

Kayo Cezar Freitas Soares

*Estudo da Contribuição da Variabilidade de
Mesoescala no Transporte, Transformação e
Destino Final de um Derrame de Óleo na
Bacia de Santos*

Rio Grande

2012

Kayo Cezar Freitas Soares

*Estudo da Contribuição da Variabilidade de
Mesoescala no Transporte, Transformação e
Destino Final de um Derrame de Óleo na
Bacia de Santos*

Dissertação submetida à Comissão de Pós
Graduação em Oceanografia Física Química
e Geológica da Universidade Federal do Rio
Grande para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Ivan Dias Soares

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA- IO FURG

Rio Grande

2012

Dissertação de mestrado sob o título “*Estudo da Contribuição da Variabilidade de Mesoescala no Transporte, Transformação e Destino Final de um Derrame de Óleo na Baía de Santos*”, defendida por Kayo Cezar Freitas Soares e aprovada em agosto de 2012, em Rio Grande, estado do Rio Grande do Sul, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Ivan Dias Soares
Orientador
Associação Atlantis

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo
Universidade Federal do Rio Grande

"De todas as coisas seguras,
a mais segura é a dúvida."

Bertolt Brecht

Agradecimentos

Nesta etapa do trabalho a parte mais prazerosa é fazer a dedicatória. Prazerosa e difícil, pois o medo de cometer a injustiça de esquecer alguém é companheiro fiel. Vamos tentar agradecer a todos, nesta minha jornada.

Agradeço a meus pais, pelo carinho, exemplo e dedicação na criação minha e de minha irmã. Meus princípios éticos e minha moral estão alicerçados nestes dois. Vocês são meus primeiros e maiores mestres. Mãe o afastamento (físico) de seu filho nestes 7 anos não foi em vão. Pai seu exemplo inspira. Te observo e tomo minhas decisões pensando sempre em como você agiria na mesma situação.

Agradeço também a minha irmã, figura doce, mas não frágil, forte porém delicada, dura porém justa. Sempre estarei pronto para te ajudar no que for preciso, você disse que sou seu orgulho, eu que morro de orgulho em ver o ser humano que você se transformou.

Agradeço a minha namorada, pelo carinho, atenção e paciência. Eu te avisei! Não sou fácil de conviver, mas você lidou sempre com muita doçura com minhas imperfeições e incompletudes. Tem um chavão que diz: não quero alguém que me complete, quero alguém que me transborde. É chavão mas se encaixa bem nesta situação, você me transborda.

Ao meu orientador, Ivan Soares, por ter embarcado nesta orientação mesmo em momento de mudanças profissionais. Te agradeço meu mestre, pela atenção e pelos ensinamentos científicos e de vida. Obrigado pela amizade e respeito.

Agradeço a Banca por ter aceitado participar do processo de correção deste trabalho, Renato David Ghisolfi e José Luiz Lima de Azevedo, contamos com a colaboração de vocês para enriquecer este trabalho.

Ao Renato Ghisolfi, por ter nos cedido a licença do OSCAR e assim viabilizado este estudo.

Ao Fernando Magalhães por ter cedido as bases hidrodinâmicas de sua dissertação de mestrado.

Agradeço a meus eternos irmãos da Republica Pão de Queijo, finada em Big River,

mas presente sempre nas nossas lembranças e história.

Aos velhos amigos de Viçosa, aquele amplexo. Poucos, porém seletos.

Aos amigos da Confraria do Mengão, obrigado pela diversão.

A Atlantis que me liberou das atividades de funcionário para fazer este mestrado.

Aos amigos e colegas do "finado" LENOC-FURG, Giovanni, Hugo, Igor, Fábio, Eric e Fernando. Pelas discussões científicas e pelo ambiente de trabalho sempre muito agradável.

Agradeço também a todos que de certa forma contribuíram para este trabalho ser concluído.

Resumo

Com o objetivo de estudar os efeitos da variabilidade de mesoescala nos processos de transporte e transformação do óleo na Bacia de Santos, foi implementado para a região um sistema de modelagens. Este sistema contempla o modelo hidrodinâmico ROMS (*Regional Ocean Model System*) e o modelo de dispersão e transformação de óleo, OSCAR (*Oil Spill Contingence and Response*). O ROMS foi utilizado para fornecer as bases hidrodinâmicas que funcionaram como forçante para o OSCAR. Foram geradas duas bases hidrodinâmicas, sendo a primeira com fluxos de superfície e vento sinóticos (sinótica) e a segunda com fluxos de superfície sinóticos e vento climatológico mensal (climatológica). Assim, na base climatológica os processos de mesoescala estão atenuados em relação à base sinótica. Foram simulados derrames em três pontos na Bacia de Santos: um em água rasa, um no Campo de Merluza e um em água profunda. O OSCAR foi implementado em modo probabilístico, gerando os resultados a partir de 100 simulações, de 30 dias cada, para diferentes períodos: anual, três meses de verão e três meses de inverno. O ano simulado foi 2007. Foram analisados os campos de probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. Os resultados foram diferentes entre as bases usadas. Assim pode-se concluir que o OSCAR é sensível às forçantes hidrodinâmicas utilizadas. Para o campo de Merluza, observou-se que a mancha tende a seguir o fluxo principal da Corrente do Brasil, em direção ao sul. Apesar disso a base sinótica gerou uma maior dispersão do óleo no sentido leste-oeste quando comparada com a base climatológica. Para o Campo de Água Profunda, a conformação dos campos de probabilidade foram significativamente diferentes, o que indicou que esta área é muito sensível à base hidrodinâmica utilizada. Para o Campo de Água Rasa observou-se a maior diferença nas curvas de probabilidade. As diferenças foram tais, que no cenário climatológico existe a probabilidade da mancha se deslocar para norte, paralela à costa, enquanto no sinótico isto não foi observado. Pode-se associar isto a maior complexidade da circulação costeira atuante na região do Campo de Água Rasa. Todos os campos apresentaram variação sazonal entre verão e inverno.

Abstract

In order to study the variability mesoscale effects in transport and transformation oil processes at Bacia de Santos, a modeling system has been implemented for the region. This system comprises the hydrodynamic model ROMS (Regional Ocean Model System), and the oil dispersion and processing model OSCAR (Oil Spill contingency and Response). The ROMS was used to supply the hydrodynamic bases that acted as forcing for OSCAR. Two hydrodynamic bases were created, the first with surface flows and synoptic wind (synoptic) and the second with synoptic surface flows and monthly climatological wind (climatological). Thus, at the climatological base, the mesoscale processes are attenuated relative to synoptic base. Oil spills were simulated at three points at Bacia de Santos: in shallow water, in Merluza field and the third, in deep water. The OSCAR was implemented in probabilistic way, generating results from 100 simulations of 30 days each, for different periods: annual, three months in summer and three months in winter. The year considered for the simulation was 2007. The probability fields of surface oil occurrence was analyzed. The results were different depending on the base considered. So the conclusion is that the OSCAR is sensible to hydrodynamic forcings used. For Merluza field, it was observed that the stain tends to follow the main stream of the Brazil Current, heading south. Nevertheless the synoptic basis generated a higher oil dispersion in the east-west direction compared to the climatological basis. For the Deepwater Field, the arrangement of probability fields were significantly different, which indicated that this area is very sensible to the hydrodynamic base used. The Shallow Water Field showed the largest difference in probability curves. The differences were such that on climatological scenario there is a probability of the stain move north, parallel to the coast, while in the synoptic it was not observed. This can be associated to greater complexity of active coastal circulation that acts in the Shallow Water Field region. All fields showed seasonal variation between summer and winter.

Sumário

Lista de Figuras	p. vii
Lista de Tabelas	p. ix
1 Introdução	p. 10
1.1 Motivação e Antecedentes	p. 14
1.1.1 Modelagem de óleo	p. 15
1.2 Objetivos	p. 27
1.3 Justificativa	p. 28
1.4 Processos do Petróleo no Mar	p. 34
1.4.1 Processos de Transporte	p. 34
1.4.1.1 Advecção	p. 34
1.4.1.2 Espalhamento	p. 36
1.4.2 Processos de Transformação	p. 37
1.4.2.1 Evaporação	p. 37
1.4.2.2 Dissolução	p. 39
1.4.2.3 Dispersão Natural	p. 39
1.4.2.4 Emulsificação	p. 40
1.4.2.5 Sedimentação	p. 41
1.5 Descrição da Área	p. 43
1.5.1 Bacia de Santos	p. 43
1.5.2 Aspectos Oceanográficos	p. 45

1.5.2.1	Padrão de circulação de Larga Escala	p. 45
1.5.2.2	Padrão de circulação de Mesoescala	p. 50
2	Metodologia	p. 56
2.1	Modelos numéricos	p. 56
2.1.1	O modelo OSCAR (Oil Spill Contingency And Response)	p. 56
2.1.2	O modelo ROMS (Regional Ocean Model System)	p. 61
2.2	As bases hidrodinâmicas e a importação dos dados para o OSCAR	p. 62
2.3	Parâmetros e premissas das simulações de derrame de óleo com o modelo OSCAR	p. 67
2.4	Estratégia de modelagem adotada	p. 69
3	Resultados	p. 74
3.1	Interpolação das bases hidrodinâmicas sinótica e climatológica	p. 74
3.2	Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície	p. 77
3.2.1	Simulações período anual	p. 77
3.2.1.1	Campo de Merluza	p. 77
3.2.1.2	Campo de Água Profunda	p. 77
3.2.1.3	Campo de Água Rasa	p. 78
3.2.2	Simulações período de inverno	p. 79
3.2.2.1	Campo de Merluza	p. 79
3.2.2.2	Campo de Água Profunda	p. 79
3.2.2.3	Campo de Água Rasa	p. 80
3.2.3	Simulações período de verão	p. 80
3.2.3.1	Campo de Merluza	p. 81
3.2.3.2	Campo de Água Profunda	p. 81
3.2.3.3	Campo de Água Rasa	p. 82
3.3	Resultados probabilísticos na secção de 26° S para o Campo de Merluza	p. 83

4	Discussão	p. 84
4.1	Comparação entre as simulações climatológicas e sinóticas	p. 84
4.1.1	Campo de Merluza	p. 84
4.1.2	Campo de Água Profunda	p. 86
4.1.3	Campo de Água Rasa	p. 88
4.2	Comparação entre as simulações anuais, inverno e verão	p. 89
4.2.1	Campo de Merluza	p. 89
4.2.2	Campo de Água Profunda	p. 90
4.2.3	Campo de Água Rasa	p. 91
4.3	Comparação entre os Campos de Merluza, Água Rasa e Água Profunda	p. 93
4.3.1	Climatológicas	p. 93
4.3.2	Sinóticas	p. 94
4.4	Secção 26° S	p. 95
5	Conclusões	p. 97
5.1	Trabalhos Futuros	p. 99
	Referências	p. 100

Lista de Figuras

1	Carta SAO Bacia de Santos	p. 12
2	Polígono Pré-Sal	p. 28
3	Número de grandes acidentes	p. 31
4	Quantidade de óleo derramado	p. 32
5	Bacia de Santos	p. 43
6	Campos de Exploração na Bacia de Santos	p. 44
7	Esquema de correntes superficiais do Atlântico Sul	p. 46
8	Representação esquemática da hipótese de Stommel	p. 47
9	Diagrama T-S Corrente do Brasil	p. 48
10	Padrão de escoamento larga escala costa brasileira	p. 50
11	Vórtice da Corrente do Brasil obtido por análise dinâmica de dados hidrográficos. Retirado de Signorini (1978)	p. 51
12	Imagens da Temperatura da Superfície do Mar - AVHRR - Região Sudeste do Brasil:	p. 52
13	Resultados dos experimentos numéricos de Calado (2001)	p. 54
14	Onda de vorticidade baroclínica na Bacia de Santos	p. 55
15	Fluxograma de processamento do modelo OSCAR.	p. 60
16	Batimetria utilizada no modelo ROMS	p. 63
17	Campo de energia cinética média para os experimentos sinótico e climatológico	p. 64
18	Campo de energia cinética turbulenta para os experimentos sinótico e climatológico	p. 65

19	Grade numérica utilizada no modelo OSCAR para a realização das simulações	p. 66
20	Batimetria usada no modelo OSCAR.	p. 69
21	Base Hidrodinâmica importada para OSCAR	p. 76
22	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Merluza - Anual	p. 77
23	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Água Profunda - Anual	p. 78
24	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Água Rasa - Anual . .	p. 78
25	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Merluza - Inverno . . .	p. 79
26	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Água Profunda - Inverno	p. 80
27	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Água Rasa - Inverno .	p. 80
28	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Merluza - Verão	p. 81
29	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Água Profunda - Verão	p. 82
30	Probabilidade ocorrência de óleo na superfície - Água Rasa - Verão . .	p. 82

Lista de Tabelas

1	Parâmetros ambientais da simulação	p. 68
2	Características e localizações dos pontos simulados	p. 70
3	Características do óleo MLDZ-3D (Campo de Merluza)	p. 70
4	Cenários de simulação	p. 71
5	Resultados probabilísticos secção 26° S	p. 83

1 *Introdução*

O petróleo é a principal fonte energética do mundo, sendo responsável pela manutenção e desenvolvimento de muitas atividades humanas. Devido à grande demanda, o petróleo é normalmente estocado e transportado em grandes quantidades. Assim, operações de transporte, transferência e extração envolvem um potencial risco de derramamento. As áreas costeiras são as mais sensíveis à poluição pois recebem aportes de diversas fontes difusas (SILVA, 1996).

Os grandes derrames de óleo causados por acidentes com petroleiros, ou por vazamentos em instalações *offshore* atraem a atenção de toda a sociedade e da mídia. Estes acidentes, normalmente de grande porte, geram contaminação aguda, a qual consiste no lançamento isolado e pontual de um contaminante no ambiente. Já a contaminação crônica é a introdução frequente de substâncias nocivas e tóxicas ao ambiente, mesmo que em pequenas quantidades. Essas perturbações persistentes e continuadas tendem a provocar efeitos pronunciados e prolongados nas comunidades biológicas, principalmente em se tratando de substâncias químicas (ODUM, 1983). Um episódio de contaminação aguda pode se dar também em locais contaminados cronicamente, como já ocorreu na Baía de Guanabara (RJ) e no Estuário de Santos (SP). Além dos impactos ambientais notórios, esses tipos de acidente geram prejuízos diversos e abrangentes, como danos econômicos à indústria pesqueira ou a qualquer outra que utilize recursos marinhos como matéria-prima e também, a inutilização de regiões turísticas.

A contaminação marinha por hidrocarbonetos do petróleo é um fator preocupante. Por ser um poluente oriundo de diversas fontes, em muitos casos difusas, é difícil a quantificação e o gerenciamento do óleo despejado no mar. Isso aumenta a importância dos estudos sobre este assunto e amplia o embate entre preservação ecológica e desenvolvimento econômico presente na indústria petrolífera.

A consequência, ou impacto, causado por um derramamento de óleo é função de um grande número de fatores, como o volume e o tipo de óleo derramado por uma embarcação ou plataforma, a eficiência da resposta ao derrame e a proximidade de áreas ambientais ou economicamente sensíveis. A probabilidade de um derramamento de óleo está condicionada a fatores tais como: a densidade de tráfego de embarcações, condições do tempo e do mar (agitação marinha, ventos, etc), perigos navegacionais, visibilidade, profundidade e tipo de fundo marinho. Assim sendo pode-se definir o risco de derrame a partir da função definida por O'Hagan (2011):

$$Risco = Consequência \times Probabilidade \quad (1.1)$$

A Bacia de Santos é hoje uma das principais bacias produtoras do Brasil, tendo um potencial imenso de aumento de sua produção com a descoberta de novos campos. A produção desta bacia pode chegar a 1 milhão de barris por dia, o que representa, de acordo com a Petrobras (www.petrobras.com.br), pouco mais da metade de toda a produção atual da estatal de 1,9 milhão de barris ao dia, apenas com petróleo leve, que é o mais valorizado no mercado internacional. Considerando somente o campo de Tupi, o potencial de exploração de gás é de 33 milhões de metros cúbicos diários, mais do que prevê o contrato de importação da Bolívia. Dados de produção informados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), (FRANKE, 2004), mostram que, em apenas dois anos, essa Bacia passou de "nova fronteira de exploração" a "grande potencial de exploração", tanto em águas profundas como em águas rasas.

Com essa expansão repentina, novas preocupações têm surgido em relação ao vazamento de óleo durante essas explorações. Sendo o litoral da Bacia de Santos densamente povoado, a possibilidade de as manchas de óleo atingirem a costa pode vir a gerar danos catastróficos, já que o adensamento aumenta a diversidade dos recursos socioeconômicos associados, conferindo uma alta complexidade no padrão de ocupação da região (GHERARDI et al., 2008). Um exemplo desta complexidade pode ser observado na carta SAO (Sensibilidade Ambiental ao Óleo) da Bacia de Santos (Figura 1).

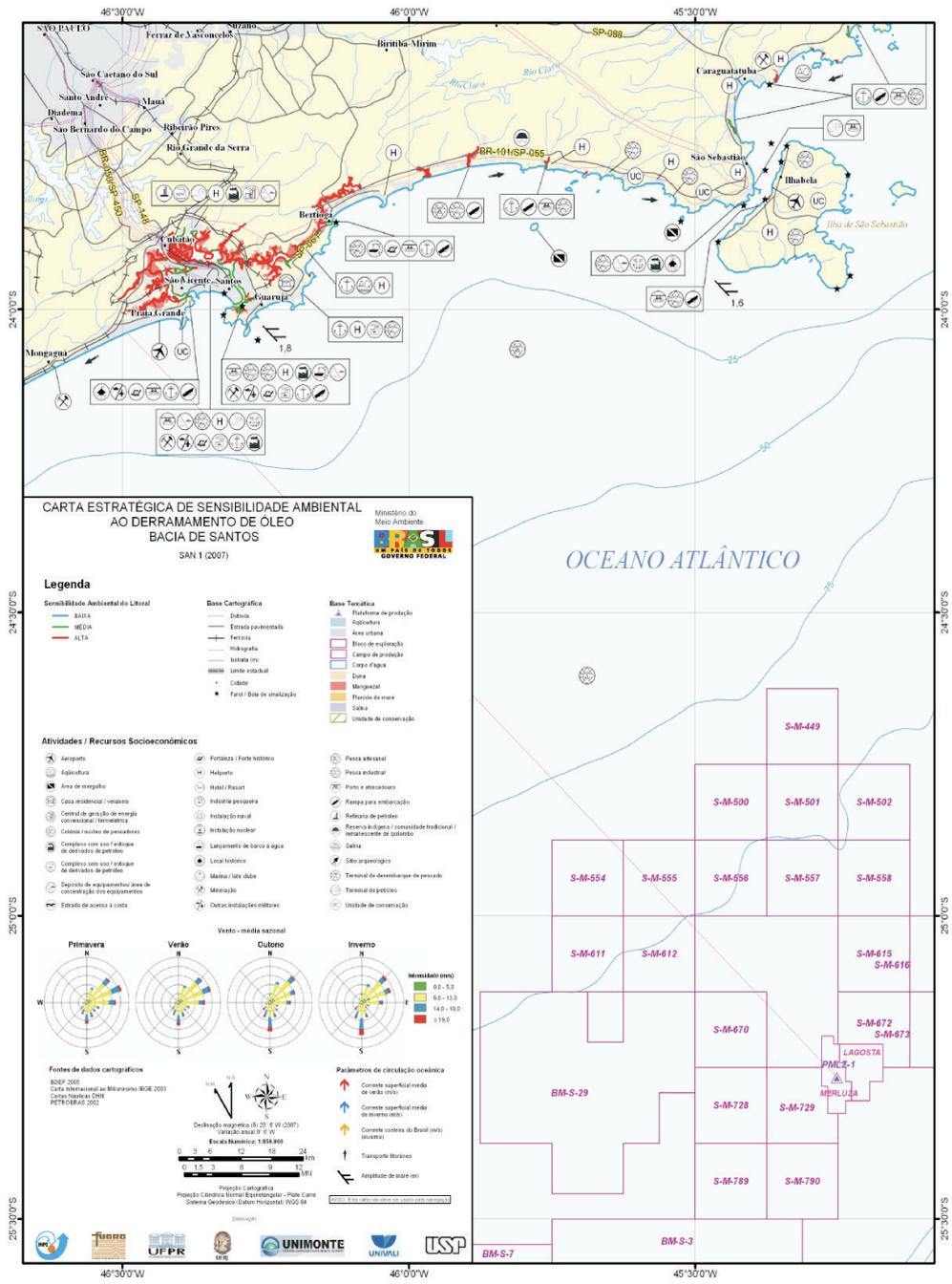


Figura 1: Detalhe da carta de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (SAO) estratégica da Bacia de Santos. Ela indica as atividades e recursos socioeconômico encontrados na região, com centro entre Ilha Bela e Santos, no litoral de São Paulo. Fonte: GHERARDI et al., 2008

A região de estudo e a necessidade de preservação de recursos econômicos e ambientais torna necessária a disponibilidade de um sistema rápido, seguro e efetivo para combate aos acidentes que resultam em derrame de óleo no mar. Este sistema deve ser embasado em estudos detalhados sobre previsão, comportamento e destino do óleo, bem como, deve evitar que áreas de interesse ecológico, turístico e comercial sejam atingidas pelo óleo derramado.

Uma ferramenta de grande uso e que permite tal previsão é composta pela utilização de modelos hidrodinâmicos e de cálculo da deriva de óleo, ambos funcionando de forma acoplada e operacional. Com base em dados de vento, maré, temperatura e salinidade os modelos hidrodinâmicos podem fornecer previsões da circulação local. Estas bases hidrodinâmicas, junto a dados de ventos, são utilizadas como forçantes para modelos que fazem previsão da dispersão de manchas de óleo no ambiente marinho. O objetivo principal deste sistema é facilitar a elaboração de um plano de combate e recolhimento do óleo derramado minimizando os impactos.

Os resultados anteriores de Lemos et al. (2009) e Sebastiao & Soares (1995) mostram que a qualidade dos dados hidrodinâmicos usados no modelo de óleo é importante, uma vez que é um fator, muitas vezes, determinante nas simulações da trajetória e do destino final do óleo. Dentro deste contexto se insere o presente trabalho. Pretende-se demonstrar que os resultados oriundos de modelos de dispersão e transformação de óleo no mar podem ser bastante diferentes de acordo com as bases hidrodinâmicas usadas para forçar a advecção do óleo. Sendo assim, foram feitas simulações utilizando duas diferentes bases hidrodinâmicas, as quais foram forçadas por ventos com diferentes variabilidades temporais. A primeira usou vento sinótico e a segunda usou uma climatologia para representar o campo de ventos.

A organização se dará da seguinte forma : ainda neste capítulo Introdução, temos o sub-capítulo 1.1 que tratará das motivações e dos antecedentes da modelagem de processos oceanográficos, com ênfase na modelagem de óleo; no 1.2 têm-se os objetivos, gerais e específicos; no 1.3 se discute as justificativas para o presente estudo e no 1.4 será feita uma descrição da área de estudo, destacando a Baía de Santos como uma importante área de exploração e produção de petróleo em alto mar no Brasil, bem como os aspectos oceanográficos desta baía, levando em conta as circulações de larga e de mesoescala. O capítulo 2 consiste na metodologia utilizada, onde será feita a descrição dos dois modelos usados: o OSCAR (Oil Spill Contingency and Response) e o ROMS (Regional Ocean Model System). No capítulo 3 serão apresentados os resultados, enquanto no capítulo 4 serão abordadas as discussões a cerca dos resultados e, por fim, as conclusões no capítulo 5.

1.1 Motivação e Antecedentes

Tendo em vista a preocupação com a preservação do meio ambiente aquático, é de suma importância a prevenção e o combate à poluição deste ambiente. Dentro deste contexto, a modelagem numérica surge como uma ferramenta poderosa. A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, bem como a necessidade de se prever possíveis impactos e manter a qualidade da água têm contribuído para um rápido desenvolvimento dos modelos de dispersão de contaminantes químicos (HESLOP; ALLEN, 1993).

Dentro do contexto "modelagem de fenômenos oceanográficos", sabe-se que é muito difícil a criação de um único modelo global que resolva de forma satisfatória os diferentes ambientes presentes nos oceanos globais com suas diferentes escalas temporais e espaciais. Tal fato é reflexo da complexidade dos processos físicos que regem os oceanos, fazendo com que os esforços para o avanço da previsão oceânica se dê em diferentes modelos. Assim sendo, os modelos se dividem em vários grupos, onde cada um irá resolver problemas específicos de formas diferentes. Como exemplo desta divisão, pode-se citar modelos que lidam com as escalas regionais do movimento e as variabilidades de mesoescala presentes nesta, outros que lidam com escalas locais, modelos focados em resolver a camada limite superficial turbulenta e assim focando em estudos nas plataformas continentais, modelos que trabalham com a larga escala e as circulações de bacias oceânicas (DYKE, 1996).

O avanço da computação nas últimas décadas, com destaque no aumento da capacidade de processamento e da possibilidade deste se dar em paralelo, tornou possível o acoplamento de diferentes modelos, tais como: físicos com ecológicos e de dispersão e transformação de contaminantes, além de possibilitar que estes utilizem grades de alta resolução na zona de interesse e apresentem resultados em tempo real de forma operacional. Estes avanços colocam a modelagem em um estágio no qual se pode fazer previsões rápidas do comportamento de ambientes costeiros e assim buscar a preservação da qualidade ambiental (JAMES, 2002; DYKE, 1996; LEHR; SIMECEK-BEATTY, 2000).

Na modelagem numérica de dispersão de contaminantes químicos tem-se como primeira, e mais simples aproximação, o tratamento do contaminante como um traçador passivo, estando este sujeito, portanto, apenas aos processos de advecção e difusão. Esta aproximação traz um grande problema embutido, pois quanto menos conservativa for a

substância de interesse e quanto maiores forem as interações com as fontes e sumidouros locais, mais nos afastamos do comportamento real desta no meio. Assim, apenas algumas substâncias poderão ser tratadas desta forma, por serem conservativas e possuírem fontes e sumidouros bem definidos e “não locais”, como por exemplo os materiais radioativos dissolvidos com meias-vidas longas e particulados muito finos com baixas velocidades de deposição (SOUZA, 2003).

1.1.1 Modelagem de óleo

Fazendo-se um resgate histórico, deve-se passar pelos primeiros esforços em modelar o comportamento de manchas de óleo em ambientes marinhos, e neste contexto os trabalhos pioneiros de Fay e Hoult são importantes. Porém, nestes trabalhos os autores se ativeram apenas ao processo de espalhamento do óleo sob condições específicas como espalhamento em água totalmente calma, em escala temporal pequena e com o balanço de força dividindo o espalhamento em somente duas dimensões. Sendo assim, os modelos de primeira geração, que embasavam seus cálculos nas formulações de Fay, apresentam limitações.

A equação (1.2) descreve o espalhamento de óleo em sua primeira fase, onde a espessura da mancha de óleo é suficientemente pequena para que a transição entre os espalhamentos gravitacional e viscoso ocorra (FAY, 1969). Os trabalhos de Fay foram importantes para a compreensão dos processos do óleo no mar, porém ao se observar vazamentos reais de óleo, nota-se que a advecção turbulenta e as correntes são mais relevantes que processos como o espalhamento. As unidades da equação (1.2) estão de acordo com o sistema internacional de unidades.

$$2\pi R \left[\frac{1}{2} \rho_0 g h^2 \Delta_w \right] \alpha \rho_0 \pi R^2 h \left(\frac{R}{2t^2} \right) \quad (1.2)$$

Onde:

R = Raio da mancha

h = Espessura da mancha

ρ_0 = Densidade do óleo

Δ_w = Diferença relativa entre as densidades do óleo e da água

g = Aceleração da Gravidade

t = Tempo desde o derrame

Tendo em vista esta constatação, deve-se destacar os esforços de Hoult (1972). Este autor formulou em seu trabalho a importância da advecção para o espalhamento do óleo, dividindo o espalhamento em dois termos. No primeiro o espalhamento é oriundo da advecção causada por correntes oceânicas e vento, e no segundo ele é fruto da tendência natural do óleo em se espalhar. Dentro do seu trabalho Hoult reformulou a equação de Fay & Hoult (1971) e Fay (1969).

Murray (1972) analisou diversas manchas de óleo *in situ* de um mesmo acidente e conseguiu prever a geometria e a área das manchas. Para tal, considerou apenas correntes, difusão horizontal turbulenta e a taxa de derrame. A evaporação e o espalhamento foram desprezados, e mesmo assim foram obtidos resultados satisfatórios.

Uma forma de modelagem que foi bastante usada é a que considera o cálculo do transporte da mancha como sendo gerado por um fator de 3,5% da velocidade do vento. Esta aproximação deve ser usada para águas com pouca ação de onda e velocidade de vento baixa (REED et al., 1999). Posteriormente foram introduzidos a estes modelos correntes locais geradas pelas principais forçantes atuantes na região. Estas podem ser correntes residuais de maré ou correntes de Ekman. Apesar destes modelos serem bons para estimar os destinos finais das manchas de óleo, eles superestimam o volume da mancha, pois não incluem as taxas de decaimento e a remoção do óleo gerada por evaporação, sedimentação e dispersão (ALVES, 2006).

O óleo apresenta características físicas e químicas que devem ser consideradas nos modelos que pretendem simular o comportamento desta substância no meio marinho. De acordo com o tipo de óleo, tem-se características específicas e diferentes entre si. O tipo de óleo derramado é muito importante, uma vez que depende disso algumas propriedades tais como: viscosidade, volatilidade e densidade. Estas informações são de suma importância para um modelo de óleo, uma vez que seus algoritmos devem resolver estas taxas de transformação do óleo respeitando as peculiaridades de cada tipo. Estas variações geram

alterações nas taxas de espalhamento, dispersão e evaporação do óleo na coluna d'água (JAMES, 2002).

Em zonas muito costeiras, a simples consideração das correntes de maré e de Ekman não é suficiente para representar a circulação, a qual se torna mais complexa devido à presença da costa próxima ao derrame. Nesses casos, a circulação local passa a ser representada por fenômenos que abrangem a interação não linear entre as forçantes, sendo necessária a aplicação de métodos mais robustos para uma boa representação da hidrodinâmica local (KULLENBERG, 1982).

A evolução da computação e dos modelos hidrodinâmicos tornou possível uma boa representação das correntes hidrodinâmicas, resolvendo suas principais forçantes e as interações lineares e não lineares dela, inclusive em regiões mais costeiras. Além disso, os modelos de advecção estão sendo implementados junto aos modelos de intemperismo do óleo, o que permite simular não apenas o destino final do óleo mas também seu balanço de massa e conseqüentemente obter resultados mais realísticos. A grande maioria das simulações de manchas de óleo é baseada em modelos lagrangianos de partículas. Os modelos de partículas são forçados por ventos e por velocidades de correntes, que por sua vez são calculadas por modelos hidrodinâmicos eulerianos.

