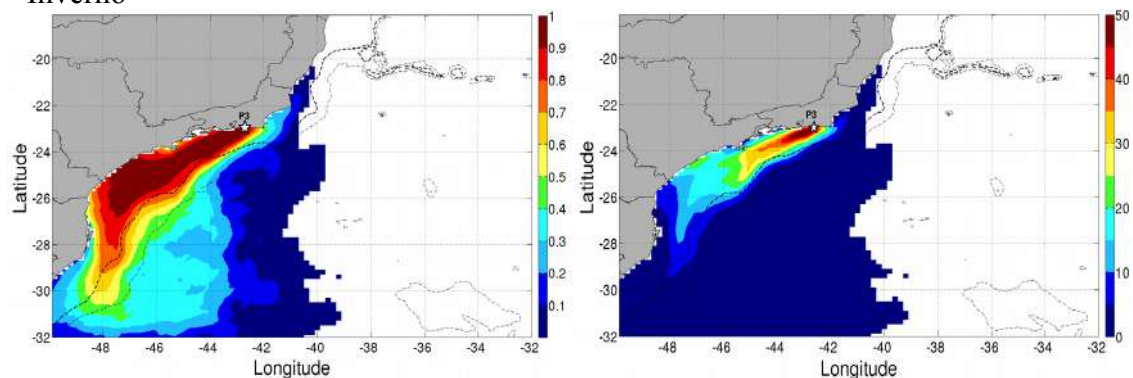
- Inverno



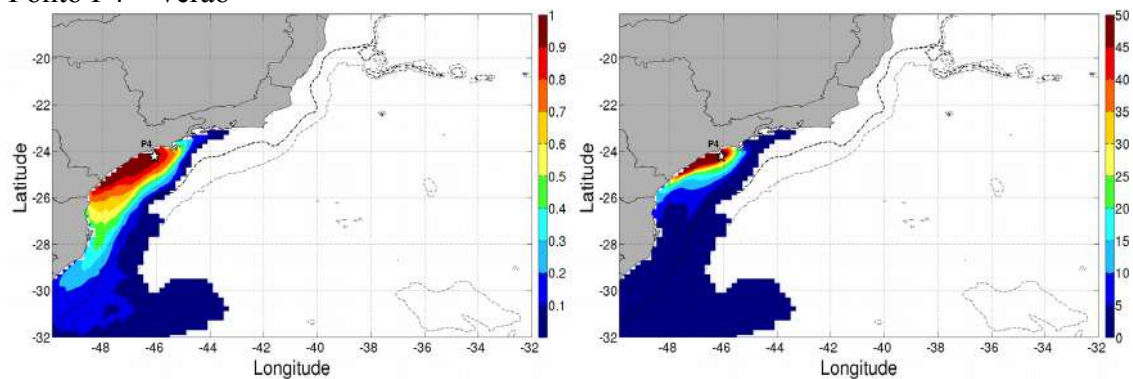
Ponto P3 – Verão



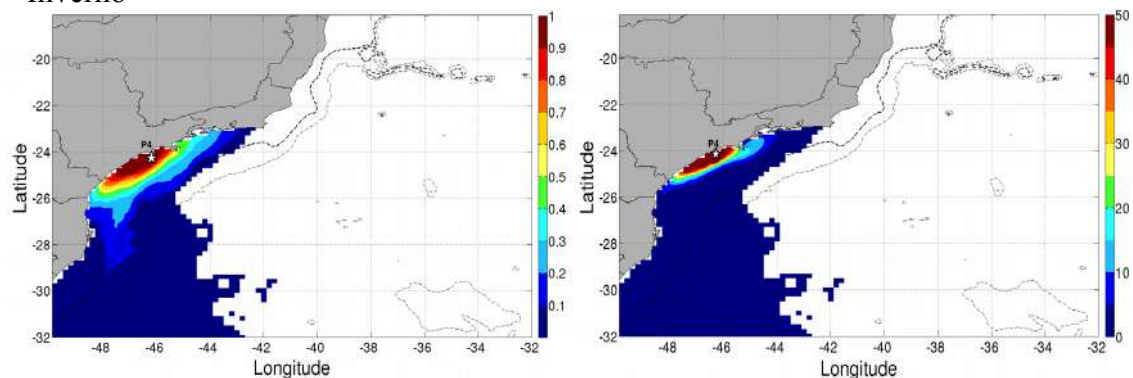
- Inverno



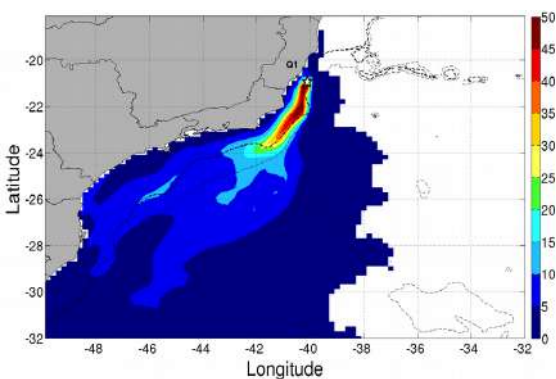
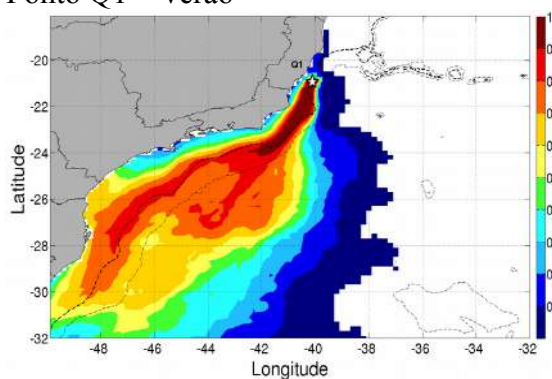
Ponto P4 – Verão



