MARCELO RODRIGUES

MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE DERRAMES DE ÓLEO COMO MÉTODO DE GESTÃO AMBIENTAL, EM PLANOS DE CONTINGÊNCIA, APLICADA AO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO (SP).

SÃO PAULO
2009

MARCELO RODRIGUES

MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE DERRAMES DE ÓLEO COMO MÉTODO DE GESTÃO AMBIENTAL, EM PLANOS DE CONTINGÊNCIA, APLICADA AO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO (SP).

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia.
Área de Concentração: Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Paolo Alfredini

SÃO PAULO
2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ... de outubro de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Rodrigues, Marcelo
Modelagem numérica do comportamento de derrames de óleo como método de gestão ambiental, em planos de contigência aplicada ao canal de São Sebastião (SP) / M. Rodrigues. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
134 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1. Hidráulica marítima 2. Modelos matemáticos 3. Petróleo (Impacto) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II. t.

Dedico aos meus pais,
Por todo amor incondicional, apoio e
incentivo ao longo da conclusão desta tese.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Paolo Alfredini, por todo apoio e orientação no desenvolvimento desta Tese, que me ampliou em muito meu conhecimento, me ensinando a filosofia dos conceitos aplicados em engenharia.

Ao Prof. Dr. Valdenir Veronese Furtado, pela longa jornada de trabalho e amizade, por ter sido o fator de incentivo para o início desta tese, e pela gentileza de permitir a aplicação do Software MIKE 21 e seus módulos no presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Siegle, por toda colaboração inestimável no desenvolvimento desta tese, por todos ensinamentos na utilização da modelagem numérica através do programa MIKE 21.

Aos grandes: Luis Américo Conti, Osvaldo Nogueira Junior, meus velhos camaradas, e grandes mestres do meu aprendizado em sensoriamento remoto; João Carlos Cattini Maluf, André Rorsch Rodrigues, e Alessandro Luvizon Bérgamo, sempre presentes na hora de aplicação de métodos estatísticos.

À Escola Politécnica da USP onde trilhei mais uma importante etapa da minha vida, de onde me orgulho de ter sido aluno de pós-graduação.

Ao Instituto Oceanográfico da USP, agradeço à Instituição e ao seu patrimônio pessoal, pela estrutura e informações que colaboraram na viabilidade da realização deste trabalho.

Aos companheiros e amigos do Instituto Oceanográfico-USP, fundamentais pelo apoio em todos os momentos, em especial Samara Cazolli y Goya, Moysés G. Tessler, Beatriz Beck Eichler, Luis Antonio Pereira de Sousa, Daniel Klein, Roberto Lima Barcellos, Edílson de Oliveira Faria, Marcelo Pisetta, Carlos Alberto Sampaio de Araújo, Beatriz Bidoli Fernandez e Andréa Cruz Kaled.

À FUNDESPA, pela gentileza no fornecimento de dados que colaboraram com esta tese, em atenção especial a Bauer Rachid.

À FAPESP, através do projeto de pesquisa 07/50560-1

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica que participaram de alguma forma no desenvolvimento desta tese, em especial Rodrigo Nogueira de Araújo, Rogério Fernando do Amaral, Emilia Arasaki e Patrícia Dalsoglio Garcia.

Aos meus velhos amigos e meus Irmãos.

Ao meu irmão Juliano e a todos da minha família que têm estado ao meu lado, ao longo da minha vida.

Fundamentalmente aos meus pais e à memória dos meus avós!

A luta pela verdade deve ter precedência sobre todas as outras.

(Albert Einstein)

∴

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS **PÁGINAS**

Figura 1. Principais processos que afetam a mancha de óleo após o derrame numa escala temporal, mostrando a relevância dos fenômenos em função do tempo transcorrido, após os derrame (Paladino, 2000). 04
Figura 2. Localização da área de estudo. 08
Figura 3. Representação esquemática das correntes de contorno oeste ao longo da costa do Brasil. 19
Figura 4. Diagrama do perfil vertical de distribuição e circulação geral das massas d'águas da região sudeste 20
Figura 5. Distribuição dos registros de vazamentos de óleo no litoral norte de São Paulo (1974 – 2000), Poffo *et al* (2001). 25
Figura 6. Classificação das ocorrências quanto às causas (Poffo *et al*, 2001). 25
Figura 7. Aplicação integrada de modelagem numérica e SIG na costa do golfo arábico. 31
Figura 8. Satélite Envisat's ASAR revelando a extensão do imenso derrame de óleo na Costa da Espanha. Navio Prestige. Novembro de 2002. 32
Figura 9. Exemplo de malha amostral com refinamento (elementos finitos), gerado no processo de interpolação dos dados batimétricos na área de estudo. 42
Figura 10. Mapa de isóbatas da plataforma continental a partir da malha batimétrica gerada. 43
Figura 11. Batimetria detalhada do Canal de São Sebastião. 46
Figura 12. Localização dos pontos de onde foram obtidos os valores das constituintes harmônicas de maré para as condições de contorno. 47
Figura 13. Rumos e intensidade de correntes no canal de São Sebastião (Furtado *et al.*, 1986). 60
Figura 14. Giro na direção das correntes na Enseada de Caraguatatuba, retornando ao interior do Canal. 61
Figura 15. Modelo mostrando correntes de deriva junto à costa continental norte do Canal de São Sebastião difratando para a enseada. 63

Figura 16. Rosa dos ventos para o período de outubro de 2003, no canal de São Sebastião mostrando orientação preferencial W/SW e E/NE. 64

Figura 17. Posição dos sistemas frontais ao longo da costa brasileira e as datas da passagem pelo litoral de São Paulo (Fonte CPTEC – INPE). 65

Figura 18. Gráfico de correlação entre direção e velocidade de ventos no mês de outubro de 2003. 66

Figura 19. Curvas de altura das marés previstas pelo modelo a partir das constituintes harmônicas para a borda sul do contorno da área. 69

Figura 20. Curvas de altura das marés previstas pelo modelo a partir das constituintes harmônicas para a borda leste do contorno da área. 69

Figura 21. Curvas de altura das marés previstas pelo modelo a partir das constituintes harmônicas para a borda Oeste do contorno da área. 70

Figura 22. Composição com os dados de maré simulada pelo modelo MIKE 21 e medida (CEBIMAR). 72

Figura 23. Composição com os dados de maré simulada pelo modelo MIKE 21 e os dados de previsão de maré para o mesmo período, gerados pela DHN. 73

Figura 24. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO MARINA (1985). Adaptado de CETESB, 1996. 77

Figura 25. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Marina. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 77

Figura 26. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO HOEGH HILL. Adaptado de CETESB, 1996. 79

Figura 27. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Hoegh Hill. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 79

Figura 28. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO TEBAR III. Adaptado de CETESB, 1996. 81

Figura 29. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo no vazamento de oleoduto no acidente denominado TEBAR 3. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 81

Figura 30. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO CAIRU. Adaptado de CETESB, 1996. 83

Figura 31. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Cairu. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 83

Figura 32. Croqui do deslocamento das manchas de óleo (26/05/1991). OPERAÇÃO N/T PENÉLOPE. 84

Figura 33. Croqui do deslocamento das manchas de óleo (27/05/1991). OPERAÇÃO N/T PENÉLOPE. 85

Figura 34. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Penélope. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 85

Figura 35. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO KATINA. 87

Figura 36. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Katina. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 87

Figura 37. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO TEBAR V. 89

Figura 38. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção e velocidade dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo no vazamento de oleoduto no acidente denominado TEBAR 3. Fonte

dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil). 89
Figura 39. Localização dos pontos de amostragem dos valores espectrais. 93
Figura 40. Valores da resposta espectral dos pontos de amostragem. 94
Figura 41. Valores espectrais dos pontos 1 e 10 da imagem de satélite. 95
Figura 42. Imagem da banda infravermelho termal, TM7. 96
Figura 43. Imagem de composição RGB das bandas TM 1, 2 e 3. 97
Figura 44. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Marina e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 101
Figura 45. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Hoegh Hill e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 102
Figura 46. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo em vazamento de oleoduto do acidente Tebar III e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 103
Figura 47. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Cairu e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 104
Figura 48. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Penélope e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 105
Figura 49. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Katina e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 106
Figura 50. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo em vazamento de oleoduto do acidente Tebar V e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 107
Figura 51. Comparação entre uma imagem de satélite contemporânea ao vazamento do oleoduto no acidente Tebar V e um de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes. 108
Figura 52. Condição de maré de quadratura com sistema meteorológico em situação de pré-frontal. 110

Figura 53. Condição de maré de quadratura durante a passagem de um sistema frontal. 111
Figura 54. Condição de maré de quadratura com sistema meteorológico em situação posterior a passagem do sistema frontal. 111
Figura 55. Condição de maré de sizígia com sistema meteorológico em situação de pré-frontal. 112
Figura 56. Condição de maré de quadratura com sistema meteorológico em situação posterior a passagem do sistema frontal. 112
Figura 57. Condição de maré de sizígia com sistema meteorológico em situação posterior à passagem do sistema frontal. 113

LISTA DE TABELAS

TABELAS **PÁGINAS**

Tabela 1. Principais vazamentos ocorridos de 1974 até o presente momento (Cetesb, 1996). 26

Tabela 2. Símbolos utilizados nas formulações do modelo HD do MIKE 21. 39

Tabela 3. Acidentes com vazamentos de óleos utilizados na comparação com os resultados do modelamento. 54

Tabela 4. Constantes Harmônicas de marés da borda da área de estudo. 67

Tabela 5. Índice de correlação entre os valores de altura da maré medida e simulada pelo software MIKE 21. 68

Tabela 6. Maiores velocidades de vento e suas respectivas datas. 71

Tabela 7. Resolução espectral das bandas TM 1 a 7 da imagem Landsat 5. (Sains Jr., 1987). 91

Tabela 8. Classificação dos pontos segundo seus atributos por análise visual. 94

LISTA DE ABREVIATURAS & SIGLAS

Ac Nv - Acidente de navegação.

APM - Anticiclones Polares Móveis,

ASAR - *Advanced Synthetic Aperture Radar*

ATA - Anticiclone Tropical Atlântico

ATC - Anticiclone Tropical Continental

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer)

BC – Corrente do Brasil

BCF – Frente da Corrente do Brasil.

CEBIMAR – Centro de Biologia Marinha – IB/USP

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Cs N Id – Causas não apuradas, sem identificar a fonte.

DHI - Danish Hydraulic Institute

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

Dt – Oleodutos.

DTSC – Dutos e Terminais do Centro Sul

GESAMP - Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution

GOES - Geostationary Operational Environment Satellite

HD – Módulo Hidrodinâmico – Mike 21

IPIECA - International Petroleum Industry Environmental Conservation Association

LABSIP - Laboratório de Simulação e Previsão Numérica Hidrodinâmica

LAMMA - Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos da Universidade Federal do Rio de Janeiro

N/T – Navio tanque

NBC – Corrente Norte do Brasil

NECC – Contra Corrente Norte Equatorial

Nv Mc – Falha mecânica em navios.

Nv N Ap - Causas não apuradas, envolvendo navios.

Nv Op– Falha operacional em navios.

OCCAM - Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project

Pi Mc - Falha mecânica no píer.

Pi Op - Falha operacional no píer

REDUC – Refinaria Duque de Caxias

REPLAN – Refinaria do Planalto Paulista

REVAP – Refinaria Henrique Lage

RPBC – Refinaria Presidente Bernardes - Cubatão

SAR - Synthetic Aperture Radar

SEC – Corrente Sul Equatorial

SECC – Contra Corrente Sul Equatorial

SEUC – Subcorrente Equatorial Sul

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SA - Spill Analysis, modulo de análise de derrame de óleo

TEBAR – Terminal Marítimo Almirante Barroso

TM – Banda Termal de imagem de satélite

Tm Cs Nt – Causa natural no terminal.

Tm Mc - Falha mecânica no terminal.

Tm Op – Falha operacional no terminal.

RESUMO

A aplicação de modelagem numérica para análise acidentes envolvendo derrames de óleo se tornou uma das principais ferramentas para o estudo deste tipo de impacto ambiental, auxiliando na previsão do deslocamento e permitindo maior eficácia nas formas de atuação nos processos de contingência do deslocamento da mancha.

Estes pressupostos dão impulso ao desenvolvimento de pesquisa aplicada neste caso específico de estudo, ou seja, de modelação hidrodinâmica no Canal de São Sebastião em vários cenários através da utilização do módulo hidrodinâmico do software MIKE 21 da DHI, e da avaliação dos resultados gerados pela simulação através de comparação com o acompanhamento de eventos reais de espalhamento de manchas de óleo em acidentes antigos e com uma imagem de satélite simultânea a um derramamento.

Foram avaliados sete eventos distintos onde ocorreram vazamentos de óleo no Canal de São Sebastião e a eles comparados às simulações hidrodinâmicas geradas pelo modelo em diferentes condições ambientais. Os resultados obtidos mostram que o deslocamento da mancha de óleo está condicionado preferencialmente pelo regime de ventos, estando bem correlacionados com os padrões hidrodinâmicos encontrados. A partir das diferentes situações apresentadas nas simulações, é possível estimar o sentido do deslocamento em acidentes futuros, dando subsídios nas ações de contenção dos efeitos deste tipo de acidente.