Uma forma mais adequada para a resolução dos modelos consiste em adicionar velocidades randômicas para a solução da dispersão turbulenta de menor escala do óleo (HUNTER et al., 1993). Este cálculo normalmente leva em conta o coeficiente de dispersão turbulenta usado no modelo hidrodinâmico. Esta técnica, utilizada em diversos trabalhos, faz com que as partículas fiquem mais dispersas. Proctor et al. (1994) utilizaram esta técnica para a modelagem dos efeitos da maré no arraste de uma mancha de óleo no Golfo da Arábia. Zhang et al. (1998) também a utilizaram para a simulação de um vazamento de óleo costeiro, introduzindo também pesos gaussianos. Korotenko et al. (2000), Korotenko et al. (2004) e Korotenko & Mamedov (2002) simularam derrames de óleo contínuos e oriundos da perda de controle do poço, também conhecido como *blowout*, no sul do Mar Cáspio utilizando a técnica de introdução de velocidades randômicas. Os modelos mais utilizados pela indústria do petróleo não têm código livre. Normalmente compra-se uma licença de uso do modelo, ou ainda, eles podem ser de uso exclusivo da empresa que o desenvolveu.

No Brasil, os modelos mais usados são o OSCAR e o OILMAP, este segundo de uso exclusivo da ASA (*Applied Science Associates*). Existem os modelos mais simples, também chamados de modelos de respostas rápidas, que são usados logo após acidentes e utilizam apenas dados de vento e corrente para simular o destino final da mancha. Por apresentarem algoritmos mais simples, são muito úteis no momento de acidentes em que a tomada de decisão rápida é crucial para minimizar os danos ambientais, econômicos e sociais, como nos derrames de óleo no mar.

A maioria dos modelos mais completos pode realizar simulações em modos determinísticos e probabilísticos. As simulações probabilísticas são geradas a partir de várias simulações determinísticas. A compilação dos resultados determinísticos gera campos de probabilidade que, por sua vez, podem ser escolhidos pelo usuário. Este modo de simulação é adequado para análise de sazonalidade, uma vez que as simulações são iniciadas aleatoriamente dentro do período de interesse da modelagem, fazendo com que diferentes condições dos dados de entrada (corrente e vento) sejam consideradas.

O módulo determinístico geralmente é usado para analisar um período específico de interesse, que pode ser um cenário com forçantes extremas ou um cenário probabilístico que resultou em uma maior probabilidade de ocorrência de óleo superficial em uma área de preservação ambiental. No modelo OSCAR é possível incorporar estratégias de respostas e contingências nas simulações em modo determinístico.

Após a descrição histórica da evolução da modelagem de óleo, das melhorias realizadas na previsão do comportamento desta substância no mar e das melhorias nos códigos dos modelos, será abordada a aplicação de alguns modelos em diferentes regiões do Brasil e do mundo. Estes modelos são: MOHID, ADIOS, GNOME, OILMAP e OSCAR.

O MOHID é uma modelo criado pelo Instituto Superior Técnico (IST) de Portugal e é composto por uma série de módulos que o dividem em MOHID água e MOHID terra. O MOHID água apresenta módulos capazes de fornecer resultados 2D e 3D da hidrodinâmica, além de simulações de dispersão de traçadores lagrangianos, qualidade da água e transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos) e.g. (LEITAO et al., 2001). Todos estes módulos apresentam a particularidade de poderem ser utilizados integrados nos códigos MOHID2D ou MOHID3D ou trabalharem isoladamente, utilizando neste caso valores de

correntes fornecidos por outros meios, como por exemplo, dados coletados *in situ*.

A trajetória do óleo no mar é calculada com base num modelo lagrangiano, assumindo que o óleo pode ser representado por um conjunto de várias partículas que se deslocam por advecção, difusão turbulenta e espalhamento. Assim, o sistema desenvolvido para a previsão e simulação de derrames de óleo baseia-se fundamentalmente em três sub-modelos: um modelo responsável pela evolução de todas as propriedades e processos específicos do petróleo (densidade, velocidades de espalhamento, evaporação, etc.); um modelo hidrodinâmico que calcula o campo de velocidades das correntes induzidas pela maré ou vento nas zonas de interesse; e um modelo lagrangeano que calcula a evolução espacial das partículas de petróleo com base nas velocidades das correntes (calculadas pelo módulo hidrodinâmico), na deriva devido ao vento, no espalhamento do petróleo (determinado no módulo do petróleo) e ainda na velocidade aleatória representativa do transporte difusivo (FERNANDES, 2001b).

O MOHID foi aplicado por Fernandes (2001b) a um acidente ocorrido em Julho de 1989, no Porto de Sines Portugal, envolvendo o petroleiro Marão. Este trabalho mostrou que nos resultados do modelo, a fragmentação da mancha de óleo, bem como a contaminação de uma larga faixa costeira, ficaram próximas aos dados coletados *in situ* durante o derrame em 1989. Contudo, no que diz respeito à advecção, a trajetória das partículas ficou aquém do registado em cerca de 10 km, ao fim de 5 cinco dias. O autor associou esta diferença com o fato do modelo hidrodinâmico ser muito simplificado, o que gerou erros na base hidrodinâmica introduzida no modelo de óleo.

Monteiro et al. (2003) aplicaram o MOHID na costa da Galícia com o intuito de fornecer previsões para um derrame de óleo ocorrido em 2002. A modelagem de óleo estava inserida em um contexto maior, representado por um sistema de monitoramento e observação de correntes e ventos.

Janeiro et al. (2008) aplicaram o MOHID na área estuarina da Lagoa dos Patos com o objetivo de simular um hipotético derrame de óleo nesta região. A mancha de óleo foi advectada por uma base hidrodinâmica validada e gerada pelo MOHID. Os resultados mostraram o deslocamento da mancha de óleo nos primeiros dias, como sendo resultado do equilíbrio entre a descarga de água doce da Lagoa dos Patos e do campo de vento. Em

descargas de água doce maiores que $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, esta forçante domina a dispersão do óleo, enquanto que em descargas menores que este valor, o vento torna-se o fator dominante.

O *Automated Data Inquiry for Oil Spills* (ADIOS) é um modelo de óleo produzido por pesquisadores norte americanos do *National Oceanic and Atmospheric Administration Hazardous Materials Response Division* (NOAA/HAZMAT). Este modelo é muito usado no mundo todo e apresenta um vasto banco de dados com vários tipos de óleo e seus aspectos físicos e químicos (LEHR et al., 1994). Lehr et al. (2002) fizeram uma grande revisão nas equações utilizadas no ADIOS e, segundo estes autores, esta foi a maior melhoria já realizada nos códigos. O modelo é capaz de representar os processos de perda de massa do óleo, de intemperismo (evaporação, espalhamento, entranhamento do óleo na coluna d'água e emulsificação), de transporte gerados por correntes, ventos e ondas, limpeza e remoção artificial do óleo (*cleanup*), além de interagir com a densidade e viscosidade do mesmo, fazendo a transformação destas propriedades do óleo através da interação deste com o meio marinho.

Etkin & Welch (2005) utilizaram o ADIOS como um dos instrumentos de um sistema de medição de custo da resposta, limpeza e remoção de óleo oriundo de um possível derrame de óleo no mar. Estes autores mostraram que o ADIOS foi eficiente para o cálculo deste custo. Este sistema tem o objetivo de fazer o cálculo e a comparação entre o custo e o benefício da resposta de um acidente.

O *General NOAA Oil Modeling Environment* (GNOME) é uma ferramenta desenvolvida pela NOAA para auxiliar as respostas para combater os impactos gerados em acidentes com derrame de óleo no mar. O GNOME fornece os resultados de trajetória de manchas de óleo em diferentes modos: Padrão; SIG (Sistema de Informações Geográficas) e Diagnóstico. O objetivo do sistema GNOME é buscar a melhor solução de resposta ao derrame visando minimizar os impactos (BEEGLE-KRAUSE, 1998).

Mearns et al. (2001) aplicaram o GNOME na região do Golfo de Farallones, região sob influência do corrente da Califórnia, em um derrame de óleo próximo a costa, com o intuito de observar o efeito deste derrame na vida marinha com diferenciação dos grupos biológicos. Os resultados obtidos mostraram que o GNOME foi eficiente na simulação

da dispersão e na transformação de óleo, além de indicar que a região é sensível a um derrame de óleo por apresentar uma alta biodiversidade.

O modelo OILMAP, desenvolvido pela ASA (*Applied Sciences Associates, Inc.*) é um dos modelos mais avançados para o acompanhamento, previsão do deslocamento e transformações químicas de um grande número de tipos de óleo. O OILMAP é um sistema de modelos, baseados em plataforma PC, que pode ser utilizado em Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Relatório de Controle Ambiental (RCA), e ou Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) em qualquer região do mundo (JAYKO; HOWLETT, 1992).

O OILMAP foi estruturado de forma modular onde o usuário pode escolher quais módulos usará em suas simulações, de acordo com seus objetivos. Por ser gerado em ambiente *Windows*[®], existe uma interface gráfica onde o modelador pode acoplar e visualizar os diferentes módulos. O sistema OILMAP inclui um modelo de trajetória e transformações (*“trajectory and fates”*) para o óleo de superfície que prevê o transporte e a degradação do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. As estimativas mostram a localização e a concentração do óleo na superfície versus o tempo. O modelo estima a variação temporal da cobertura de área, espessura da mancha e viscosidade do óleo. O modelo também estima o balanço da massa de óleo ou a quantidade de óleo sobre a superfície do mar, na coluna de água, evaporado, na costa e fora da área de estudo versus o tempo. Os processos de transformações biogeoquímicas no modelo incluem dispersão, evaporação, entranhamento ou arrastamento, dispersão natural ou por suspensão e emulsificação. Em versão opcional, o OILMAP pode também calcular as interações do óleo com a camada de sedimentos e, no balanço de massa, a sedimentação associada a este processo (SOUZA, 2003).

López et al. (2006) realizaram simulações de derrame de óleo na plataforma de Casablanca na Espanha, considerando diferentes condições ambientais e diferentes modelos de transporte e transformação de óleo. São eles: OILMAP, ADIOS, EUROSPILL e GNOME. As taxas de evaporação das partes voláteis do óleo foram calculadas para cada modelo e comparadas com resultados experimentais. Os autores realizaram estas comparações pois a parte evaporada do óleo é muito importante no balanço de massa final de um derrame no mar. Os resultados com o OILMAP, obtidos neste estudo mostraram que o óleo não atingiu a costa e em um período de 54 horas, aproximadamente 39,2% do óleo derramado

evaporou tendo ocorrido um aumento da viscosidade do óleo. Estes resultados foram considerados satisfatórios pelos autores.

O OILMAP foi utilizado como um dos instrumentos para a criação de uma ferramenta de prevenção e combate à derrames de óleo no mar no complexo estuarino de Paranaguá, no Paraná. Este estudo faz parte da dissertação de Souza (2003). O autor usou o POM (*Princeton Ocean Model*) para obtenção dos campos hidrodinâmicos, tendo sido criado ainda um índice que leva em conta o risco de cada área para auxiliar na tomada de decisão em caso de derrame de óleo no mar.

López et al. (2007) usaram o OILMAP para criação de um plano de contingência para derrames de hidrocarbonetos no porto de Ibiza, Ilhas Baleares na Espanha. O intuito do trabalho era fazer uma revisão do plano de contingência já existente para a região. Os autores consideraram o OILMAP adequado para as situações simuladas e destacaram a importância de uma resposta rápida ao derrame para que áreas costeiras e sensíveis fossem preservadas.

O OSCAR é um modelo desenvolvido por pesquisadores noruegueses na SINTEF. Seu objetivo é auxiliar nas tomadas de decisão para criação de estratégias de respostas para derrames de óleo. O OSCAR foi desenvolvido para ser utilizado tanto em derrames de plataformas *offshore* quanto em terminais costeiros, produzindo análises de respostas e contingências (REED et al., 1995). O modelo pode calcular quantitativamente e qualitativamente os impactos ambientais gerados pelo derrame de óleo no ambiente marinho e costeiro.

Reed et al. (1999) utilizaram o OSCAR para avaliar o impacto ambiental em derrames simulados de óleo *offshore* próximos à costa da Namíbia . As simulações foram geradas com óleo leve, derrame de 11.000 barris por dia, durante 10 dias e óleo diesel 150 m^2 em regime instantâneo. Foram utilizadas ações de resposta com recolhimento mecânico e colocação de dispersante. A base hidrodinâmica e os dados de vento e maré foram gerados pela SINTEF considerando as condições da região. Os cenários com óleo diesel mostraram uma dispersão natural deste, sempre com fracas velocidades de ventos, o que fez com que os impactos do diesel fossem pequenos, pois o óleo se dispersa e não chega na costa. Os cenários com óleo leve mostraram que as respostas e as estratégias de recolhimento foram

eficazes e minimizariam os impactos no ambiente.

Aamo & Reed (1997) realizaram testes de sensibilidade no modelo OSCAR. Estes testes estavam inseridos no contexto de calibração e validação do modelo. No total foram realizadas 48 simulações selecionando parâmetros que direta ou indiretamente afetavam a sensibilidade ambiental como espalhamento do óleo, ações de respostas e avaliação dos impactos biológicos. Os resultados indicaram que o parâmetro de espalhamento (K) é chave para o cálculo da área atingida pelo óleo e do balanço final de massa. O número de partículas utilizadas no modelo teve pouca influência no balanço de massa final. Em águas calmas, a eficiência do recolhimento mecânico do óleo teve pouca influência no total recolhido, porém influenciou na taxa de recolhimento. Já em águas mais agitadas e com ventos fortes, o total de óleo recolhido teve forte influência da eficiência do equipamento utilizado. A eficiência da utilização de dispersante ficou fortemente dependente do tempo gasto nas viagens dos helicópteros que levavam estes produtos. As ações de respostas que envolviam barcos foram dependentes do número de partículas utilizadas para simular o óleo, porém as ações que envolviam aviões não sofreram com isso e por último, os efeitos da alteração da concentração limite para gerar efeitos biológicos afetaram apenas os ovos e as larvas de peixe em um intervalo de 0-40 ppb (partes por bilhão) por hora.

Aamo et al. (1998) propuseram um plano de contingência regional usando o OSCAR como ferramenta de planejamento. Este plano foi feito para o Mar do Norte na costa da Noruega. Segundo estes autores um plano de contingência deve conter uma análise comparativa das alternativas de respostas para que se defina qual é a mais apropriada. Isto deve levar em conta a eficiência e o custo de cada alternativa de resposta e, nesta questão, o OSCAR se mostrou um ferramenta importante para tal planejamento.

O OSCAR possibilita ao usuário a avaliação de vários métodos de resposta e de combate ao vazamento de óleo e minimização dos impactos de manchas de óleo em ambientes marinhos e costeiros. Reed et al. (2004) avaliaram a aplicação de dispersantes químicos em manchas de óleo em águas rasas na baía de Matagorda, Texas, e para tal foram simulados diferentes cenários de derramamento. Os resultados mostraram que o modelo obteve êxito em simular a aplicação dos dispersantes mesmo em áreas muito costeiras. Tal resultado é de extrema importante, pois indica que é possível minimizar os impactos em zonas costeiras e estas áreas são muito sensíveis devido à complexidade dos recursos

ambientais presentes.

Outro trabalho que utilizou o OSCAR para a análise de dispersante é o de Daling et al. (2002). Este trabalho se insere dentro de um novo contexto na Noruega, uma vez que as autoridades locais começaram a aceitar e utilizar os dispersantes químicos como uma alternativa para o combate de manchas de óleo no mar. Com estas mudanças, os planos de contingências noruegueses tiveram que ser refinados para a inserção desta alternativa de combate. Isto foi reflexo dos vários trabalhos que abordavam o uso desta substância química para minimizar os impactos causados por possíveis acidentes. Os resultados mostraram que o OSCAR foi muito útil para a avaliação dos cenários pré-derramamento e para a quantificação dos derrames e possíveis danos ao ambiente.

No Brasil existem alguns trabalhos científicos e grupos de pesquisa que buscaram trabalhar com o OSCAR e implementá-lo na zona costeira e oceânica. Dentro deste contexto se destacam os esforços do grupo de pesquisa do LabPosseidon ligado ao Departamento de Oceanografia da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo). Os trabalhos de Lemos (2009) e Lemos et al. (2009) mostraram como o OSCAR é sensível à base hidrodinâmica introduzida como forçante para a advecção da mancha de óleo. No primeiro trabalho, o autor propôs uma zona de exclusão para as atividades de Exploração e Produção de petróleo próxima ao Banco de Abrolhos na Bahia. Já no segundo, os autores avaliaram o efeito das correntes geradas pela maré no espalhamento e transporte do óleo na mesma região.

Baptista et al. (2006) utilizaram o OSCAR para a realização da modelagem do Campo de Merluza. Estes autores simularam situações de verão e inverno para dois pontos de derrame, um na plataforma e outro em um duto próximo a costa. O trabalho foi utilizado no processo de licenciamento ambiental da atividade de exploração e produção do Campo de Merluza. Foram utilizados como forçantes, os dados de vento de reanálise do NCEP/NCAR e o campo de correntes oriundos do POM (*Princeton Ocean Model*). O POM foi integrado para dois períodos, verão e inverno, uma mês para cada. Os autores introduziram como forçante nos contornos laterais da grade do modelo hidrodinâmico dados de temperatura e salinidade obtidos do modelo global OCCAM (*Ocean Circulation and Climate Advanced Model*). A elevação da superfície (η) prescrita nos contornos abertos foi composta pela soma dos níveis médios do OCCAM com a altura de maré, que por

sua vez foi calculada a cada passo de tempo do modelo, a partir das amplitudes e fases obtidas do modelo FES95.2. Os experimentos de verão foram forçados com uma série de ventos horários fornecida pela PETROBRAS. Os experimentos de inverno foram forçados com dados de reanálise obtidos pela SOMAR. Os dados de reanálise apresentam variação espacial, com intervalo de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e temporal de 6 horas, tendo sido interpolados para cada hora. O óleo não atingiu a costa em nenhuma simulação na plataforma. Para as simulações no duto, todos os cenários atingiram a costa.

Pimentel (2007) realizou uma análise das estratégias de resposta ao derramamento de óleo no Campo de Golfinho, localizado próximo à costa do Espírito Santo. A autora utilizou o OSCAR como ferramenta principal e conseguiu, a partir dos resultados, mostrar que a utilização da modelagem computacional foi bastante útil para auxílio na tomada de decisão em relação a diferentes alternativas de contingência a um derramamento de óleo.

Lemos (2009) realizou experimentos com o OSCAR na região do Banco de Abrolhos, para tal ele forçou o modelo com bases hidrodinâmicas geradas no POM e campo de vento do SOMAR Meteorologia produzidos pelo modelo ETA alimentado com dados de reanálise do NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*) com resolução temporal de 6 horas. No POM também foi introduzida esta base de ventos, além das principais componentes harmônicas de maré (M2, S2, N2, K2 e O1) importadas do FES95.2. O campo termohalino inicial foi derivado do modelo global OCCAM. Os resultados de Lemos (2009) mostraram que a exploração de petróleo próxima ao Banco de Abrolhos gera risco de contaminação da área de preservação, sendo necessário portanto a criação de uma área de exclusão para as atividades de P&D.

Soares et al. (2005) implementaram para região da Bacia de Santos um modelo numérico de dispersão de óleo desenvolvido por eles. O modelo de dispersão de óleo foi introduzido no modelo hidrodinâmico POM. Um experimento de um mês (720 horas) foi realizado com o modelo hidrodinâmico, tendo como forçantes a maré, o vento e a Corrente do Brasil. O vento foi forçado na superfície na forma de stress. Utilizou-se um vento variável, com intervalo de amostragem de uma hora. Para a maré, utilizou-se as cinco principais constituintes harmônicas (M2, S2, N2, O1 e K1) cujas amplitudes e fases foram obtidas do modelo global FES95.2, da Universidade de Grenoble, França. A Corrente

do Brasil foi forçada nos contornos abertos da grade através de campos de salinidade e temperatura que reproduzem a componente baroclínica dessa corrente. Os campos de salinidade e temperatura foram obtidos do modelo global OCCAM.

Tendo em vista todo o apresentado, observou-se uma grande evolução na previsão do comportamento de manchas de óleo no mar. Este cenário deve-se às melhorias nos modelos numéricos que pretendem simular este comportamento. Os algoritmos de decaimento foram se aprimorando e os resultados dos modelos ficaram cada vez mais próximos da realidade, tornando a modelagem de óleo uma ferramenta imprescindível para o planejamento de combate a derrames de óleo. Porém, tem-se uma variável muito importante que é introduzida neste modelo para servir de forçante: a base hidrodinâmica e os campos de correntes, que são fatores determinantes para o sucesso de uma modelagem. Assim, analisá-los torna-se a chave para uma boa simulação do comportamento do óleo no mar. Uma representação bem feita do campo de correntes e do campo de ventos, unida a um modelo robusto o suficiente para representar todos os processos do óleo no mar é uma forma adequada de se preservar áreas com potencial de serem contaminadas por possíveis derrames. Neste contexto, o presente trabalho se insere, buscando avaliar bases hidrodinâmicas com diferentes variabilidades e o efeito que estas geram nos resultados de modelos de óleo no que diz respeito ao transporte de manchas.

1.2 Objetivos

Tendo em vista o problema apresentado, esta dissertação tem por objetivo avaliar a contribuição de bases hidrodinâmicas com diferentes variabilidades associadas, no transporte, transformação e destino final de manchas de óleo na Bacia de Santos. De forma clara, os objetivos se dividem da seguinte maneira:

Objetivo Geral:

Estudar o efeito dos processos de mesoescala em derrames de óleo resultantes de eventuais acidentes nas atividades de exploração e produção do pré-sal na Bacia de Santos.

Objetivos Específicos:

- Implementar e consolidar a metodologia de importação dos dados de vento e dados hidrodinâmicos oriundos do modelo ROMS para o modelo OSCAR;
- Avaliar o efeito da sazonalidade no espalhamento e no destino final de manchas de óleo na Bacia de Santos em campos de água rasa, profunda e no Campo de Merluza;
- Avaliar a influência da mesoescala no transporte, no espalhamento e no destino final da mancha de óleo;

1.3 Justificativa

O petróleo é a principal fonte energética do mundo, porém, por ser um recurso não renovável, as descobertas de reservas significativas desta substância despertam o interesse e a atenção da comunidade mundial. No Brasil, foi descoberta, nos últimos anos, uma grande reserva de petróleo na chamada camada pré-sal, que encontra-se no mar em águas profundas e ultra profundas. Diversos poços estão em exploração e já produzem petróleo, principalmente óleo leve, que tem um maior valor no mercado. As áreas de exploração e os respectivos campos encontram-se tanto em águas rasas quanto em águas profundas. A descoberta desta imensa reserva colocou o Brasil em um outro patamar mundial no que diz respeito à reservas e produção de petróleo. O polígono que delimita a área do pré-sal encontra-se na figura 2.

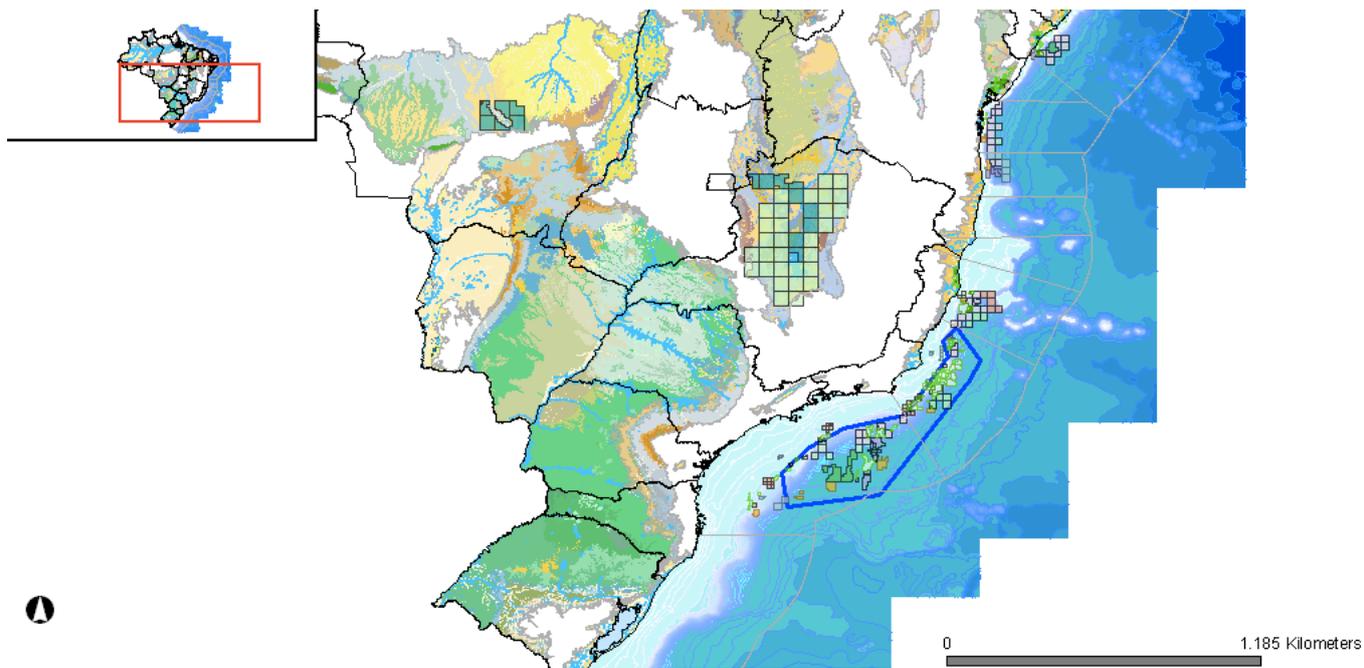


Figura 2: Delimitação do polígono do pré-sal em azul. Fonte: Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis)

A camada do pré-sal estende-se desde o Espírito Santo até Santa Catarina em uma área de aproximadamente 112 mil km^2 . Essa camada tem aproximadamente 800 km de comprimento e, em algumas áreas, 200 km de largura. Esta área propiciará um aumento substancial na produção e exploração de petróleo no mar e segundo Petrobras (2012a), a perspectiva de produção diária em 2017, somente na área do pré-sal, é de 1 milhão de barris. Este aumento de produção gera preocupações com a preservação da qualidade

ambiental e com o risco de acidentes capazes de gerar derrames de óleo no mar.

Os derrames de óleo no mar e a contaminação marinha por hidrocarbonetos são preocupações constantes de pesquisadores e órgãos ambientais no mundo todo. Segundo Clark (2001), metade da produção mundial de petróleo é transportada pelo mar, elevando os riscos de derrames em ambientes marinhos. Além disso, o óleo derramado em terra pode ser transportado até o oceano através da lixiviação. A extensão de um derrame de hidrocarboneto e os efeitos negativos gerados a partir dela podem ser agravados por diversos fatores, tais como: quantidade e toxicidade do produto derramado, condições ambientais (agitação do mar, ventos, etc), época do ano, sensibilidade do local e contingências e resposta adotadas.

O Conselho Nacional de Pesquisa da Academia de Ciência Norte Americana (NRC, 2003) estimou o despejo de óleo no mar em 1,3 milhões de toneladas por ano, podendo variar entre 470 mil toneladas e 8,4 milhões de toneladas no mesmo período.

Os acidentes agudos, que ocorrem em refinarias, navios taques e plataformas, gerando uma grande quantidade de óleo introduzido no mar, não são as principais fontes de contaminação marinha por hidrocarbonetos. No entanto, sua contribuição não deve ser sonogada. Mesmo não sendo constantes e ocorrendo de forma esporádica, estes acidentes introduzem grande quantidade de petróleo no oceano, atingindo áreas sensíveis e sendo transportados para áreas remotas. Neste contexto, os impactos destes derrames podem ser locais e até regionais, uma vez que o óleo pode ser transportado para áreas remotas dependendo de alguns fatores como: tempo de derrame, tipo de óleo derramado e condições meteorológicas e oceanográficas da região.

O trabalho de Banks (2003) mostrou o efeito de um derrame de óleo na produção primária de uma área sensível que é a região das Ilhas de Galápagos no Equador. Os impactos ambientais e econômicos de um derrame de óleo foram observados e relatados em vários trabalhos como Verma et al. (2008) e Baars (2002), dentre outros. Dependendo da sensibilidade do local, o derrame pode ser catastrófico do ponto de vista social, ambiental e econômico, como observado por Irvine et al. (2006), que mostrou como um derrame agudo, de grande proporção pode gerar efeitos duradouros e até crônicos, além de apresentar o local de contaminação oriundo de uma grande mancha de óleo como sendo incerto, pois

esta mancha pode ser levada para locais distantes do ponto de sua introdução no ambiente.

Estes acidentes tendem a chocar a comunidade pois sua extensão e as imagens fortes de seus efeitos, como praias com óleo e animais marinhos sujos de óleo geram preocupação na sociedade. Os efeitos de um derrame são diretamente sentidos pela população que vive nas áreas atingidas pela mancha de óleo. Um derrame de grandes proporções foi observado no Golfo do México em 2010, onde uma plataforma de exploração da BP (*British Petroleum*) explodiu e gerou um derrame que durou mais de três meses com vazão praticamente constante. Este derrame gerou impactos de cunho econômicos e ambiental para região. Dentre os vários trabalhos que acompanharam os impactos deste acidente e avaliaram a evolução temporal da mancha gerada, pode-se citar o de Leifer et al. (2012), que fez uma revisão do estado da arte quanto ao sensoriamento remoto da mancha, e o de Harlow et al. (2011), que propôs uma estratégia para a reparação dos impactos iniciais do derrame.

No Brasil, o derrame do Golfo do México teve impacto, porém não de cunho ambiental e sim político. O IBAMA, a partir da experiência americana, resolveu rever os planos de contingência e os planos de emergência individuais para as plataformas que operam em águas territoriais brasileiras. Nos Estados Unidos, o derrame serviu para rever seus planos de exploração de petróleo no Golfo do México além das estratégias para desastres desta magnitude (BOZEMAN, 2011).

Apesar do acidente no Golfo do México, os grandes derrames de óleo no mar vêm diminuindo, como pode ser observado na figura 3, que mostra os dados de ocorrência de grandes derrames de óleo no mar da *International Tanker Owners Pollution Federation* (ITOPF).

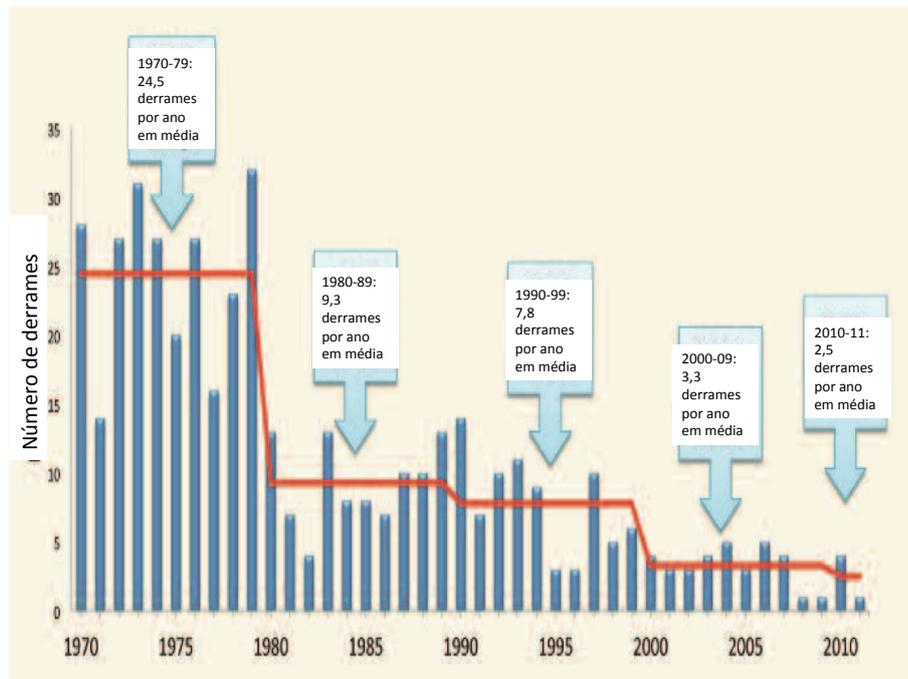


Figura 3: Número de grandes acidentes, que resultaram em derrames de óleo acima de 700 toneladas, de 1970 até 2011. Fonte: ITOPF (2012).