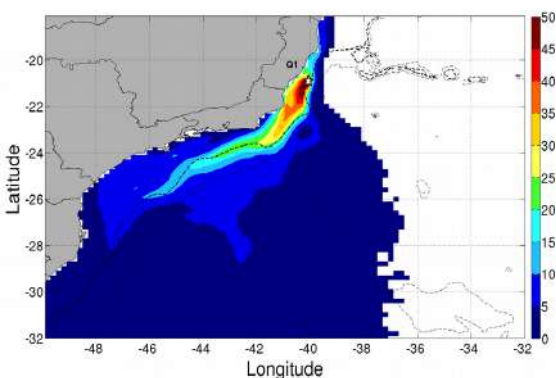
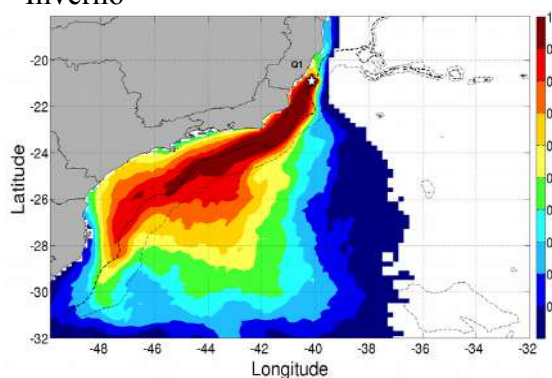
- Inverno



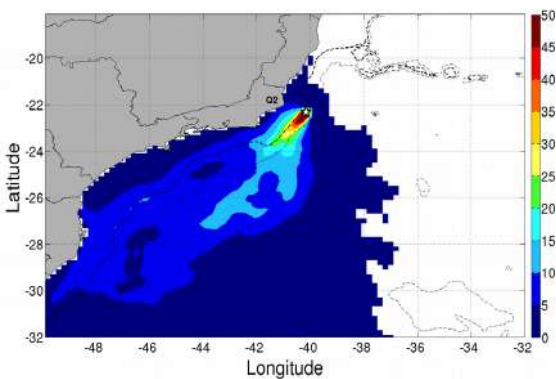
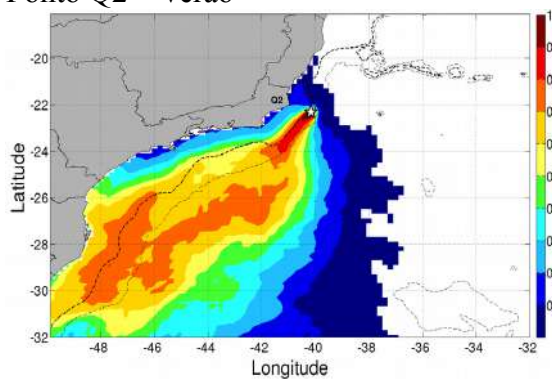
Quebra da Plataforma/Talude Continental
Ponto Q1 – Verão



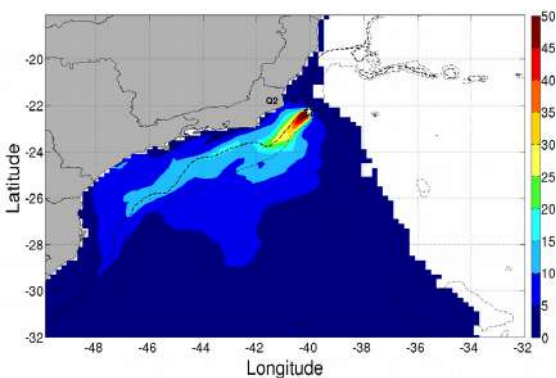
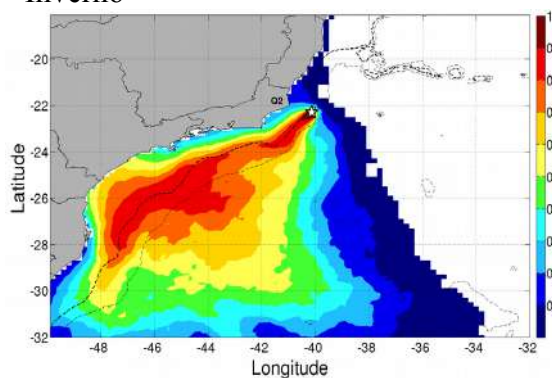
- Inverno