Palavras chave: engenharia hidráulica, modelos matemáticos, derrames de óleo, São Sebastião, São Paulo.

ABSTRACT

The application of numeric models for analysis of oil spill in the coastal environments becomes one of the most important ways to understand the behavior of the oil in this case of impact, giving subsides to the prediction of the displacement of the patches and allowing best efficiency in the control of the extension of the impact agent.

These assumptions give thrust to the development of applied research in this work, which is defined by the knowledge of the different hydrodynamic conditions that compose the oceanographic structure in the São Sebastião Channel, by the utilization of the software MIKE 21 of the DHI (Danish Hydrodynamic Institute) and the comparison with historic cases of spill described in the literature. A satellite image was processed showing the real conditions of the spill, considering the physic-chemical changes and compared with the other data improve the evaluation process.

Seven oil spills were studied and compared to the simulations, and there were generated six scenarios in different environmental conditions. The results show that the most important forcing of the environmental conditions of the oil patch is the wind, and the simulations agree well with the real processes. The hydrodynamic module of Mike 21 reveals an applicable tool for this kind of studies, giving sufficient information to reduce the impact of oil spill improving the oil spill contention.

Keywords: hydraulic engineering, numerical model, oil spill, São Sebastião, São Paulo.

ÍNDICE

Lista de figuras vii
Lista de tabelas xii
Lista de abreviaturas e siglas xiii
Resumo xv
Abstract xvi

1 - INTRODUÇÃO 01

1.1 – Considerações iniciais 01

1.2 – O Petróleo e o Ambiente Marinho 03

2 - ÀREA DE ESTUDO 07

3 - OBJETIVOS 09

4 - JUSTIFICATIVA DO ESTUDO 11

5 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13

5.1 - Levantamento histórico 13

5.2 - Características geológicas e geomorfológica da Região de São Sebastião condicionantes dos processos oceanográficos 15

5.3 - Estudos sobre a Meteorologia e Estrutura Hidrodinâmica 16

5.4 - Derrames de óleo no Canal de São Sebastião e seus efeitos 23

5.5 - Aplicação de Modelagem Numérica no espalhamento de óleo em derrames no Brasil 27

5.6 - Sensoriamento remoto e derrames de óleo 32

6 – METODOLOGIA 36

6.1. – Introdução 36

6.2 - Modelo Computacional MIKE 21 37
6.2.1 – Apresentação e Características do Módulo HD 37
6.3 - Batimetria 40
6.4 - Condições de Contorno 47
6.5 - Resistência do Leito 48
6.6 - Viscosidade 50
6.7 - Vento 51
6.8 - Análise e Previsão de Maré 52
6.9 - Análise comparativa de derrames de óleo reais e simulados 53
6.10 - Sensoriamento Remoto por Imagem de Satélite 55

7 – RESULTADOS & DISCUSSÃO 57
7.1 - Introdução 57
7.2 - Calibração do Modelo 58
7.3 - Validação do Modelo 59
7.4 - Análise dos dados de ventos 64
7.5 - Análise dos dados de marés 67
7.6 - Derrames Significativos abordados 74
7.7 - Aplicação de sensoriamento remoto em derrames de óleo 90
7.8 - Resultados da modelagem numérica no estudo de derrames de óleo 98
7.8.1 - Introdução 98
7.8.2 - Derrames de óleo e resultados da simulação - análise comparativa 99
7.8.3 - Cenários simulados em condições ambientais distintas 109
7.8.4 - Considerações finais 114

8 - CONCLUSÕES 117

9 - REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS 120

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

Os ambientes costeiros são caracterizados como a interface onde interagem integralmente, a litosfera, a hidrosfera, atmosfera e biosfera, a região onde a vida e esses grandes sistemas da Terra se interpõem em um embate constante, onde energia se transfere e se transforma em grande intensidade.

Todas estas mudanças, tanto as de caráter espacial, quanto as relacionadas aos processos conduzidos em escalas de tempo variáveis, estão relacionadas aos parâmetros que compõem a estrutura ambiental do litoral, como a geologia, a geomorfologia, a vegetação, pluviosidade, sedimentos, o regime de ventos, as marés, ondas, bioatividades e as variações relativas do nível médio do mar. A esses elementos se unem as atividades antrópicas em todo seu espectro de atuação.

Relativamente poucos programas científicos foram ou estão sendo feitos com o objetivo de monitorar os ambientes costeiros/marinhos e avaliar impactos das ações humanas, tais como vazamentos de óleo (GESAMP, 2001). A importância destes programas foi realçada neste programa, onde os autores afirmam que a reduzida disponibilidade de informação científica impede a compreensão das condições de mudança geradas pelos impactos, dificultando também o estabelecimento de prioridades de ação e a efetividade das medidas de proteção eventualmente adotadas.

Os hidrocarbonetos, na forma de petróleo, são uma das principais fontes de energia e matéria prima para o mundo. Por outro lado, sua exploração envolve altos riscos de impactos ambientais, como reportado há décadas, nos acidentes de trabalho e nas guerras entre países produtores, atingindo os próprios locais de extração.

Outro fato que amplia as possibilidades de risco está na relação entre as áreas fonte e as regiões de maior consumo, que mostra que as maiores reservas de petróleo estão predominantemente distantes das áreas de maior consumo. Isto implica em transporte por longas distâncias através de embarcações ou dutos (mar e terra), armazenagem e processamento (refinarias e indústrias petroquímicas), aumentando as possibilidades de acidentes.

Segundo relato da Comissão Mundial Independente dos Oceanos (1999), os regimes de gestão, destinados a controlar as ameaças aos ecossistemas marinhos, muitas vezes não existem, ou estão insuficientemente desenvolvidos, e os custos inerentes da procura pelos recursos litorâneos são ignorados. Entretanto esses custos podem ser identificados e bem avaliados através de estudos dos efeitos de curta duração como, por exemplo, em alguns derrames de óleo.

Esta análise gera subsídios práticos na prevenção de acidentes e no monitoramento das fontes de risco e, diante de fatos consumados, fornecer subsídios para uma avaliação objetiva do quadro, permitindo a contenção do processo e a mitigação dos efeitos já instalados.

Estes pressupostos fortalecem o impulso de se desenvolver pesquisa aplicada, no caso específico deste estudo, de modelação numérica do espalhamento de manchas de óleo no Canal de São Sebastião em vários cenários reais, através da aplicação do módulo hidrodinâmico do software MIKE 21 da DHI, e da validação dos resultados através de comparação com uma imagem de satélite simultânea a um derramamento e com o comportamento de manchas em outros acidentes, descritos em relatórios da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental).

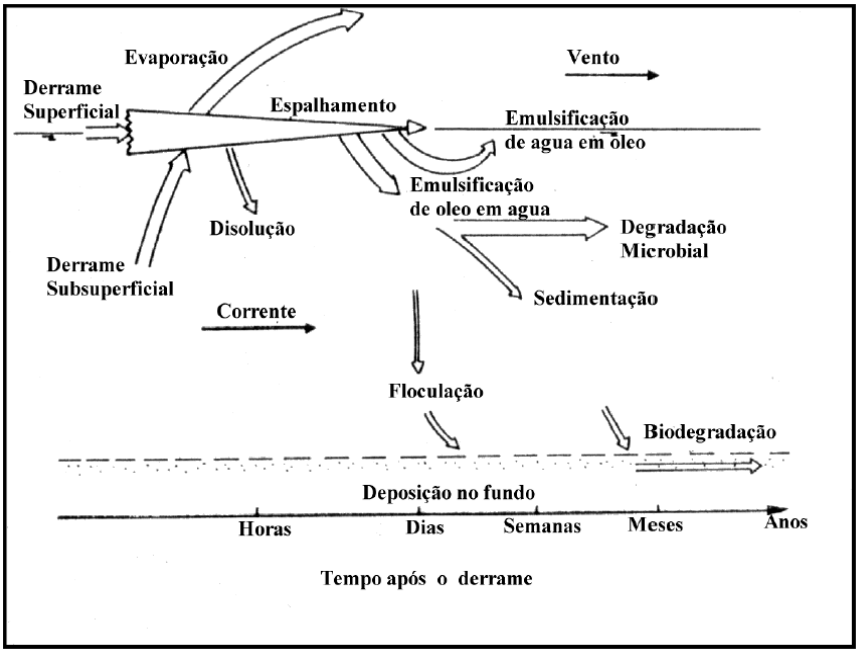
1.2 - O Petróleo e o Ambiente Marinho

O petróleo é considerado uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil, e consiste numa das principais fontes de energia e matéria prima para o mundo industrializado junto com o gás natural, também um subproduto da indústria do petróleo. Ele alimenta mais de 60% das necessidades energéticas das economias industrializadas. Sua composição contém em torno de 98% de hidrocarbonetos, junto com enxofre, nitrogênio O-heterocíclicos, quinonas, ácidos, fenóis, tióis e complexos metalo-orgânicos.

Após sua liberação para o ambiente, o óleo bruto e seus derivados sofrem uma grande variedade de alterações e transformações através de processos físicos, químicos e biológicos, sendo que os principais são (Wheeler; 1978; NRC, 2003; UNEP, 1991; Bícego, 1996, Silva, 2005):

- ***Espalhamento:*** devido à ação de ventos, marés, ondas e correntes;
- ***Evaporação:*** onde são eliminados os compostos mais leves, ocorrendo o aumento da viscosidade do óleo derramado;
- ***Dissolução:*** onde há a remoção de hidrocarbonetos aromáticos e saturados de baixo peso molecular através da transferência dos hidrocarbonetos para a coluna d'água;
- ***Dispersão:*** onde ocorre a incorporação de pequenas partículas na coluna d'água;
- ***Emulsificação:*** processo irreversível que impede operações de limpeza, provocando surgimento de uma mistura viscosa e flutuante;
- ***Adsorção:*** (de compostos solúveis) junto aos tecidos de organismos vivos e partículas suspensas;
- ***Sedimentação:*** havendo a remoção do óleo da coluna d'água
- ***Biodegradação:*** com a seguinte ordem de preferência: alcanos > alcenos > aromáticos > cicloalcanos;
- ***Oxidação fotoquímica:*** que acarreta uma maior dispersão devido à oxidação de compostos mais solúveis.

Um exemplo visual de alguns destes processos e outros identificados por Shen e Yapa (1988) está mostrado na figura 1.



Fonte: Shen e Yapa (1988))

Figura 1. Principais processos que afetam a mancha de óleo após o derrame numa escala temporal, mostrando a relevância dos fenômenos em função do tempo transcorrido, após os derrame (Paladino, 2000).

Os pequenos vazamentos, provenientes do transporte marítimo, representam cerca de 98% das perdas totais de petróleo e derivados, enquanto que as perdas acidentais correspondem aos 2% restantes.

Segundo Pavlakis et al. (1996) a dimensão do derramamento não está diretamente relacionada com o grau de dano causado aos ecossistemas envolvidos. Até mesmo pequenos vazamentos podem causar grandes danos a um meio ambiente ecologicamente sensível, como, por exemplo, baías, canais e enseadas onde existe pequena influência de correntes marítimas.

Nestas regiões, os processos de dispersão dos poluentes são mais lentos, aumentando a probabilidade de impactos ambientais e desastres ecológicos que podem durar muitos anos. Ao contrário, em regiões de alta influência destas

correntes, um derramamento pode ser deslocado para mar aberto facilitando os processos de dispersão natural do óleo por intemperismo.

A grande variedade de ecossistemas próximos ao litoral gera impacto em uma diversidade muito grande de organismos, e em diferentes ambientes com diferentes formas de ocupação humana, acabando por comprometer inclusive as relações sociais e econômicas de uma região.

Por outro lado, vazamentos em regiões mais afastadas tendem a causar pouco impacto em função da dispersão gerada por correntes em sentido oceânico, porém não podem ser negligenciadas quanto aos seus efeitos, pois essas correntes podem ser em sentido da costa. Neste caso, os processos tardios de degradação, associados ao alto tempo de residência dos compostos finais, podem causar contaminação em comunidades biológicas com espécies utilizadas para o consumo humano. Os efeitos em longo prazo podem ser danosos, pois frações ficam retidas junto aos sedimentos de fundo, permanecendo disponíveis para processos de bioacumulação nas cadeias tróficas.

Outros fatores de suma importância na gravidade do dano são o tipo de óleo vazado, que conforme a composição podem persistir por longos períodos, aumentando a extensão dos danos até áreas muito distantes, o volume vazado, fatores biológicos, condições meteorológicas, agentes hidrodinâmicos atuantes, estações do ano e métodos de limpeza utilizados (IPIECA, 1991).

Dentre os métodos preventivos estão às análises potenciais de risco e as ações para reduzir esses riscos, principalmente, estudos de previsão de impacto por modelagem numérica e a conseqüente elaboração de diversos cenários que componham as condições ambientais características e predominantes nas áreas de estudo e a elaboração de modelos de sensibilidade e vulnerabilidade ambiental com base em técnicas de sensoriamento remoto.

Segundo IPIECA (1991), situações distintas requerem diferentes respostas. Os riscos de derramamento de petróleo e derivados e suas respectivas respostas

devem ser classificados de acordo com a dimensão do derramamento, e com a proximidade das instalações operacionais de uma dada empresa. Planos de emergência devem ser desenvolvidos para cada nível e devem estar relacionados a cada cenário de derramamento de cada empresa.