Como se observa nas figuras 3 e 4, a quantidade de grandes acidentes diminuiu significativamente entre as décadas de 1970 e 1980, e também entre 1990 e 2000. Esta diminuição tende a uma estagnação e isto pode ser explicado pelo grande avanço tecnológico e o surgimento de medidas de segurança. Porém, o erro humano é um dos fatores que contribuem para que estes acidentes continuem ocorrendo. O avanço na diminuição do número de derrames e da quantidade de óleo derramado é fruto de uma nova consciência ambiental e econômica, que mostra que o oceano não tem um poder infinito de depuração e que o petróleo é um bem não renovável e que portanto não deve ser desperdiçado. Até os anos 1950, a contaminação por óleo no ambiente marinho era totalmente desconsiderada. Leis sancionando as operações navais que despejavam óleo no mar existiam apenas nos EUA e na Inglaterra (ALVES, 2006).

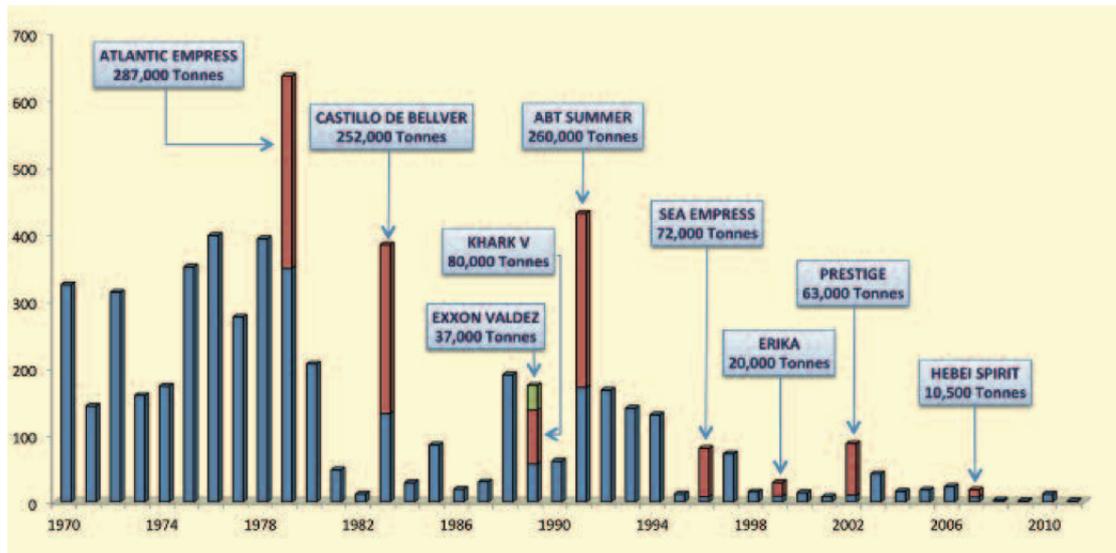


Figura 4: Quantidade de óleo derramado no mar, de 1970 até 2011. Fonte: ITOPF (2012).

No ano 2000 ocorreram dois acidentes com oleodutos da PETROBRAS, sendo um na Baía de Guanabara e outro no Paraná. Estes acidentes geraram uma grande repercussão nacional (MENICONI; BARBANTI, 2002; SILVA et al., 2009) e contribuíram para avanços na segurança das operações e na legislação ambiental nacional. Exemplos disso podem ser evidenciados pela resolução do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) 293, de 12 de dezembro de 2001, que introduziu o conceito de um conteúdo mínimo no Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos ou plataformas, bem como suas respectivas instalações de apoio, além de orientar também a sua elaboração antes da ocorrência desses incidentes (SOUZA, 2003). Posteriormente, a evolução desta resolução resultou na Resolução do CONAMA n° 398 de 11 de Junho de 2008.

Dentro desse contexto, a modelagem surge como uma ferramenta importante e indispensável para o licenciamento de atividades que envolvam risco de derrames de óleo no mar. No PEI a modelagem é utilizada para definir a área de influência indireta da atividade, bem como o risco do óleo atingir áreas críticas. No licenciamento ambiental brasileiro é obrigação do empreendedor apresentar a modelagem de derramamento de óleo para a delimitação da área de influência direta, juntamente com a coleta dos dados primários para a calibração e validação do modelo. Um modelo validado é peça fundamental para auxiliar o empreendedor, os órgãos de fiscalização e os órgãos ambientais a tomarem decisões rápidas e eficientes em momentos de acidentes, buscando minimizar o impacto

causado por estes (IBAMA, 2002).

As diretrizes e relatórios técnicos emitidos pelo IBAMA mostram alguns entraves tecnológicos e pontos críticos para a modelagem de derrames de óleo. Dentre estes se destacam a falta de dados meteorológicos e bases hidrodinâmicas consistentes para forçarem os modelos de óleo em todas as bacias sedimentares do Brasil. Isto é especialmente crítico uma vez que trabalhos anteriores mostram como os modelos de óleo são sensíveis as forçantes (LEMOS et al., 2009; SEBASTIAO; SOARES, 1995). Um segundo problema observado é a falta de padronização dos modelos aplicados e a falta de validação para a costa brasileira. Neste sentido destacam-se os esforços de Soares et al. (2005) que construíram os primeiros esforços para a criação de um modelo de óleo para as águas brasileiras.

O presente trabalho se insere como uma ferramenta científica para auxiliar os tomadores de decisão e os avaliadores de estudos com modelagem de óleo, no que tange à qualidade das modelagens apresentadas para licenciamentos ambientais, uma vez que busca avaliar bases hidrodinâmicas diferentes quanto à representação de fenômenos oceanográficos e a contribuição destas para o comportamento do óleo no mar. Uma base mais realista tende a representar a hidrodinâmica local de forma mais fidedigna. Assim sendo, uma modelagem hidrodinâmica que sonegue alguns fenômenos de interesse, pode levar a resultados errôneos no planejamento do combate a derrames de óleo. Neste trabalho serão usadas duas bases hidrodinâmicas para a Bacia de Santos, sendo uma forçada com ventos sinóticos e outra forçada com ventos climatológicos.

1.4 Processos do Petróleo no Mar

Para discutir acerca dos processos do petróleo no mar, estes serão divididos em dois grandes grupos, onde o primeiro contemplará os processos de transporte e o segundo, os processos de transformação e intemperismo. Quando uma grande quantidade de petróleo é introduzida no meio marinho, este tende a se espalhar e formar uma fina camada na superfície formando as manchas de óleo. Os processos de transporte e intemperismo que atuam sobre essas manchas definem o destino final e a área atingida pelo óleo (FAY, 1969).

Os processos sofridos pelas manchas de óleo são diferentes e dependentes das características físicas do mesmo. Alguns destes processos são bem compreendidos e apresentam algoritmos eficientes para quantificar as transformações do óleo. No entanto, outros processos ainda não são bem conhecidos, gerando erros na quantificação destes.

1.4.1 Processos de Transporte

Serão separados os processos de transporte em dois: advecção e espalhamento.

1.4.1.1 Advecção

A advecção é o processo que o óleo sofre no mar oriundo das ações das correntes e dos ventos. Uma mancha de óleo introduzida no ambiente marinho estará sujeita às ações de correntes e do vento, mesmo que aparentemente as correntes ou ventos não sejam fortes (DYKE, 1996). O processo advectivo pode ser subdividido em deriva de Stokes, correntes de Ekman, circulação de Langmuir, correntes geostróficas, correntes de maré, difusão turbulenta, entre outros, de acordo com as causas do movimento (ALVES, 2006). A advecção é o principal mecanismo que determina a localização do óleo a partir do ponto de derramamento, sendo o processo de transporte predominante após o espalhamento inicial (ASCE, 1996).

Os processos de advecção do óleo são influenciados por fatores como a quantidade de óleo derramado, o tamanho da mancha formada e o tamanho do sistema meteorológico ao qual está submetida a mancha. Kullenberg (1982) mostrou que, caso a mancha seja menor que o sistema meteorológico ao qual esta está submetida, este atuará como fator

de fragmentação e conseqüente dispersão, enquanto que se o sistema meteorológico for menor, ele advectará a mancha de forma integral.

Apesar do oceano também apresentar difusão molecular, observada em experimentos de laboratório, a parcela turbulenta é o fator predominante, sendo cerca de aproximadamente mil vezes maior que a difusão molecular. A turbulência, ou transporte randômico de água, é mais eficiente no transporte de poluentes, além de fazê-lo aproximadamente em todas as direções. Tendo em vista a importância de cada parcela, observa-se que a difusão molecular pode eventualmente ser negligenciada em modelos de dispersão de poluentes, o que não ocorre com a porção turbulenta (SOUZA, 2003).

Para o cálculo do transporte de um contaminante qualquer, normalmente se utiliza a Equação 1.3 da advecção e difusão. Porém existe uma grande quantidade de equações e algoritmos a serem aplicados de acordo com os diferentes contaminantes e seus comportamentos no meio (KULLENBERG, 1982). Os algoritmos usados para simular derrames de óleo diferem daqueles usados para outros poluentes (Equação 1.3) devido as suas peculiaridades (JAMES, 2002).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla (E \nabla C) + S \quad (1.3)$$

Onde:

C = Concentração do contaminante

t = Tempo

V = Velocidade

E = Coeficiente de difusão

S = Termo da fonte

A maior parte dos modelos de dispersão de óleo utiliza a superposição linear para aproximar o movimento do óleo, considerando as principais forçantes do meio sendo as informações sobre a hidrodinâmica local obtidas de observações em campo ou de modelos hidrodinâmicos (ASCE, 1996).

1.4.1.2 Espalhamento

O processo dominante, nas primeiras horas que o óleo é introduzido na água é o espalhamento. Este consiste no aumento da área da mancha devido à tendência natural do óleo em se espalhar mesmo em água parada. Esta tendência se dá devido ao equilíbrio dinâmico entre força gravitacional, inércia, atrito, força viscosa e tensão superficial. Segundo Fay (1969), o espalhamento se divide em três fases, cada uma delas dominada por duas forças. A fase inicial é determinada pela gravidade e pela força inercial. Essa fase é a mais rápida e é desconsiderada nos modelos, chamada de "fase gravitacional-inércia". Após um período de tempo curto, segue-se a fase gravitacional-viscosa, na qual a força gravitacional é balanceada pelas forças oriundas da viscosidade do óleo. Com o passar do tempo, a espessura do óleo vai diminuindo e a força gravitacional perde sua importância e surge a terceira e mais duradoura fase, onde a tensão superficial é balanceada pela força viscosa do óleo. A transição entre essas forças ocorre nas primeiras 4 horas após o derramamento (FINGAS, 2000).

Após decorrido algum tempo do derrame, a mancha tende a ser deformada, fragmentada e dispersada devido à agitação marinha, correntes, ventos, ondas e turbulência. Nestas condições, a aproximação de Fay torna-se inaplicável. Contudo, numa fase inicial do derrame, o cálculo da área da mancha pode ser estimada pela teoria de Fay. A área é um parâmetro importante não só para o desenvolvimento de estratégias de defesa e contenção da mancha, mas também porque alguns processos de intemperismo (como a evaporação, por exemplo) dependem diretamente da área superficial ocupada pela mancha (FERNANDES, 2001b).

No OSCAR, segundo Reed (2001), o espalhamento de uma mancha formada por um derrame contínuo é calculado pela equação 1.4. Todas as unidades estão no sistema internacional de medidas.

$$x_{LE} = C_0 \left(\frac{g\Delta\rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \frac{m^{1/2}}{(\rho_w\mu_w)^{1/8}} t^{3/8} \quad (1.4)$$

Onde:

x_{LE} = Extensão da mancha

g = Aceleração da gravidade

$\Delta\rho$ = Diferença de massa específica entre a água e o óleo

ρ_w = Massa específica da água

μ_w = Viscosidade da água

m = metade da razão massa derramada / corrente superficial

C_0 = constante de espalhamento

Essa equação representa o regime viscoso gravitacional no processo de espalhamento e considera apenas o espalhamento em função da gravidade da porção mais espessa da mancha (PIMENTEL, 2007).

1.4.2 Processos de Transformação

Os processos de transformação e intemperismo serão divididos em evaporação, dissolução, dispersão, emulsificação e sedimentação. Os processos tratados aqui, aos quais o petróleo está sujeito quando em contato com o mar, são aqueles que modificam ou retiram o óleo da água.

1.4.2.1 Evaporação

Este é um processo muito importante e atua desde o início do derrame. Quando o óleo é derramado, os componentes orgânicos que possuem ponto de ebulição mais baixos (mais voláteis) são rapidamente volatilizados, reduzindo assim o volume e a massa da mancha que permanece na água e aumentando a proporção dos compostos mais pesados presentes na mesma. Os derrames de hidrocarbonetos mais leves podem ter o seu volume reduzido em 40% em poucas horas, apenas devido à evaporação (COSTA, 1999).

As taxas de evaporação serão definidas, de forma geral, pelas características físico-químicas do óleo, sendo influenciadas pelo espalhamento, pela temperatura e pela agitação marinha. A evaporação será determinante na modificação do óleo derramado e em sua

toxicidade, uma vez que muitos dos compostos leves do óleo são considerados mais tóxicos (SEBASTIAO; SOARES, 1995). A evaporação é, portanto, o primeiro processo envolvido na remoção de óleo da superfície da água. À medida que o óleo continua a se intemperizar, especialmente formando emulsões água-óleo, a evaporação vai diminuindo (FERNANDES, 2001b).

Óleos que apresentam em sua composição a predominância de componentes pesados (moléculas com mais carbonos) podem permanecer na superfície da água por várias semanas até um ano após o óleo ter sido lançado no ambiente (FINGAS, 2000).

A evaporação é peça fundamental para o balanço de massa da mancha após o derrame. Quantificar este processo de forma satisfatória é importante para calcular a perda de massa com o tempo e a quantidade de óleo que permanece na água para ser intemperizado.

Segundo Reed et al. (1999), pode-se calcular a evaporação através do método de pseudo-componente ou do método analítico. No método de pseudo-componente a fração do óleo que evapora é calculada apenas em função do tempo e da temperatura. Neste método o óleo é dividido em frações correspondentes às faixas de temperatura de evaporação, definidas a partir de testes de laboratório. Dessa forma, a taxa de evaporação é considerada como sendo proporcional à pressão parcial de vapor de cada componente, calculada pelo modelo, obedecendo à curva empírica de evaporação de cada fração (TBP – “*true boiling point*”) (SOUZA, 2003). A taxa de evaporação será função da temperatura da superfície do mar e do estresse do vento.

O método analítico busca fazer uma simplificação do pseudo-componente, uma vez que este último exige uma grande complexidade de dados e de esforço computacional para ser resolvido.

A formulação mais usada hoje em dia relaciona a taxa de evaporação à pressão de vapor dos componentes, à área da mancha após o espalhamento, a um coeficiente de transporte de massa que depende da velocidade do vento, à temperatura ambiental e ao tipo de óleo. Esta formulação foi testada em laboratório e se mostrou satisfatória para muitos tipos de óleo (ASCE, 1996).

1.4.2.2 Dissolução

Apesar de apresentar vários componentes insolúveis em água, os hidrocarbonetos de petróleo contam, dentro dos seus constituintes, com uma fração que é solúvel. Assim a mistura óleo-água se separa em duas fases. A fase não dissolvida, que é a maior parcela e que flutua sob a superfície da água, e uma parte solúvel, que é introjetada nas camadas superficiais da água, logo abaixo da mancha. Esta fase dissolvida é formada por componentes aromáticos de baixo peso molecular e por compostos polares, caracterizados como resinas, que são fragmentados e formam com a água uma mistura líquida homogênea. Já a parte flutuante compreende aquela fração estável e que pode ser dispersada (ASCE, 1996).

A dissolução é desprezada em muitos modelos de difusão de óleo, o que se deve ao fato nesta representar um pequeno efeito sobre o balanço de massa, visto que, geralmente, apenas 1% do óleo derramado na superfície irá para a fase dissolvida (ASCE, 1996). A reduzida presença de hidrocarbonetos solúveis no petróleo resulta numa baixa perda de hidrocarbonetos por dissolução, quando comparado com outros processos (FERNANDES, 2001b). A dissolução e a evaporação são dois processos competitivos. Embora após o derrame da mancha, inicialmente a dissolução aumente, após alguns minutos verifica-se um rápido decréscimo, devido às perdas por evaporação. Dados experimentais demonstram que após cerca de 15 minutos do derrame a dissolução cessa. A solubilidade pode variar entre 1 e 100 ppm (FINGAS et al., 1996).

Ecologicamente, a dissolução é um processo importante, pois é ela a responsável por disponibilizar para a biota as frações mais tóxicas do óleo, que são justamente as mais leves e solúveis. Portanto, a ameaça destes compostos à vida aquática se dá em um curto espaço de tempo, uma vez que os processos que geram a evaporação destes compostos atuam na retirada destes contaminantes da água (FINGAS, 2000).

1.4.2.3 Dispersão Natural

A dispersão é o processo no qual gotículas de óleo chamadas "*droplets*" são introduzidos na coluna d'água a partir da superfície do mar, sobretudo através da ação das ondas ou turbulência. Este processo, também conhecido como "entranhamento" é influenciado por três fatores principais: viscosidade do óleo, temperaturas da água e do ar e agitação

do mar.

Quanto maior a viscosidade do óleo, maior será a possibilidade de se formarem manchas de óleo mais espessas na superfície da água, e assim diminuir a dispersão para a coluna d'água. A temperatura da água e do ar podem inibir o processo de dispersão quando estas estão abaixo do ponto de fluidez do óleo. O estado de agitação do mar está ligado à energia das ondas e à turbulência gerada. Desta maneira, um derrame que ocorra em um período de tempestade pode ter grande parte de sua massa removida da superfície pelo mecanismo de entranhamento, enquanto que em condições meteorológicas e oceanográficas não extremas a evaporação será o processo de remoção mais importante (FINGAS, 2003).

Dependendo das condições físico-químicas do óleo e da hidrodinâmica, a dispersão natural pode ser insignificante (FINGAS, 2000). Óleos muito pesados tendem a não se dispersar naturalmente em nenhum tipo de condição, já óleos leves tendem a se dispersar mais facilmente. Segundo Sebastiao & Soares (1995), após a evaporação, a dispersão natural é o processo que mais remove óleo da superfície.

1.4.2.4 Emulsificação

A emulsificação consiste no processo de formação das emulsões de água em óleo, que são comumente chamadas de *mousse*. A formação de emulsões nada mais é que a dispersão de pequenas gotículas de um líquido dentro de outro. Emulsões óleo-água estáveis contêm entre 50% e 80% de água, representando uma expansão do volume do óleo derramado de duas a cinco vezes. Outra mudança gerada é na viscosidade do óleo, que muda de algumas centenas para 100.000 cS (centistokes). Este incremento de viscosidade faz com que a mancha de óleo deixe de ser apenas um material líquido derramado, transformando-se em um semi-sólido pesado e de caráter não Newtoniano (SOUZA, 2003). Como resultado deste processo a evaporação diminui, bem como a expansão da mancha. O óleo emulsificado ganha densidade e é transportado para posições mais profundas da coluna d'água (ASCE, 1996).

Os aumentos de volume e viscosidade dificultam bastante as operações de limpeza e remoção. O óleo emulsificado torna-se praticamente impossível de ser dispersado ou

queimado *in situ*. É esperado que a maioria dos óleos só inicie a emulsificação após uma certa fase de intemperismo. A ocorrência deste processo depende além da composição do petróleo, também do estado do mar, sendo que a formação de emulsões é favorecida na presença de mar agitado (FINGAS; FIELDHOUSE, 2004).

A tendência de formação e a estabilidade das emulsões água-óleo parecem ser função do conteúdo de asfaltenos e parafinas no petróleo. A maior parte dos produtos refinados não formam emulsões água-óleo estáveis devido à ausência destes compostos (FERNANDES, 2001b). A mínima percentagem de massa de asfaltenos e de parafinas para estabilizar uma emulsão é de cerca de 3% (FINGAS et al., 1996). Assim, em muitos óleos o processo de emulsificação só ocorre quando outros processos de intemperismo, como evaporação, atuam para enriquecer o óleo em asfaltenos e parafinas.

1.4.2.5 Sedimentação

A sedimentação é o processo que faz com que parte do óleo derramado na superfície do mar seja depositado no fundo do corpo d'água. Este processo ocorre, basicamente, quando o óleo atinge uma densidade maior que a água circunvizinha, fazendo com que uma parcela de óleo afunde. Os dois fatores principais de geração do aumento de densidade são: a emulsificação, que pode chegar a tal nível que a densidade se eleve a ponto de uma parcela do óleo emulsificado depositar no fundo e a interação do óleo com o material mineral (sedimentos) presente na coluna d'água. A sedimentação é maior na presença de grande quantidade de material em suspensão, como próximo à costa e em desembocaduras de rios e lagunas. Em geral, este processo é pouco importante nos primeiros dias.

O processo de sedimentação de petróleo é relativamente complicado e de difícil contabilização. Segundo estudos realizados, cerca de aproximadamente 10% do óleo total é depositado no fundo (FINGAS, 2000).

O trabalho de Boehm (1987) mostra que a taxa de sedimento em suspensão é um fator determinante nas taxas de sedimentação de óleo. O autor mostra que, entre 1-10 $mg.L^{-1}$ de concentração de sedimento em suspensão, as taxas de transporte de óleo para o fundo oriundo da aglomeração óleo-mineral são praticamente inexistentes. Em ambientes onde a concentração de sedimento em suspensão é entre 10-100 $mg.L^{-1}$ pode ocorrer uma

taxa significativa de transporte de óleo para o leito marinho, porém isto é regulado pela turbulência local. Em níveis maiores que 100 mg.L^{-1} ocorrem taxas ainda mais altas de sedimentação de óleo adsorvido em sedimentos.

1.5 Descrição da Área

1.5.1 Bacia de Santos

A Bacia de Santos localiza-se na margem continental da Região Sudeste do Brasil, tendo limite norte com a Bacia de Campos, definido pelo Alto de Cabo Frio, e limite sul com a Bacia de Pelotas, definido pela Zona de Fratura de Florianópolis, como pode se observar na figura 5.

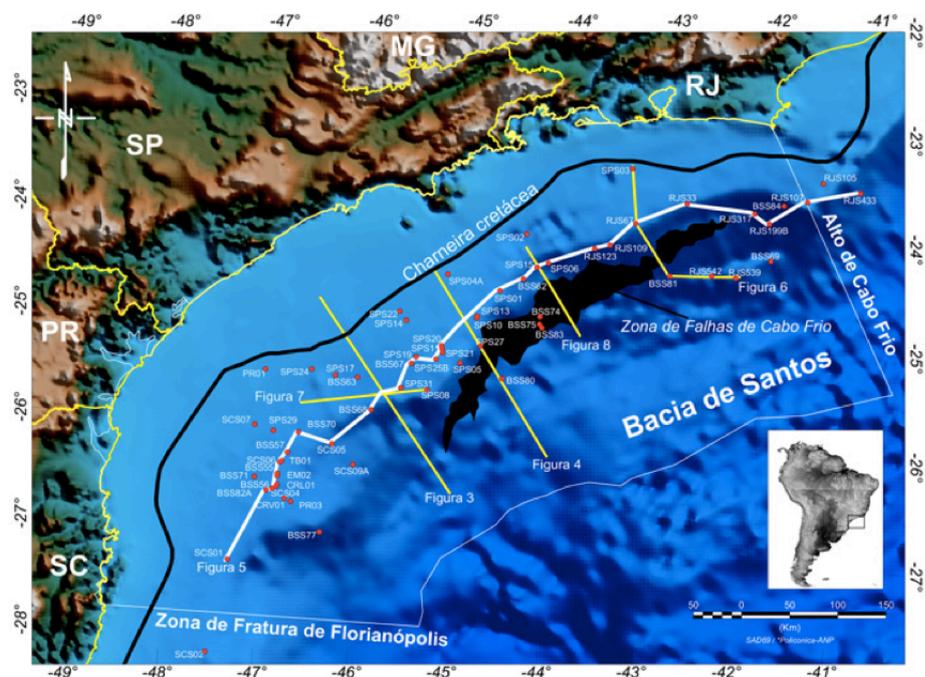


Figura 5: Mapa de localização da Bacia de Santos. Fonte: Assine et al. (2008)

A exploração da Bacia de Santos teve início em 1979, com a descoberta de reservas principalmente de gás natural no Campo de Merluzá. Outras jazidas em reservatórios da sequência pós salífera, de pequeno porte, estão em produção na bacia (Coral, Estrela do Mar, Tubarão, etc.). Nos últimos anos, porém, a Bacia de Santos passou a ser alvo de investimentos mais significativos em trabalhos de exploração e produção. Segundo Franke (2004), a Bacia de Santos é um bom exemplo de mudança de *status* passando em dois anos de "nova fronteira exploratória" para "elevado potencial" depois da descoberta de grandes reservas de gás e petróleo, principalmente em suas águas profundas.

A Bacia de Santos teve vários campos licitados pela ANP (Agência Nacional de Pe-

tróleo, Gás Natural e Biocombustível) nas rodadas de concessão de exploração, como ilustrado na figura 6, onde observam-se os campos licitados nas Rodadas de 0 a 4. Observam-se campos mais costeiros, em águas rasas, e campos em água profunda.

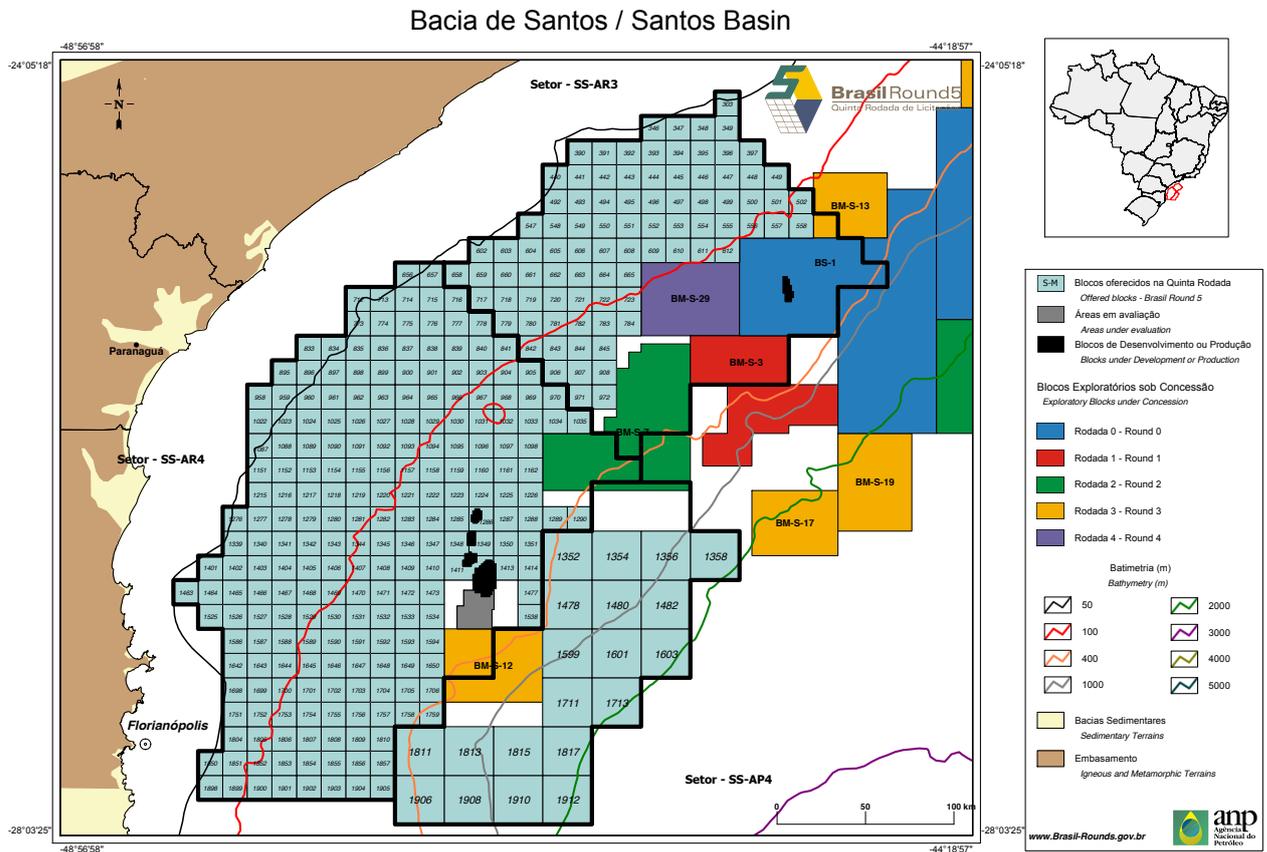


Figura 6: Mapa mostrando os campos de exploração da Bacia de Santos licitados pela ANP nas Rodadas de Licitação 0, 1, 2, 3 e 4. Fonte: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível.

Segundo Assine et al. (2008), a Bacia de Santos apresenta formação geológica e estrutural similar da Bacia de Campos. As bacias são separadas pelo alto de Cabo Frio e apresentam muitas semelhanças na evolução estrutural. Isto faz com que as perspectivas de encontrar grandes reservas de petróleo em Santos sejam altas, pois a Bacia de Campos é hoje a maior produtora de petróleo do Brasil.

A expectativa da Petrobras é de que a Bacia de Santos deva proporcionar, somente em gás natural, uma produção diária de 15 milhões de metros cúbicos somente no Campo de Mexilhão - o correspondente a 50% da capacidade de importação pelo Gasbol, o gasoduto

que viabiliza a importação de gás natural boliviano (IBP, 2009).

A partir de 2006 foram anunciadas várias descobertas em reservatórios Pré-Sal. Além do anúncio da presença de grandes reservas no Campo de Tupi também foram anunciadas as descobertas de óleo leve nos Campos de Parati, Carioca, Caramba, Júpiter, Guará, Bem-te-Vi e Iara. E as descobertas continuam. Em 2012, a Petrobras anunciou a ocorrência de petróleo leve em águas ultraprofundas da Bacia de Santos, no bloco BM-S-9, nos reservatórios do pré-sal. O novo poço, denominado Carioca Sela, localiza-se na área de avaliação do 1-SPS-50 (Carioca), a 4,5 Km do poço descobridor. Nesse novo poço, distante cerca de 270 km da costa do Estado de São Paulo, foi recuperado um óleo de 27 graus API, em profundidade de 2.149 metros (PETROBRAS, 2012b).