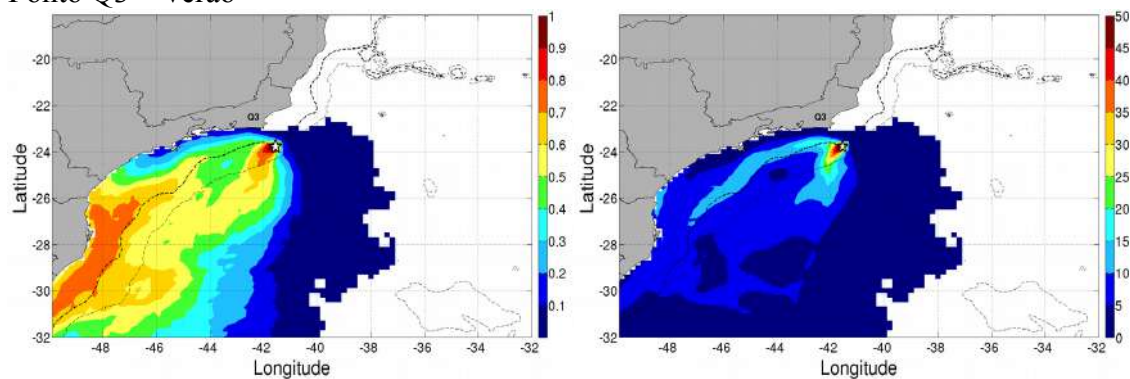
Ponto Q2 – Verão



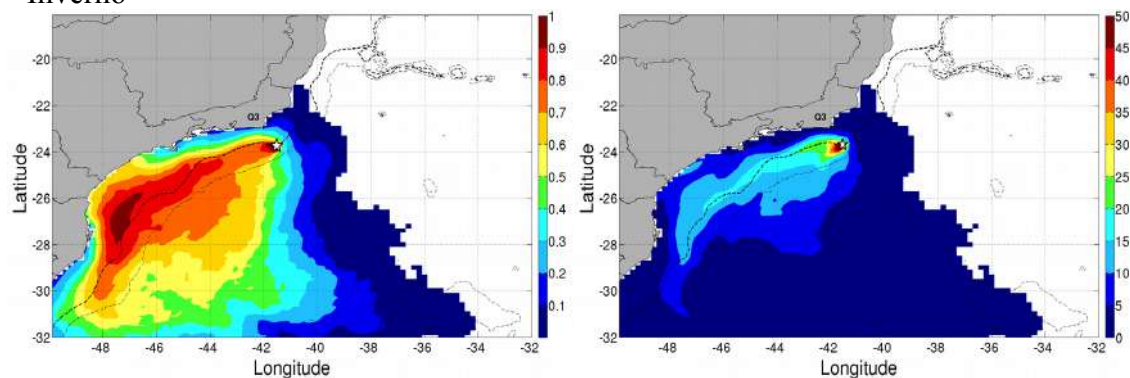
- Inverno



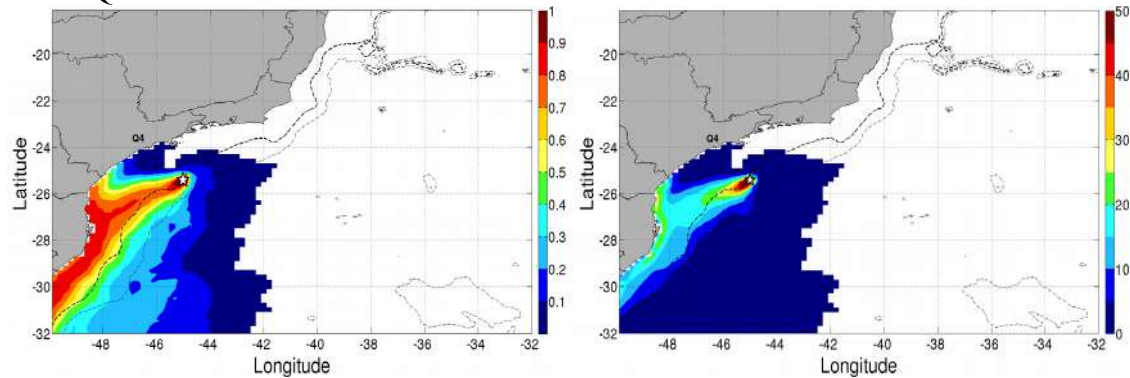
Ponto Q3 – Verão



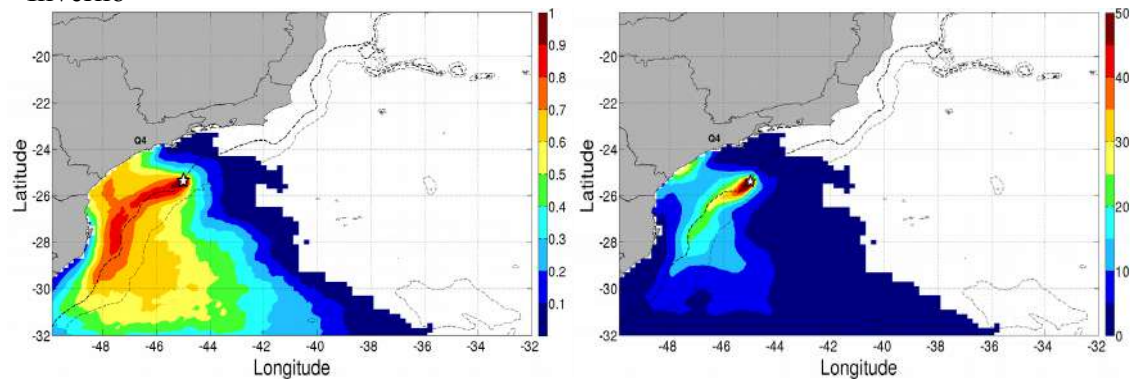
- Inverno



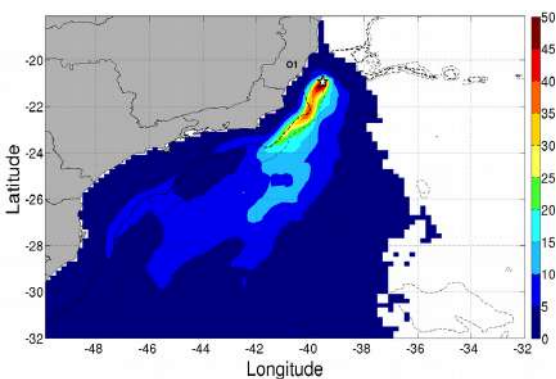
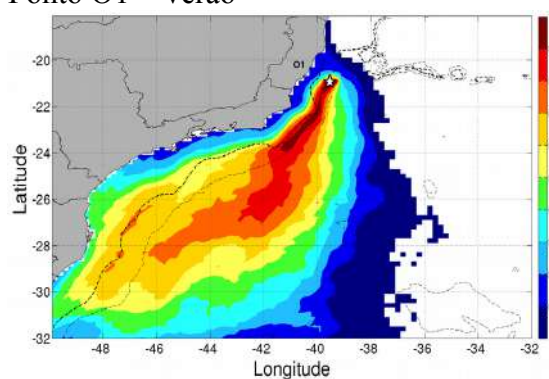