2 - A ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o Canal de São Sebastião, as regiões costeiras próximas e a Plataforma Continental adjacente. O canal de São Sebastião está localizado no litoral norte do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 23º43'S e 23º54'S de latitude e, 45º28'W e 45º20W de longitude (Figura 2).

É uma feição marcante do litoral paulista, separando a Ilha de São Sebastião do continente, com 25 quilômetros de extensão e orientação preferencial SW-NE. Apresenta larguras máximas entre seis e sete quilômetros nas bocas norte e sul, respectivamente, tendo em suas porções centrais estreitamentos de até dois quilômetros. Sua profundidade é bastante variável, atingindo valores superiores a 40 metros no eixo principal do canal na região central.

As áreas costeiras adjacentes compreendem, a norte a enseada de Caraguatatuba e a sul, a partir da Ilha do Toque-Toque, embaiamentos de tamanhos variados, destacando-se, na linha de costa, as praias de Toque-Toque Grande, Samiagem, Paúba e Maresias.

Essa região destaca-se dentro do litoral centro-norte do Estado de São Paulo tanto pelo apelo turístico e imobiliário gerado pela beleza e imponência da sua costa e da Ilha de São Sebastião, como pelas presenças, na porção interna do canal, de um porto de grande atividade comercial, pelo Terminal Marítimo Almirante Barroso-Dutos e Terminais do Centro Sul (TEBAR/DTCS), onde foram desembarcados, em 2002, 52.774.256 toneladas de petróleo e derivados (Porto de São Sebastião, 2002) e onde ocorreram 151 vazamentos de óleo ligados ao transporte marítimo entre 1978 e 2002 (Milanelli, 2003).

Figura 2. Localização da área de estudo.

3 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste na implementação de modelagem numérica através do software MIKE21 do DHI (Danish Hydraulic Institute) para, através da determinação do comportamento hidrodinâmico, inferir sobre os processos de espalhamento de derrames de óleo no Canal de São Sebastião e áreas adjacentes. Esta correlação parte da avaliação, análise e comparação dos resultados do modelo com vazamentos ocorridos durante transferência no terminal, ou em acidentes nos oleodutos próximos da costa, conforme descritos e esquematizados em relatórios da CETESB.

A partir dos resultados gerados pela modelagem, e depois dos procedimentos das técnicas de calibração e validação, foram realizadas séries de simulações em cenários distintos, correspondendo a:

- Diferentes momentos na inter-relação entre fenômenos meteorológicos e astronômicos, traduzidos por ventos e marés;
- Na comparação entre orientação de fluxos com características dinâmico-sedimentares da área de estudo, conforme descritos em estudos anteriores;
- Na comparação com o comportamento dinâmico do espalhamento de manchas de óleo no canal, baseados em fatos reais acompanhados e descritos no relatório sobre a dinâmica de vazamentos no Canal de São Sebastião (CETESB, 1996), escopo principal deste trabalho.

Os eventos descritos correspondem aos acidentes denominados N/T Marina (1985), N/T Hoegh Hill (1986), Tebar 3 (1988), N/T Cairu (1990), N/T Penélope (1991), N/T Katina (1991) e Tebar 5 (1994).

Para este último, foram aplicadas técnicas de geoprocessamento de imagem digital de satélite, simultânea ao período de vazamento ocorrido em maio de 1994, com dois objetivos distintos:

- Caracterizar o evento com informações reais, dando uma dimensão mais precisa do comportamento da mancha no Canal de São Sebastião, em momento específico;

- Utilizar o processamento e classificação da imagem na comparação e complementação dos dados levantados pela CETESB como forma de validação espacial e análise crítica do modelo gerado neste trabalho.

Os cenários estudados apresentam diferentes condições meteorológicas e oceanográficas, exigindo respostas do modelo em condições bastante diversas em que se mostre viável e confiável para se tomar medidas preventivas e mitigadoras rápidas e, conseqüentemente, mais eficientes em caso de acidentes.

Com a definição do comportamento temporal e espacial do agente poluente, em diversas condições ambientais e, associando estas informações aos diversos estudos ambientais e aos mapas de sensibilidade e vulnerabilidade desta região costeira do Estado de São Paulo, pode-se criar um banco de dados, tanto de previsão da extensão do impacto com o tempo, como de procedimentos para contenção e redução do espectro de influência de um acidente deste tipo.

4 – JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Este trabalho aborda uma questão de extrema relevância, dentro do quadro que compõe as diferentes formas de agressão que os ambientes naturais têm sofrido no decorrer da ocupação humana das áreas costeiras.

Os acidentes com vazamento de óleo têm sido responsáveis por grande apreensão quanto aos efeitos nocivos, imediatos e residuais, no ambiente e na sociedade local ou dependente. Ainda hoje poucos estudos acadêmicos ou aplicados estão sendo feitos com o objetivo de monitorar os ambientes costeiros/marinhos e avaliar os impactos das ações humanas.

A importância notória destes programas e as orientações por mais trabalhos com este tipo de abordagem ambiental indicam que a reduzida disponibilidade de informação científica restringe a compreensão das condições de mudança geradas pelos impactos, dificultando também o estabelecimento de prioridades de ação e a efetividade das medidas de proteção eventualmente adotadas.

Este trabalho vem de encontro às necessidades cada vez mais prementes, da sociedade e dos órgãos fiscalizadores, públicos ou particulares, de se estabelecer um grande acervo de informações relacionadas a este tipo de catástrofe.

Estas gamas variadas de informações, seja baseadas em conceitos de sensibilidade e vulnerabilidade, sejam modelos estocásticos ou probabilísticos, ou simplesmente de observação por sensores ou visuais, permitirão que se estabeleçam critérios cada vez mais práticos, rápidos e eficientes para se tomar atitudes cabíveis, conforme as condições ambientais inerentes ao momento da ocorrência, em função das inúmeras possibilidades das variáveis atuantes.

Estudos de modelagem numérica e sensoriamento remoto têm sido largamente utilizados na detecção e mapeamento de películas de óleo. Exemplos

da aplicação estão presentes em todas as partes do mundo submetidas a este tipo de acidente, conforme se pode ler nos itens posteriores referentes ao tema.

A modelagem numérica permite o planejamento prévio, tanto através do mapeamento de áreas mais sensíveis e vulneráveis, conforme Santos (2005), como da aplicação dos métodos adequados de contenção nas áreas necessárias de imediato, devido à possibilidade de respostas mais rápidas das equipes de contenção e limpeza, com a conseqüente redução do impacto.

Dessa forma, e se considerando o fato em si, o estabelecimento de modelos de previsão auxilia em muito na identificação e preservação das áreas de risco, e a determinação da validade do modelo bidimensional integrado verticalmente MIKE21 permite que se estenda sua aplicação para áreas ainda de risco incipiente. É, entretanto, fundamental sempre evidenciar a necessidade de se realizar monitoramento de rotina, melhorando o controle sobre os agentes potenciais de risco, imputando as devidas responsabilidades pelos acidentes, permitindo que se atribua penas aos infratores e reduzindo as agressões ao meio.

Este procedimento amplia as possibilidades da atuação dos órgãos competentes na contenção dos derrames e proteção às áreas mais sensíveis numa primeira abordagem de campo.

5 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 - Levantamento histórico

Os primeiros levantamentos cartográficos realizados na costa paulista datam do início do século XVII , com destaque para o litoral compreendido entre a Vila de São Vicente e o Rio de Janeiro, entretanto, data apenas de 1789 a publicação da "Carta corographica e hydrographica de toda a costa do mar da Capitania de São Paulo", em que constam dados batimétricos da costa paulista, cartas de detalhe da Baía de Santos, parte sul da região de Cananéia, e enseadas de Guaratuba e Paranaguá (Taunay, 1922).

A região de estudo deste trabalho tem as suas primeiras abordagens efetivas com o levantamento sobre as características naturais da Ilha de São Sebastião, realizada por Ihering (1893), que deu ênfase aos aspectos biológicos, geológicos, oceanográficos e geográficos.

Outra referência de destaque são os estudos de Backhouser (1918, *apud* Cruz 1974), que tece considerações acerca dos aspectos geológicos e geomorfológicos da Serra do Mar no litoral norte paulista e dos movimentos eustáticos, caracterizando a região como submetida a um processo de emersão não completada, considerando o Canal de São Sebastião como originário de uma falha submarina e os sambaquis estudados por Loefgren (1893) como indicadores de paleoníveis marinhos.

Dentro da temática de obras portuárias pode-se destacar a publicação "Obras de melhoramentos dos portos de São Sebastião e Ubatuba" da Diretoria de Viação (1941) e os trabalhos de Kutner (1969) sobre a sedimentação no Canal de São Sebastião. Este trabalho, realizado para a empresa Brasconsult, foi destinado ao projeto básico do porto de São Sebastião. Kutner (1976) realizou levantamentos sobre a dinâmica sedimentar visando o apoio na pesquisa e reconhecimento de áreas portuárias.

Dentre os trabalhos voltados à pesquisa em Oceanografia geológica, Furtado (1978) caracteriza os processos dinâmicos da sedimentação atual do Canal de São Sebastião. O autor analisa cartas batimétricas, perfis de ecossondagem e análises granulométricas e composicionais dos sedimentos, além de parâmetros oceanográficos físicos, tais como marés, efeitos de ventos locais, padrão de ondas incidentes e comportamento de correntes, interpretando as características da dinâmica sedimentar atual na área.

Os primeiros trabalhos sistemáticos com análise de séries temporais de dados oceanográficos foram realizados por Emilsson (1962) e Kvinge (1967), definindo o fator vento como a principal influência nas correntes do canal, porém sendo as variações no nível da superfície do mar suas causas primárias. Já Furtado *et al.* (1987) estudam o comportamento principal das correntes do Canal de São Sebastião e da evolução das condições meteorológicas, visando estabelecer correlações com a deriva das manchas de óleo dos eventuais acidentes.

Dentre os trabalhos mais recentes, cuja temática e área de estudo tenham relações com o escopo deste projeto, destacam-se os estudos de modelos numéricos barotrópicos de dispersão oceânica realizado por Soares (1994) onde o autor avalia a potencialidade dos impactos de derrames de petróleo; e os estudos sobre as massas d'água e a circulação no canal, realizados por Miranda & Castro (1995), Fontes (1995), Silva (1995), Coelho (1997), Assad (2000), e a aplicação de um modelo baroclínico de circulação de massas d'água para o canal, realizado por Silva (2001).

Os trabalhos recentes de cunho geológico-oceanográfico, realizados na área, consistiram em aplicações de técnicas de geoprocessamento e modelagem digital de terreno, como Conti (1998) e a análise dos processos sedimentares e da distribuição de matéria orgânica nos sedimentos do canal e plataforma continental adjacente.

Zanardi (1996) e Milanelli (2003) estudam hidrocarbonetos na água e sedimentos de fundo visando, respectivamente, identificar seus níveis, distribuição e origem; e o biomonitoramento de costões rochosos para avaliação de impactos gerados por vazamentos de óleo no canal. Convém destacar a análise histórica dos vazamentos de óleo no litoral norte de São Paulo (1974-1999) realizado por Poffo (2000) e o trabalho de Santos (2005) que monta um modelo de dados geográficos baseado em conceitos de vulnerabilidade e sensibilidade ambiental, indicando as regiões de maior impacto em caso de vazamentos de óleo.

5.2 - Características geológicas e geomorfológicas condicionantes dos processos oceanográficos na Região de São Sebastião.

Quando se observa uma determinada linha de costa, com toda a riqueza de detalhes que ela apresenta, deve-se sempre ter em mente que, a paisagem observada é o resultado de uma infinidade de processos atuando na evolução de sua conformação, em diferentes escalas espaciais, e em eventos de ciclos variáveis energética e temporalmente.

Essas variáveis são fatores determinantes na definição das características extremamente recortadas do litoral centro-norte paulista, com pequenos embaiamentos e enseadas, planícies costeiras restritas formando grandes anfiteatros e um grande número de praias de pequeno porte e costões de alinhamento irregular e inúmeras ilhas.

Uma das características marcantes dessa região é a presença da Ilha de São Sebastião, separada do continente por um canal estreito e profundo, e com uma área de 336Km^2. Apresenta uma topografia acidentada e íngreme, com altura média em torno de 1.000m, atingindo até 1.379m (Pico de São Sebastião).

Segundo Almeida (1964), a existência da ilha foi determinada pela ocorrência do magmatismo alcalino, pois essas intrusões foram responsáveis por um arcabouço mais resistente à erosão que o entorno, tornando a Ilha, um testemunho da regressão erosiva da Serra do Mar, processo este que se constitui no mecanismo primário de formação do Canal de São Sebastião. Campanha, *et* al. (1994) sugerem uma origem tectônica para o Canal, evidenciando que o trecho mais profundo do canal está localizado e tem orientação NW-SE, semelhante às estruturas regionais e de uma zona de cisalhamento de cavalgamento adjacente.

Esses estudos sobre a evolução geológica da costa paulista mostram que, além dos fatores supracitados, a partir do Terciário superior (~5.0 M.a.) as mudanças climáticas que implicam em eventos transgressivos e regressivos, começaram a condicionar a morfologia costeira. Uma feição significativa entre essas condicionantes corresponde a um paleovale localizado na porção sul da Ilha de São Sebastião identificado por Furtado *et al.* (1992) e que representaria segundo Furtado *et al.* (1995) a rota preferencial do avanço do mar no processo transgressivo.