1.5.2 Aspectos Oceanográficos

Na seção anterior foi discutida a importância da Bacia de Santos dentro do cenário de exploração de óleo *offshore* no Brasil, o qual tem um grande potencial de crescimento em sua produção em um horizonte de poucos anos. Nesta seção serão tratados os aspectos oceanográficos da Bacia de Santos e do sudeste brasileiro. Será feita uma discussão sobre as principais massas d'água presentes nesta região, sobre os padrões de circulação de larga escala com os giros de bacia e sobre a movimentação das massas d'água e da principal corrente presente na área de estudo, que é a Corrente do Brasil (CB). Serão discutidos por último, os padrões de mesoescala e como estes agem e se comportam na região, além dos vórtices, meandros e outras feições oceanográficas de mesoescala.

1.5.2.1 Padrão de circulação de Larga Escala

A circulação oceânica de larga escala, nas regiões subtropicais, pode ser resumida pela circulação dominante, que são os giros anticiclônico das bacias. Esta circulação é a resposta do oceano às tensões geradas pelos ventos de superfície. Stommel (1948) identificou que as correntes junto a borda oeste destes giros são confinadas em um jato estreito e intensificado. A estas se dá o nome de "Correntes de Contorno Oeste"(CCOs) (STOMMEL, 1948; MUNK, 1950). Estas correntes são caracterizadas por serem fluxos intensos, estreitos e bem definidos fluindo ao largo das margens continentais (SILVEIRA et al., 2000). Esta intensificação é resultado da variação latitudinal do parâmetro de Coriolis (STOMMEL,

1948).

No oceano Atlântico sul temos um giro subtropical onde a Corrente do Brasil (CB) é a CCO. O giro subtropical do Atlântico sul é limitado ao norte pela Corrente Sul Equatorial (CSE). A CSE se bifurca em 12°S, fluindo para o norte a Corrente Norte do Brasil (CNB) e para o sul, a CB (PETERSON; STRAMMA, 1991). A CB segue bordeando a plataforma continental brasileira até aproximadamente 33°S - 38°S, onde se encontra com a Corrente das Malvinas (CM). No entorno destas latitudes se encontra a Região da Convergência Subtropical, onde a CB encontra a CM e juntas formam uma zona de confluência e se afastam da costa em direção ao oceano aberto formando a Corrente do Atlântico Sul (CAS) (STRAMMA; ENGLAND, 1999). Na borda leste deste oceano tem-se a Corrente de Benguela (CBe), que fecha o giro. A circulação e o esquema de correntes superficiais do oceano Atlântico pode ser observado na Figura 7.

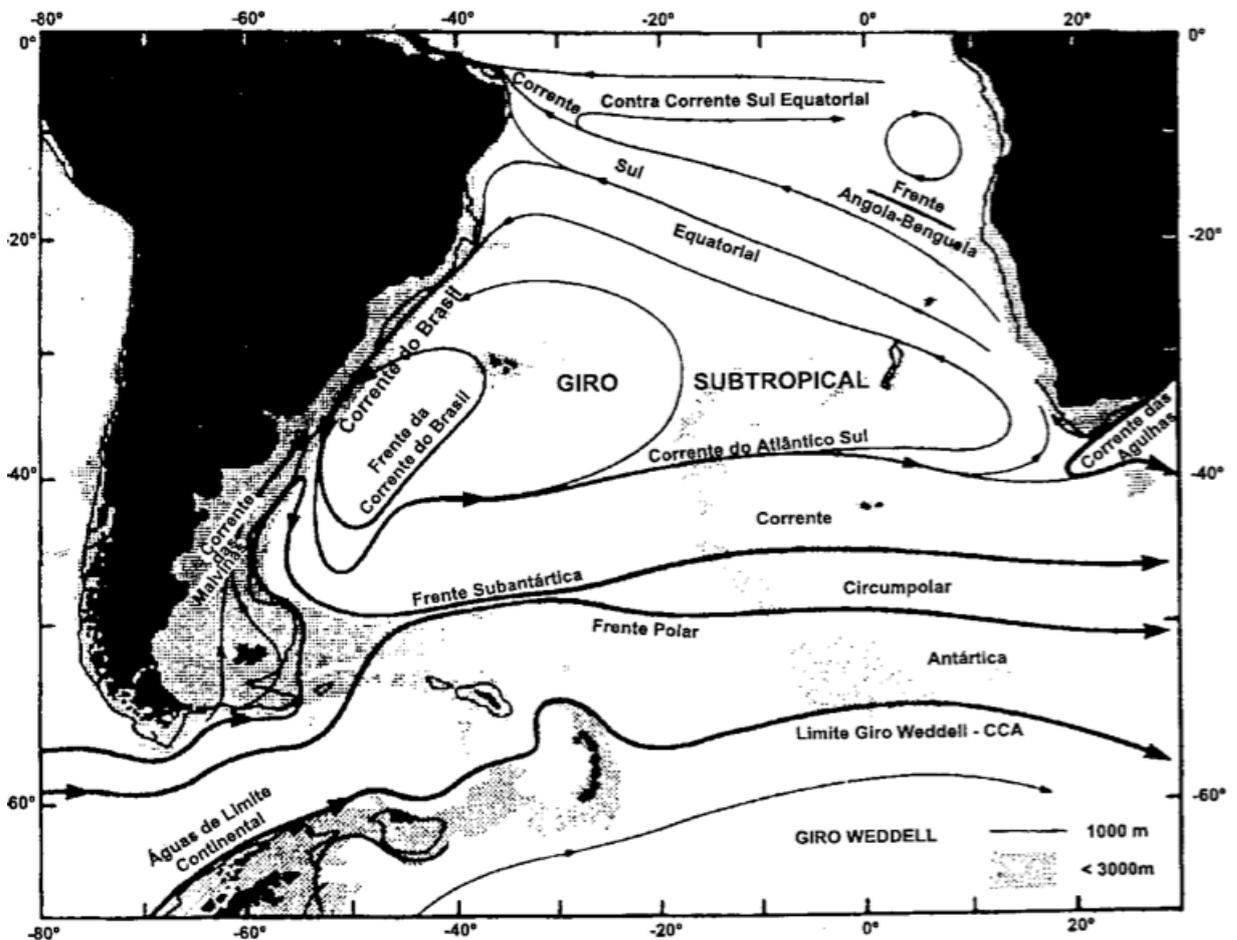


Figura 7: Representação esquemática do Giro Subtropical do Atlântico Sul (SILVEIRA et al., 2000 apud PETERSON; STRAMMA, 1991)

A CB é a CCO do giro subtropical do Atlântico Sul, mesmo sendo uma Corrente de Contorno Oeste, ela é fraca em relação a sua similar do Atlântico Norte, a Corrente do Golfo (CG). As correntes de contorno oeste podem ser pensadas como fluxos de retorno do transporte de Sverdrup (SILVEIRA et al., 2000). O transporte de Sverdrup pode ser estimado através dos campos de cisalhamento do vento em larga escala e estes não são significativamente diferente entre os dois hemisférios a ponto de justificar as diferenças de transporte encontradas entre a CB e CG. Segundo Signorini (1978), a CB é uma corrente fraca que transporta 5,2 Sv em 22° S. Campos et al. (1995) calculou o valor de 7,2 Sv próximo à Bacia de Santos.

Pioneiro na tentativa de explicar tal diferença entre a CB e a CG, Stommel (1965) dividi a circulação entre "forçada pelo vento" e termohalina, mostrando que na CB estas duas apresentavam sentidos opostos, ao passo que na CG elas tinham o mesmo sentido. Esta constatação, que justificaria o grande transporte e volume carreados pela CG, pode ser observada no esquema presente da figura 8.

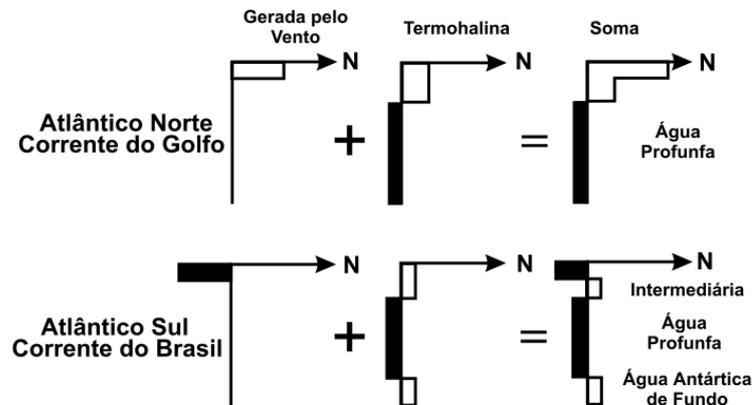


Figura 8: Representação esquemática da hipótese de Stommel para explicar a fraca intensidade relativa da Corrente do Brasil (painel inferior) comparativamente à Corrente do Golfo (painel superior). De acordo com Silveira et al. (apud STOMMEL, 1965)

Segundo Silveira et al. (2000), a hipótese de Stommel ainda não foi refutada, embora estudos observacionais recentes mostrem que o padrão de circulação, associados às massas d'água de subsuperfície, intermediárias e profundas, seja mais complexo do que se supunha anteriormente, principalmente no sudeste-sul brasileiro devido às células de recirculação. É possível que ocorra um fluxo mais contínuo nos primeiros 3.000 metros.

As massas d'água que se empilham na região da CB são características do Atlântico

Sul (SILVEIRA, 2007). Nos primeiros 3.000 metros de coluna d'água, encontram-se a Água Tropical (AT), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), a Água Intermediária Antártica (AIA) e a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (SILVEIRA et al., 2000). O diagrama T-S típico da CB pode ser observado na Figura 9.

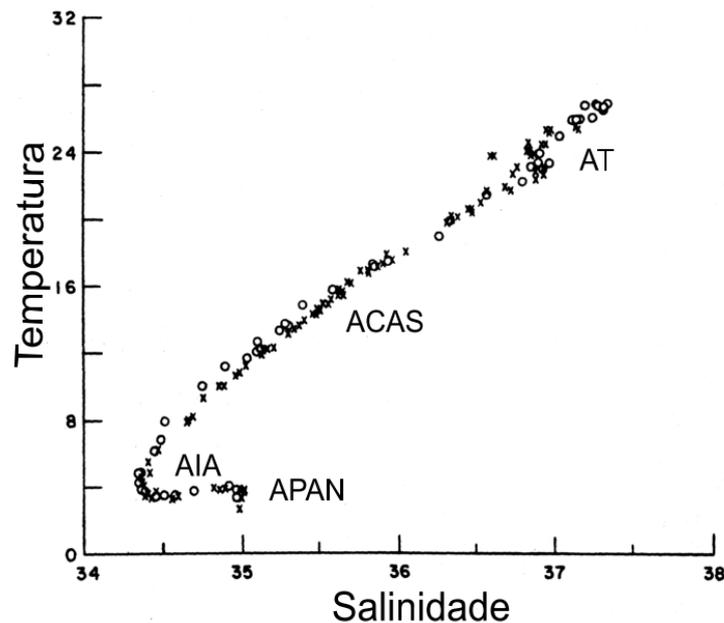


Figura 9: Diagrama T-S típico da Corrente do Brasil, de acordo com Silveira et al. (2000)

A seguir será feita uma descrição das características termohalinas destas massas d'água. Emilson (1960) caracterizou a AT como sendo uma massa de água quente e salina, ocupando a camada superficial do Atlântico Sul Tropical. Esta massa flui para o sul junto com a CB e neste percurso interage com as águas costeiras, que apresentam temperatura e salinidade menores. Próximo ao sudeste brasileiro sua temperatura característica é de 20°C e salinidade de 36.

A ACAS é encontrada fluindo na região da piconclina, com temperaturas maiores que 6° C e menores que 20° C e com salinidade entre 34,6 e 36 (SILVEIRA et al., 2000). Sverdrup et al. (1942) constataram que a ACAS é formada por afundamento das águas na região da Convergência Subtropical, e subsequentemente se espalha ao longo da superfície de densidade adequada a seu ajustamento hidrostático. Miranda (1985) sugere que no sudeste brasileiro os valores típicos da ACAS são 20° C de temperatura e 36,20 de salinidade.

A região de formação da AIA encontra-se na Convergência Subantártica (WUST; DEFANT, 1936). Sverdrup et al. (1942) indicaram que os intervalos termohalinos da AIA são de 3° C - 6° C de temperatura e de 34,2 - 34,6 de salinidade. Esta massa é responsável pelo mínimo de salinidade no diagrama T-S da figura 9.

A APAN tem intervalos de temperatura de 3° C - 4° C e salinidade entre 34,6 e 35. No sudeste brasileiro, ocupa o estrato entre 1500 e 3000 metros de profundidade.

A CB é responsável por transportar a AT entre 0-200 metros de profundidade e a ACAS entre os níveis de 200-400 metros (SILVEIRA et al., 2000). A região onde a CB flui tem um peculiaridade dentro das CCOs que é a existência de um cisalhamento vertical que faz com que o fluxo da corrente se inverta entre 400-500 metros de profundidade. A esta nova corrente, que flui para norte, se dá o nome de Corrente de Contorno Intermediária (CCI). O trabalho de Boebel et al. (1999) descreve a CCI através da análise de flutuadores de diversos tipos e indica que ela é formada pela bifurcação da AIA, que ocorre aproximadamente aos 30° S, portanto no limite sul da Bacia de Santos.

Silveira et al. (2000) faz uma grande revisão sobre o escoamento dessas massas d'água e a dinâmica de larga escala ao largo da costa leste brasileira. Baseados nos resultados de Stramma & England (1999), mostraram que o escoamento da ACAS não é tão simples. A ACAS entra no Giro Subtropical, circula em direção à África com as Correntes do Atlântico Sul e Benguela e atinge a costa Brasileira sendo transportada pela CSE. Existe uma bifurcação, onde parte do escoamento segue em direção ao Equador e parte segue em direção ao Sul.

A revisão de Silveira et al. (2000) mostrou que, apesar de incerta, a localização do ponto de separação do fluxo da ACAS é aceito pela literatura como sendo no Cabo de São Tomé (22° S), onde a ACAS flui para o sul pela costa Brasileira. A figura 10 mostra a síntese do escoamento das correntes. A Corrente de Contorno Profunda é a CCP e SNB é a Sub-corrente Norte do Brasil.

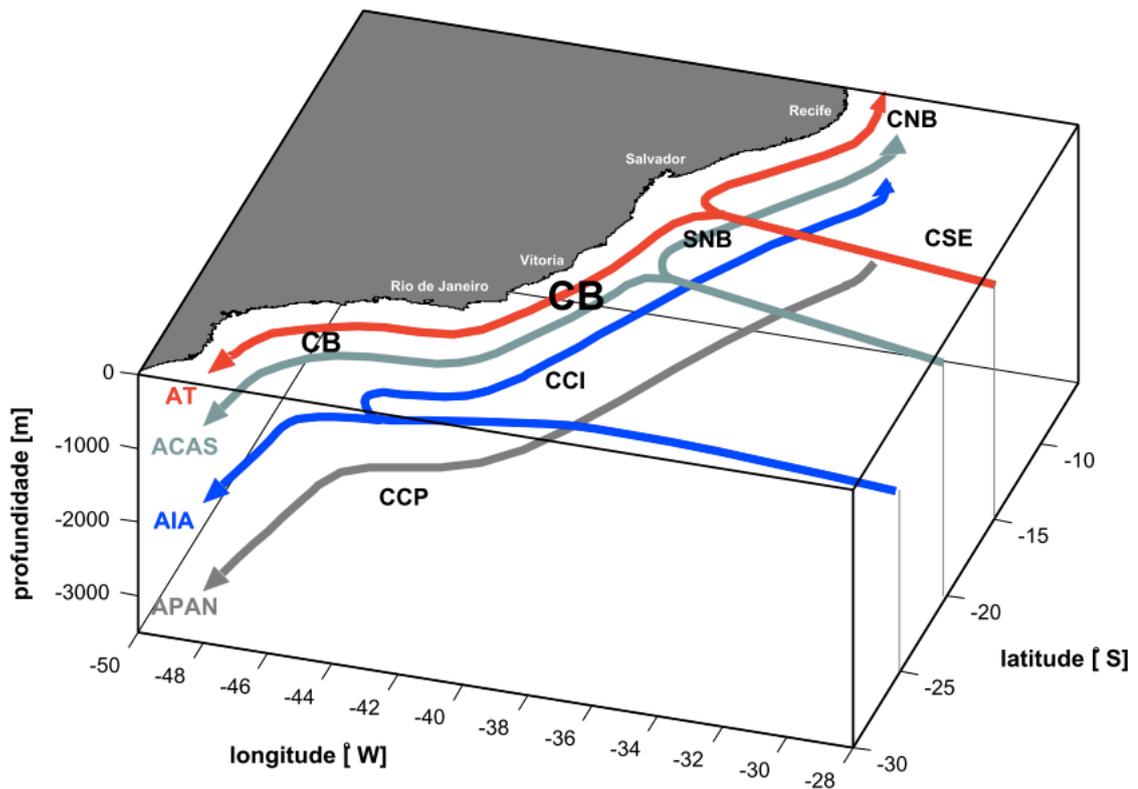


Figura 10: Síntese do escoamento das correntes com o padrão de larga escala ao longo da costa brasileira. Retirado de Soutelino (2008)

1.5.2.2 Padrão de circulação de Mesoescala

Os movimentos de mesoescala apresentam dimensão da ordem de centenas de quilômetros e período de até centenas de dias. Se encaixam nesta definição os vórtices, meandros e bifurcação de correntes. A circulação atmosférica é uma importante forçante geradora destes movimentos (SOUTELINO, 2008).

A circulação de mesoescala ao largo da costa sudeste do Brasil foi descrita por Silveira et al. (2000). São encontradas na literatura informações acerca da estrutura de vórtices e meandros. A primeira descrição de meandramento da CB e dos vórtices registrados na região sudeste foi realizada por Mascarenhas et al. (1971). Os autores descreveram estruturas de vórtices ciclônicos e anticiclônicos na região ao largo de Cabo Frio a partir de mapas de topografia dinâmica. Eles observaram que parte deste meandramento atinge regiões interiores à plataforma continental. Especula-se também que a topografia favoreça o meandramento e a geração de vórtices nesta região.

Signorini (1978) tratou do tema "meandramento da CB", discutindo a região entre o Cabo de São Tomé e a Baía de Guanabara. O vórtice anticiclônico, ao norte de Cabo Frio (Figura 11), foi detectado neste estudo. Este encontrava-se em águas profundas (maior que 1000 metros) e possuía extensão vertical de 500 metros.

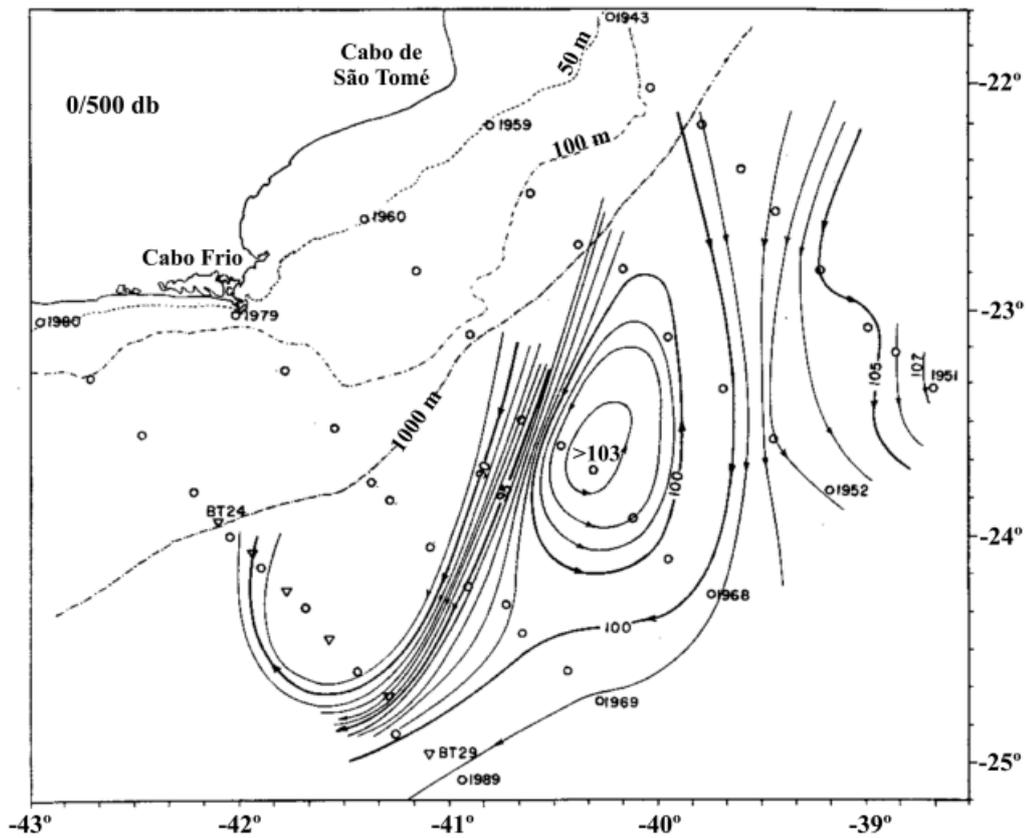


Figura 11: Vórtice da Corrente do Brasil obtido por análise dinâmica de dados hidrográficos. Retirado de Signorini (1978)

Campos et al. (1995) apresentaram uma explicação dinâmica para a formação do "meandramento da CB", próximo a área de Cabo Frio, e para a ocorrência de um padrão ondulatório dentro da Bacia de Santos. Estes autores mostraram que, devido a uma mudança brusca da orientação da linha de costa, a CB gera meandros ciclônicos na região de Cabo Frio. Isto é consequência do mecanismo de conservação de vorticidade potencial. A CB ganha vorticidade ciclônica e se desloca em direção à plataforma atingindo áreas mais rasas. Para devolver o eixo da CB para oceano aberto ela ganha vorticidade anticiclônica. Este mecanismo gera, a sul de Cabo Frio, um padrão de meandramento em direção à costa brasileira como uma onda de *Rossby* topográfica. Este padrão pode ser observado na figura 12.

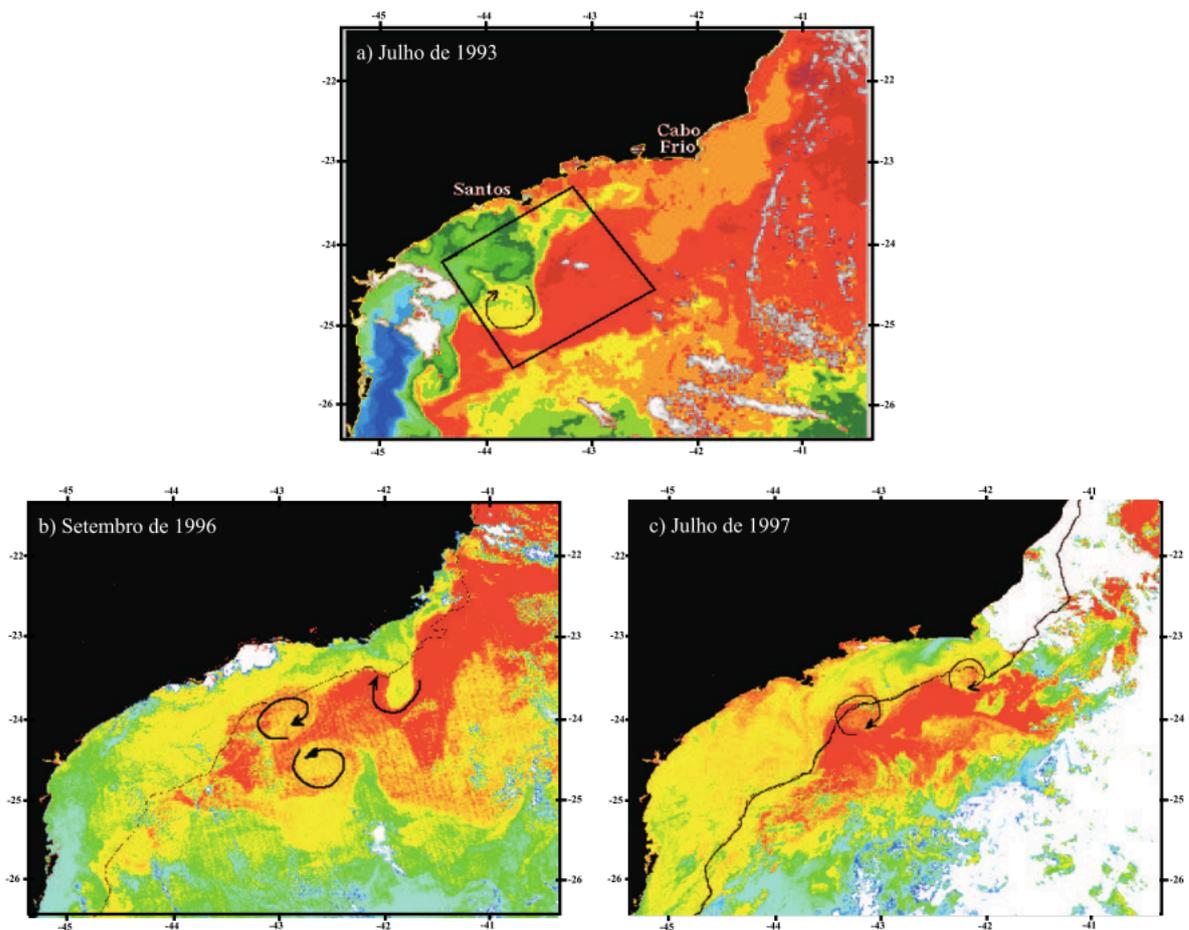


Figura 12: Imagens da Temperatura da Superfície do Mar - AVHRR - Região Sudeste do Brasil: (a) julho de 1993; (b) setembro de 1996; (c) julho de 1997, onde as águas quentes (tons vermelhos) são características da CB e as ondulações configuram meandros (editados com o sentido de rotação). Retirado de Godoi (2005).

Na Bacia de Santos ocorre a formação de pares de vórtices, tanto ciclônicos quanto anticiclônicos, em lados opostos à corrente. Segundo Campos et al. (1995), essas estruturas são menores que as de Cabo Frio e aparentemente não se desprendem do eixo principal da CB. Os eventos de formação de vórtices ao norte e dentro da Bacia de Santos estão relacionados entre si (SILVEIRA et al., 2000).

Os estudos conduzidos por Fernandes (2001a) tentaram elucidar a estrutura e natureza do processo de geração do meandramento da CB a partir da geração de ondas de vorticidade. Este autor utilizou experimentos numéricos para mostrar que o processo de geração das ondas de instabilidade é baroclínico. Estas ondas tinham frequência típica de 25 dias e comprimento de onda de cerca de 430 km. Os resultados de Fernandes (2001a)

diferiram das observações pretéritas no que diz respeito à velocidade desta onda. Este autor mostrou que a onda tem velocidade de fase de $0,20 \text{ m.s}^{-1}$ para sudoeste, o que representa cerca de 40% da velocidade média da CB modelada.

Calado (2001) realizou simulações numéricas prognósticas com o modelo *Princeton Ocean Model* (POM). Este autor investigou o papel da interação do sistema de corrente formado pela interação da CCI e da CB, que fluem em sentidos contrários. Os resultados mostraram que os meandramentos da CB, ao largo da Bacia de Santos, decorrem da combinação entre a influência da orientação da linha de costa e da topografia. Estes agem para fornecer o "gatilho" para o processo de meandramento. Por outro lado, a instabilidade baroclínica é o mecanismo responsável pelo crescimento temporal primário dos meandros no sudeste brasileiro. O sistema CB seria, segundo o autor, "baroclinicamente" instável. Alguns resultados numéricos de Calado (2001) são observados na figura 13.

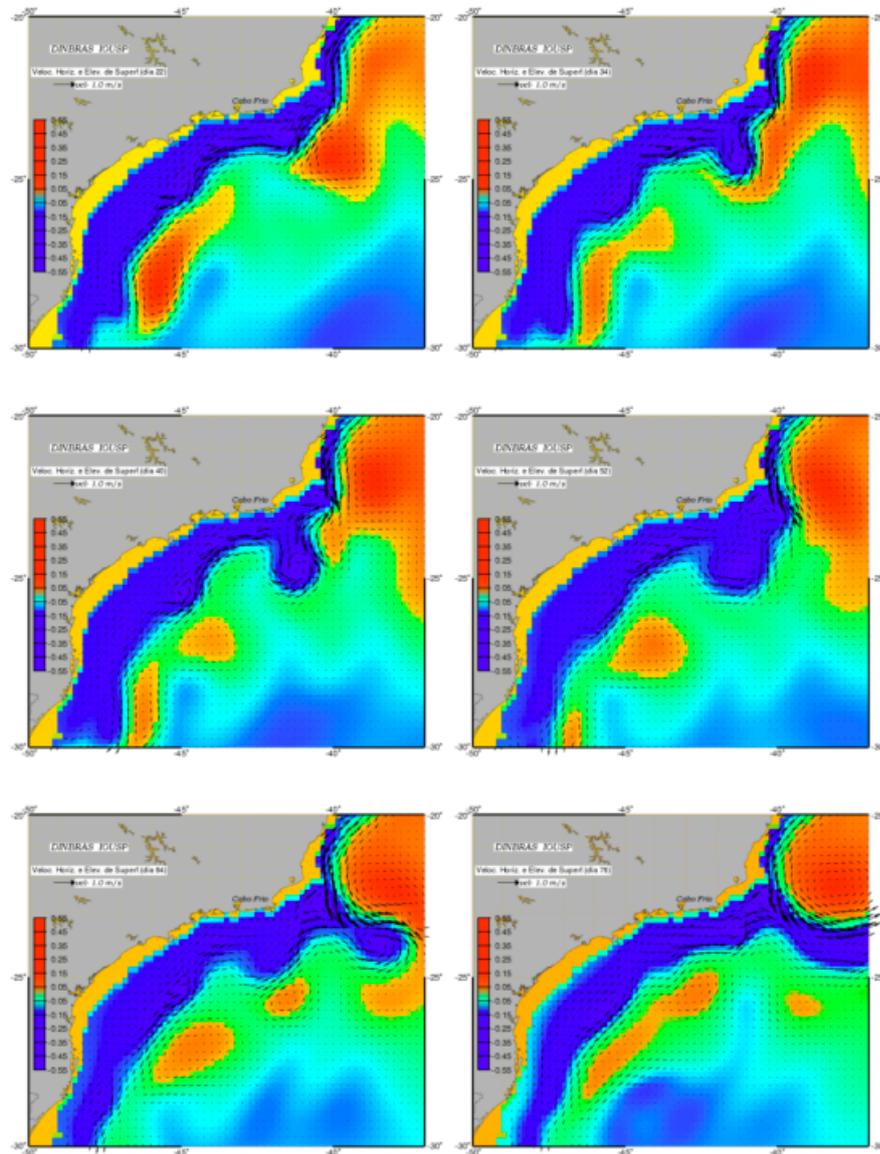


Figura 13: Evolução temporal do campo de elevação de superfície e velocidade de correntes superficiais do experimento numérico de Calado (2001). Estes resultados foram gerados com a presença da CCI, com intervalo de 12 dias de simulação entre cada quadro.