Ponto Q4 – Verão



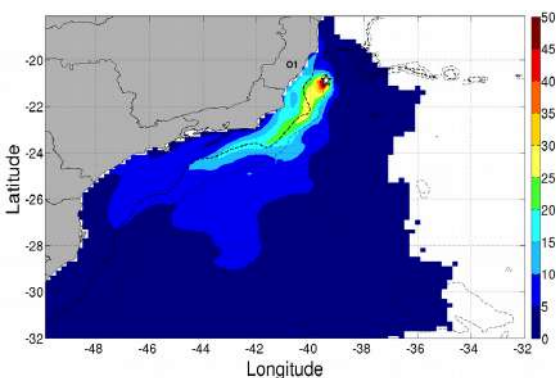
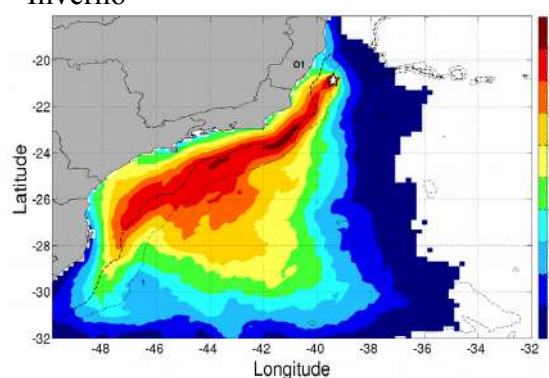
- Inverno



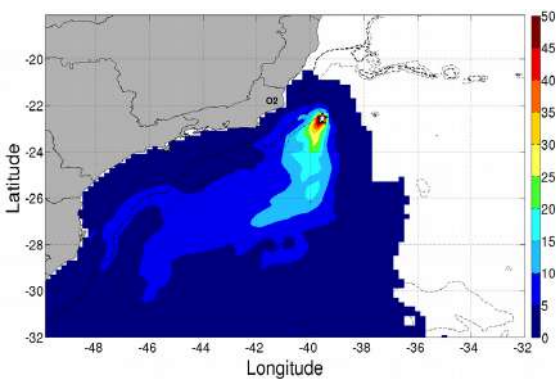
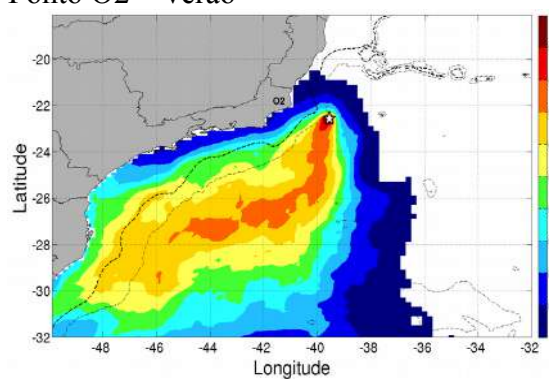
Oceano
Ponto O1 – Verão



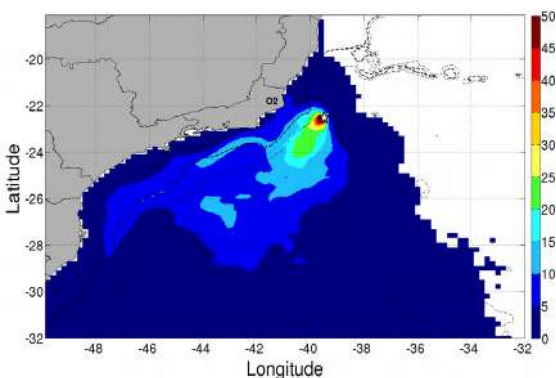
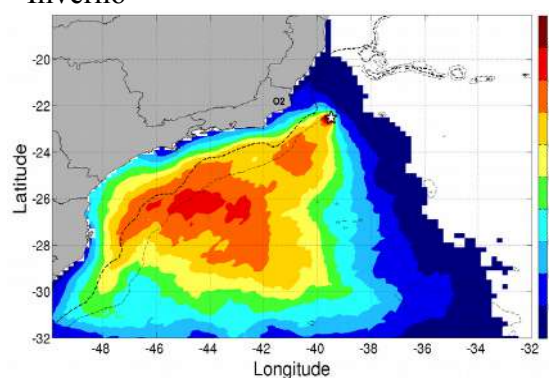
- Inverno