Atualmente esse paleovale condiciona a penetração de massas de águas para o interior do canal como, por exemplo, a ACAS (Água Central do Atlântico Sul), que avança junto ao fundo em direção à costa (Furtado *et al*. 1992).

5.3 - Estudos sobre a Meteorologia e Estrutura Hidrodinâmica

A posição latitudinal e sua localização zonal fazem o Estado de São Paulo ser considerado o palco maior do complexo jogo das atuações dos sistemas atmosféricos atuantes na costa brasileira, visto que é nesta faixa de transição que ocorre o confronto entre os climas controlados pelos sistemas tropicais marinhos e pelos extra-tropicais (marinho polares) além dos fenômenos frontológicos (Sant'anna Neto, 1990).

Essas massas sofrem perturbações freqüentes pela atuação desses sistemas frontais, sob a forma de frentes frias, quentes, estacionárias e de fenômenos locais como a formação de centros de baixa pressão. O balanço entre as massas de ar, tropical e polar e a freqüência dessas perturbações transientes gera variações temporais nas condições meteorológicas do litoral sudeste (Occhipinti,1963).

A dinâmica atmosférica da região Sudeste apresenta, com relação aos sistemas atmosféricos da baixa troposfera, diferentes situações. No verão há o predomínio das correntes de leste, originadas pelo deslocamento dos ventos alísios. Ao chegar ao litoral paulista, a massa tropical atlântica encontra a íngreme escarpa da serra do Mar produzindo um aumento da umidade, da nebulosidade e mesmo das precipitações, assim como, de uma queda da temperatura (Sant'Anna Neto, 2005)

No período de primavera/verão, o anticiclone migratório polar é responsável pelo avanço das frentes frias que atuam na região, por mecanismos de circulação superior do ar e pelo deslocamento do equador térmico para o hemisfério norte. No outono/inverno, os bloqueios das frentes tornam-se mais frágeis e o anticiclone polar avança para latitudes mais baixas, deixando terreno para a evolução da massa polar, que traz episódios de temperaturas mais frias

Além desses sistemas atmosféricos outros são responsáveis por perturbações e instabilidades. As ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) resultantes do corredor de umidade da massa equatorial continental, no sentido noroeste/sudeste, alimentam e intensificam a perturbação frontal no estado de São Paulo. Além destes, também atuam na região as linhas de instabilidade do ar tropical e os Complexos Convectivos de meso-escala (CCM's) (Sant'Anna Neto, *op cit.)*.

Os sistemas frontais, de forma específica, se caracterizam como eventos meteorológicos significativos na transferência de energia dos sistemas atmosfera/oceano para a região costeira sudeste do Brasil. Durante a passagem de

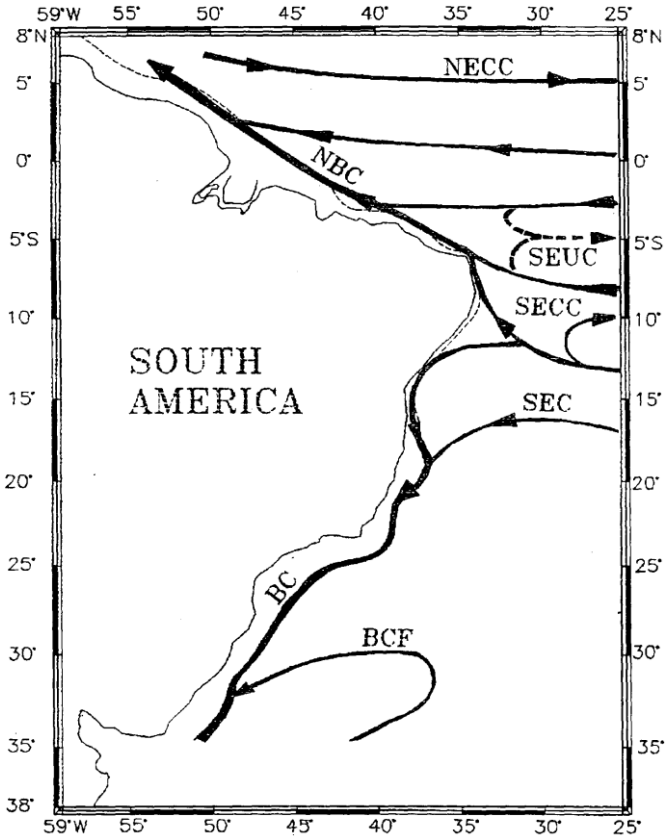
um evento pode-se determinar três momentos distintos no comportamento climático da região:

a) Entrada da frente fria, ou condição pré-frontal com ventos atingindo velocidades em torno de 5 m/s, provenientes inicialmente de NE e girando em sentido anti-horário para NW, ao aproximar de determinada localidade. Ocorre queda da pressão atmosférica e elevação da temperatura.
b) Chegada da frente, ou estágio frontal, com aumento repentino da pressão atmosférica, alta precipitação pluviométrica e instabilidade climática. Os ventos são provenientes de SW-S-SE com velocidades de 5 m/s, porém podendo ocorrer fortes rajadas.
c) Passagem total da frente, ou condição pós-frontal, com queda de temperatura e gradação em sentido anti-horário da direção dos ventos de SW para NE, conforme o sistema se afasta, tendendo às condições anteriores de estabilidade (Santos, 1965).

O padrão de ondulações incidente na costa paulista é resultado da ação de sistemas de ondas provenientes de S-SE, gerados por ventos de APM (Anticiclone Polar Migratório) em condição pré-frontal e de sistemas de ondas provenientes de N-NE, geradas por ATA (Anticiclone Tropical Atlântico) e por APM (condição de pós-frontal) que predominam por cerca de 85% do tempo, embora a atuação de ambos fenômenos possa ser simultânea em determinados momentos (Silva, 2003 ; Araújo, 2005).

O Canal de São Sebastião tem seu comportamento hidrodinâmico superficial fortemente associado ao regime climático. Este regime é bastante complexo pela presença de áreas serranas na região costeira como, por exemplo, a Serra do Juqueriquerê e os relevos altos a abruptos da Ilha de São Sebastião, além de estar situado em uma posição de transição entre os sistemas tropicais e extratropicais, apresentando variações significativas em relação às áreas adjacentes (Barcellos, 2000).

Com relações aos aspectos hidrodinâmicos, a região do Canal de São Sebastião e sua Plataforma Continental adjacente localizam-se na região central da Plataforma Continental Sudeste brasileira (PCSE). As porções mais externas deste trecho da PCSE estão sob o domínio da Corrente do Brasil (CB), cuja formação se dá basicamente a partir do ramo mais setentrional da Corrente Sul Equatorial, o qual gira anticiclonicamente para o sul, próximo a 10º e alimenta a CB (Peterson e Stramma, 1990 *apud* Castro, 1996). Estas disposições estão discriminadas na figura 3.



NBC *– Corrente Norte do Brasil;* ***BC*** *– Corrente do Brasil;* ***NECC*** *– Contra Corrente Norte Equatorial;* ***SECC*** *– Contra Corrente Sul Equatorial;* ***SEUC*** *– Subcorrente Equatorial Sul;* ***SEC*** *– Corrente Sul Equatorial;* ***BCF*** *– Frente da Corrente do Brasil. Figura adaptada de Peterson & Stramma (1990) e Richard & Reverdin (1986) apud Castro (1996).*

Figura 3. Representação esquemática das correntes de contorno ao longo da costa do Brasil.

Essa corrente flui para o sul, bordejando o continente sul americano até a Convergência Subtropical (33º-38º), onde conflui com a Corrente das Malvinas e se separa da costa (Silveira *et al.* 2000) e transporta ao longo do talude continental na PSCE duas massas d'água de origem distintas, a Água Tropical (AT) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) (Silva, 2001). Além dessas, ocorre na plataforma continental interna uma massa d'água denominada água Costeira (AC). O diagrama correspondente à circulação geral das massas d'água que compõem a região Sudeste e seus perfis verticais de distribuição, segundo Emilson (1961) estão presentes na figura 4.

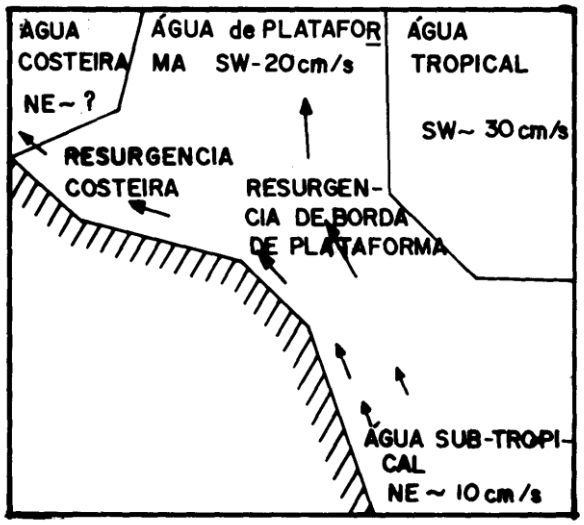


Figura 4. Diagrama do perfil vertical de distribuição e circulação geral das massas d'águas da região sudeste.

Segundo Castro (1996), e conforme estabelecido por Emilsson (1961) e detalhado por outros vários autores, as águas da PCSE são resultados da mistura entre:

- Água Tropical (AT): quente e salina com temperatura maior que 20ºC e salinidade menor que 36,40 (Miranda, 1982) e transportada para sul-sudoeste na camada superficial (0-200m) da Corrente do Brasil, ao longo do talude e quebra de plataforma.

- Água Central do Atlântico Sul (ACAS): relativamente fria, com temperatura menor que 20ºC e salinidade menor que 36,40 (Miranda, 1982) e transportada também para sul-sudoeste, mas na camada inferior da Corrente do Brasil (200 a 500m), próximo à quebra da Plataforma Continental.
- Água Costeira: resultado da mistura de água da descarga continental com as águas da plataforma continental, com baixa salinidade, verticalmente homogênea e sujeita a variações sazonais.

Os primeiros trabalhos sistemáticos com análise de séries temporais de dados oceanográficos foram realizados por Emilsson (1962), pelo Serviço de Pesquisas Hidráulicas da Escola Politécnica da USP, durante a Campanha Hidrográfica de São Sebastião (1965) e por Kvinge (1967). Segundo Emilsson (1962), as correntes presentes no canal são geradas predominantemente por força dos ventos, conforme as condições de tempo vigentes, não se observando influência marcante de correntes de maré.

Estudos sistemáticos em oceanografia têm sido realizados no Canal de São Sebastião. As análises dos resultados na forma de perfis de correntes, séries temporais, recuperação de corpos de deriva e definição de suas trajetórias, mostraram que, o padrão de circulação ao longo do canal caracteriza-se por movimentos de baixa freqüência tanto para o norte como para o sul, muito pouco influenciado pela ação das marés (Emilsson, 1962; Kvinge, 1967; Castro, 1990; Fontes, 1995; Miranda & Castro, 1995) e com movimentos residuais predominantemente para o norte (Furtado, 1978; Furtado *et al.* 1987; Castro, 1985 e Castro & Miranda, 1998b, Silva *et al.*, 2001).

Fontes (1995) evidenciou que a circulação no Canal mostrou-se predominantemente barotrópica com movimento unidirecional para NE durante o outono, inverno e primavera, sendo que no verão ocorreram movimentos baroclínicos em duas camadas, predominantemente para SW na camada superficial e para NE na profunda, e estariam associados à tensão de cizalhamento do vento na plataforma adjacente e à penetração da ACAS pela extremidade sul do Canal.

O autor ainda argumenta que em qualquer época do ano as correntes mais intensas observadas na região central do canal de São Sebastião são as superficiais, uma vez que a camada d'água superficial recebe transferência direta de energia cinética da atmosfera, sendo ainda que nela os termos de atrito lateral e de fundo são relativamente pequenos.

Dentre os trabalhos mais recentes, cuja temática e área de estudo têm relações com o escopo deste projeto, destacam-se os modelamentos numéricos barotrópicos de dispersão oceânica realizado por Soares (1994) em que o autor avalia a potencialidade dos impactos de derrames de petróleo, Coelho (1997), Leandro (1999), Assad (2000), e a aplicação de um modelo baroclínico de circulação de massas d'água para o canal, realizado por Silva (2001).

Apesar de ser muito pouco influente na geração de correntes no Canal de São Sebastião, o entendimento dos processos envolvidos na formação e propagação de marés é fundamental, quando da aplicação de programas de simulação hidrodinâmica.

A análise das marés considera a observação de vários parâmetros significativos e estáveis temporalmente dentro deste processo, sendo que estes parâmetros são chamados de constantes de maré. O método Harmônico de análise de marés, baseado nas investigações de Laplace, considera as marés observadas como a soma de um número finito de constituintes harmônicos, cujas velocidades angulares e fases são determinadas a partir de argumentos astronômicos (Franco, 1988).

Com relação à região de estudo, são considerados igualmente importantes para o conhecimento das marés da região Sudeste os desenvolvimentos tecnológicos da informática (modelagem numérica), que permitiram obter a solução numérica das equações hidrodinâmicas e possibilitaram, pela primeira vez, fazer a previsão das alturas e correntes de marés em toda a plataforma sudeste (Harari 1977 ,1984).