Godoi (2005) construiu um modelo quase-geostrófico para as ondas de vorticidade ocorrentes na Baía de Santos, diferente de outros estudos como o de Calado (2001). A autora se ateve à dinâmica das ondas estáveis. Utilizando dados de cruzeiros oceanográficos e um modelo linear simples, a autora mostrou a dependência da relação de dispersão destas ondas de gradiente de vorticidade potencial associada às CB e CCI. A Figura 14 sugere uma onda com aproximadamente 200-300 km de comprimento na área da Baía de Santos.

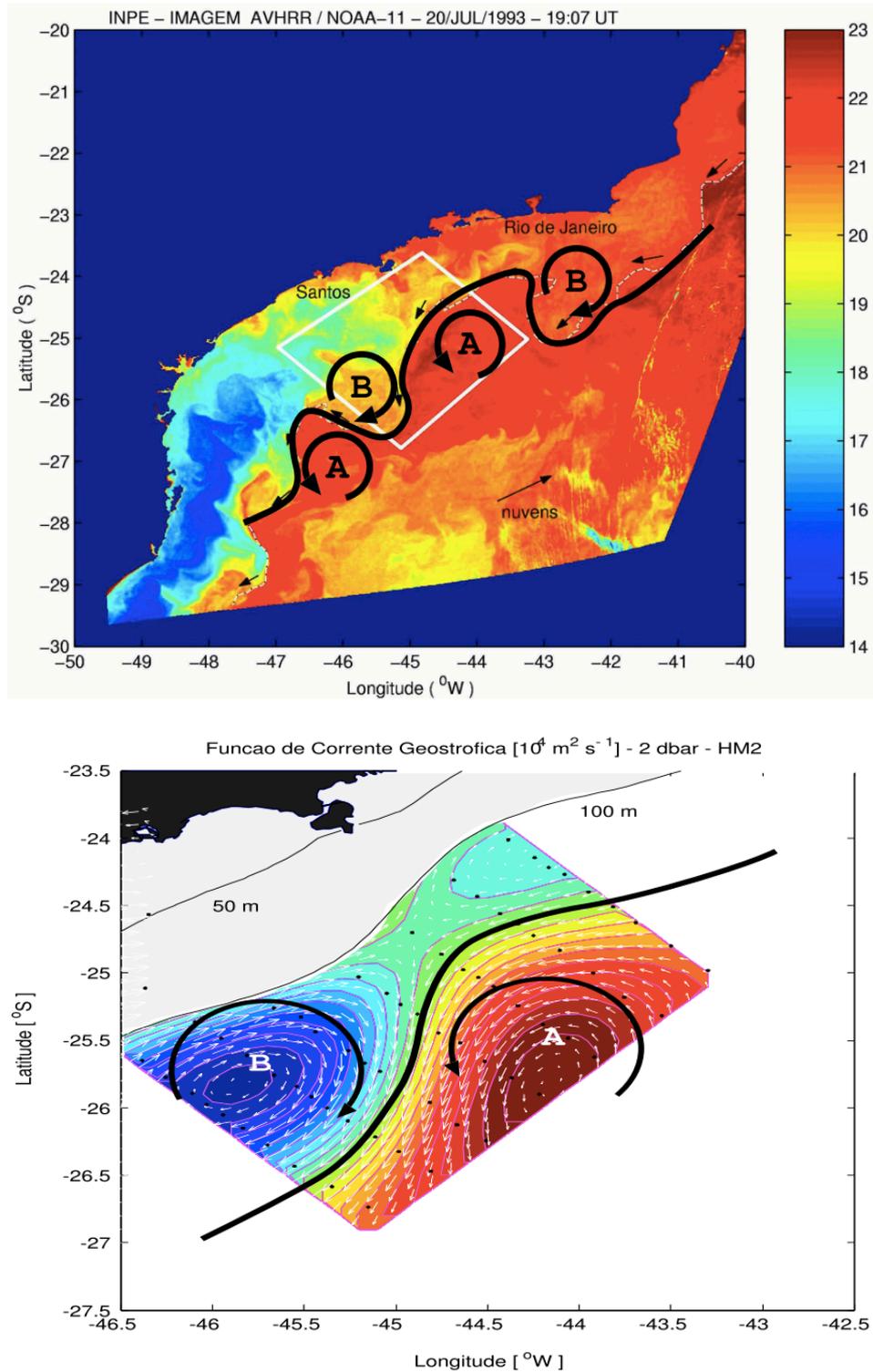


Figura 14: Interpretação conjunta de imagem da Temperatura da Superfície do Mar - AVHRR/NOAA-11 - 20/julho/1993 [painel superior] e do mapa da função de corrente geostrofica para 2 dbar - cruzeiro HM2 - inverno 1993 [painel inferior] como onda de vorticidade baroclínica. Retirado de Godoi (2005).

2 Metodologia

Neste capítulo será discutida a metodologia empregada para avaliar a contribuição das variabilidades de mesoescala no comportamento de uma mancha de óleo no mar. Primeiramente, apresenta-se uma breve descrição dos modelos numéricos OSCAR e ROMS, utilizados no trabalho. Nas seções seguintes, são discutidos o detalhamento dos tratamentos realizados para importação das bases hidrodinâmicas do ROMS para o OSCAR e a estratégia de modelagem adotada para o presente estudo.

2.1 Modelos numéricos

Para realizar as simulações junto ao modelo OSCAR, utilizou-se como forçantes apenas campos hidrodinâmicos, que foram gerados pelo modelo numérico ROMS e estão descritos no trabalho de Magalhaes (2012). A não utilização dos campos de vento no OSCAR teve por objetivo isolar o efeito das bases hidrodinâmicas na dispersão da mancha de óleo. A introdução de outra forçante (campos de vento) poderia "contaminar" a análise introduzindo uma nova variável no problema, optando-se portanto, por usar apenas a forçante hidrodinâmica nas modelagens aqui apresentadas.

2.1.1 O modelo OSCAR (Oil Spill Contingency And Response)

O modelo de dispersão de óleo empregado neste estudo foi o OSCAR (Oil Spill Contingency and Response), desenvolvido pela SINTEF, com o objetivo de dar suporte à tomadas de decisão em momentos de derrames de óleo e na elaboração de planos de contingência (REED et al., 1999).

O OSCAR é um modelo amplamente usado para diversos fins. Dentre estes, estão

os planos de contingência, a análise prévias de derramamento de óleo, a identificação do destino da mancha, a simulação dos processos de intemperismo, a análise de potenciais consequências ambientais e a eficiência de diversos métodos de combate ao óleo derramado (incluindo o uso de dispersantes) (DALING et al., 2002). Além disso, o modelo é capaz de analisar o custo/benefício da compra de equipamentos de combate ao óleo no mar, de auxiliar na logística das repostas a derrames de óleo no mar e avaliar o impacto e o risco ambiental (REED et al., 1995).

São componentes-chaves do sistema: um modelo de intemperismo de óleo da SINTEF (AAMO et al., 1993; DALING et al., 1990), um modelo tridimensional de trajetória do óleo e destino químico (REED et al., 1995), um modelo de combate a derramamentos de óleo (AAMO et al., 1995; AAMO et al., 1996) e modelos de exposição a peixes e ictioplâncton, pássaros e mamíferos marinhos (REED et al., 1995).

Com a finalidade de representar bem o óleo e seus produtos de degradação, o OSCAR realiza uma combina um grande número de componentes individuais, pseudocomponentes e metabólitos do óleo. Este tipo de abordagem permite que as taxas dos processos de intemperismo sejam calculadas para cada componente, já que diferentes componentes apresentarão taxas de evaporação ou degradação diferentes.

O OSCAR é um modelo de código fechado, implicando que o usuário não tem acesso ao seu código fonte e assim não podendo alterá-lo. A interação do modelo com o usuário é feita a partir de uma interface gráfica em ambiente *Windows*[®], onde muitos parâmetros de entrada podem ser alterados e/ou importados para dentro do modelo, como o fluxo de correntes, o regime de ventos, o perfil vertical de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido, o número de partículas sólidas e dissolvidas, a temperatura da água e do ar, a taxa de vazamento do óleo, a composição padrão do óleo, dados referentes ao sedimento em suspensão, etc (LEMOS, 2009). Podem ser geradas simulações determinísticas e probabilísticas, e os seus resultados podem ser visualizados diretamente na interface do modelo, sendo que alguns podem ser exportados para arquivos texto e/ou GIS e serem abertos em outros programas. Os mapas determinísticos podem ser visualizados de forma tridimensional e lagrangeana, podendo informar a quantidade de óleo sedimentado no fundo marinho, a viscosidade do óleo, a quantidade de água misturada ao óleo, a concentração do óleo, o diâmetro de partículas, a concentração de óleo que depositou na linha de costa

e a espessura da mancha de óleo, além do balanço de massa com os principais processos de intemperismo e respostas como o recolhimento mecânico (REED et al., 1995).

As simulações probabilísticas geram mapas de probabilidade através de várias simulações determinísticas. Todos os resultados neste modulo são eulerianos. Os resultados estão divididos em: superfície, coluna d'água, costa, e risco total que integra todos os resultados probabilísticos.

O passo de tempo do OSCAR é definido como o intervalo de tempo que o modelo usa para calcular os processos de intemperismo atuantes sobre a mancha de óleo ou as ações de resposta ao derrame, quando estas existem, e o valor padrão é de 10 minutos. Vários valores dos parâmetros do modelo podem ser ajustados como, taxa de transferência do vento para indução de corrente, número de partículas para representar o óleo e o tempo de gravação de saída dos resultados, que o modelo usa como padrão de 2 em 2 horas. Aamo & Reed (1997) realizaram testes de sensibilidade no modelo para vários destes parâmetros. A grade utilizada nas simulações numéricas é construída no próprio modelo OSCAR de forma regular.

A linha de costa utilizada pelo modelo possui resolução de 1 km, e é importada da *Agência de Mapeamento de Defesa dos EUA*, sendo possível importar linhas de costa para o modelo. A batimetria padrão do modelo OSCAR é a SeaTopo 6.2, a qual cobre uma área que se estende de 72° S até 72° N, numa resolução de 3 a 10 km. Esse conjunto de dados é baseado na combinação de dados altimétricos de satélite com os dados coletados por navios (REED, 2001).

Para a introdução do campo de correntes o modelo permite a inserção de campos bi e tridimensionais. Os campos bidimensionais podem variar ou não temporalmente. Os campos tridimensionais são importados de modelos ou de equipamentos de medição em campo. Estes devem variar temporalmente. Estes campos devem ser tratados para importação, e um tratamento necessário, em alguns casos, é a interpolação tanto na vertical (para deixar os dados em coordenadas verticais do tipo z) quanto na horizontal (para deixar os dados espaçados regularmente).

O modelo calcula internamente a formação de onda a partir dos dados de ventos.

A altura e o período da onda são computados e armazenados em uma grade retangular compatível com a usada para definir terra e água, e uma série de grades de pista de vento também é computada e armazenada. A cada mudança na velocidade ou direção do vento, um novo par de grades com altura e período da onda é calculado. As equações 2.1 e 2.2 são usadas para computar a altura da onda (H) e o período (T) como função da velocidade do vento (U), da profundidade da água (d), da pista de vento (F) e da aceleração da gravidade (g). Essas equações foram retiradas do U.S. Army Corps of Engineers Shore Protection Manual (1984).

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0,283 \tanh \left[0,530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left[\frac{0,00565 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0,530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right] \quad (2.1)$$

$$\frac{gT}{U_A^2} = 7,54 \tanh \left[0,833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left[\frac{0,0379 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0,833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right] \quad (2.2)$$

As aproximações e cálculos feitos para ondas não permitem a inclusão de processos como difração, reflexão e interação de onda e corrente.

O fluxograma de funcionamento do OSCAR está mostrado na figura 15. O usuário deve informar o tipo e composição do óleo, as condições de vazamento (taxa, localização, profundidade, temperatura e salinidade) e as condições de implementação do modelo, isto é, número de partículas, grade de simulação, níveis de profundidade e fator do vento (LEMOS, 2009).

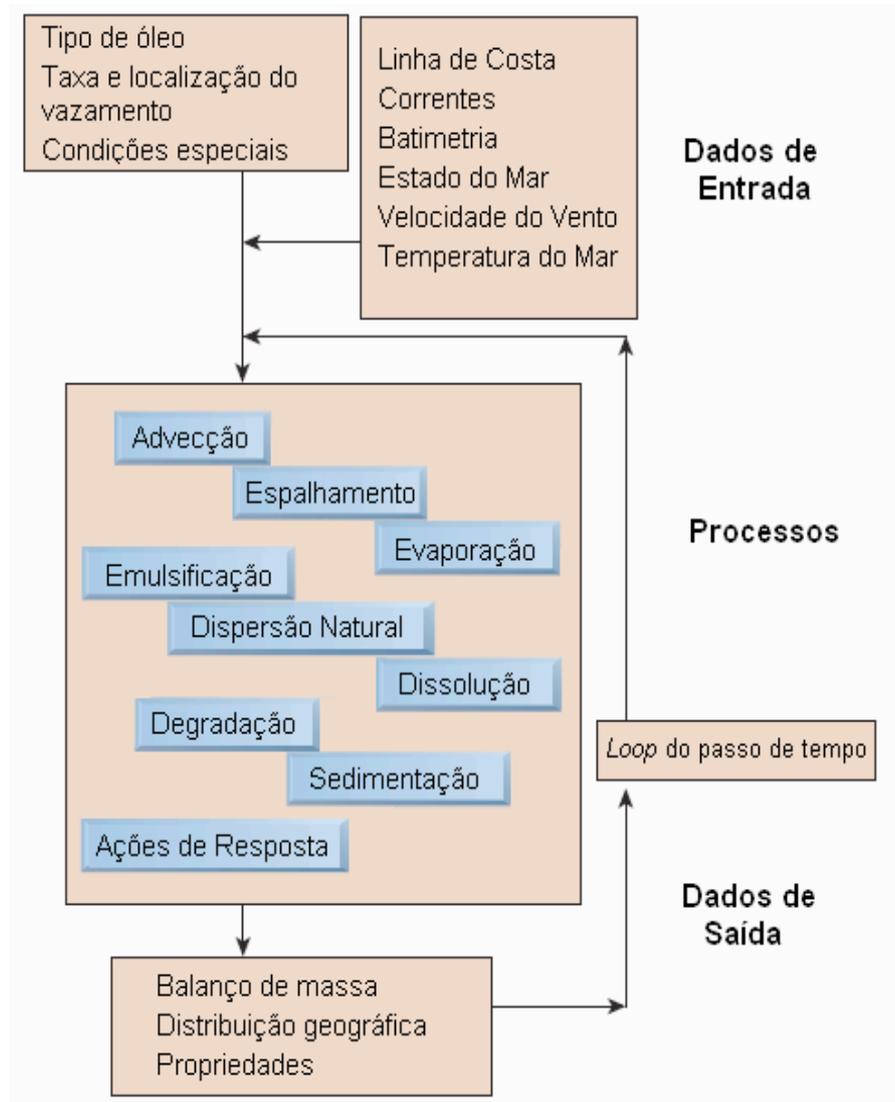


Figura 15: Fluxograma de processamento do modelo de dispersão de óleo OSCAR. Fonte: Adaptado de Reed et al. (1999).

O OSCAR emprega algoritmos de espalhamento superficial, advecção, entranhamento, emulsificação e evaporação para determinar o transporte e destino dos compostos. O óleo sedimentado pode misturar no sedimento e voltar à fase dissolvida na coluna d'água, enquanto que o óleo próximo à superfície pode evaporar para a atmosfera. Na coluna d'água os poluentes sofrem uma turbulência horizontal e vertical. Além disto, o particionamento entre o dissolvido e adsorvido ao material particulado é calculado com base na teoria do equilíbrio linear. Já a degradação na água e nos sedimentos é representada como um processo de decaimento de primeira ordem.

2.1.2 O modelo ROMS (Regional Ocean Model System)

O ROMS é um modelo desenvolvido pela Rutgers University em conjunto com a comunidade científica e outras universidades (UCLA e IRD). O ROMS é um modelo de diferenças finitas, que utiliza as equações primitivas do movimento, de superfície livre, hidrostático e com coordenadas que seguem a topografia ("terrain-following"), também chamadas de coordenadas sigma esticadas "stretched" na vertical. Estas coordenadas seguem a topografia, uma vez que não são valores fixos de profundidade e sim porcentagens da coluna d'água. Na horizontal, são usadas coordenadas ortogonais curvilineares.

O modelo apresenta algoritmos numéricos eficientes (Fortran 90/95), com possibilidade de ser utilizado em arquiteturas de tarefa única ou multitarefa, além de conter submodelos (biogeoquímicos, poluentes e transporte de sedimentos) e métodos de acoplamento com outros modelos conhecidos na literatura, como o SWAN (ondas) e o WRF(meteorológico). Os principais algoritmos, fórmulas e descrição do modelo podem ser acessados de forma online na página *www.myroms.org*.

Além disso, o modelo possui um módulo para assimilação de dados variacional (4DVAR), com base no algoritmo de Lanczos. O código do modelo está em constante desenvolvimento, pois trata-se de um código aberto ("opensource"), o que permite sua distribuição gratuita juntamente com o código-fonte e possibilidades de alterações e modificações por parte do usuário. O código-fonte é distribuído a partir de um protocolo SVN que permite manter a versão original do modelo atualizada além de possibilitar modificações e alterações do usuário de maneira simples e organizada.

O ROMS, como diversos outros modelos hidrodinâmicos utilizados para estudos de escoamentos de fluidos geofísicos, utiliza a técnica de "Mode-Splitting", que consiste em dividir o cálculo das equações do momento em dois modos, o barotrópico e o baroclínico. O primeiro modo é resolvido várias vezes dentro de cada intervalo do segundo modo, resolvendo as equações de superfície livre e de momento integrado na vertical, comunicando-se com o modo baroclínico (tridimensional), ambos se ajustando aos resultados de forma a otimizar o cálculo e não permitir divergências entre os valores calculados (BLUMBERG; MELLOR, 1987).

Diversos esquemas de advecção, mistura vertical (MY2.5, $K - \epsilon$, $K - \omega$), parametrizações (“bulk fluxes” e “subgrid-scale”) e condições de contorno estão disponíveis para utilização através da ativação de chaves em CPP (Pré-processamento em C). Os dados de entrada e saída do modelo são padronizados e possuem formato Netcdf (Network Common Data Format) (WARNER et al., 2010). As equações do movimento 2D e 3D são discretizadas no tempo usando um preditor (Leap-Frog) e corretor (Adams-Multon) de terceira ordem, o que permite uso de passos de tempo maiores. Para a advecção de momentum no modo externo, o padrão utilizado pelo modelo é um algoritmo de 4ª ordem centrado, e para o modo interno um de 3ª ordem positivo (“upstream”). Para os traçadores (temperatura e salinidade), o padrão utilizado é de 4ª ordem centrada. Além disso, diversos outros esquemas de advecção estão presentes, entre eles o método de advecção recursiva MPDATA (Multidimensional Positive Definite Advection Transport Algorithm), além de diferentes algoritmos para o cálculo do termo do gradiente de pressão.

2.2 As bases hidrodinâmicas e a importação dos dados para o OSCAR

As séries temporais de dados hidrodinâmicos foram importadas para o modelo OSCAR e funcionaram como a única forçante (meteo-oceanográfica) nos cenários de derramamento de óleo. Os dados de ventos não foram importados para o OSCAR para que fosse possível isolar o efeito da base hidrodinâmica na dispersão do óleo.

As bases hidrodinâmicas utilizadas no presente estudo foram cedida pelo Laboratório de Experimentação Numérica da Universidade Federal do Rio Grande (LENOC-FURG). Magalhaes (2012) utilizou-as em sua dissertação de mestrado, para analisar o efeito da variabilidade temporal do vento na Corrente do Brasil.

Foram utilizadas duas bases hidrodinâmicas, sendo uma forçada com fluxos de superfície sinóticos e ventos climatológicos mensais, que será chamada de base climatológica, e uma segunda base forçada com fluxo de superfície sinótico e vento sinótico (6 em 6 horas) que será chamada de base sinótica. A componente climatológica é gerada a partir da média climatológica mensal de onze anos de dados. As simulações hidrodinâmicas, realizadas por Magalhaes (2012), foram configuradas mantendo todos os parâmetros iguais, a

não ser o coeficiente de viscosidade turbulenta para velocidades e traçadores e os fluxos de superfície.

Os experimentos numéricos foram realizados para um período de nove anos utilizando o modelo ROMS. A resolução utilizada na grade foi de aproximadamente $1/12^\circ$, criando elementos com cerca de 7 km, cobrindo a região da Bacia de Santos e parte sul da Bacia de Campos. Foi escolhido apenas o ano 2007 para ser importado para o OSCAR.

A grade utilizada na simulação do ROMS contou com a batimetria do ETOPO-REMO que pode ser observada na figura 16. Esta batimetria foi interpolada para o domínio de estudo e teve os ajustes necessários para garantir a estabilidade numérica do modelo. A frequência de gravação dos resultados foi de cinco dias. Apesar das simulações realizadas por Magalhaes (2012) terem frequência de gravação de um dia, para modelagem de óleo optou-se por salvar os arquivos de cinco em cinco dias. A grade tem dimensão de 200×146 elementos (x por y), com 30 camadas verticais. O modelo ROMS usou climatologias mensais do modelo HYCON NCODA nos contornos, as climatologias também serviram de condição inicial das simulações. O modelo usou campos iniciais de temperatura e salinidade e não foi forçado com maré.

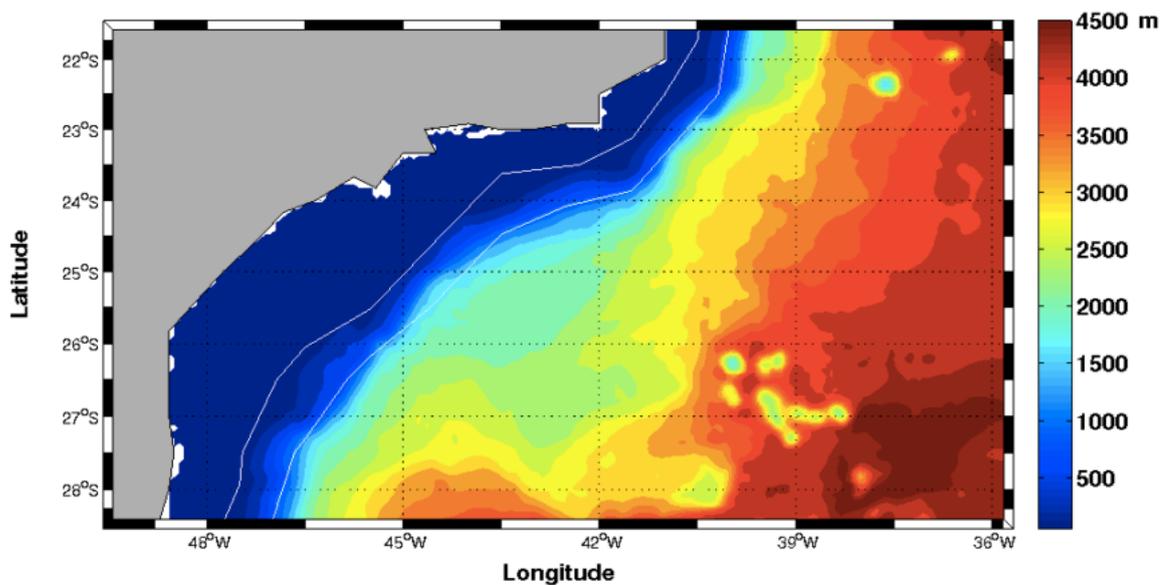


Figura 16: Grade numérica utilizada no modelo ROMS para a realização dos experimentos numéricos, com destaque para batimetria. As linhas brancas mostram as isóbatas de 200 e 1000 metros. Cedida por Magalhaes (2012).

Os resultados de Magalhaes (2012) mostraram que a energia cinética média (ECM) e turbulenta (ECT) são diferentes nos experimentos climatológicos e sinóticos. Isto fica evidenciado nas figuras 17 e 18. A energia cinética média está relacionada a intensidade do escoamento médio, ao passo que a energia cinética turbulenta está relacionada à intensidade da turbulência e da formação de processos de mesoescala.

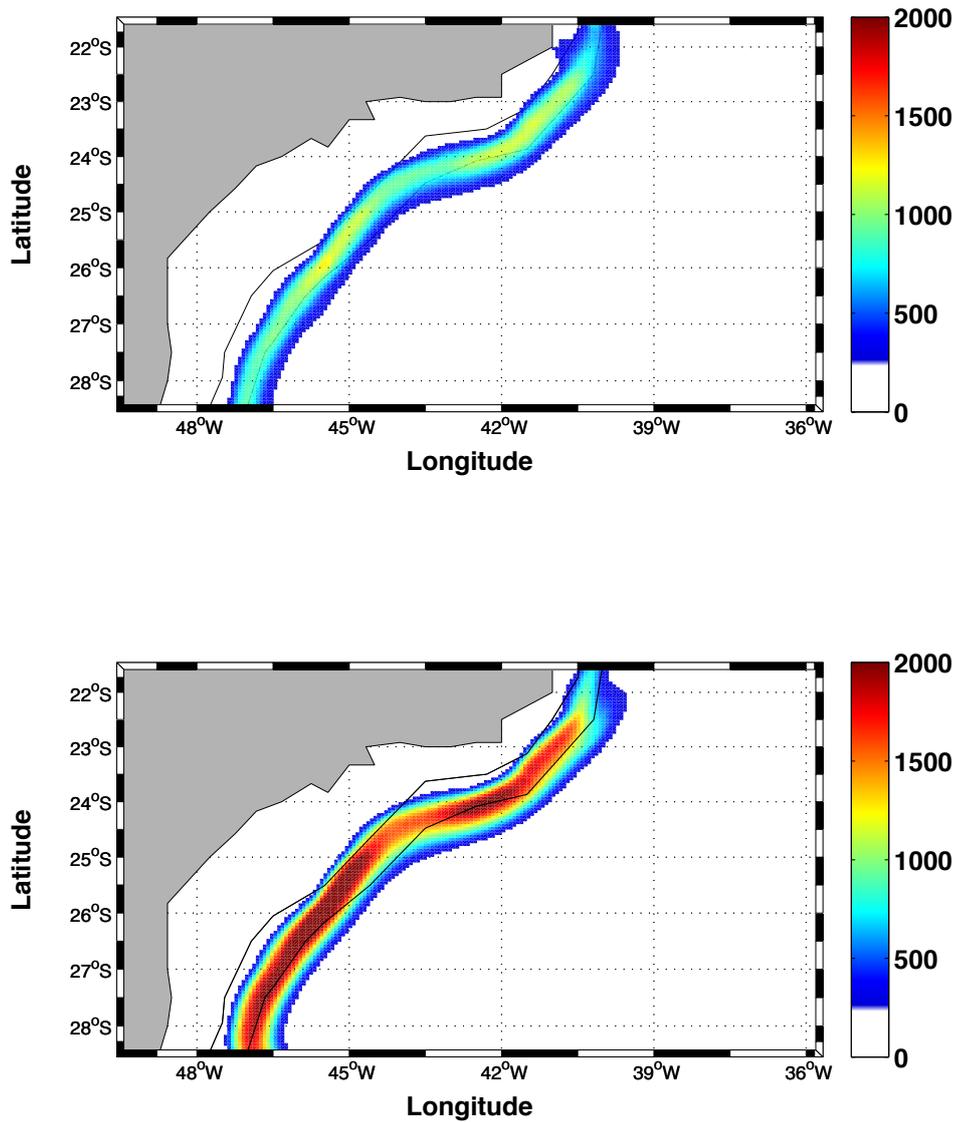


Figura 17: Campo de energia cinética média (cm^2/s^2) de toda a simulação, calculado a 15 metros de profundidade para a base sinótica (parte superior) e base climatológica (parte inferior). Gentilmente cedido por Magalhaes (2012)

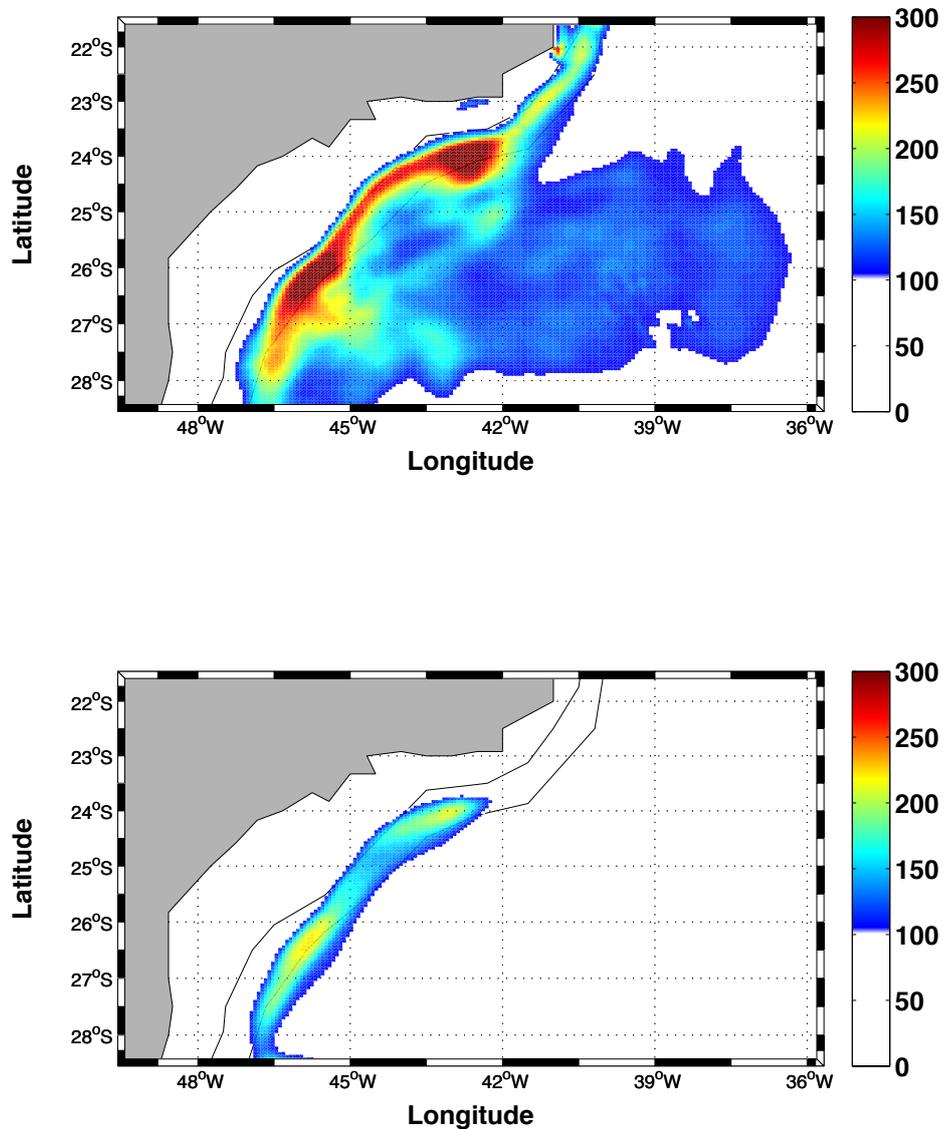


Figura 18: Campo de energia cinética turbulenta (cm^2/s^2) de toda a simulação, calculado a 15 metros de profundidade para a base sinótica (parte superior) e base climatológica (parte inferior). Gentilmente cedido por Magalhaes (2012).