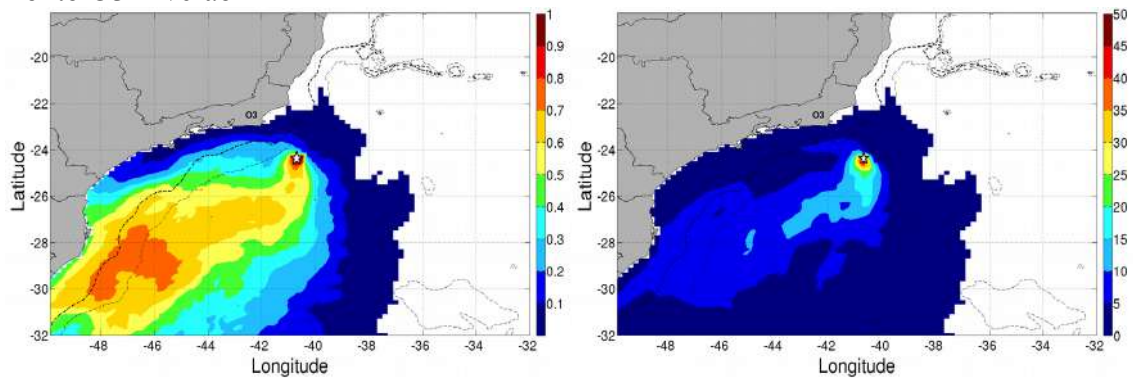
Ponto O2 – Verão



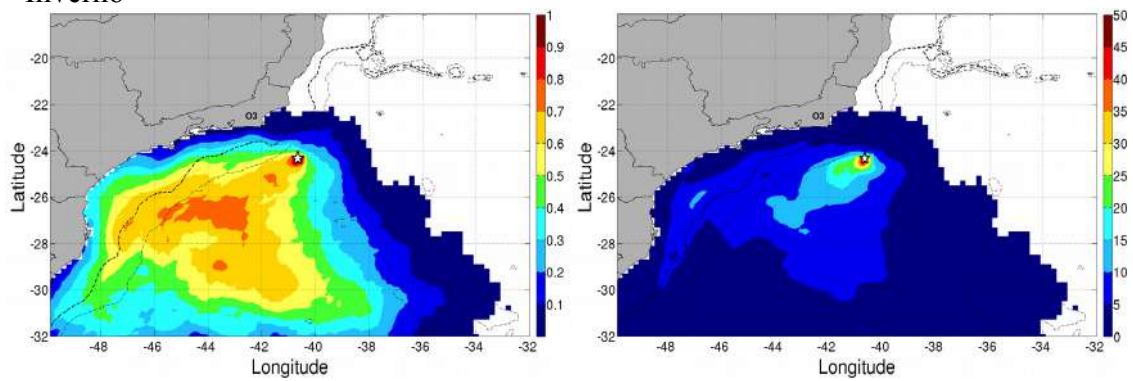
- Inverno



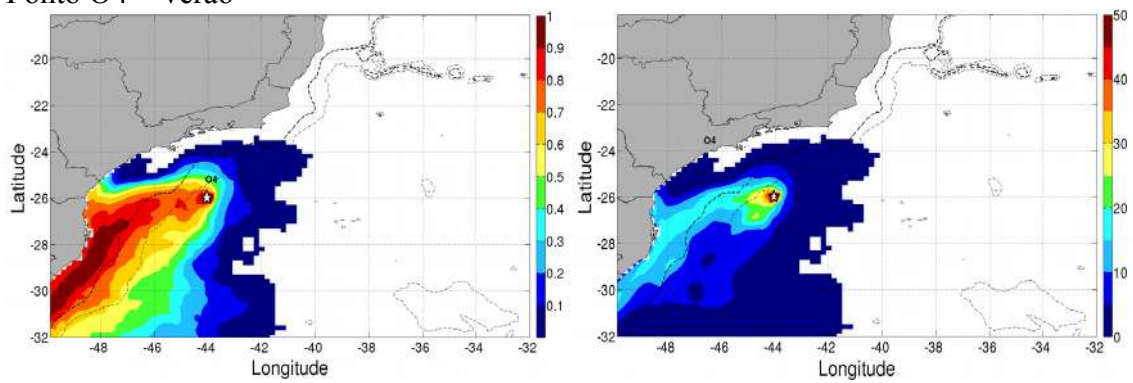
Ponto O3 – Verão



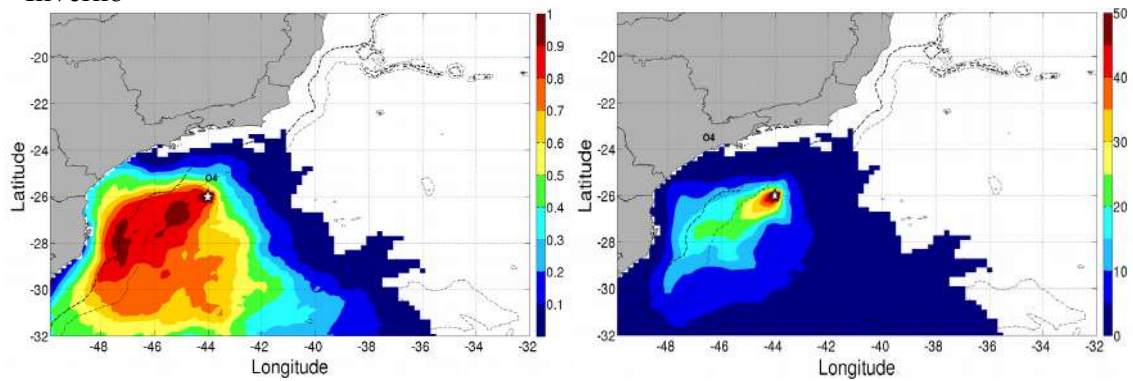