Mesquita & Harari (1983) definem que as oito principais constituintes que correnpondem a mais de 90% do efeito de maré na plataforma continental sudeste são: M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1 e Q_1. Quanto ao sentido de giro da circulação de maré na região Sudeste é o sentido anticiclônico o predominante, ou seja, anti-horário (Mesquita & Harari, 2003).

5.4 Derrames de óleo no Canal de São Sebastião e seus efeitos

A região compreendida pelos municípios de São Sebastião e Ilhabela soma 86 praias, sendo que 60 delas se encontram ao longo do Canal. De uma forma geral a linha de costa da área, como num padrão para o litoral paulista, é composta por três grandes sistemas costeiros: sistemas de praia, sistema de costões, e sistemas de desembocaduras.

De uma forma mais detalhada, os ecossistemas costeiros típicos dessa região são os manguezais, marismas, praias, costões rochosos, planícies de marés, águas costeiras, fundos arenosos e rochosos rasos. Esses ecossistemas estiveram e ainda estão sujeitos a impactos ambientais decorrentes de vazamentos de óleo na região.

Esse risco é devido à presença do terminal da Petrobrás (DTCS), antigo TEBAR (Terminal Marítimo Almirante Barroso). Esse terminal é composto por dois píeres com dois berços de atracação ao norte e dois ao sul, adequados para receber óleo cru e derivados, e para abastecer petroleiros e rebocadores com óleo combustível, como *bunker C*, *fuel oil*, *marine gas* e diesel.

Este é um terminal para importação e exportação de petróleo e derivados, recebendo armazenando e encaminhando para seus destinos finais, como por exemplo para o abastecimento das refinarias de Paulínia (REPLAN), Presidente Bernardes-Cubatão (RPBC) e São José dos Campos (REVAP). Está em operação desde 1969, movimentando segundo a CETESB (1996) 55% do volume total de

petróleo transportado no Brasil e, segundo Tommasi (1994) é responsável pelo fato do litoral norte de São Paulo ser considerado o mais impactado por vazamento de óleo da costa sul e sudeste.

O petróleo é considerado um produto perigoso e seu transporte e manuseio oferece riscos ao meio ambiente e à segurança humana, isto é, no caso da liberação deste produto há possibilidade de danos materiais e humanos, enfermidades ou até morte, resultante da exposição de pessoas, animais ou vegetais a agentes ou condições ambientais potencialmente perigosas (SERPA, 1999 *apud* Poffo *et al.* 2001).

Acidentes ambientais de caráter tecnológico são decorrentes essencialmente de falhas humanas, tanto na manipulação direta de equipamentos, como no gerenciamento operacional inadequado, envolvendo atividades de manutenção, segurança do navio, píer ou terminal, que acabam por comprometer os procedimentos e equipamentos, possibilitando a ocorrência de falhas e conseqüentemente acidentes (Poffo, 2000). A figura 5 abaixo mostra a distribuição dos registros de vazamentos de óleo no Litoral Norte do Estado de São Paulo (1974 a 2000).

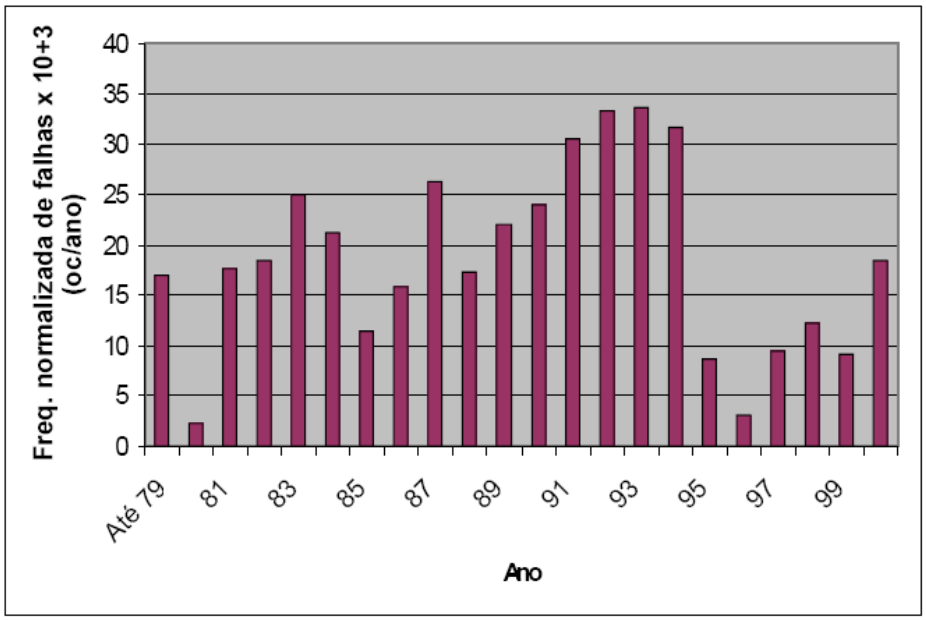
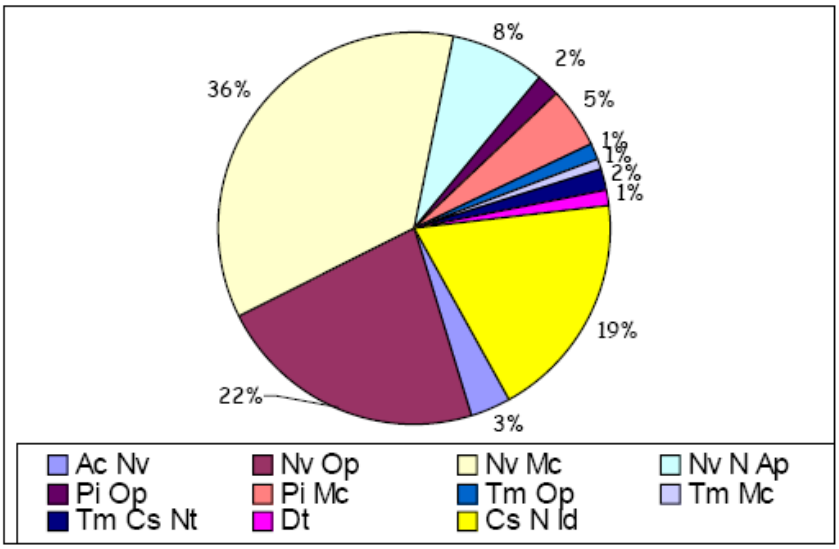


Figura 5. Distribuição dos registros de vazamentos de óleo no litoral norte de São Paulo (1974 – 2000), Poffo *et al* (2001).

Dentro deste contexto, os acidentes associados a falhas mecânicas foram as causas mais freqüentes das ocorrências (36%), seguidos pelas falhas operacionais (22%) conforme mostrado no gráfico da figura 6.



Ac Nv *- Acidente de navegação.* ***Nv Op****– Falha operacional em navios.*
Pi Op *- Falha operacional no pie.r* ***Pi Mc*** *- Falha mecânica no píer.*
Nv Mc *– Falha mecânica em navios.* ***Tm Op*** *– Falha operacional no terminal.*
Tm Mc *- Falha mecânica no terminal.* ***Tm Cs Nt*** *– Causa natural no terminal.*
Cs N Id *– Causas não apuradas, sem identificar a fonte.*
Nv N Ap *- Causas não apuradas, envolvendo navios.* ***Dt*** *– Oleodutos.*

Figura 6. Classificação das ocorrências quanto às causas (Poffo *et al.*, 2001).

Os acidentes com vazamento de óleo na região de São Sebastião tiveram seu primeiro registro de grande impacto com o que vitimou o N/T Takimya Maru em agosto do 1974, com um volume vazado de 6.000 m^3. A tabela a seguir mostra os principais vazamentos ocorridos.

Navio Tanque - Ruptura Oleoduto	**Data**	**Volume (m^3)**
Takimya Maru	08/1974	~ 6.000
Brazilian Marina	9/1/1978	6.000
World Galla	1/3/1981	60
Arabean	1/2/1983	300
World Petrobrás II	21/4/1983	30
Tairu	15/2/1985	100
Marina	18/3/1985	2.500
Cairu II	23/5/1985	30
Hamilton Lopes IV	24/4/1986	220
Hoeg Hill	28/9/1986	50
Aghia Irini	8/5/1987	80
Japurá	3/2/1989	200
Tebar IV *	17/8/1989	350
Joinville	28/11/1989	40
Cairu	8/8/1990	80
Anand	24/1/1991	70
Maribrás	31/3/1991	40
Penélope	26/5/1991	280
Katina	13/8/1991	60
Tebar V*	15/5/1994	2.700
Mafra IV	16/03/2000	7,25
Vergina	04/11/2000	91,57
Nordic Marita	02/06/2003	> 25
OSBAT –Guaecá*	18/02/2004	> 260

* = Ruptura de oleoduto

Tabela 1. Principais vazamentos ocorridos de 1974 até o presente momento (Cetesb, 1996).

Para o Estado de São Paulo, a CETESB dispõe do Cadastro de Emergências Químicas – CADEC, onde são registradas as ocorrências atendidas desde 1978. Neste cadastro consta que de janeiro de 1978 a dezembro de 2006 foram computadas 6.700 ocorrências, com gradativo aumento de casos até atingir o total de 626 ocorrências em 2001 e que este número foi reduzindo, nos anos seguintes, até chegar ao valor de 397 em 2006. Nos últimos dez anos, de 1995 a 2006, foram registrados 165 casos envolvendo liberação de óleo, sendo 56 para São Sebastião e 109 para Santos, maior parte relacionada com volumes inferiores a 7 ton (CETESB, 2007b).

Vários estudos têm sido realizados nas últimas décadas visando identificar as conseqüências dos derrames, utilizando-se de várias abordagens científicas. Além dos trabalhos específicos realizados pela CETESB E PETROBRÁS, pesquisas ligadas às Universidades e voltados à área de oceanografia química têm estudado a distribuição de indicadores de impactos.

Esses estudos mostram que os efeitos da poluição não desaparecem com rapidez, pois diferentemente da coluna d'água, a persistência do óleo em sedimentos é bem maior (Zanardi, 1996). Segundo Bícego (1988), os últimos compostos podem durar até cinco meses após o acidente. Zanardi (1996) descreve ainda que o vazamento ocorrido no oleoduto OSBAT em 1989, descrito pela CETESB como "Operação TEBAR IV", teve seus efeitos identificados até três meses depois nas amostras de água e sete meses depois os sedimentos ainda estavam contaminados. Isto implica em um grau de persistência que pode ser superior escala anual, podendo ser investigado registros em testemunhos que possam ser correlacionáveis a derrames mais antigos.

Silva (2005), analisando marcadores bioquímicos, define conclusivamente a contaminação por petróleo na área, e que as principais fontes poluidoras do Canal de São Sebastião estão associadas à área portuária e do DTCS.

5.5 Aplicação de Modelagem Numérica no espalhamento de óleo em derrames

Estudos prévios em modelagem numérica e sua aplicação, baseados em dados oceanográficos, meteorológicos e químicos, visando compreender o comportamento do espalhamento de petróleo em um determinado local, são uma poderosa ferramenta para se identificar a destinação das manchas, servido de base para a implementação de métodos de contenção de resposta rápida. Sua aplicação é de grande importância no controle e mitigação dessas catástrofes.

Modelos computacionais para simular o comportamento e as trajetórias de derrames de óleo em ambiente marinho têm sido desenvolvidos em estudos ao longo de todas as áreas vulneráveis a este tipo de ocorrência. Entre os primeiros trabalhos que estudaram aspectos da hidrodinâmica associada ao comportamento de uma mancha de petróleo, pode-se considerar, como um dos precursores, os trabalhos de Fay (1969).

O autor caracterizou este comportamento considerando as forças que regem o processo de espalhamento, dividindo o fenômeno em três regimes: gravitacional-inercial, gravitacional-viscoso e viscoso-tensão superficial.

Os primeiros modelos, como os de Fay (1969), Hoult (1972), Murray (1972), Fannelop & Waldman (1971) e DiPietro *et alii* (1978) não levavam em conta o transporte causado pelas correntes marinhas e os ventos, e não consideravam nenhum tipo de processo de destino como evaporação, dispersão, etc.

Segundo a Sociedade Americana de Engenheiros Civis, ASCE (*Task Committee on Modeling Oil Spills* (1996), *in* Paladino, 2000) os modelos têm evoluído nos últimos 25 anos, desde os bi-dimensionais (2DYZ) que consideram apenas a trajetória, até modelos tridimensionais que incluem formulações para processos como evaporação, emulsificação, diluição, entre outros, além da dispersão devida ao arraste das correntes e os ventos.

Os modelos que apresentam algoritmos mais simples têm tempo de resposta computacional rápida, e são usados logo após o acidente com dados de vento e correntes no instante do acidente. Estudos preventivos normalmente usam modelos determinísticos estudando derrames sob condições extremas e modelos probabilísticos para avaliar as componentes sazonais (Alves, 2006).

Com a evolução da computação e dos modelos hidrodinâmicos, tornou-se possível uma boa representação das correntes hidrodinâmicas, incluído as principais forçantes, inclusive em regiões mais costeiras. Além disso, os modelos

dinâmicos estão sendo implementados junto aos modelos de intemperismo do óleo, o que os permite simular as manchas com melhor precisão (Alves, 2006).