Os resultados hidrodinâmicos do ROMS foram interpolados, tanto na vertical quanto na horizontal, para serem importados e lidos pelo modelo OSCAR. A interpolação horizontal foi cúbica (ou trilinear) e na vertical usou-se a interpolação linear. No plano horizontal (x-y) os resultados da grade do ROMS com 200x146 foram levados para uma grade de 302x202, totalmente linear, com os mesmos limites espaciais e com resolução de $1/12^\circ$. A grade utilizada no OSCAR pode ser vista na figura 19.

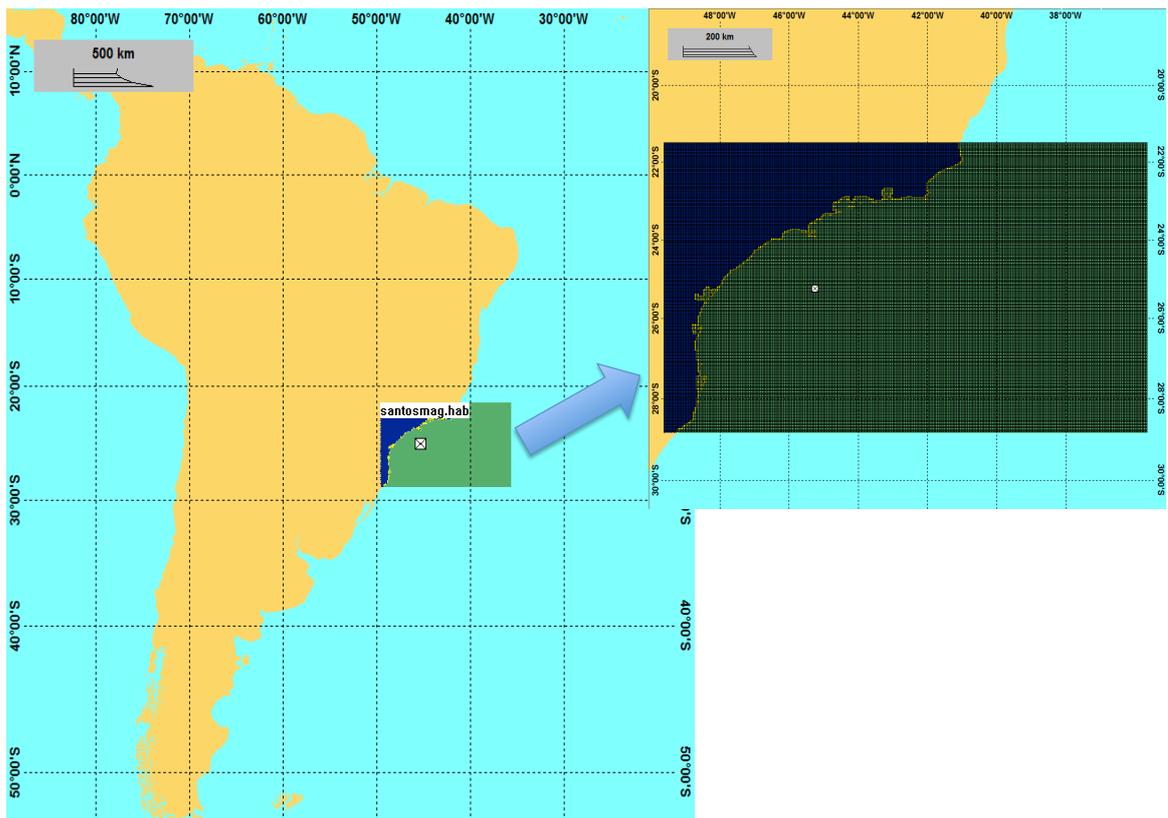


Figura 19: Grade numérica utilizada no modelo OSCAR para a realização das simulações. As cores azul, amarela e verde representam o continente, sedimentos costeiros (areia) e a água, respectivamente. Em destaque a região da Bacia de Santos e a delimitação dos elementos de grade utilizados.

Na vertical os dados foram passados de coordenada sigma esticada para coordenada z . Após isso foi utilizada a interpolação linear e os dados foram rearranjados em 5 níveis z . Os níveis escolhidos foram 5 metros, 50 metros, 80 metros, 150 metros e 300 metros. Estes 5 níveis representam toda a coluna d'água uma vez que o quinto nível faz a representação até o fundo.

Os dados são importados para o OSCAR a partir de arquivos NetCDF (*Network Common Data Form*), onde tem-se as informações de data, localização (latitude e longitude) dos pontos da grade, componentes u e v da velocidade e os níveis z escolhidos. Estes arquivos NetCDF são importados para o OSCAR, o qual gera um arquivo hidrodinâmico próprio com extensão .hyd.

Foram importadas para o OSCAR as duas bases, climatológica e sinótica, que foram

usadas de forçantes para os diferentes cenários simulados. O período de cada uma é de um ano, compreendendo de 1° de janeiro de 2007 a 1° de janeiro de 2008. A frequência temporal dos dados é de cinco dias.

2.3 Parâmetros e premissas das simulações de derrame de óleo com o modelo OSCAR

Os parâmetros ambientais presentes neste trabalho foram fornecidos pelo IBAMA, retirados da Modelagem da Dispersão de Óleo e Efluentes feita para o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do empreendimento do “Campo de Merluza”.

Os parâmetros ambientais são importantes no destino e nos processos de intemperismo que estão associados ao óleo no mar, influenciando na elaboração de estudos ambientais, bem como nas estratégias de contenção e recolhimento.

Os principais parâmetros ambientais a serem considerados, segundo Lemos (2009), são a temperatura do ar e da água, a salinidade, a concentração de sedimento em suspensão, a porcentagem da velocidade do vento induzindo corrente superficial e a taxa de oxigênio dissolvido.

As temperaturas do ar para verão e inverno foram obtidas no relatório fornecido pelo IBAMA, (BAPTISTA et al., 2006), apresentando valores de inverno e verão de 17°C e 22°C respectivamente, sendo que para a simulação anual foi utilizado o valor de 20°C, valor este que foi escolhido por estar entre os valores de verão e inverno. Os dados foram medidos na cidade de São Paulo, próximo à área de estudo. Os dados de temperatura e salinidade da coluna d'água até 300 metros também foram obtidos de Baptista et al. (2006). Estudos feitos na região mostraram que a concentração de sedimentos em suspensão é em média de 10 $mg.L^{-1}$ (LEITAO et al., 2001). Esse parâmetro é fundamental, visto que é um dos principais causadores da sedimentação do óleo no leito marinho (BOEHM, 1987). A taxa de oxigênio dissolvido, segundo pesquisadores noruegueses, ainda não é relevante para as simulações do OSCAR, sendo usado um valor padrão no modelo de 10 $mg.L^{-1}$. As informações ambientais utilizadas no trabalho estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros ambientais da simulação

Parâmetro	Descrição	Valor Utilizado
Temperatura do Ar	Temperatura média anual do ar obtida através do INMET para Sao Paulo	20 °C - Anual 22 °C - Verão 17 °C - Inverno
Temperatura da Água	Temperatura média climatológica da água do mar (BAPTISTA et al., 2006)	22 °C
Salinidade	Salinidade média da água do mar obtida por média climatologica	36
Concentração de Sedimento em suspensão	Concentração de sedimento para a região de estudo	10 mg.L ⁻¹
Taxa de Oxigênio dissolvido	Média Fornecida por pesquisadores da SINTEF	10 mg.L ⁻¹

Para as simulações realizadas, de dispersão e transporte de óleo, foram escolhidos três campos de exploração na Bacia de Santos: Campo de Merluza, Campo de Água Profunda, e Campo de Água Rasa, para que se pudesse avaliar o efeito das variabilidades de mais alta frequência em diferentes locais, sob a Corrente do Brasil, sob a Plataforma Continental e em águas profundas. Foram utilizados campos de correntes tridimensionais e variáveis no tempo, gerados através de simulação hidrodinâmica com o ROMS. Os ventos com variação espaço-temporal foram zerados com o objetivo de isolar o efeito das correntes.

A batimetria usada foi a presente na base de dados do OSCAR e está baseada na combinação de dados de altimetria por satélite e levantamento batimétricos realizados através do uso de ecobatímetros. Essa base é distribuída em pontos de grade regular com uma resolução de 3 a 10 km e é definida no modelo através do SeaTopo 6.2, o qual cobre uma área que se estende de 72° S até 72° N (REED, 2001). A figura 20 mostra a batimetria utilizada na modelagem, com a marcação dos três pontos de derrame localizados no Campo de Merluza, no Campo de Água Profunda e no Campo de Água Rasa.

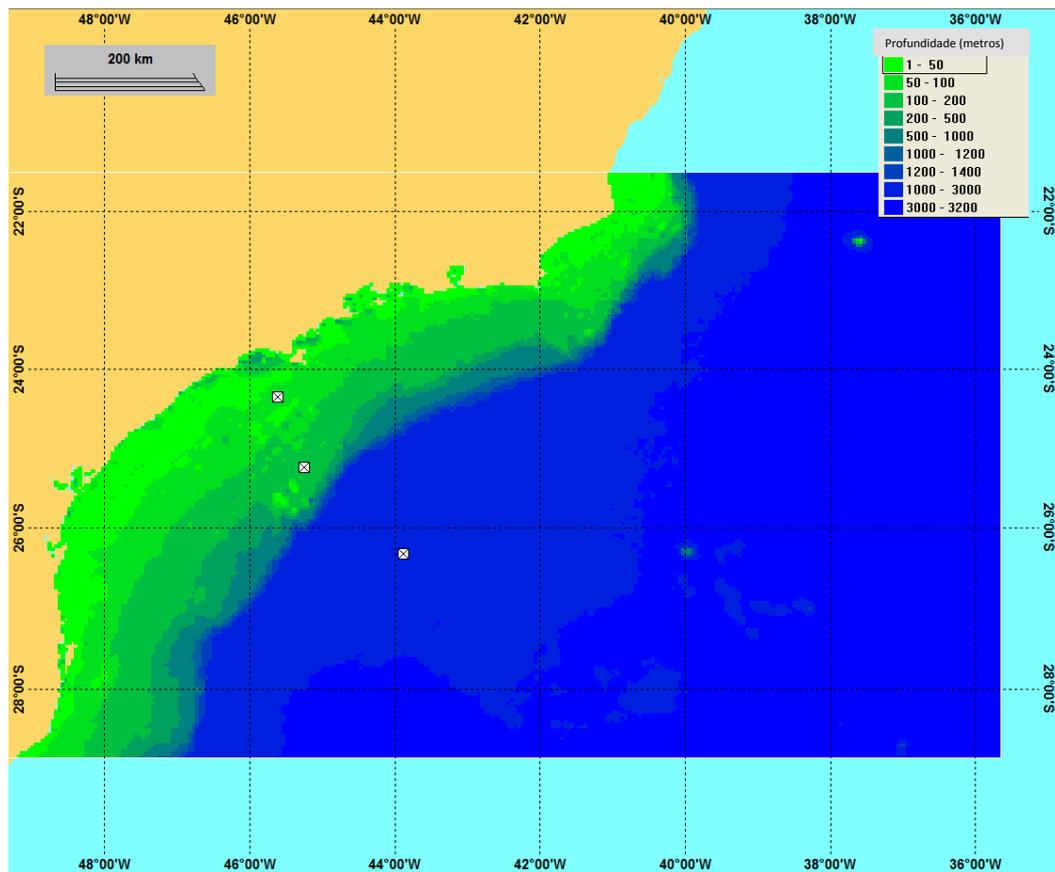


Figura 20: Localização dos pontos de derrame de óleo no Campo de Merluza, Campo de Água Rasa e Campo de Água Profunda. Em verde e azul a batimetria utilizada até 3200 metros, fonte de dados *SeaTopo 6.2*

2.4 Estratégia de modelagem adotada

Para o estudo da dispersão e do transporte do óleo derramado foram utilizadas duas bases hidrodinâmicas, produzidas por Magalhaes (2012) utilizando o modelo ROMS. Na primeira, o vento utilizado foi sinótico (6 em 6 horas) e na segunda usou-se uma média climatológica para o campo de vento. A base climatológica apresenta instabilidades e feições de mesoescala atenuadas e muitas vezes filtradas. A base sinótica tem incorporada as variabilidades de maior frequência, como a mesoescala. As simulações com as duas bases foram conduzidas considerando-se os mesmos parâmetros ambientais e as mesmas premissas.

A Tabela 2 mostra os campos escolhidos para a simulação de derrame de óleo. Foram selecionados três campos: um costeiro, um sobre a CB e um em água profunda. O volume de óleo derramado foi estabelecidos de acordo com as definições de derrames de pior caso

presente na Resolucao CONAMA n° 398, de 11 de Junho de 2008. Considerou-se a perda de controle do poço (*blowout*) por 30 dias com uma taxa de vazão de $63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Esta taxa foi definida para o estudo de licenciamento da obra em Baptista et al. (2006) e totaliza o volume de $1912,50 \text{ m}^3$ de óleo em 30 dias de derrame.

Tabela 2: Características e localizações dos pontos simulados

Campo	Latitude	Longitude	Profundidade da coluna d'água	Volume do <i>Blowout</i>
Merluza	25° 15' S	45° 15' W	170 metros	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$
Água Profunda - BM-S-34	26° 20' S	43° 52' W	2.300 metros	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$
Água Rasa - S-M-303	24° 22' S	45° 32' W	76 metros	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$

A Tabela 3 apresenta algumas das características do óleo MLZ-3D explorado no Campo de Merluza, Petrobras. Foi selecionado para as simulações um óleo, do banco de dados do OSCAR, com características semelhantes. Como não existem informações de produção e do tipo de óleo explorados nos outros Campos (Água Rasa e Água Profunda), foram usados os dados do Campo de Merluza.

Tabela 3: Características do óleo MLDZ-3D (Campo de Merluza)

Característica	Valores	Unidade
Densidade	55,1	°API
Densidade Relativa	0,754	g/cm^3
Viscosidade Dinâmica (à 25° C)	0,556	cP

Com o objetivo de avaliar os efeitos das bases hidrodinâmicas em diferentes áreas, foram escolhidos três campos. O primeiro é o Campo de Merluza, que está sob a influência direta da CB, uma vez que este se encontra na quebra da plataforma continental. O

segundo é o Campo de Água Profunda, que está sob influência da circulação oceânica ao largo leste da CB. Por último foi escolhido o Campo de Água Rasa, que está na plataforma continental e está sujeito a circulação costeira.

A fim de que sejam consideradas diferentes condições oceanográficas, foram realizadas 100 simulações determinísticas para gerar os campos de probabilidade. Estas simulações determinísticas se diferem entre si pelo momento de início da simulação e cada uma tem um período de 30 dias. Para representar a sazonalidade foram escolhidos períodos diferentes para serem realizadas as 100 simulações:

- Período anual, 365 dias - janeiro de 2007 a dezembro de 2007.
- Período de verão, 90 dias - janeiro de 2007 a março de 2007.
- Período de inverno, 90 dias - junho de 2007 a agosto de 2007.

Na Tabela 4 são listados os cenários realizados e os seus respectivos critérios de parada. Foram considerados derrames com vazamento contínuo por 30 dias. O critério de parada adotado foi encerrar as simulações assim que se encerrassem os derrames.

Tabela 4: Cenários de simulação

Cenário	Campo	Período	Base hidrodinâmica	Volume	Vazão
1	Merluza	Anual	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
2	Merluza	Anual	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
3	Água Profunda	Anual	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
4	Água Profunda	Anual	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
5	Água Rasa	Anual	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
6	Água Rasa	Anual	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias

7	Merluza	Inverno	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
8	Merluza	Inverno	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
9	Água Profunda	Inverno	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
10	Água Profunda	Inverno	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
11	Água Rasa	Inverno	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
12	Água Rasa	Inverno	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
13	Merluza	Verão	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
14	Merluza	Verão	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
15	Água Profunda	Verão	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
16	Água Profunda	Verão	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
17	Água Rasa	Verão	Sinótico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias
18	Água Rasa	Verão	Climatológico	$63,75 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$	Contínuo por 30 dias

Foram analisados os campos de probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para todos os cenários simulados. A probabilidade percentual de ocorrência de óleo na superfície representa a área na qual o óleo estará presente ao longo dos 30 dias de simulação de cada cenário. Para o Campo de Merluza ainda foram feitas análises sob outros resultados probabilísticos em uma secção a 26° S. São eles:

1. Tonelagem Máxima por Célula de 10 km^2
2. Tempo Mínimo de Chegada (dias)
3. Máximo Tempo de Exposição Atmosférica (dias)

A tonelagem máxima de óleo por célula representa a quantidade de óleo em cada célula do OSCAR. Este fator é fortemente influenciado pelo tipo de óleo. Óleos leves tendem a sofrer mais com a evaporação levando a uma quantidade por célula menor. O tempo mínimo de chegada é um fator de planejamento importante pois define áreas onde o óleo chegará primeiro. O máximo tempo de exposição atmosférica informa quanto tempo o óleo fica em um determinado lugar até ser intemperizado e removido para a atmosfera, ou advectado para outra área.

3 *Resultados*

Neste capítulo serão apresentados os resultados. Primeiro serão apresentados os padrões de circulação presentes nas bases hidrodinâmicas interpoladas para o OSCAR. Depois serão apresentados os resultados probabilísticos para os seguintes cenários: anual, verão e inverno, além das duas opções de base hidrodinâmica (sinótica e climatológica) e dos três pontos de simulação (Merluza, Água Rasa e Água Profunda). Os resultados estão apresentados em forma de mapas. Por último, serão apresentados os resultados do Campo de Merluza para a secção 26° S em forma de tabela.

3.1 Interpolação das bases hidrodinâmicas sinótica e climatológica

Os dados hidrodinâmicos gerados por Magalhaes (2012) e oriundos do modelo ROMS, apresentados na figura 21, mostram as bases climatológicas e sinóticas para os períodos de verão (01/06/2007) e inverno (01/06/2007). Em todas as imagens fica clara uma corrente bem marcada, em direção ao sul e na quebra de plataforma. Este fluxo é associado à Corrente do Brasil (CB). As velocidades da CB estão entre 0,5 e 1,0 $m.s^{-1}$.

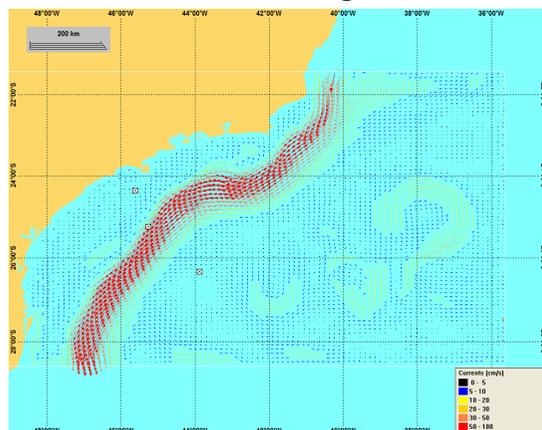
Para as simulações de derrames no Campo de Merluza a CB pareceu ser responsável pelo destino final do óleo derramado nesta área. No campo sinótico observou-se uma maior presença de instabilidades na plataforma, na CB e na área mais profunda ao largo do eixo principal da CB. Esta instabilidade foi gerada pela frequência temporal sinótica nos dados de vento que forçaram o modelo hidrodinâmico. Ela também serviu para causar uma dispersão maior no óleo derramado em Merluza.

Na base climatológica, nota-se a presença de uma corrente costeira sobre a plataforma,

que flui em direção ao norte na área de estudo. Esta corrente é descrita na literatura por Godoi (2005) e pode estar associada à corrente fria de plataforma. Esta corrente não é observada no campo sinótico, isto pode estar associado à maior instabilidade resultante da forçante de superfície de maior frequência.

Na área mais oceânica (ao leste da CB), observa-se uma menor intensidade nas velocidades das correntes. Existem interações de instabilidades (vórtices e meandros) desta região com a CB e presença de vórtices e meandros em ambas as bases hidrodinâmicas (sinótica e climatológica), porém na base sinótica estes processos de mesoescala são muito mais intensos e pronunciados.

Base Climatológica



Base Sinótica

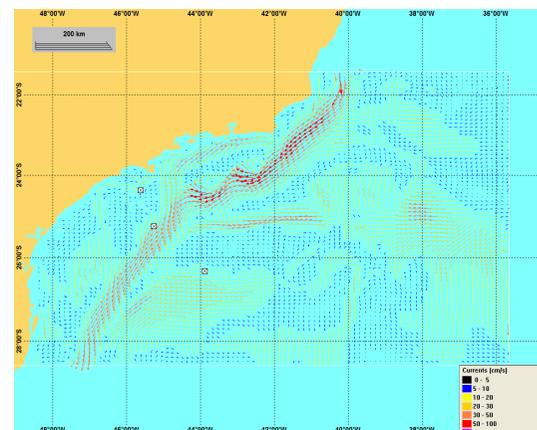
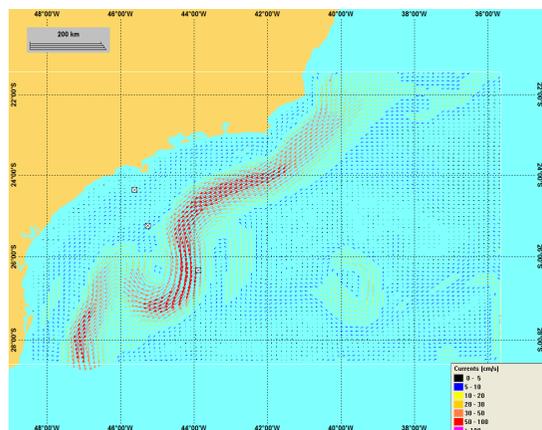
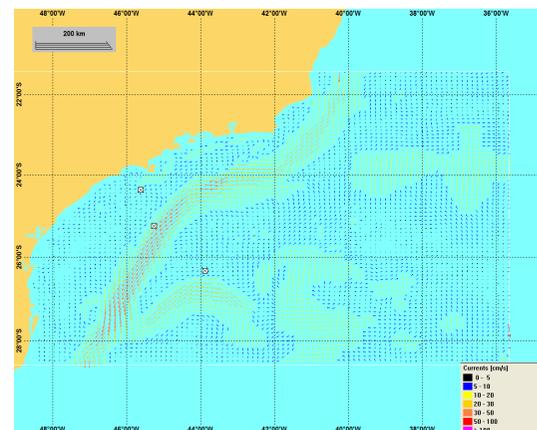


Figura 21: Campos superficiais de corrente interpolados para o modelo OSCAR e espaçados de 2 em 2 pontos para facilitar a visualização. Na esquerda a base climatológica e na direita a base sinótica. As figuras superiores referem-se ao dia 01/01/2007. As figuras inferiores referem-se ao 01/06/2007. Os três pontos marcados nas figuras, são as localizações dos campos de Água Rasa, Merluza e Água Profunda.

3.2 Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície

Serão apresentados os resultados para a ocorrência de óleo na superfície para diferentes cenários simulados, que representam os riscos, em porcentagem, de presença de óleo na superfície durante os 30 dias de simulação.

3.2.1 Simulações período anual

Os mapas foram gerados a partir de 100 simulações determinísticas dentro do período de um ano de dados hidrodinâmicos (365 dias).

3.2.1.1 Campo de Merluza

O campo de Merluza localiza-se na Bacia de Santos em uma área sobre a influência direta da Corrente do Brasil. As figuras mostram mapas de probabilidade de ocorrência de óleo na superfície a partir de derrames contínuos de 30 dias no campo de Merluza.

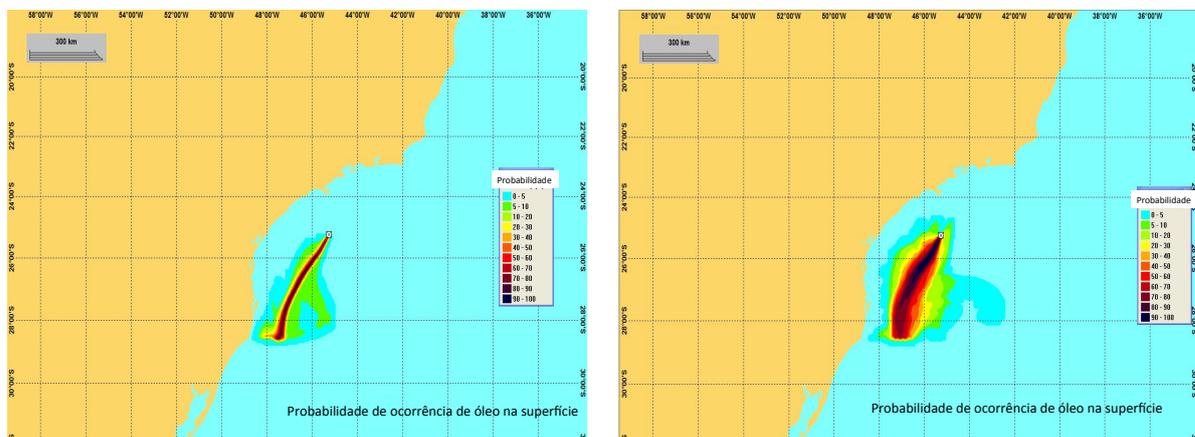


Figura 22: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de 1 ano (365 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo, mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Merluza

3.2.1.2 Campo de Água Profunda

O campo de água profunda escolhido para a simulação encontra-se na Bacia de Santos em uma área à leste do eixo principal da Corrente do Brasil.

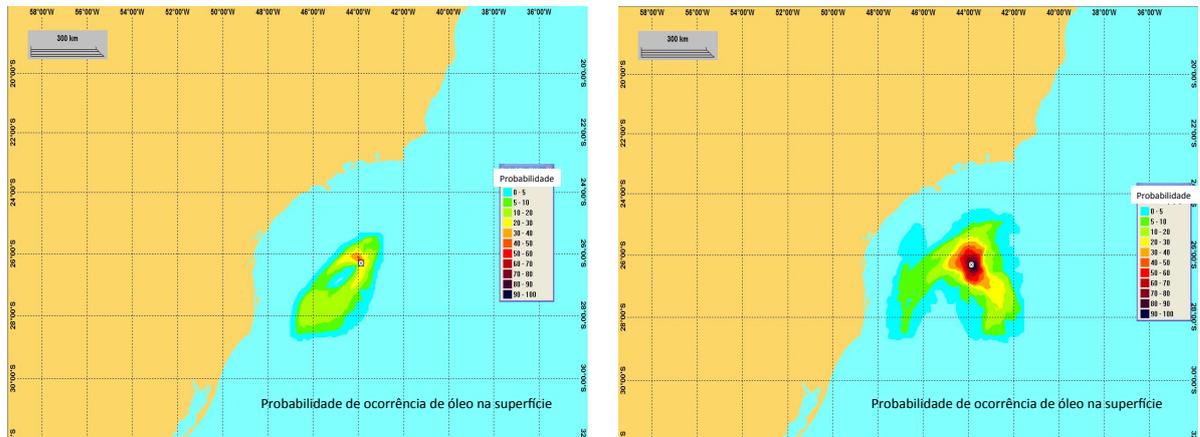


Figura 23: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de 1 ano (365 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Água Profunda

3.2.1.3 Campo de Água Rasa

O campo de água rasa escolhido para a simulação encontra-se na Bacia de Santos em uma área à oeste do eixo principal da Corrente do Brasil.

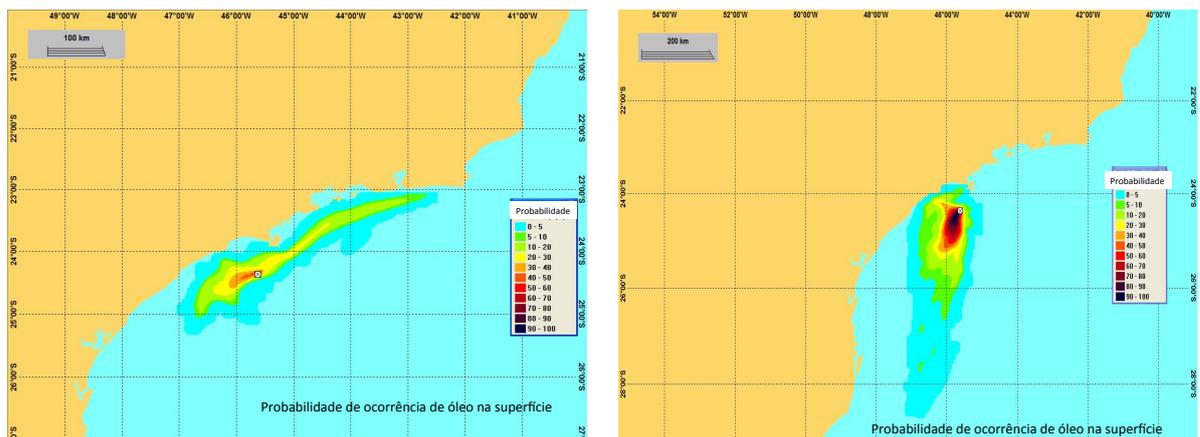


Figura 24: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de 1 ano (365 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Água Rasa

3.2.2 Simulações período de inverno

Os mapas foram gerados a partir de 100 simulações determinísticas dentro do período de inverno (junho, julho e agosto) dos dados hidrodinâmicos (90 dias).

3.2.2.1 Campo de Merluza

O campo de Merluza localiza-se na Bacia de Santos em uma área sobre a influência direta da Corrente do Brasil.

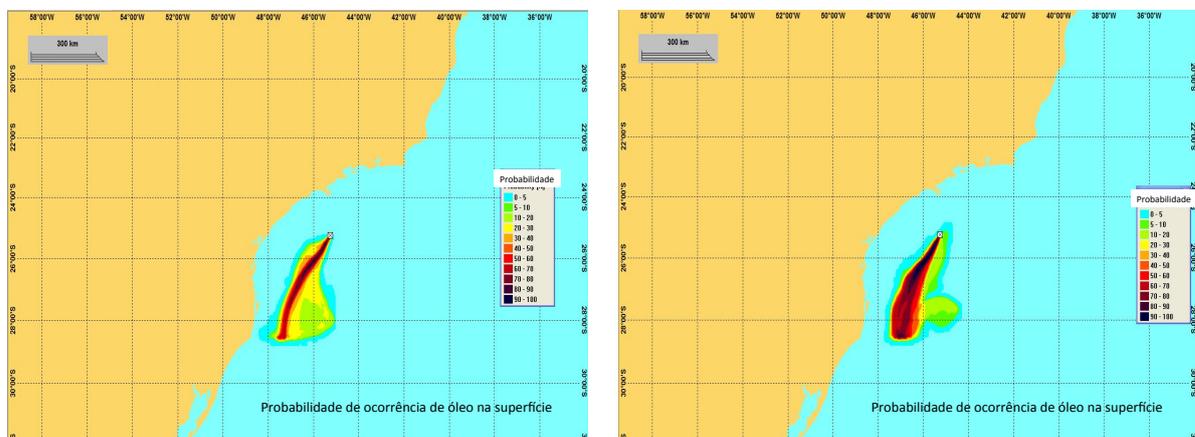


Figura 25: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de inverno (90 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Merluza

3.2.2.2 Campo de Água Profunda

O campo de água profunda escolhido para a simulação encontra-se na Bacia de Santos em uma área à leste do eixo principal da Corrente do Brasil.