- Inverno



Ponto O4 – Verão

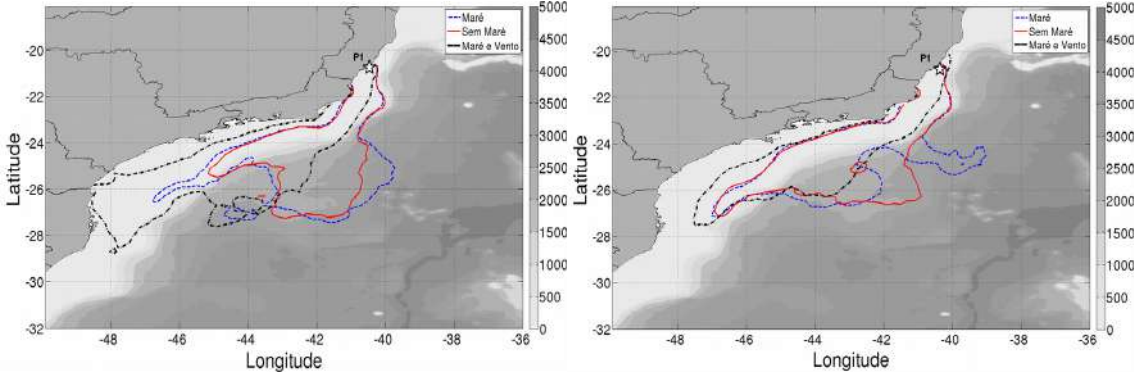


- Inverno

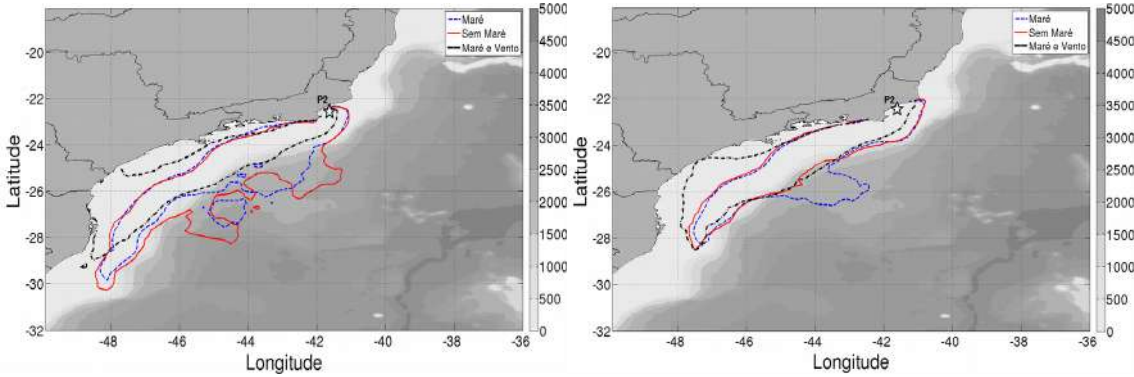


APÊNDICE 4 – Figuras com contornos de 80% de probabilidade dos três Experimentos.