Nos estudos e aplicações na costa brasileira, vários modelos foram equacionados e desenvolvidos para estudos de derrames de óleo em ambientes marinhos costeiros. Paladino (2000) apresenta um modelo numérico 2D para a estimação da trajetória seguida por manchas de petróleo derramadas no porto de São Francisco do Sul, Estado de Santa Catarina, onde existe uma monobóia de carga e descarga de óleo em alto mar. Para atingir este objetivo desenvolve um modelo matemático baseado nas equações de Navier-Stokes aplicadas à mancha de óleo, integradas ao longo da espessura da mancha.

O LAMMA (Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos da Universidade Federal do Rio de Janeiro) desenvolve um modelo computacional que é capaz de simular o comportamento e a trajetória do óleo no ambiente marinho denominado NICOIL. Este modelo pode ser aplicado a vazamentos instantâneos e contínuos, e vem sendo implementado tanto para regiões oceânicas como costeiras (Mehdi, 2005).

Como exemplo de aplicações do NICOIL pode-se citar o vazamento ocorrido devido ao rompimento de um duto da REDUC na Baía de Guanabara - Rio de Janeiro em 18 de janeiro de 2000, e o acidente ocorrido em março de 2001 que culminou com o afundamento da Plataforma de prospecção de óleo P-36 da PETROBRÁS.

Oliveira e Meyer (2006) apresentam a modelagem do comportamento evolutivo de manchas de óleo no Canal Central da Baía de Ilha Grande, na região do terminal petrolífero. Foram considerados dois cenários distintos, a partir de uma fonte poluente no terminal e de uma mancha inicial detectada. Em ambos os casos, as simulações levaram em consideração diferentes condições de vento, desde situação de calmaria como de ventos provenientes de SE, SW, NE e NW.

O estudo realizado por Alves (2006) tem como alvo a Bacia de Pelotas, onde se encontra o Porto de Rio Grande e o Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra.

O modelo de óleo utilizado foi forçado com valores de correntes de um modelo hidrodinâmico 3-D (Princeton Ocean Model) e ventos das análises do modelo atmosférico proveniente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

O modelo hidrodinâmico foi forçado com vento, marés e saídas (temperatura, salinidade e elevação do nível do mar) do modelo oceânico global OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project), a partir do que foram gerados cenários probabilísticos da trajetória das manchas, nos dez dias iniciais e também cenários do destino final das manchas determinando as áreas mais suscetíveis à contaminação, em caso de acidente.

Não foram encontradas na literatura descrições da aplicação do programa do Mike 21 para simulação do deslocamento de manchas de derrames de óleo na costa de São Paulo, sendo este trabalho pioneiro no estado.

Para o Canal de São Sebastião deve-se destacar dois trabalhos aplicados, o modelo desenvolvido por Soares (1994) e a modelagem da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR – PETROBRAS, realizado por Fortis (2005). O primeiro autor desenvolveu um estudo teórico da dispersão de substâncias dinamicamente passivas, com um modelo hidrodinâmico, baseado nas equações de continuidade de movimento para águas rasas de Heaps (1978) e um modelo de dispersão baseado na equação da dispersão horizontal de Fisher *et al.*(1979).

Fortis (op cit) realizou estudo da dispersão dos efluentes com alta concentração de amônia de dois emissários com sistema difusor. Foram utilizados dois métodos, o integral (software CORMIX) e o método dos volumes finitos (software FLUENT), que se mostrou, segundo o autor, mais coerente com os dados de monitoramento de qualidade de água e diluição de traçadores. Com relação aos modelos específicos mais conhecidos que estão hoje disponíveis podem-se citar o MIKE 21 SA, OSCAR, OILMAP, MOHID, CHEMMAP, GEMS, DELFT, GNOME, entre outros.

Mundialmente a aplicação de modelagem numérica para derrames de óleo é muito ampla, sendo que a aplicação do software MIKE 21 na caracterização de derrames está exemplificada de duas formas distintas em literatura: os trabalhos de Vethamony et al. (2007), que estudou um derrame ocorrido em Goa no ano de 2005, após a colisão de duas embarcações e o trabalho de Verma *et al.* (2008), que descreve uma simulação de um derrame de óleo e produtos químicos na costa do golfo árabe, onde novos empreendimentos estão sendo implantados, de forma a identificar os riscos, caracterizando, assim, duas formas clássicas de abordagem do problema.

Com relação a estudos integrados, um exemplo é o de modelo numérico em sistema de informação geográfica (SIG), exemplificado na figura 7, na qual foram utilizados os seguintes aplicativos: Costmap, Oilmap, Chemap e Simap da ASA (Applied Science Associates, Inc.) na elaboração de uma carta do deslocamento de óleo e produtos químicos no golfo arábico.

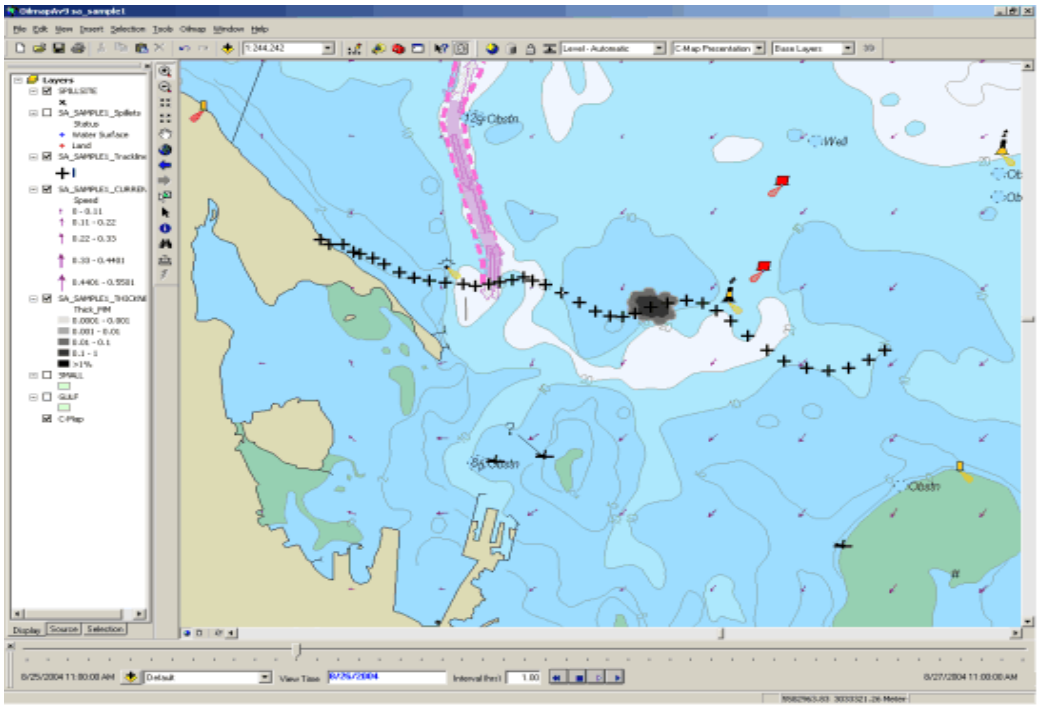


Figura 7. Aplicação integrada de modelagem numérica e SIG na costa do golfo arábico.

5.6 Sensoriamento remoto e derrames de óleo

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto em ambientes marinhos permite que se obtenham avaliações qualitativas significativas das características físico-químicas da água e de parâmetros tais como material em suspensão e diferentes tipos de poluentes, incluindo aí manchas de vazamento de óleo.

Atualmente, os principais produtos utilizados no monitoramento desse tipo de acidente são as imagens dos radares de abertura sintética a bordo dos satélites RADARSAT-1 ENVISAT. As imagens são adquiridas nos modos de operação *ScanSAR Narrow A e B* e *Extended Low 1* do RADARSAT-1, e no modo *Wide Swath* do sensor ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) a bordo do ENVISAT. Tais modos apresentam ângulos de incidência e larguras de faixa mais efetivos para o monitoramento oceânico (Bentz *et al.*, 2005).

Um exemplo de imagem do satélite Envisat está disponibilizado na figura 8.

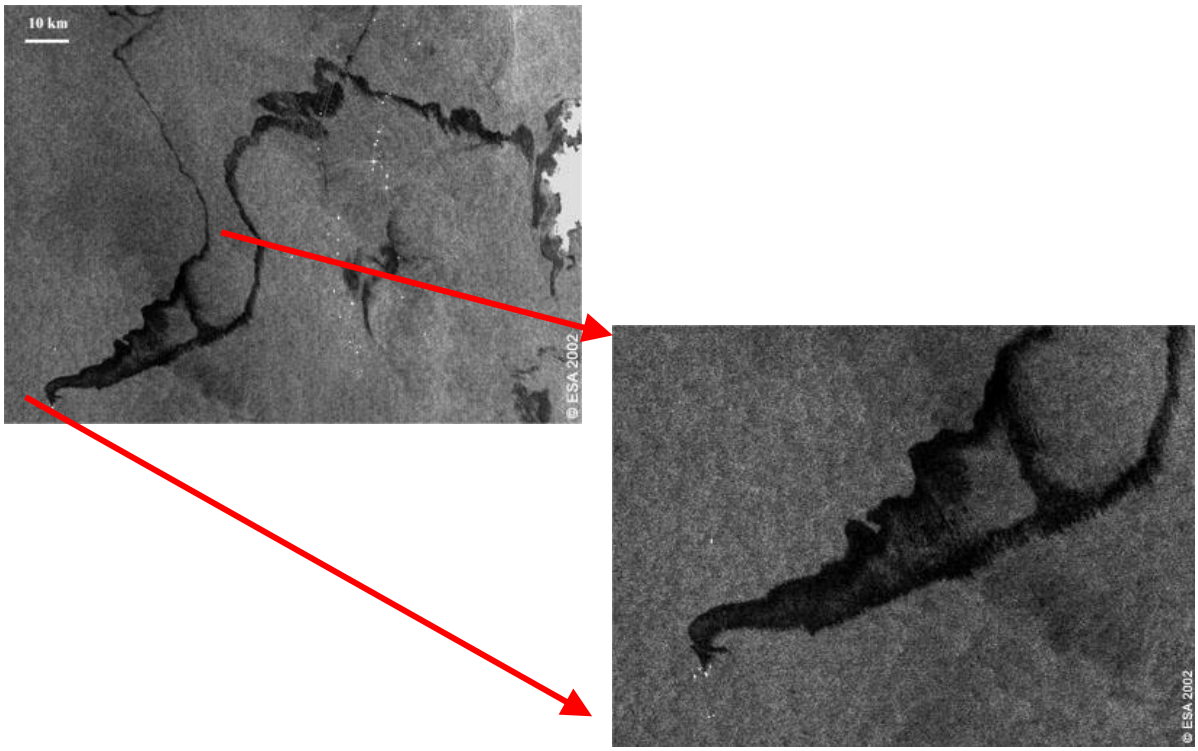


Figura 8. Satélite Envisat's ASAR revelando a extensão do imenso derrame de óleo na Costa da Espanha. Navio Prestige, Novembro de 2002

Uma proposta metodológica para identificação de filme de óleo utilizando processamento digital de imagem TM/LANDSAT foi apresentada por Kampel & Amaral (2001), onde os autores detectaram e estimaram a extensão da mancha de óleo decorrente do derrame ocorrido na Baía da Guanabara, Rio de Janeiro em 18 de janeiro de 2000.

Segundo os autores, as maiores limitações ao largo uso destas técnicas está na presença de cobertura de nuvem e na baixa resolução temporal das imagens LANDSAT, que tem retorno de 16 dias, limitando a evolução do monitoramento da evolução de um derrame. O uso de imagens de outros tipos de satélites ampliaria o emprego potencial do sensoriamento remoto neste tipo de acidente.

Apenas algumas descrições sobre uso do satélite LANDSAT, em derrames de óleo, foram encontradas, como por exemplo, da dispersão da película do ITOX I, vazado no México e identificado através do GOES (*Geostationary Operational Environment Satellite*), por AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e imagens do LANDSAT (O'Neil *et al.*, 1983 *apud* Fingas & Brown, 1997). Outro caso foi a detecção de óleo na Baía de Gabarus, Canadá, a partir do vazamento do navio Kurdistão, também detectado pelo satélite em questão (Fingas & Brown, 1997).

Não se encontram com facilidade, na literatura científica nacional, trabalhos que descrevam procedimentos de monitoramento evolutivo de acidentes por tratamento de imagem digital. A utilização de imagem de satélite aplicada a derrames de petróleo tem sido utilizada mais na forma preventiva ao longo da costa brasileira, de acordo com propostas de criação de modelos de bancos de dados e cartas de sensibilidade e/ou vulnerabilidade ambiental a esse tipo de desastre.

Neste sentido, na região do litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, Souza *et al.* (2005) desenvolveu um sistema de informações geográficas (SIG) para o monitoramento de derrames de óleo. Na produção da base cartográfica

digital foi realizado o Processamento Digital de Imagens LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM+, SPOT, CBERS 2, e IKONOS; gerando, para gestão das áreas de risco, todo um mapeamento ambiental, envolvendo dados geográficos, dos tipos geológicos, geofísicos, e socioeconômico.