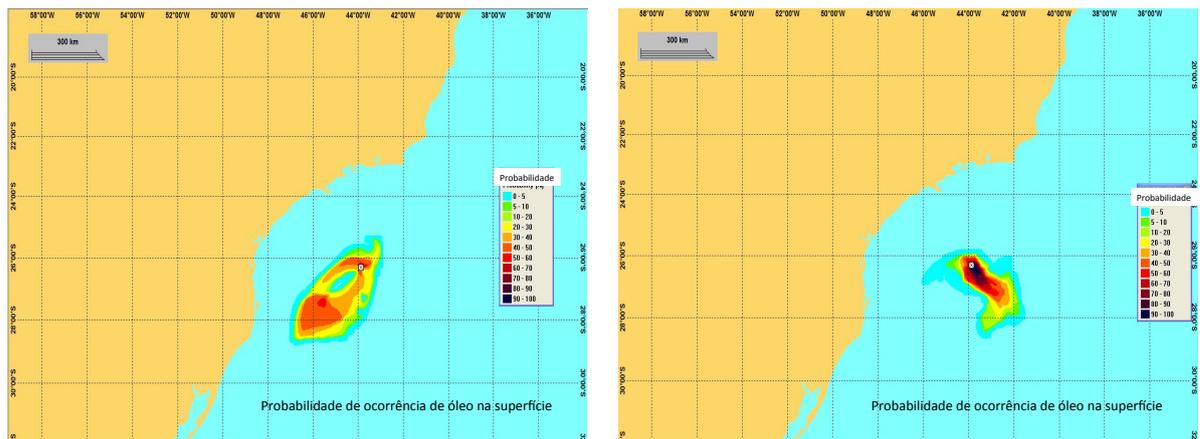


Figura 26: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de inverno (90 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Água Profunda

3.2.2.3 Campo de Água Rasa

O campo de água rasa escolhido para a simulação encontra-se na Bacia de Santos em uma área à oeste do eixo principal da Corrente do Brasil.

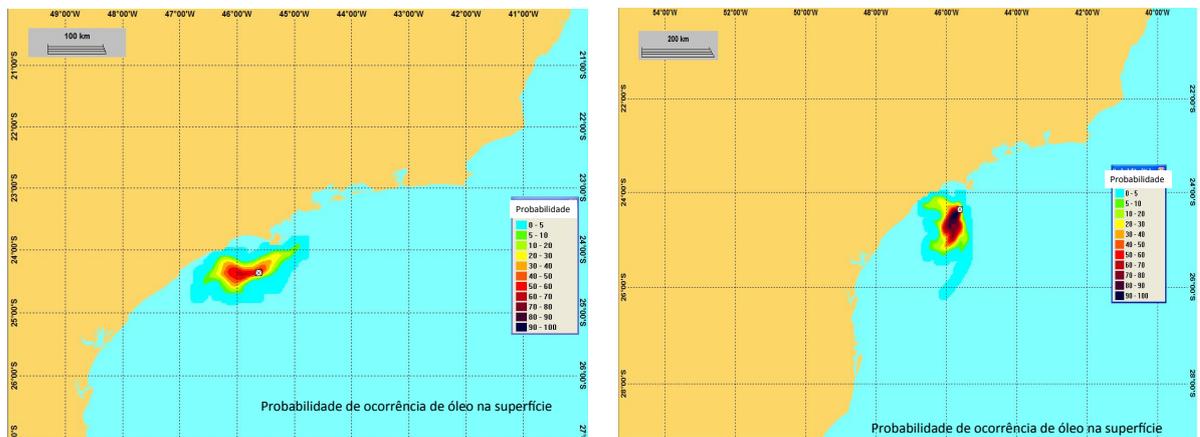


Figura 27: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de inverno (90 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Água Rasa

3.2.3 Simulações período de verão

Os mapas foram gerados a partir de 100 simulações determinísticas dentro do período de verão (janeiro, fevereiro e março) dos dados hidrodinâmico (90 dias).

3.2.3.1 Campo de Merluza

O campo de Merluza localiza-se na Bacia de Santos em uma área sobre a influência direta da Corrente do Brasil.

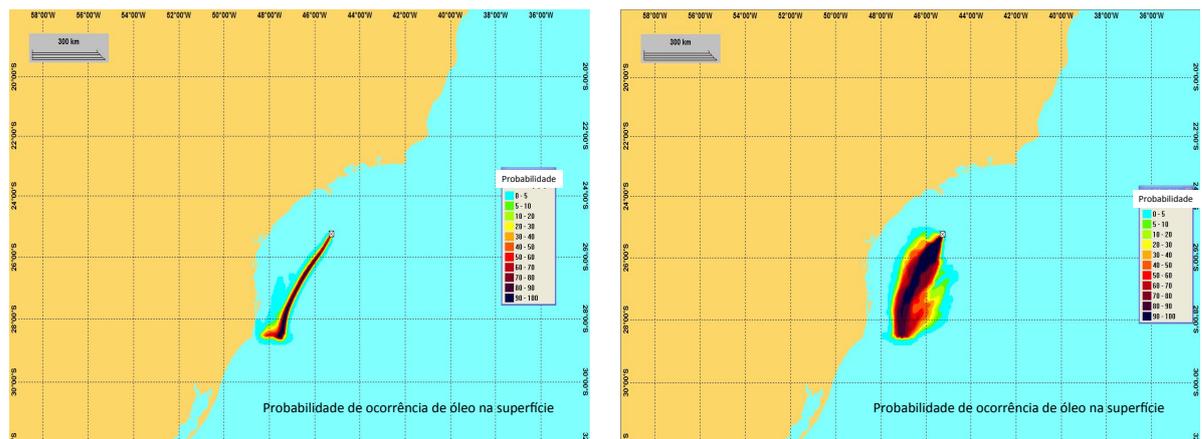


Figura 28: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de verão (90 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Merluza

3.2.3.2 Campo de Água Profunda

O campo de água profunda escolhido para a simulação encontra-se na Bacia de Santos em uma área à leste do eixo principal da Corrente do Brasil.

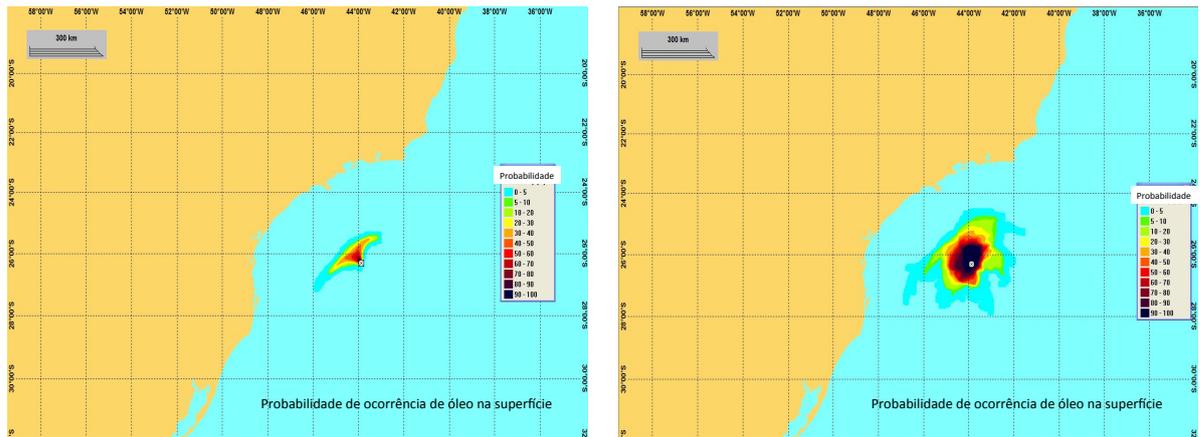


Figura 29: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de verão (90 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Água Profunda

3.2.3.3 Campo de Água Rasa

O campo de água rasa escolhido para a simulação encontra-se na Bacia de Santos em uma área à oeste do eixo principal da Corrente do Brasil.

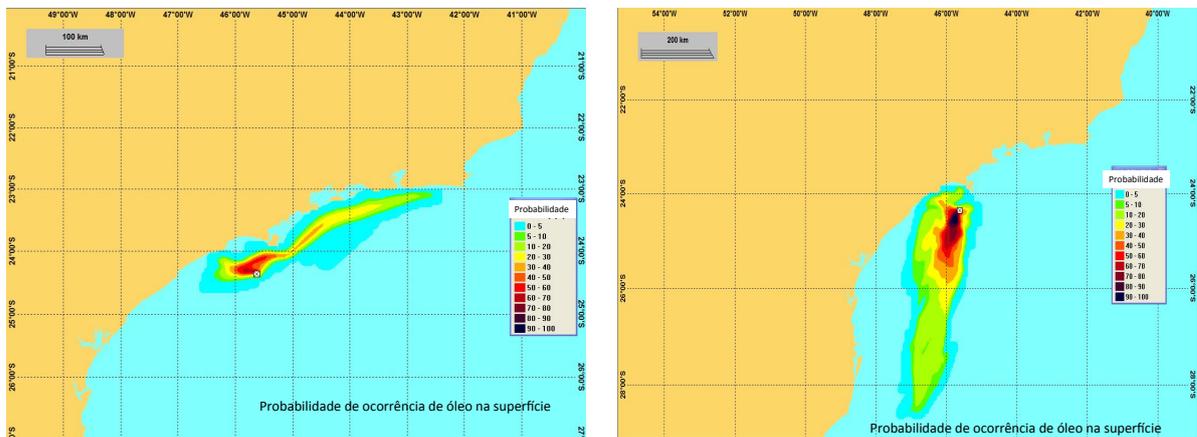


Figura 30: Resultado probabilístico das 100 simulações de 30 dias cada, para o período de verão (90 dias), com derrame de $63,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de óleo mostrando a probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A esquerda a simulação com a base climatológica e a direita a simulação com a base sinótica para derrames acidentais no campo de Água Rasa

3.3 Resultados probabilísticos na secção de 26° S para o Campo de Merluza

Nesta secção são apresentados os resultados para o Campo de Merluza, nas simulações com as bases hidrodinâmicas sinótica e climatológica, para os períodos anual, inverno e verão. Todos os resultados são para a secção presente na latitude 26° S. Os resultados são para:

- Comprimento da região com probabilidade de ocorrência de óleo superficial, maior ou igual a 40% (metros).
- Tonelagem Máxima por Célula de 10 km^2 .
- Tempo Mínimo de Chegada (dias)
- Máximo Tempo de Exposição Atmosférica (dias)

Tabela 5: Resultado para 100 simulações probabilísticas de derramamento de $63,75 m^3 dia^{-1}$ de óleo do tipo leve no Campo de Merluza, avaliados na secção na latitude de 26° S

Resultados	Climatológico			Sinótico		
	Anual	Inverno	Verão	Anual	Inverno	Verão
Comprimento da região com probabilidade de ocorrência de óleo superficial, maior ou igual a 40% (metros)	23.400	45.300	16.600	96.300	44.400	128.900
Tonelagem Máxima por Célula de 10 km^2	1	1,1	0,25	1,8	0,5	0,6
Tempo Mínimo de Chegada (dias)	2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Máximo Tempo de Exposição Atmosférica (dias)	23	18	21	13	15	7,5

4 *Discussão*

Devido a grande quantidade de análises comparativas decorrentes do presente estudo, a discussão será dividida em três. A primeira e mais importante parte será a comparação entre as simulações que utilizaram base hidrodinâmica sinótica e as que utilizaram base hidrodinâmica climatológica. Posteriormente, serão discutidas as análises da sazonalidade, comparando as simulações dos cenários de verão e inverno e por último serão feitas as discussões e análises das comparações entre os diferentes campos simulados. Todas as análises comparativas serão feitas tendo como base os resultados para a probabilidades de ocorrência de óleo na superfície.

4.1 **Comparação entre as simulações climatológicas e sinóticas**

Serão realizadas as discussões acerca das modelagens de derrame de óleo que usaram como forçantes a base sinótica e a base climatológica. São consideradas as comparações para os diferentes campos simulados, a saber: Campo de Merluza; Campo de Água Profunda; e Campo de Água Rasa.

4.1.1 **Campo de Merluza**

A área referente ao Campo de Merluza está sob forte influência da CB. O ponto de derrame está localizado no eixo principal da corrente. Nas simulações probabilísticas anuais, tanto para as simulações com base sinótica quanto as com base climatológica a CB foi o fator principal na definição do destino final da mancha. Ambas se deslocaram para sul, não havendo probabilidade de ocorrência de óleo superficial a norte do ponto de derrame. Devido a intensificação dos vetores de velocidade na área da CB o óleo foi advectado até

o extremo sul da grade do modelo, criando os campos de probabilidade a sul do ponto de derrame seguindo o eixo principal da corrente.

Apesar da conformação dos campos de probabilidades seguirem a CB, nota-se diferenças entre os cenários simulados para o período anual. A base hidrodinâmica sinótica, traz uma maior presença de variabilidades de mesoescala dentro de suas componentes dinâmicas. Isto faz com que as instabilidades e turbulências sejam maiores, ao passo que, na base hidrodinâmica climatológica, a componente do movimento médio se mostra mais acentuada e o incremento de energia cinética causado pelos processos de mesoescala são menos significativos. Estas características dinâmicas distintas, refletem nos mapas de probabilidade de ocorrência de óleo na superfície. A maior instabilidade, principalmente associada à energia cinética turbulenta, presente na base sinótica, gera um maior espalhamento do óleo no sentido leste-oeste, fazendo com que o mancha tenha uma maior probabilidade de atingir áreas ao largo da CB.

Comparando os cenários de inverno das simulações sinótica e climatológica observa-se que a área, com probabilidade de ocorrência de óleo na superfície maior que 50 %, é mais ampla no sentido leste-oeste na simulação feita com a base sinótica. Isto está associado às instabilidades de inverno presentes na CB e nas suas áreas de influências adjacentes. Estas instabilidades podem ser fruto de vórtices, meandros e outras estruturas dinâmicas de mesoescala. As feições de mesoescala tendem a complexar o fluxo da CB fazendo com que este não carregue o óleo apenas para sul, mas também para a área a leste (sob a plataforma) e a oeste (oceano aberto). Observando os cenários de verão, nota-se o mesmo comportamento, onde a probabilidade de ocorrência de óleo segue prioritariamente para o sul no eixo principal da corrente, com um espalhamento no sentido leste-oeste mais pronunciado quando se compara com as simulações de inverno.

Todas estas variações no espalhamento estão relacionadas às energias que regem o sistema. Como o Campo de Merluza está sobre o núcleo da CB, este está sobre forte influência dela. O trabalho de Magalhaes (2012) mostrou que a base sinótica apresenta uma energia cinética turbulenta maior que aquela presente na base climatológica. Desta maneira, pode-se afirmar que a base sinótica contém maior presença de mesoescala, o que a deixa mais próxima da realidade. Esta mesoescala é responsável pelo transporte do óleo para áreas ao largo do fluxo médio da CB. A base climatológica apresenta uma

energia cinética média maior, o que indica que seus fluxos médios são mais pronunciados e refletem diretamente no transporte da mancha de óleo, fazendo com que esta tenda a seguir o fluxo médio da CB e se espalhar pouco ao largo deste.

Os resultados obtidos estão de acordo com os apresentados em Baptista et al. (2006). O campo de Merluza está sob influência da CB e por isso o padrão de escoamento médio desta será determinante no destino final do óleo, como também observou Lemos (2009) na área do Banco de Abrolhos. Entretanto a presença de perturbações neste campo médio torna-se um fator decisivo para a dispersão leste-oeste da mancha. Baptista et al. (2006) observou uma dispersão leste-oeste, bem maior que a encontrada neste estudo, o que pode ser justificado pela introdução das forçantes atmosféricas, principalmente o campo de ventos superficiais, presente no estudo destes autores e ausentes nos experimentos aqui apresentados. Os resultados de Soares et al. (2005) mostraram que o vento contribuiu para dispersar o óleo em direção à costa. Os mesmos autores obtiveram resultados bem diferentes daqueles encontrados neste estudo e no estudo de Baptista et al. (2006). Soares et al. (2005) constataram que o óleo inicialmente derivava para norte e depois se deslocando em direção oeste até encontrar o litoral. Estes autores implementaram um modelo de óleo próprio para a área da Baía de Santos, modelo este que não representava numericamente, de forma adequada, vários dos processos aos quais o óleo está sujeito nas áreas marinhas.

Pimentel (2007) e Fonseca (2009) também observaram que a CB teve papel decisivo no destino final da mancha de óleo derramada. Estas autoras simularam derrames no Campo de Golfinho, no Espírito Santo. As curvas de probabilidade mostraram um tendência de deslocamento para o sul da mancha, justificada pelas altas velocidades dos vetores que formam a CB.

4.1.2 Campo de Água Profunda

O Campo de Água Profunda (CAP) encontra-se ao largo do fluxo principal da CB. No domínio de estudo, a área de maior velocidade de corrente compreende a região da CB, ao passo que no ponto de derrame do Campo de Água Profunda as velocidades das correntes são bem menores. Além de menores, as velocidades não têm um padrão tão definidos quanto na CB, sendo muito mais heterogênic. A composição da hidrodinâmica na região do CAP é muito mais complexa e não apresenta uma conformação média tão clara. O

deslocamento em um mesmo ponto pode variar em todas as direções com o passar do tempo. Quanto à presença de instabilidades e feições de mesoescala, a área do CAP é influenciada por meandros e vórtices próximos da CB. Ao norte desta região, próximo a Cabo Frio, existe uma área de grande formação destas estruturas hidrodinâmicas. Quanto à larga escala, esta área compreende as células de recirculação da CB.

As baixas velocidades de corrente fizeram com que o óleo derramado no CAP não tivesse a probabilidade de atingir áreas tão distantes quanto no Campo de Merluza. Porém, tanto nas simulações com base sinótica quanto nas com base climatológica, existem a possibilidade de a mancha atingir a área ao norte do derrame. Em ambas as simulações o óleo é levado até a CB e transportado para o sul, isto pode está associado às células de recirculação da Corrente do Brasil, ou a processos de meandramentos da mesma, que fazem com que seu eixo atinja a área do CAP. Na simulação com base sinótica, a probabilidade de ocorrência de óleo a norte do CAP é maior do que na simulação com base climatológica.

Em ambas as simulações, as baixas velocidades das correntes médias fizeram com que o óleo ficasse mais tempo em um mesmo ponto, contribuindo para que este atingisse uma área menor que aquela atingida pela mancha do Campo de Merluza. Além disso, os processos de evaporação foram eficientes na remoção do óleo, uma vez que o óleo utilizado nas simulações era leve com muitos compostos voláteis.

Magalhaes (2012) mostrou que na área do CAP a energia cinética turbulenta (ECT) é maior na base sinótica do que na base climatológica. Na base sinótica esta área apresenta ECT maiores que $100\text{cm}^2/\text{s}^2$, enquanto na base climatológica a ECT não chega a este valor. Esta ECT maior, foi fator determinante na maior probabilidade de dispersão da mancha observada no cenário com base sinótica.

Lemos (2009) mostrou que o óleo leve sofre mais com o processo de remoção oriundo da evaporação, o que gera uma menor dispersão visto que, quando exposto na atmosfera, o óleo é removido. Os resultados climatológicos para o período de verão tiveram uma dispersão pequena, oriunda desta alta taxa de evaporação e das baixas velocidades das correntes locais.

4.1.3 Campo de Água Rasa

O Campo de Água Rasa (CAR) está sobre a plataforma continental e a profundidade no ponto de derrame é de 76 metros. A dinâmica nesta região é a dinâmica costeira, complexa e com velocidades de corrente inferiores às observadas na CB. Observa-se que na base hidrodinâmica climatológica existe uma corrente na região da CAR que flui para norte durante quase todo o ano, enquanto que na base sinótica, esta corrente não é tão marcada e muitas vezes não é observada. Calado (2001) observou esta corrente costeira em seus experimentos numéricos, e ela está descrita como uma corrente fria e costeira que flui para o norte, sobre a plataforma.

Os cenários no CAR foram os que apresentaram maior diferença entre as simulações com base sinótica e com base climatológica. Nas simulações com a base climatológica, observa-se uma dispersão da mancha para norte acompanhando a corrente costeira para norte. A complexidade presente na base sinótica não cria este deslocamento tão pronunciado para norte. O transporte da mancha na base sinótica se dá praticamente em direção a sul e em direção à CB, enquanto que nas simulações com a base climatológica, o deslocamento é paralelo à costa, em direção norte, para uma área mais distante do ponto de derrame, e para sul, mais próximo ao ponto de derrame.

Quando se compara ao Campo de Merluza, o transporte do CAR atinge uma área menor, ficando restrito a uma área mais próxima ao ponto de derrame. Na simulação de inverno, ambas as manchas ficam restritas a uma área a sul do ponto de derrame e bem próximo a este. Na simulação com base climatológica, a área com probabilidade de ocorrência de óleo fica paralela à costa, ao passo que na simulação com a base sinótica a área da mancha é quase perpendicular à costa. Na simulação de verão observa-se uma grande diferença nas curvas de probabilidade, tendo a mancha forçada com base climatológica se deslocando a norte do derrame e a mancha forçada com base sinótica se deslocando ao sul. Em ambas as simulações a mancha atinge áreas distantes do ponto de derrame, porém em sentido inverso. Ou seja, na climatológica a probabilidade de que a mancha atinja áreas a norte do derrame é maior, ao passo que utilizando a base sinótica tem-se uma probabilidade maior de que a mancha se afaste da costa.

Reflexo da maior complexidade da circulação costeira, o CAR apresenta cenários onde se observa a maior diferença entre as simulações climatológicas e sinóticas. Neste campo

os resultados corroboram com os observados por Lemos et al. (2009) e Sebastiao & Soares (1995) que mostraram que os modelos de dispersão de óleo são bastantes sensíveis às forçantes meteorológicas e oceanográficas introduzidas neles.

A circulação costeira é complexa sendo resultado de várias forçantes como atmosféricas, correntes de maré, aporte de água costeira, dentre outras. A diferenciação entre as simulações no CAR é fruto desta complexidade e da dificuldade de representar todos estes fenômenos. Lemos (2009) mostrou como as correntes de maré foram importantes no processo de dispersão da mancha de óleo. As bases hidrodinâmicas utilizadas neste estudo não contam com as forçantes de maré. Segundo os resultados de Lemos (2009), a presença das elipses de maré auxilia na dispersão leste-oeste, assim a falta desta forçante pode ter sido determinante para que o óleo não tenha chegado na costa.

4.2 Comparação entre as simulações anuais, inverno e verão

Nesta seção serão comparados os resultados de cada campo quanto à suas sazonalidades, ou seja, serão feitas comparações entre as simulações de período anual, inverno e verão.

4.2.1 Campo de Merluza

No Campo de Merluza tanto o período anual quanto o inverno e o verão apresentam um deslocamento da mancha no sentido da CB em ambas as simulações. A CB é a principal corrente presente na área de estudo (SILVEIRA et al., 2000; STRAMMA; ENGLAND, 1999). É nela que se observam as maiores velocidades e os fluxos mais constantes, assim sendo, era de se esperar que o deslocamento da mancha seguisse seu eixo principal. Isto é observado em vários estudos onde o ponto de derrame está sobre influência da CB, como nos trabalhos de Baptista et al. (2006), Pimentel (2007) e Lemos2009a. Soares et al. (2005) não observaram o deslocamento da mancha no sentido da CB. Estes autores justificam tal comportamento como sendo reflexo da não introdução dos processos de entranhamento e emulsificação, que faz com que a dispersão da mancha pelos processos de advecção-difusão das correntes não tenha tanta contribuição pro destino final da mancha.

Nas simulações com a base sinótica é notado uma maior dispersão da mancha no sentido leste-oeste. Isto é evidenciado por uma maior probabilidade de ocorrência de óleo na superfície ao largo do eixo principal da CB. Quando se compara os diferentes períodos de simulação que utilizaram a base sinótica como forçante, observa-se que no período de verão a probabilidade do óleo se espalhar no sentido leste-oeste é maior do que no inverno e no anual. Isto indica que as atividades de mesoescala, que geram energia cinética turbulenta, são maiores no verão, pois associa-se esse espalhamento (leste-oeste) às instabilidades do fluxo médio da CB. Este comportamento não foi observado por Lemos (2009) para a região do Banco de Abrolhos, o que pode ser explicado pelas forçantes diferentes introduzidas por este autor na simulação, tais como corrente de maré e ventos de superfície.

Nas simulações que utilizaram a base climatológica como forçante, o deslocamento leste-oeste é minimizado. Isto é reflexo do maior transporte médio da CB e da menor presença de instabilidades nesta. Quando se compara os períodos de simulação, tem-se um comportamento bem parecido nos campos de probabilidade. Porém, no inverno a probabilidade da mancha atingir áreas ao largo da CB é maior que nos outros períodos, principalmente no deslocamento para leste em direção ao oceano aberto. Isto pode estar ligado a atividades de larga escala como as células de recirculação ou a instabilidades na CB, uma vez que mesmo no campo climatológico estas instabilidades não foram totalmente removidas, mas apenas suavizadas. Este maior espalhamento leste-oeste pode ser correlacionado aos resultados de Lemos et al. (2009), onde ao se comparar os períodos de verão e inverno na região do Banco de Abrolhos, observou-se que as instabilidade na CB são maiores no período de inverno.

4.2.2 Campo de Água Profunda

No Campo de Água Profunda, as curvas de probabilidade se diferem de acordo com o período simulado. Para as simulações com a base climatológica, o período anual e de inverno apresentam as curvas de probabilidade bem parecidas, com um deslocamento para sul e criando uma estrutura em forma de elipse. Enquanto que nas simulações com a base sinótica, as curvas de probabilidade são bem diferentes em todos os períodos.

Para o período anual, a mancha de probabilidade mostra que a área mais provável de ocorrência de óleo na superfície é o entorno do ponto de derrame. Também existe a

probabilidade do óleo se deslocar em direção à costa, atingir a CB e ir para o sul, ou ainda, se deslocar para oceano aberto. No período de inverno, a probabilidade maior é que a mancha siga no sentido sudeste em direção a oceano aberto e assim se afaste da costa. Já no verão, a probabilidade maior é que a mancha se desloque para noroeste, porém não atinja áreas muito distantes do ponto de derrame.

Nas simulações com a base climatológica temos uma grande diferença entre as probabilidades de ocorrência de óleo na superfície de acordo com os períodos simulados. No período anual a maior probabilidade é que a mancha fique restrita ao ponto de derrame, uma vez que as velocidades de corrente são pequenas e o óleo acaba evaporando antes de atingir área muito afastadas. Porém existe a probabilidade dele se deslocar para o sul atingindo área mais remotas. A conformação da mancha de probabilidade é no formato de uma elipse com o eixo norte-sul maior. No período de inverno, as curvas de probabilidade de ocorrência de óleo na superfície são bem parecidas com as anuais, porém aumenta a probabilidade do óleo atingir áreas mais distantes ao sul do ponto de derrame. Já no período de verão as curvas de probabilidade assumem uma forma peculiar, mostrando que o óleo não se deslocará muito do ponto de derrame, porém este pode ir em direção à CB e ser advectado para sul. Os resultados de verão mostraram que se o óleo atingir a CB, a quantidade será pequena, uma vez que o deslocamento desse na CB é pequeno também. No verão, a simulação mostrou que não existe a probabilidade do óleo se deslocar para oeste.

A exposição à atmosfera gera remoção do óleo pelo processo de evaporação, gerando uma menor dispersão da mancha pois a quantidade de óleo na água é rapidamente diminuída, principalmente por se tratar de um óleo leve. Este comportamento foi observado por Aamo & Reed (1997) em seus testes de sensibilidade do OSCAR.

4.2.3 Campo de Água Rasa

Nas simulações no Campo de Água Rasa, existe uma diferença nas curvas de probabilidade de acordo com os períodos simulados. O período anual e o verão geraram curvas de probabilidade mais parecidas, porém estas são bem diferentes quando dependendo da base utilizada.

Nas simulações com base sinótica tem-se uma maior probabilidade de deslocamento

da mancha de óleo no sentido sul, obliquamente à linha de costa. Na simulação em período anual, a maior probabilidade é que a mancha de óleo se desloque no sentido sul em direção oblíqua à linha de costa, se afastando desta. Porém existe uma probabilidade desta se direcionar em direção a costa, isto é evidenciado pelas curvas de probabilidade. Apesar do deslocamento em direção à costa, o óleo não chega até ela. Isto se deve mais aos processos de remoção do óleo (evaporação) do que a advecção propriamente dita, uma vez que a simulação foi feita com óleo leve e este apresenta uma grande quantidade de produtos voláteis. Estes resultados estão de acordo com os de (LEMOS, 2009), que mostrou que o óleo leve se dispersa menos que óleos mais pesados. No período de inverno, as curvas de probabilidade são bem parecidas com as geradas no período anual. No período de verão têm-se uma maior probabilidade da mancha atingir áreas mais distantes do ponto de derrame, principalmente ao sul. Também existe a probabilidade da mancha se aproximar da costa, mas como observado nos outros períodos, a mancha não chega a atingir a costa.

Nas simulações que tiveram como forçante a base climatológica, observou-se uma diferença significativa entre os diferentes períodos. Na simulação anual, existe uma probabilidade de a mancha de óleo atingir áreas ao norte do ponto de derrame. A curva de probabilidade segue paralela à costa indicando haver ali uma forçante clara que faz com que o óleo se desloque nesta corrente costeira para norte. Mesmo com esse deslocamento para norte a maior probabilidade é que a mancha de óleo fique próxima ao ponto de derrame. No período de inverno, as curvas de probabilidade apresentam uma conformação bem diferente. Apesar de ainda indicarem que a mancha de óleo tem maior probabilidade de ficar em uma área próxima ao derrame, neste período não se observa a probabilidade da mancha de óleo se deslocar para norte. Na simulação de verão, o óleo tem uma maior probabilidade de se deslocar para o norte, apesar da área mais provável de ocorrência de óleo ser próxima ao ponto de derrame.

Baptista et al. (2006) fizeram simulações com derrame de óleo no Campo de Merluza e em um duto mais costeiro, que se localiza em uma área menos profunda que a do CAR. Para a simulação de inverno os resultados são parecidos, com os encontrados por Baptista et al. (2006), com o óleo se deslocando próximo à costa e para oceano aberto. Porém, no estudo destes autores a mancha atinge à costa, devido a maior quantidade de óleo derramado, à presença do campo de ventos e à proximidade maior do ponto de derrame à costa. Para o período de verão os resultados são diferentes. Isso se deve à localização diferente entre aos pontos de derrame.

4.3 Comparação entre os Campos de Merluza, Água Rasa e Água Profunda

Nesta seção é discutida a comparação entre o Campo de Merluza, Campo de Água Profunda e Campo de Água Rasa. As comparações serão separadas em climatológicas e sinóticas.