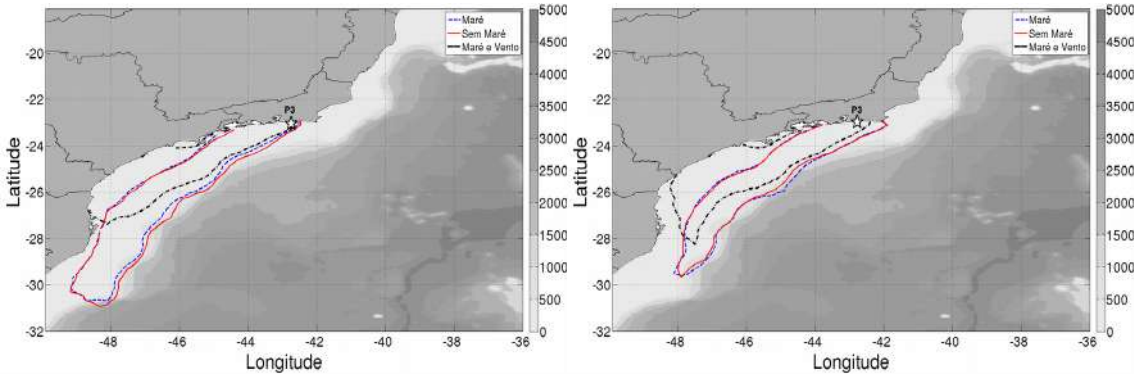
Ponto P1 – Verão e Inverno



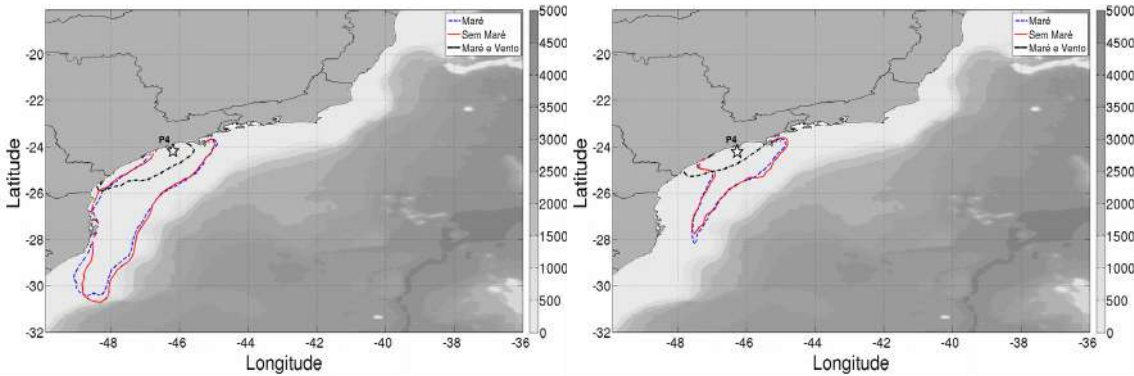
Ponto P2 – Verão e Inverno



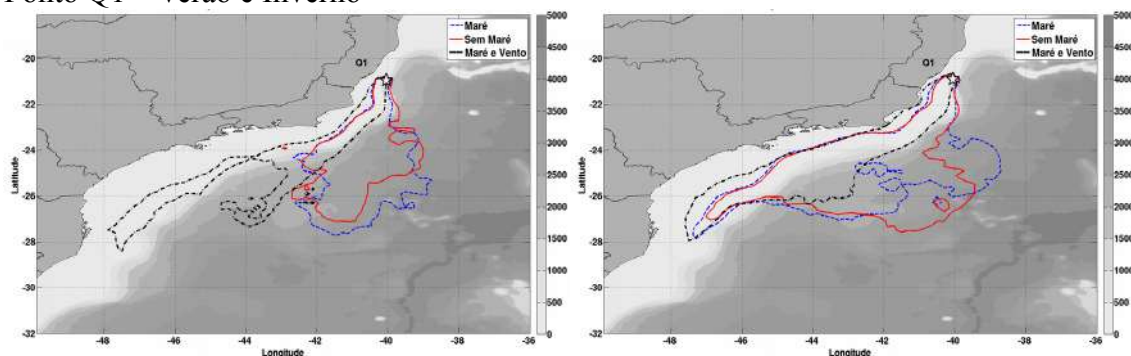
Ponto P3 – Verão e Inverno



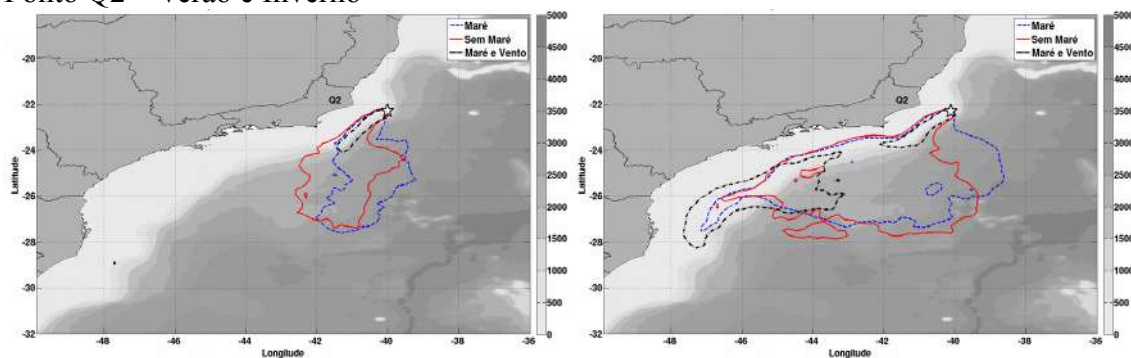
Ponto P4 – Verão e Inverno



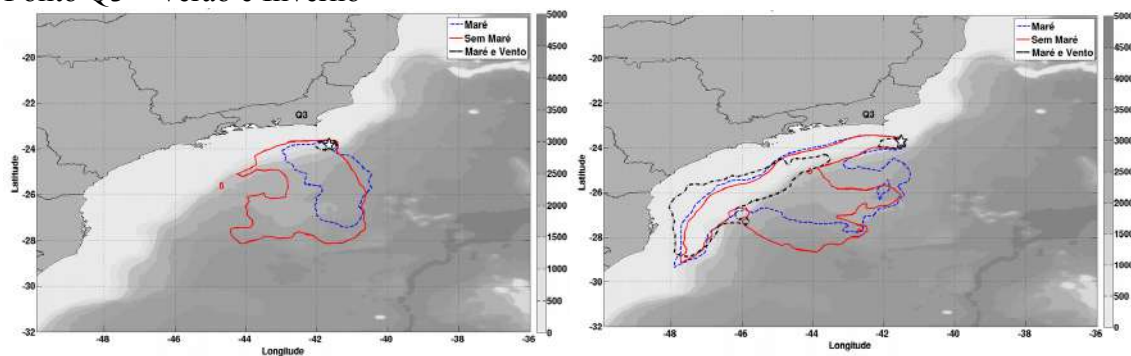
Ponto Q1 – Verão e Inverno