Santos (2005) projetou um modelo de bancos de dados em SIG, capaz de determinar a sensibilidade e a vulnerabilidade ambiental da costa de São Paulo aos efeitos decorrentes de vazamento de óleo. Os métodos foram baseados nos índices ISA propostos pela NOAA e, entre as informações envolvidas no desenvolvimento dos modelos, estão as imagens ETM+ do satélite LANDSAT 7.

Também na bacia do Potiguar, a segunda maior região de exploração petrolífera do Brasil, localizada no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Albuquerque & Amaro (2007) tiveram como objetivo específico a aplicação de imagens SAR *(Synthetic Aperture Radar*) do RADARSAT-1 e meteo-oceanográficas, numa estrutura de banco de dados georreferenciados, para monitorar o aparecimento e a movimentação de manchas de óleo no mar, baseado nos dados de direção e temperatura de correntes, além de auxiliar na elaboração de um plano de contingência eficiente das áreas afetadas. Cabral *et al.* (2007), aplicando esses conceitos estabelecidos, elaboraram cartas de sensibilidade ambiental à poluição por óleo nas bacias de Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba.

Sensores de microondas do tipo SAR capturam imagens em duas dimensões e são atualmente uma importante ferramenta no monitoramento de derrames de óleo, em função de sua ampla cobertura e pela sua capacidade de coletar dados dia e noite e em qualquer condição atmosférica. Os principais satélites provedores de imagens SAR são o ERS-1, utilizado desde o início dos anos 1990, e atualmente o RADARSAT- 1 e o ENVISAT, que se tornaram as fontes da maior quantidade de imagens deste tipo.

Estudos detalhados das aplicações destas técnicas de sensoriamento remoto (SR) estão indicados e discutidos nas revisões sobre os métodos de

processamento de imagens aplicados a derrame de petróleo, tais como os elaborados por Fingas & Brown (1997) e Brekke & Solberg (2005). Nestas revisões, os autores discutem e avaliam desde os diferentes tipos de satélites e sensores, assim como técnicas de abordagem, formas manuais e automáticas de tratamentos, como a geração de algorítmos para detecção, sempre associados às diferentes condições gerais dos momentos, intrínsecas a cada caso.

6 - METODOLOGIA

6.1 Introdução

A metodologia proposta neste trabalho consistiu primeiramente no levantamento de informações prévias de séries temporais das forçantes de caráter meteorológico e oceanográfico. Além dessas forçantes, tais como ventos, correntes e marés, foram obtidos dados batimétricos. Os conjuntos de dados foram fornecidos pelo Instituto Oceanográfico da USP e pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), tendo se optado, neste trabalho, por calibrar e validar o modelo baseando-se em dados medidos referentes ao mês de outubro de 2003, período em que foi possível obter séries temporais completas e detalhadas de ventos e marés.

Realizou-se, seqüencialmente, um trabalho de consolidação dos dados e definição das condições de contorno para o modelo, que foi baseada nas alturas de maré, a partir dos dados das constantes harmônicas fornecidas pelo Laboratório de Simulação e Previsão Numérica Hidrodinâmica (LABSIP) do Instituto Oceanográfico da USP, coordenado pelo Prof. Dr. Joseph Harari e por dados de maré fornecidos pela DHN, do marégrafo de São Sebastião.

Estas informações estão integradas e processadas utilizando modelação numérica baseada nos recursos do programa MIKE21, que gera modelos barotrópicos, através de seu módulo HD (Hidrodinâmico). Para a calibração do modelo os parâmetros utilizados foram a resistência do leito, dada pelo coeficiente de Manning, a viscosidade pela formulação de Smagorinsky e por fim o coeficiente de atrito do ventos sobre a superfície da água. Este último fator é considerado o mais importante pelo forte predomínio do vento como condicionante das correntes no Canal de São Sebastião (Castro, 1990).

Como base para validação da modelagem hidrodinâmica, foi utilizada uma série de dados de marés medidas, obtidas junto ao Instituto Oceanográfico da USP, através de um registrador de nível de água (*Water Level Recorder Model 7*)

da marca Aanderaa, fundeado em área adjacente à praia em frente ao CEBIMAR – USP (aproximadamente UTM 456939 E, 7664657 S). Os dados das correntes superficiais para o mês de outubro de 2003, foram obtidos a partir de um fundeio realizado no píer sul do porto de São Sebastião (aproximadamente UTM 460373 E, 7366684 S), através de um ADCP do tipo Somtec Argonaut.

Foram abordadas e esquematizadas as descrições do acompanhamento de derrames ocorridos na região, descritas nos relatórios sobre dinâmica dos vazamentos de óleo no Canal de São Sebastião (CETESB, 1996) e em Poffo (2000) através do software Surfer 8, da Golden Software, que possibilitou a reprodução e adaptação das informações geradas pela CETESB adaptadas para este trabalho.

Foi utilizada, ainda, uma imagem de satélite Landsat TM-5, de 17 de maio de 1994, cobrindo a região de São Sebastião. A passagem do satélite foi simultânea a um vazamento do oleoduto da Petrobrás denominado TEBAR V, no dia 15 do respectivo mês e ano. O processamento desta imagem foi realizado através do software ErMapper.

6.2 Modelo Computacional MIKE 21

6.2.1 – Apresentação e Características do Módulo HD

O software MIKE 21, versão 2008, foi desenvolvido pela DHI – DANISH HYDRAULIC INSTITUTE WATER e seu módulo hidrodinâmico MIKE 21 HD consiste de um sistema de modelagem numérica que permite a simulação das variações tanto do nível como do fluxo d’água em áreas costeiras em geral. É um modelo bidimensional simulando fluxos variáveis em um nível vertical homogêneo, condições adequadas para simulação dos níveis de água e das velocidades de corrente em superfície, gerados predominantemente pelo vento.

A entrada dos dados se faz de forma a completar as necessidades para elaboração dos cálculos, tomando por base a grade batimétrica e as condições de contorno da área de estudo. Neste trabalho foram utilizados dados digitalizados a partir das informações das Folhas de Bordo da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN - Ministério da Marinha) da plataforma continental e região costeira do Estado de São Paulo.

Para orientar o cálculo, a batimetria da região e as condições de contorno são necessárias para resolver as equações diferenciais parciais de movimento. Estas condições de contorno são geralmente os seguintes dados de borda:

- Níveis da superfície para as bordas abertas e densidade de fluxo paralelo a borda aberta ou, densidade de fluxo paralelo e perpendicular às bordas abertas;
- Batimetria (profundidade e contorno do continente);
- Resistência de fundo;
- Velocidade e rumo do vento;

As equações utilizadas para descrever as variações do fluxo e do nível d'água são a equação da conservação de massa (1) e as equações do momento integradas na vertical (2 e 3).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \qquad \textbf{... (1)}$$

Conservação da Quantidade de movimento em x:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh\frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ &+ \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2} - \frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xx}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{xy}\right)\right] - \Omega p \\ &- fVV_x + \frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}\left(p_a\right) = 0 \end{aligned}\right\} \qquad \textbf{... (2)}$$

Conservação da quantidade de movimento em y:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}\\&+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xy}\right)\right]+\Omega p\\&-fVV_y+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial_y}\left(p_a\right)=0\end{aligned}\right\} \quad \text{... (3)}$$

Os símbolos usados nas equações estão na tabela 2 a seguir:

h (x,y,t)	-	profundidade da água (m)
ζ (x,y,t)	-	elevação da superfície (m)
p,q (x,y,t)	-	densidade de fluxo nas direções x e y ($m^3/s/m$) = (uh,vh); (u,v) = velocidades médias na vertical nas direções x e y
C(x,y)	-	Coeficiente de Chezy ($m^{1/2}/s$)
G	-	aceleração da gravidade (m/s^2)
F(V)	-	fator de atrito do vento
V, $V_x.V_y(x,y,t)$	-	velocidade do vento e componentes nas direções em x e y (m/s)
$\Omega(x,y)$	-	parâmetro de Coriolis, dependente da latitude (s^{-1})
$P_a(x,y,t)$	-	pressão atmosférica ($kg/m/s^2$)
ρ_w	-	massa específica (kg/m^3)
x,y	-	coordenadas (m)
T	-	tempo (s)
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	-	componentes do efeito de cisalhamento

Tabela 2. Símbolos utilizados nas formulações do modelo HD do MIKE 21.

6.3 Batimetria

Os dados batimétricos foram obtidos a partir da digitalização de cartas náuticas e folhas de bordo da DHN (Alfredini, 2002). Esses dados foram organizados em planilha Excel (Microsoft), onde constam dados de latitude e longitude em UTM, e da profundidade em metros para cada estação.

Esses dados batimétricos foram inicialmente selecionados para cobrir a área de estudo e, posteriormente, organizados na forma de tabelas. A partir desta base gerou-se uma grade regular, através da interpolação pelo método linear presente no modelo.

A relação entre o espaçamento da grade e a área do modelo devem ser coerentes com a escala das informações que se deseje obter, dessa forma, as variações da batimetria devem ter resolução suficiente para que sejam representativas no cálculo das simulações a serem realizadas. O espaçamento da grade está diretamente relacionado às atribuições de valor ao número de Courant e à velocidade de percurso da informação no modelo.

O número de Courant é definido como:

$$\mathbf{C}_R = c\,\frac{\Delta t}{\Delta x}, \qquad ...(4)$$

Onde $\mathbf{c}$ é a celeridade, Δt é o espaço de tempo e Δx é o espaçamento da grade.

$$\mathbf{c} = (g * h)^{1/2}$$

...(5)

Onde *g* é a força gravitacional e *h* é a profundidade.

A versão 2008 deste programa usa o mesmo mecanismo de simulação e aproximação numérica na elaboração de uma grade simples, regular, porém é possível refinar áreas de interesse especial dentro da área do modelo. Todos os

domínios dentro do modelo são conectados dinamicamente, aumentando a velocidade de processamento computacional.

Dessa forma a malha gerada para o modelo é não regular, e tem como solução técnica o uso de célula centradas de volume finito. A malha é baseada em elementos triangulares lineares e se apresenta de forma a adensar progressivamente seu espaçamento, aumentando o grau de detalhe até a área alvo específica. O espaçamento máximo foi definido em média de 5000 metros enquanto o mínimo varia em torno de 500 metros.

Para esses dados foram definidos os arcos e núcleos que compõem o conjunto da grade batimétrica. Foram criados quatro agrupamentos com aumento na densidade de ponto e conseqüentemente diminuição no espaçamento à medida que se aproxima da área alvo que é o canal de São Sebastião.

As variações progressivas são necessárias para se evitar instabilidades no sistema. A partir da definição das características da grade os pontos e seus respectivos valores foram então plotados e interpolados segundo o método estatístico de mínima curvatura.

Um exemplo do padrão do adensamento do espaçamento de forma progressiva no processo de interpolação para geração da grade amostral está apresentado na figura 9. A partir da malha elaborada criou-se o mapa de isóbatas da área, conforme pode se ver na figura 10.

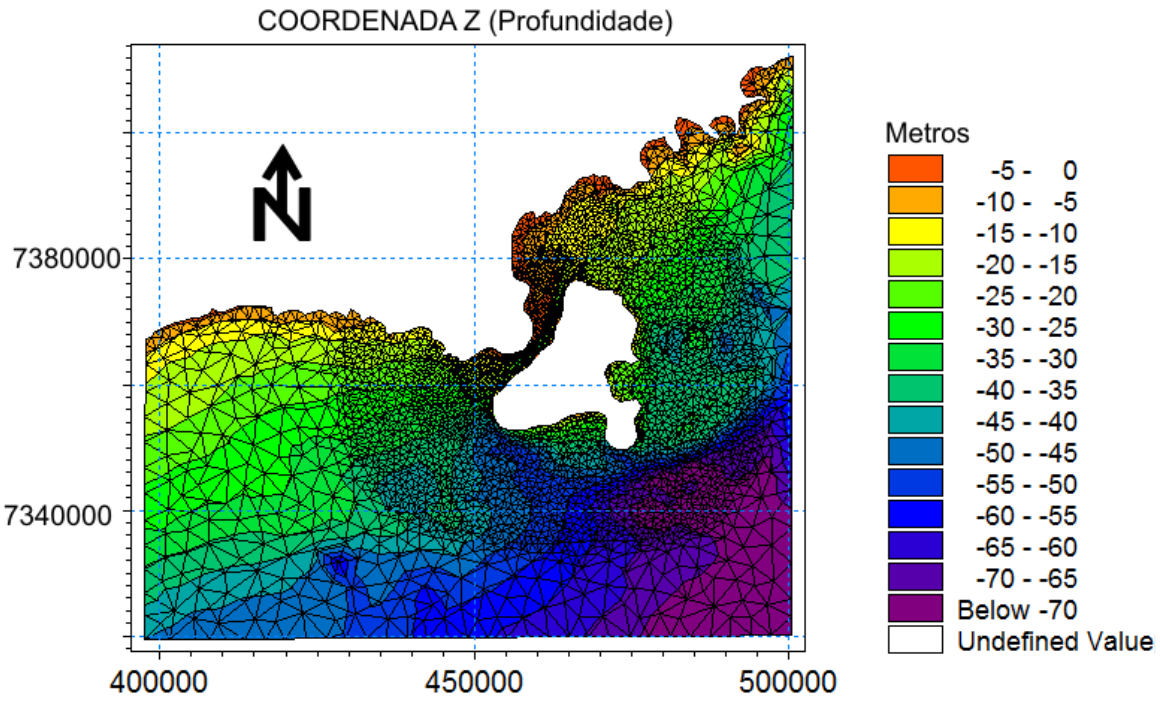


Figura 9. Exemplo de malha amostral com refinamento (elementos finitos), gerado no processo de interpolação dos dados batimétricos na área de estudo.