4.3.1 Climatológicas

Nas simulações climatológicas tem-se as componentes médias do movimento mais acentuadas, fazendo com que os fenômenos de mesoescala sejam atenuados, ou até sonegados. As análises dos diferentes campos têm por objetivo verificar o efeito da base hidrodinâmica na dispersão do óleo em áreas com diferentes dinâmicas de circulação. O Campo de Merluza está sob influência direta da CB, to que faz com que a mancha se desloque em direção a sul e siga as características de escoamento médio da CB. As velocidades da CB são grandes, de 50 à 100 $cm.s^{-1}$ e isso faz com que a mancha tenha probabilidade alta de atingir o limite sul da grade, corroborando com os resultados presentes em Baptista et al. (2006) porém com um menor espalhamento leste-oeste.

No Campo de Água Profunda, as velocidades de corrente são menores, fazendo com que a mancha tenha uma grande probabilidade de não se dispersar para regiões muito remotas ao ponto de derrame. No CAP temos uma sazonalidade bem marcada com os campos de probabilidade bem diferentes entre inverno e verão. O padrão de probabilidade de ocorrência de óleo na superfície segue as feições das correntes médias presentes, levando o óleo até a CB e esta transportando o mesmo para sul. Porém a forte evaporação faz com que pouco óleo chegue a região da CB. Esta alta taxa de evaporação é observada por Aamo & Reed (1997), onde óleos leves tendem a se evaporar em taxas maiores que os óleos pesados.

No campo de água rasa, observa-se um probabilidade do óleo atingir áreas ao norte do derrame. Devendo isto à presença de uma corrente costeira que segue para o norte

sobre a plataforma continental. Esta corrente foi observada nos experimentos de Calado (2001). Esta corrente é observada nos dados de verão, porém no inverno ela perde intensidade e quase desaparece, o que reflete nos campos de probabilidade que apresentam uma sazonalidade marcada, sendo bem diferentes nas simulações de verão e inverno. Assim como no CAP a dispersão da mancha tende a ser menor que a observada no Campo de Merluza, resultado também foi observado por Baptista et al. (2006).

4.3.2 Sinóticas

Na simulação com a base sinótica as componentes médias são acrescidas pelas componentes turbulentas, criadas pela introdução do vento sinótico na formação dos campos de corrente. Esta introdução de variabilidades de escalas temporais menores tendem a complexar o campo de corrente, o que pode ser observado na figura 21.

No Campo de Merluza a mancha apresenta maior probabilidade de seguir o fluxo médio da CB, porém com um espalhamento leste-oeste, oriundo dos processos de instabilidades presentes na base hidrodinâmica sinótica. A CB carrega a mancha de óleo até o contorno sul da grade simulada. A CB é uma corrente forte e é de se esperar que ela exerça papel fundamental no destino final do óleo, como registrado nos trabalhos de Pimentel (2007) e Lemos (2009).

No Campo de Água Profunda a maior probabilidade é que o óleo fique próximo ao ponto de derrame, porém devido à presença de células de recirculação da CB e às feições de mesoescala, a mancha poderá ser transportada até a CB que levará a mancha para o sul da grade. As velocidades de corrente próximas ao CAP são menores e mais complexas que as encontradas no Campo de Merluza. Estas correntes menores expõem o óleo à ação da evaporação e fazem com que este não se disperse para áreas muito remotas, sendo removido antes disso.

No campo de Água Rasa a probabilidade maior é que a mancha se desloque para o sul, corroborando com os resultados de Palma et al. (2008) que mostram a circulação costeira na região da Baía de Santos como sendo basicamente uma corrente que flui para sul. A circulação na plataforma é mais complexa que a circulação observada no Campo de Merluza e as velocidades de corrente são em média menores que as presentes na CB.

4.4 Secção 26° S

Foi escolhida a secção em 26° S para análise de vários resultados probabilísticos, para todos os cenários simulados no campo de Merluza.

O resultado de comprimento da região com probabilidade de ocorrência de óleo superficial maior ou igual a 40%, mostrou que os cenários sinóticos apresentaram um maior comprimento. Relacionando este fato com a probabilidade da mancha se espalhar no sentido leste-oeste. A indicação de que os cenários sinóticos apresentaram maior dispersão leste-oeste mostra que as atividades que geram instabilidade no fluxo médio da CB, estão mais presentes nesta base hidrodinâmica. Dentro dos cenários com base sinótica, o de verão apresentou um espalhamento maior, mostrando que as atividades geradoras desta dispersão estão mais presentes no verão pelo menos esta secção. Já na simulação climatológica, o cenário de maior comprimento foi o de inverno. Isso também foi observado por Lemos (2009) na região de Abrolhos. Este autor afirma que no inverno a CB apresentou maior presença de instabilidades do que no verão.

O resultados probabilísticos para Tonelagem Máxima por Célula de 10 km^2 , indicaram que o cenário no qual terá maior presença de óleo na secção de 26° S é o sinótico de período anual. Porém ao comparar as duas simulações de inverno, tem-se que o cenário climatológico carregou mais óleo. Os valores de tonelagem de óleo são baixos para todos os cenários. Isso é fruto da remoção do óleo gerado pelo processo de evaporação, que segundo vários autores como Aamo & Reed (1997) e Lemos (2009), o óleo leve é mais sujeito à ação da evaporação.

Já o resultado para Tempo Mínimo de Chegada mostrou que a base climatológica na simulação de período anual foi a que apresentou o menor tempo de chegada. Apesar disso, todos os resultados estão próximos, o que mostra que este parâmetro não foi significativamente diferente para os cenários simulados.

Os resultados de Máximo Tempo de Exposição Atmosférica mostram que nos cenários climatológicos, o tempo de exposição foi maior. Isto mostra que na secção analisada o

óleo esteve mais tempo em superfície, e conseqüentemente mais sujeito à ação de fatores de intemperismo e remoção tal como evaporação nas simulações climatológicas. Este maior tempo de exposição também é resultado do menor espalhamento leste-oeste do óleo.

5 *Conclusões*

Pode-se concluir no presente trabalho, que o modelo OSCAR é sensível à base hidrodinâmica introduzida como forçante para advecção da mancha de óleo. Assim, ele foi adequado para análise da contribuição da variabilidade de mesoescala no transporte, transformação e destino final de um derrame de óleo.

As bases hidrodinâmicas foram interpoladas e importadas com sucesso para o OSCAR, consolidando a metodologia de importação de bases geradas no ROMS para o modelo OSCAR. Nas simulações nenhum campo apresentou risco de chegada de óleo na costa, porém deve ser destacado que as simulações foram geradas sem os campos de ventos no OSCAR. Isto pode ter contribuído para que nenhuma simulação apresente probabilidade de o óleo atingir a costa.

As bases produzidas pelo ROMS representaram a distribuição das correntes, tendo os dados coberto o período de um ano. A base climatológica representou bem o fluxo médio da Corrente do Brasil, apesar de superestimá-lo, porém os processos turbulentos causadores de instabilidades, meandramentos e vórtices estão atenuados. A base sinótica representa de forma mais adequada a realidade, conforme mostrado por Magalhaes (2012). Nela os processos turbulentos são considerados e estão mais presentes que na base climatológica. Existe a formação de vórtices, meandros e da onda de *Rossby* na Bacia de Santos, descrita na literatura por vários autores. Ocorreu diferenciação nas simulações influenciadas pela sazonalidade da área de estudo.

Com relação ao Campo de Merluza, observou-se que a mancha tende a seguir para sul acompanhando o fluxo intenso da CB. Entre as bases hidrodinâmicas utilizadas, observou-se que a maior presença de processos turbulentos de mesoescala na base sinótica, contribuíram para um maior espalhamento da mancha no sentido leste-oeste. As grandes

velocidades da CB fazem com que o óleo seja advectado e dispersado para áreas remotas ao ponto de derrame. Porém nenhuma das simulações no Campo de Merluza gerou risco de chegada de óleo na costa, restringindo a área de risco ao entorno da CB.

Em relação ao Campo de Água Profunda, podemos concluir que este é muito sensível à base hidrodinâmica utilizada, uma vez que os resultados foram significativamente diferentes entre as simulações com as duas bases. Esta área está sujeita a uma forte variação sazonal, o que ficou claro nas diferenças encontradas nas simulações de verão e inverno. As velocidades de corrente na região são menores que as da CB, porém em alguns cenários, o óleo foi carregado até a CB. A evaporação mostrou ser um fator importante, principalmente no cenário climatológico de verão, que gerou uma mancha de probabilidade muito restrita à área de derrame.

Já para o Campo de Água Rasa, conclui-se que existem diferenças significativas entre as simulações sinóticas e climatológicas. Diferenças tais, que no cenário climatológico existe a probabilidade da mancha se deslocar para norte paralela à costa e no sinótico isto não é observado. Este campo apresentou uma forte variação sazonal, com deslocamentos significativamente diferentes entre verão e inverno. A complexidade da circulação costeira mostrou ser representada de forma diferente nas bases criadas com variabilidade de vento distintas. Isto foi determinante no destino final e nos campos de probabilidade de cada cenário.

A simulação com óleo leve mostrou que este é advectado quando as velocidades de corrente são altas. Na simulação de verão com a base climatológica, o óleo foi praticamente todo intemperizado próximo ao ponto de derrame. As simulações mostraram que este processo foi determinante na baixa tonelagem por célula presente na secção de 26° S. A ausência da forçante atmosférica no modelo serviu para sonegar processos, tais como: formação de ondas no OSCAR; entranhamento; diminuição da advecção, dentre outros processo que o óleo sofre no mar em função da ação do vento.

Este trabalho mostra uma indicação clara de que as bases hidrodinâmicas inseridas no modelo de óleo OSCAR afetam de forma significativa os processos de transporte da mancha de petróleo. Assim, sugere-se que estudos de derrame de óleo no mar usem bases validadas e que representem as principais feições oceanográficas presentes, sejam elas de larga, meso ou pequena escalas. Este estudo tanto tem implicações científicas, para a

modelagem numérica de óleo no mar, quanto pode auxiliar os órgãos que lidam com o processo de licenciamento ambiental de atividades que envolvam risco de derrame. Fica claro que o campo de correntes deve ser bem representado para se ter um modelo que cumpra seu objetivo, que é prever o comportamento do óleo no mar. Este estudo também indica que processos de escalas temporais e espaciais diferentes agem sob o óleo e fazem com que este tenha destino final diferente.

5.1 Trabalhos Futuros

Esta dissertação abre caminhos para novos estudos, assim sugere-se que estudos complementares sejam feitos no futuro, visando à melhor compreensão dos fenômenos aqui analisados. Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Incorporar a forçante atmosférica (campo de vento) nas simulações, gerando cenários de ventos médios e sinóticos combinados com campo de correntes médias e sinóticas;
- Inserir mais campos em posições diferentes dos atuais na simulação;
- Fazer as simulações em uma grade com o limite sul em latitudes mais altas, principalmente para as simulações do Campo de Merluza;
- Utilizar tipos de óleo diferentes, por exemplo óleos intermediários ou pesados;
- Buscar informações e dados de derrames reais, simulá-los no OSCAR e comparar os resultados;
- Realizar experimentos numéricos inserindo a maré para as simulações de derrames em áreas costeiras.
- Criar simulações com pontos de derrames no fundo do mar.

Referências

- AAMO, O.; REED, M. Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: sensitivity studies. *of the 1997 International Oil Spill*, p. 1–22, 1997. Disponível em: <http://itk.ntnu.no/ansatte/Aamo/_Ole.Morten/pdf/kalib.pdf>.
- AAMO, O.; REED, M.; LEWIS, A. *Regional Contingency Planning Using OSCAR Oil Spill Contingency and Response Model*. [S.l.], 1998.
- AAMO, O. M.; REED, M.; DALING, P. S. *Evaluation of environmental consequences and effectiveness of oil spill response operations with a possible change in first line response at the Veslefrikk field*. [S.l.], 1995.
- AAMO, O. M.; REED, M.; DALING, P. S.; JOHANSEN, O. A Laboratory-Based Weathering Model: PC Version for Coupling to Transport Models. In: *Proceedings of the 1993 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar*. [S.l.: s.n.], 1993.
- AAMO, O. M.; REED, M.; DOWNING, K. *Calibration, verification and sensitivity analysis of the IKU Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) model system*. [S.l.], 1996.
- ALVES, F. N. A. *Estudo do transporte de manchas de óleo por um modelo lagrangeano de partículas na Bacia*. 161 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande, 2006.
- ASCE. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division-Journal Of Hydraulic Engineering*, p. 594–609, 1996.
- ASSINE, M. L.; CORRÊA, F. S.; CHANG, H. K. Migração de depocentros na Bacia de Santos : importância na exploração de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, p. 111–127, 2008.
- BAARS, B. J. The wreckage of the oil tanker 'Erika'—human health risk assessment of beach cleaning, sunbathing and swimming. *Toxicology letters*, v. 128, n. 1-3, p. 55–68, mar. 2002. ISSN 0378-4274. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1186981>>.
- BANKS, S. SeaWiFS satellite monitoring of oil spill impact on primary production in the Galápagos Marine Reserve. *Marine pollution bulletin*, v. 47, n. 7-8, p. 325–30, jan. 2003. ISSN 0025-326X. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1281009>>.
- BAPTISTA, M.; CABRAL, A. P.; HARGREAVES, F.; MARQUES, P. *Modelagem da Dispersão de Óleo e Efluentes- Atividade de Produção e Escoamento de Gás e Condensado - Campo de Merluza - Bacia de Santos - Estudo de Impacto Ambiental*. 2006.

- BEEGLE-KRAUSE, C. J. Gnome: NOAA's Next-Generation spill trajectory model. *Hazardous Materials Response Division*, p. 1262–1266, 1998.
- BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model*. Washington, DC.: American Geophysical Union, 1987. 1–16 p.
- BOEBEL, O.; DAVIS, R. E.; OLLITRAULT, M.; PETERSON, R. G.; RICHARDSON, P. L. The Intermediate Depth Circulation of the Western South Atlantic. *Geophysical Research Letters*, v. 26, n. 21, p. 3329–3332, 1999.
- BOEHM, P. D. *Transport and transformation processes regarding hydrocarbon and metal pollutants in offshore sedimentary environmental*. New York: Isevier Applied Science, 1987. 233–286 p.
- BOZEMAN, B. The 2010 BP Gulf of Mexico oil spill: Implications for theory of organizational disaster. *Technology in Society*, Elsevier Ltd, v. 33, n. 3-4, p. 244–252, ago. 2011. ISSN 0160791X. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160791X1100044>>.
- CALADO, L. *Dinâmica da formação dos meandros e vórtices da Corrente do Brasil ao largo do Sudeste Brasileiro*. 112 p. Tese (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2001.
- CAMPOS, E. J. D.; GONCALVES, J. E.; IKEDA, Y. Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil Bight: Summer of 1991. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, 1995.
- CLARK, R. B. *Marine Pollution*. 5. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2001. 248 p. ISBN 0198792921.
- COSTA, M. *Evolução de hidrocarbonetos derramados nas zonas costeiras e estuarinas*. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra, 1999.
- DALING, P. S.; BRANDVIK, P. J.; MACKAY, D.; JOHANSEN, O. Characterization of crude oils for environmental purposes. *Oil and Chemical Pollution*, v. 7, n. 3, p. 199–224, jan. 1990. ISSN 02698579. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026985790580027>>.
- DALING, P. S.; SINGSAAS, I.; REED, M.; HANSEN, O. Experiences in Dispersant Treatment of Experimental Oil Spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 7, n. 5-6, p. 201–213, dez. 2002. ISSN 13532561. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256102000610> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1353256102000610>>.
- DYKE, P. *Modelling Marine Processes*. [S.l.]: Ellis Horwood Ltd, 1996. 152 p. ISBN 9780130981202.
- EMILSON, I. The shelf and coastal waters off Southern Brazil. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 1960.
- ETKIN, D. S.; WELCH, J. Development of the Oil Spill Response Cost-Effectiveness Analytical Tool. In: *Arctic & Marine Oilspill Program Seminar*. [s.n.], 2005. Disponível em: <http://osrceat.environmental-research.com/erc_papers/ERC_paper_7.pdf>.

FAY, J. A. The Spread of Oil Slicks on A Calm Sea. *Oil on the Sea*, Cambridge,, p. 53–63, 1969.

FAY, J. A.; HOULT, D. P. *Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface*. [S.l.: s.n.], 1971. 21 p.

FERNANDES, A. M. *Dinâmica baroclínica da Corrente do Brasil na região sudeste*. 126 p. Tese (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2001.

FERNANDES, R. *Modelagem de derrames de hidrocarbonetos*. 67 p. Tese (Trabalho Final de Curso) — Instituto Superior técnico, 2001.

FINGAS, M. The Long Term Weathering of Water-in-Oil Emulsions. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 8, n. 2, p. 137–143, abr. 2003. ISSN 13532561. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135325610300046>>.

FINGAS, M.; FIELDHOUSE, B. Formation of water-in-oil emulsions and application to oil spill modelling. *Journal of hazardous materials*, v. 107, p. 37–50, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940300411>>.

FINGAS, M. F. *The basics of oil spill cleanup*. 2 edition. ed. [S.l.]: CRC Press, 2000. 256 p.

FINGAS, M. F.; JOKUTY, P.; FIELDHOUSE, B. *Oil Spill Behaviour and Modeling*. Ottawa Canada: Environment Technology Center Canada, 1996.

FONSECA, S. A. R. *ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTINGÊNCIA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO: ESTUDO DE CASO DO CAMPO DE GOLFINHO, ESPÍRITO SANTO – BRASIL*. 99 p. Tese (Graduação) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

FRANKE, M. Novas Fronteiras Exploratórias: Estudando o futuro no Brasil. In: *Rio Oil & Gas*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. p. 33.

GHERARDI, D. F. M.; CABRAL, A. P.; KLEIN, A. H. F.; MUEHE, D. C. E. H.; NOERNBERG, M. A.; TESSLER, M. G.; SARTOR, S. M. Mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima de santos. *Brazilian Journal Aquatic Science Technologic*, v. 12, n. 2, p. 11–31, 2008.

GODOI, S. S. D. *Dinâmica Quase-Geostrófica do Sistema Corrente do Brasil no Embaiamento de São Paulo*. 157 p. Tese (Doutorado) — universidade de São Paulo, 2005.

HARLOW, W. F.; BRANTLEY, B. C.; HARLOW, R. M. BP initial image repair strategies after the Deepwater Horizon spill. *Public Relations Review*, Elsevier Inc., v. 37, n. 1, p. 80–83, mar. 2011. ISSN 03638111. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036381111000127>>.

HESLOP, S. E.; ALLEN, C. M. Modeling Contaminant Dispersion in The River Severn Using a Random-Walk. *Journal Of Hydraulic Research*, v. 31, n. 3, p. 323–331, 1993.

HOULT, D. P. Oil Spreading on the Sea. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 4, n. 1, p. 341–368, jan. 1972. ISSN 0066-4189. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.fl.04.010172.00201>>.

HUNTER, J. R.; CRAIG, P. D.; PHILLIPS, H. E. On the Use of Random Walk Models with Spatially Variable Diffusivity. *Journal Of Computational Physics*, v. 366376, p. 366–376, 1993.

IBAMA. *Informação Técnica ELPN/IBAMA N 023/02 - Modelagem de Derramamento de óleo no mar*. 2002. 1–9 p.

IBP. *Informativo sobre o Pré-Sal*. 2009. Disponível em:

IRVINE, G. V.; MANN, D. H.; SHORT, J. W. Persistence of 10-year old Exxon Valdez oil on Gulf of Alaska beaches: the importance of boulder-armoring. *Marine pollution bulletin*, v. 52, n. 9, p. 1011–22, set. 2006. ISSN 0025-326X. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1652460>>.

ITOPF. *Handbook 2012/13*. 2012.

JAMES, I. Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review. *Environmental Modelling & Software*, v. 17, n. 4, p. 363–385, jan. 2002. ISSN 13648152. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815201000809> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136481520100080>>.

JANEIRO, J.; FERNANDES, E.; MARTINS, F.; FERNANDES, R. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine pollution bulletin*, v. 56, n. 4, p. 650–65, abr. 2008. ISSN 0025-326X. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1831308>>.

JAYKO, K.; HOWLETT, E. OILMAP: An Interactive Oil Spill Model. *OCE-ANS'92. Mastering the Oceans*, p. 203–206, 1992. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=61268>.

KOROTENKO, K. A.; MAMEDOV, R.; KONTAR, A.; KOROTENKO, L. Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input. *Journal of Marine Systems*, v. 48, n. 1-4, p. 159–170, jul. 2004. ISSN 09247963. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092479630400012>>.

KOROTENKO, K. A.; MAMEDOV, R. M. Prediction of the Transport and Dispersal of Oil in the South Caspian Sea Resulting from Blowouts. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 1, p. 383–414, 2002.

KOROTENKO, K. A.; MAMEDOV, R. M.; MOOERS, C. Prediction of the Dispersal of Oil Transport in the Caspian Sea Resulting from a Continuous Release. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 6, n. 5-6, p. 323–339, dez. 2000. ISSN 13532561. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135325610100050>>.

KULLENBERG, G. *Pollutant transfer and transport in the sea*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 1982. 240 p. ISBN 978-0849356018.

LEHR, W.; JONES, R.; EVANS, M.; SIMECEK-BEATTY, D.; OVERSTREET, R. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling & Software*, v. 17, n. 2, p. 189–197, jan. 2002. ISSN 13648152.

LEHR, W. J.; CALHOUN, D.; JONES, R.; LEWANDOWSKI, A.; OVERSTREET, R. Model Sensitivity Analysis in Environmental Emergency Management: A Case Study in Oil Spill Modeling. In: *Winter Simulation Conference*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 8.

LEHR, W. J.; SIMECEK-BEATTY, D. The Relation of Langmuir Circulation Processes to the Standard Oil Spill Spreading, Dispersion, and Transport Algorithms. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 6, n. 3-4, p. 247–253, jun. 2000. ISSN 13532561. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256101000433>> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1353256101000433>>.

LEIFER, I.; LEHR, W. J.; SIMECEK-BEATTY, D.; BRADLEY, E.; CLARK, R.; DENNISON, P.; HU, Y.; MATHESON, S.; JONES, C. E.; HOLT, B.; REIF, M.; ROBERTS, D. a.; SVEJKOVSKY, J.; SWAYZE, G.; WOZENCRAFT, J. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., v. 124, p. 185–209, set. 2012. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442571200156>>.

LEITAO, J. C.; SILVA, A.; FERREIRA, P. Modelação Matemática da deposição de Dragados na Zona Costeira do Estado de São Paulo - Brasil. In: *A Hidroinformática em Portugal*. [s.n.], 2001. p. 2–18. Disponível em: <<http://maretec.mohid.com/PublicData/products/ConferencePapers/CP-New7.pd>>.

LEMOS, A. T. *Modelagem numérica como ferramenta de determinação de uma zona de exclusão para as atividades de exploração e produção (E&P) de petróleo na região do banco de abrolhos*. 176 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande-FURG, 2009.

LEMOS, A. T.; SOARES, I. D.; GHISOLFI, R. D.; CIRANO, M. Oil spill modeling off the Brazilian eastern coast: the effect of tidal currents on oil fate. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, n. 4, p. 625–639, dez. 2009. ISSN 0102-261X. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2009000400007&lng=en&nrm=iso&tlng=e>.

LÓPEZ, J. R.; MARCH, R. R.; GONZÁLEZ, G.; SOCÍAS, F. S. Simulation of oil spills at the Casablanca platform (Tarragona, Spain) under different environmental conditions. *Journal of Maritime Research*, III, n. 1, p. 55–72, 2006.

LÓPEZ, J. R.; OLIVER, A. S.; GONZÁLEZ, S. G.; LUENGO, M. G. Contingency Plan for Hydrocarbon Spills in the Port of Ibiza. *Journal of Maritime Research*, IV, n. 1, p. 51–62, 2007.

MAGALHAES, F. C. *Avaliação da Influência da Variabilidade Temporal do Vento no Transporte e Formação dos Processos de Mesoescala da Corrente do Brasil*. 92 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande - FURG, 2012.

- MASCARENHAS, A. S.; MIRANDA, L. B. de; ROCK, N. J. A study of oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. In: Costlow Jr., J. (Ed.). New York: Gordon and Breach Science, 1971. cap. Fertility, p. 285–308.
- MEARNS, A.; WATABAYASHI, G.; LANKFORD, J. Dispersing oil near shore in the California current region. *Reports of California*, v. 42, p. 97–109, 2001. Disponível em: <http://www.calcofi.ucsd.edu/newhome/publications/CalCOFI_Reports/v42/pdfs/Vol_42_Mearns_etal.pdf>.
- MENICONI, M. D. F. G.; BARBANTI, S. M. *Case Study : Evaluation of Hydrocarbon Sources in Guanabara Bay , Brazil*. 2002.
- MIRANDA, L. B. de. Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, v. 33, n. 2, p. 105–119, 1985.
- MONTEIRO, P.; BLANCO, J.; CABANAS, J. M.; MANEIRO, J.; PAZOS, Y. Oil Spill Monitoring and Forecasting on the Prestige-Nassau accident. *26th Arctic and Marine Oilspill Program AMOP Technical Seminar*, 2003. Disponível em: <<http://www.meteogalicia.es/datosred/infoweb/meteo/docs/publicacions/artigos/AMOP.pdf>>.
- MUNK, W. H. ON THE WIND-DRIVEN OCEAN CIRCULATION. *Journal of Meteorology*, v. 7, n. 2, p. 80–93, abr. 1950. ISSN 0095-9634. Disponível em:
- MURRAY, S. P. Turbulent diffusion of oil in the ocean. *Limnology and oceanography*, XVII, n. 5, p. 10, 1972. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/10.2307/283471>>.
- NRC. *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. Washington, DC.: National Academy Press, 2003. 261 p.
- ODUM, E. P. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1983. 432 p.
- O'HAGAN, C. *Use of GIS for assessing the changing risk of oil spills from tankers*. London: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, 2011. Disponível em: <www.itopf.co>.
- 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. C11, p. 1–22, nov. 2008. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007JC004720.shtm>>.
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanog.*, v. 26, p. 1–73, 1991.
- PETROBRAS. *Atuação no Pré-Sal*. 2012.
- PETROBRAS. *Descobrimos petróleo leve na Bacia de Santos*. 2012. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/noticias/descobrimos-petroleo-leve-na-bacia-de-santos>>.
- PIMENTEL, F. P. *Análise de Estratégias de Respostas a Derramamentos de óleo no Campo de Golfinho (ES - Brasil) Utilizando o Modelo OSCAR*. 110 p. Tese (Graduação) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

PROCTOR, R.; FLATHER, R. A.; ELLIOTT, A. J. Pergamon Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf— application to the Gulf oil spill. *Continental Shelf Research*, v. 14, n. 5, p. 531–545, 1994.

REED, M. *Technical Description and Verification Tests of OSCAR2000, A Multi-Component 3-Dimensional Oil Spill Contingency And Response Model*. [S.l.], 2001.

REED, M.; AAMO, O. M.; DALING, P. S. Quantitative analysis of alternate oil spill response strategies using OSCAR. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 2, n. 1, p. 67–74, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135325619500020>>.

REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; RS, B. r. B.; CLARK, J.; AURAND, D. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. *Environmental Modelling & Software*, v. 19, n. 7-8, p. 681–690, jul. 2004. ISSN 13648152. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136481520300192>>.

REED, M.; EKROL, N.; RYE, H.; TURNER, L. Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Analysis in Support of Environmental Impact Assessment Offshore Namibia. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 5, n. 1, p. 29–38, abr. 1999. ISSN 13532561. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256198000504> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135325619800050>>.

REED, M.; FRENCH, D.; RINES, H.; RYE, H. A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment. In: *Proceedings of the 1995 International Oil Spill Conference*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 61–66.

REED, M.; JOHANSEN, O.; BRANDVIK, P. J.; DALING, P.; LEWIS, A.; FIOCCO, R.; MACKAY, D.; PRENTKI, R. Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 5, n. 1, p. 3–16, abr. 1999. ISSN 13532561. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256198000292> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135325619800029>>.

SEBASTIAO, P.; SOARES, C. G. Modeling the fate of oil spills at sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 2, n. 2-3, p. 121–131, jan. 1995. ISSN 13532561.

SIGNORINI, S. R. On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep Sea Research*, v. 25, n. 5, p. 481–490, maio 1978. ISSN 01466291. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/014662917890556>>.

SILVA, C. a.; Oliveira Ribeiro, C. a.; KATSUMITI, a.; ARAÚJO, M. L. P.; ZANDONÁ, E. M.; Costa Silva, G. P.; MASCHIO, J.; ROCHE, H.; Silva de Assis, H. C. Evaluation of waterborne exposure to oil spill 5 years after an accident in Southern Brazil. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 72, n. 2, p. 400–9, mar. 2009. ISSN 1090-2414. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1847974>>.

SILVA, G. *Percepção ambiental da indústria de petróleo no litoral brasileiro*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de São Carlos, 1996.

SILVEIRA, I. C. A. D. *O Sistema Corrente do Brasil na Bacia de Campos , R.J.* 181 p. Tese (Livre Docente) — Universidade de São Paulo, 2007.

SILVEIRA, I. C. A. D.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S. D.; IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000. ISSN 1679-8759. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-87592000000200008&lng=pt&nrm=iso&tlng=p>.

SOARES, I. D.; ALVES, F. N. A.; PIOVESAN, R. B. Simulação da Dispersão de Óleo na Bacia de Santos. In: *3 Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo de Gás*. Salvador: [s.n.], 2005.

SOUTELINO, R. G. *A origem da Corrente do Brasil*. 120 p. Tese (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008.

SOUZA, J. a. M. A. C. de. *A Modelagem Computacional como Ferramenta na Prevenção e Combate a Derrames de Óleo no Mar – Estudo de Caso para o Complexo Estuarino De Paranaguá*. 192 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

STOMMEL, H. The Westward Intensification Of Wind-Driven Ocean Currents. *American Geophysical Union*, v. 29, n. 2, 1948.

STOMMEL, H. M. *The Gulf Stream: a physical and dynamica description*. [S.l.]: University of California Press, 1965.

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

SVERDRUP, H. U.; JOHNSON, M. W.; FLEMING, R. H. *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology*. New York: Prentice-Hall, 1942.

VERMA, P.; WATE, S. R.; DEVOTTA, S. Simulation of impact of oil spill in the ocean—a case study of Arabian Gulf. *Environmental monitoring and assessment*, v. 146, n. 1-3, p. 191–201, nov. 2008. ISSN 0167-6369. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1809517>>.

WARNER, J. C.; Rockwell Geyer, W.; ARANGO, H. G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time. *Computers & Geosciences*, v. 36, n. 7, p. 921–935, jul. 2010. ISSN 00983004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S009830041000104>>.

WUST, G.; DEFANT, A. *Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans*. [S.l.]: Berlin und Leipzig : Walter de Gruyter & Co., 1936.

ZHANG, D. F.; EASTON, A. K.; STEINER, J. M. Simulation of Coastal Oil Spills using the Random Walk Particle Method with Gaussian Kernel Weighting. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 4, n. 2, p. 71–88, 1998.