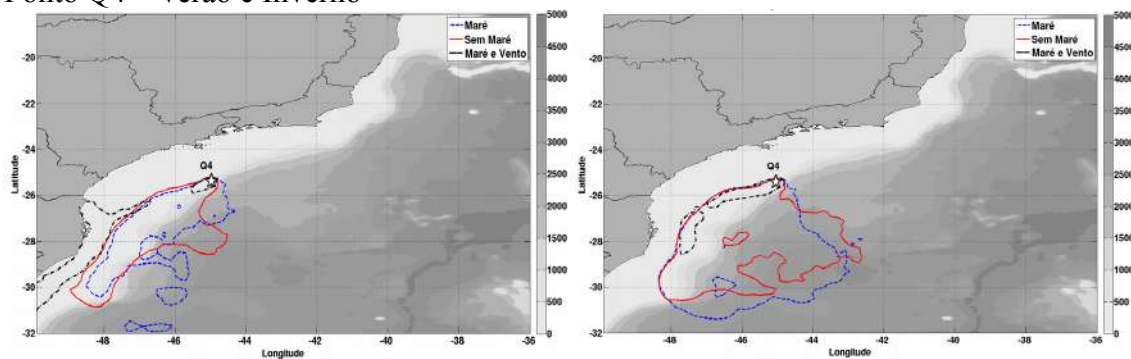
Ponto Q2 – Verão e Inverno



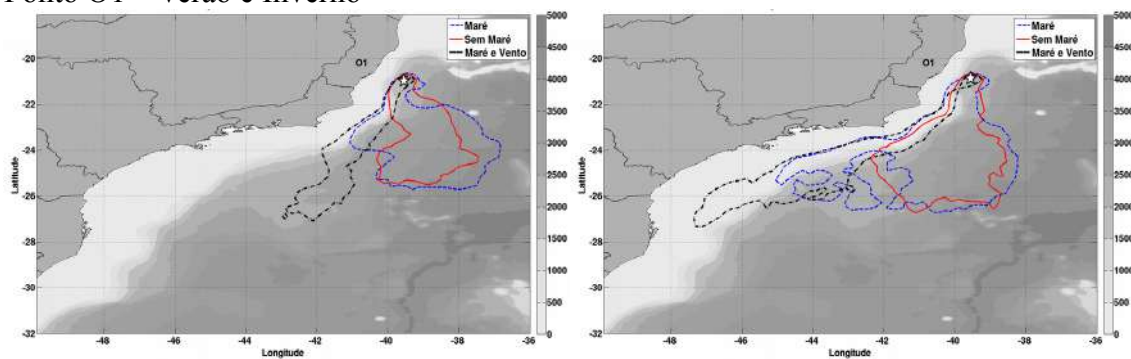
Ponto Q3 – Verão e Inverno



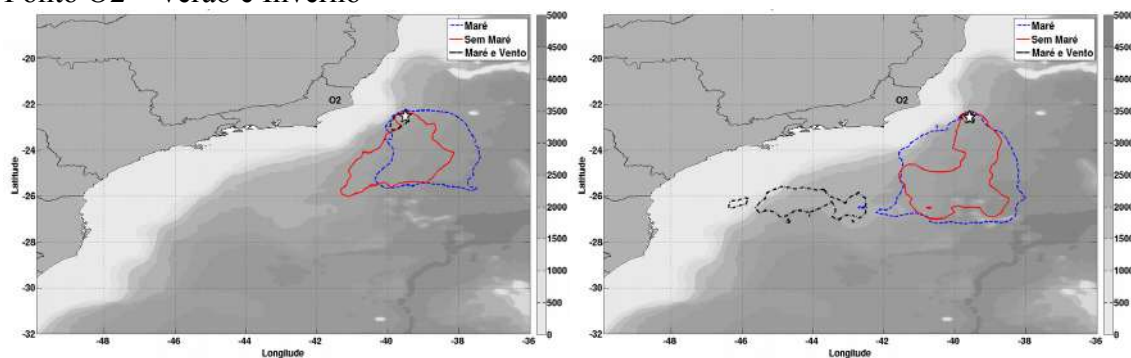
Ponto Q4 – Verão e Inverno



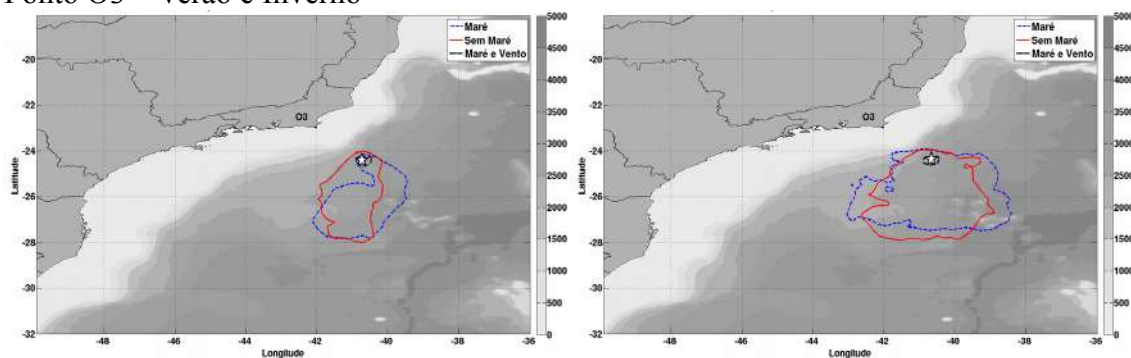
Ponto O1 – Verão e Inverno



Ponto O2 – Verão e Inverno



Ponto O3 – Verão e Inverno



Ponto O4 – Verão e Inverno