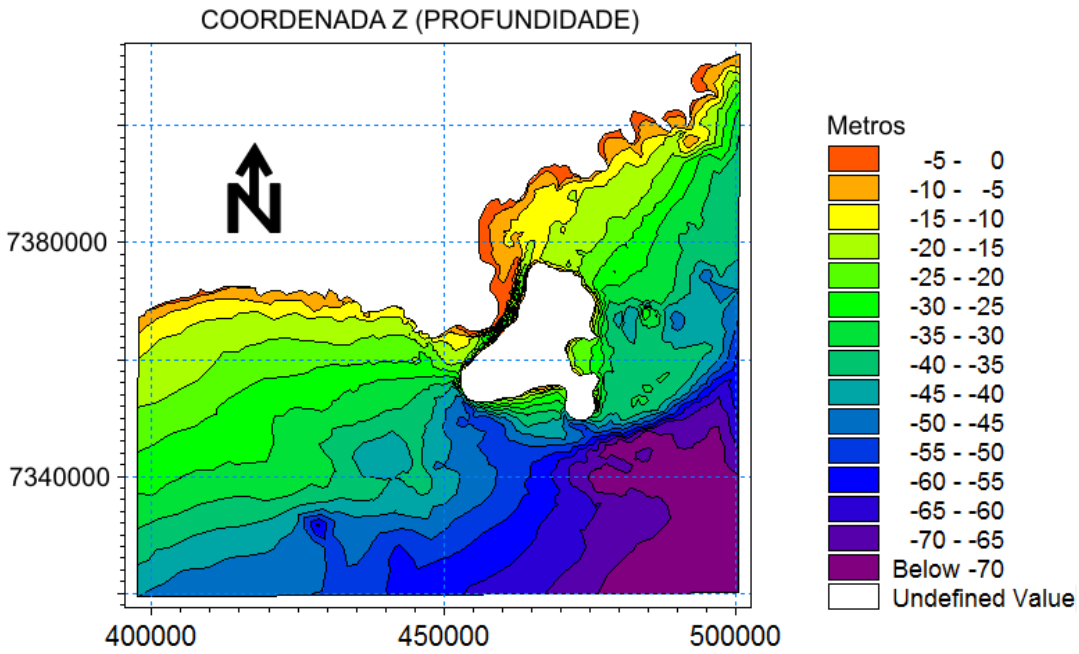


Figura 10. Mapa de isóbatas da plataforma continental a partir da malha batimétrica gerada.

Este mapa mostra as características batimétricas da região que compreende o Canal de São Sebastião e a plataforma continental adjacente. Na região costeira e plataforma da área a sul da ilha as isóbatas tendem a se orientar de forma subparalela à linha de costa, sofrendo inflexão naturalmente ao se aproximarem da Ilha.

A porção a norte é mais complexa, mais irregular, com uma extensa área de baixa declividade se projetando da costa na sombra da ilha para os sistemas atmosféricos provenientes de sul e com o rio Juqueriquerê como fonte próxima de sedimentos. Na plataforma externa as isóbatas têm comportamento tendendo ao paralelismo, exceto na área adjacente à boca sul do canal, onde pode se observar às feições descritas por Furtado e Bonetti Filho (1995) e caracterizada como um paleovale fluvial preservado.

Estudos anteriores, relacionados ao Projeto Remac, e recentes realizados por Rodrigues *et al.* (2003) e Conti (2004) mostram as características geomorfológicas e sedimentares da plataforma continental de São Paulo, identificando neste contexto, as variações entre as regiões a sul e a norte da Ilha de São Sebastião, evidentes neste mapa batimétrico apresentado na figura 10.

Dentro da área específica deste trabalho, o Canal de São Sebastião se configura como uma estrutura alongada separando a Ilha de São Sebastião do continente, com 25 quilômetros de extensão e orientação preferencial SW-NE. Apresenta larguras máximas entre seis e sete quilômetros nas bocas norte e sul, respectivamente, tendo em suas porções centrais estreitamentos de até dois quilômetros.

Sua profundidade é bastante variável, atingindo valores superiores a 40 metros no eixo principal do canal na região central, com o canal principal se deslocado no sentido da linha de costa da Ilha. Conti (1998) detalha os aspectos morfossedimentares do Canal de São Sebastião, definindo sua compartimentação em três partes:

- A sul, com baixa declividade e sedimentos predominantemente arenosos finos;

- A norte onde ocorre uma grande complexidade geomorfológica e sedimentar, com a presença de um pontal arenoso na face continental do canal, projetando-se para a enseada adjacente onde, na porção voltada para o continente, ocorre deposição de sedimentos siltosos e argilosos;

- Na região central do canal, mais estreita, onde os fluxos são mais intensos. Essas características batimétricas estão demonstradas no mapa apresentado na figura 11.

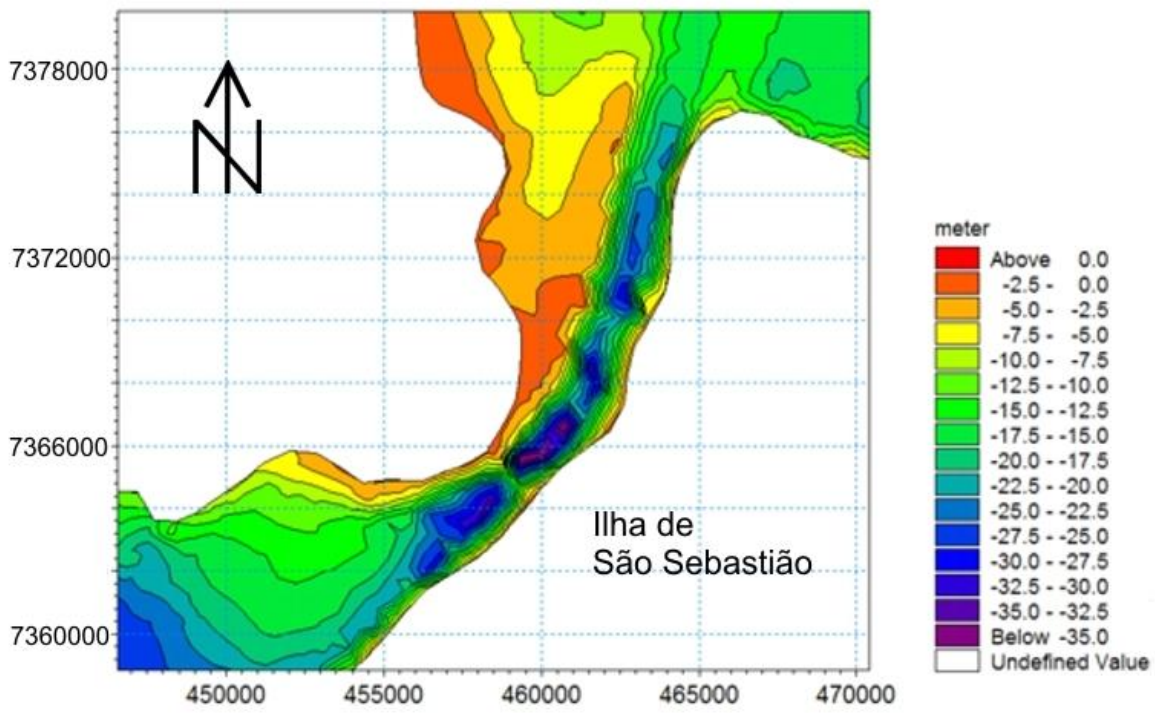


Figura 11. Batimetria detalhada do Canal de São Sebastião.

6.4 Condições de Contorno

Para os processamentos foi estabelecido que as condições de contorno lateral serão obtidas através das variações do nível do mar nas bordas abertas.

As condições de contorno se basearam nos dados das constantes harmônicas de três estações previamente definidas e consideradas representativas para todo o eixo referente aos limites da área de estudo. Esses três pontos se mostraram suficientes para a definição, pois as variações nas alturas de maré ao longo dos eixos que compuseram o contorno da área de estudo se mostraram pouco significativas. Estes pontos de referência estão apresentados na figura 12.

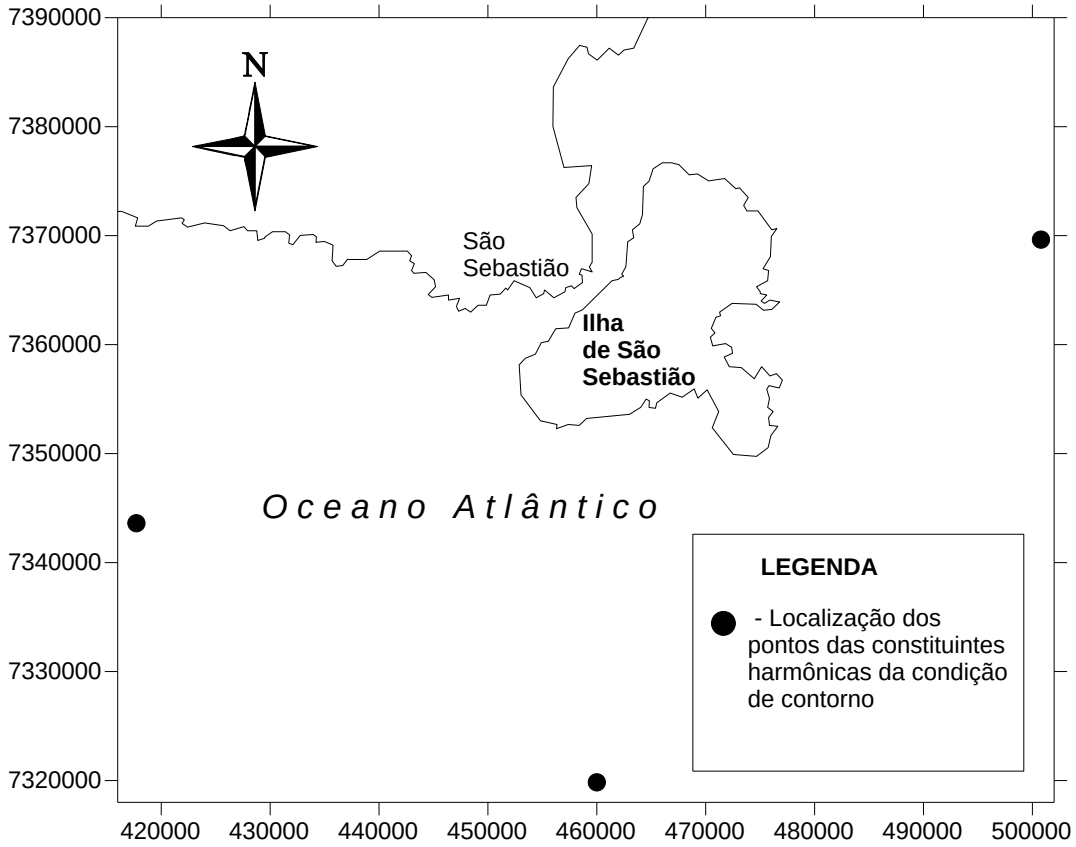


Figura 12. Localização dos pontos de onde foram obtidos os valores das constituintes harmônicas de maré para as condições de contorno.

Para cada um dos pontos deu-se a entrada dos valores de fase e amplitude de cada uma das 8 componentes de maré considerados neste trabalho, ou seja, Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2 e K2.

A partir deste procedimento foram geradas séries temporais de previsão de maré para o período selecionados neste estudo através do módulo de previsão de maré do MIKE 21. Dessa forma foi possível criar uma base para as simulações das variações na maré durante os períodos investigados dentro do processo de calibração do modelo.

6.5 Resistência do Leito

A resistência do leito pode ser definida genericamente como a quantidade de energia consumida em um processo de escoamento relacionada às características físicas, químicas e das características do material em suspensão da camada limite; e com a rugosidade da superfície de fundo. Esta última é função direta da composição granulométrica e da morfologia das feições sedimentares atuais.

No módulo HD do programa MIKE 21, para a descrição da resistência do leito pode-se aplicar o Número de Chezy ou o Coeficiente de Manning , sendo que, a formulação para definir a resistência do leito pode ser:

$$M = \frac{g \cdot u \cdot |u|}{C^2} \quad , \qquad \textbf{...(6)}$$

onde g é a gravidade, u é a velocidade e C é o número de Chezy. A forma de conversão do Coeficiente de Manning para Número de Chezy é a seguinte:

$$C = M \cdot h^{1/6} \quad , \qquad \textbf{...(7)}$$

onde M é o Coeficiente de Manning e h é a profundidade local. As unidades do Número de Chezy e do Coeficiente de Manning são $m^{1/2}/s$ e $m^{1/3}/s$ respectivamente, respeitando o Sistema Internacional (S.I.). No caso deste trabalho optou-se pela utilização do Coeficiente de Manning, pelos melhores resultados obtidos.

6.6 Viscosidade

Analisando as ordens de grandeza das equações da quantidade de movimento, é possível ver quais são as forças que governam os movimentos dos fluidos. As equações mostram que existem três forças atuando sobre um fluxo de água: forças inerciais, viscosas e de gravidade. Os termos viscosos subdividem-se nas tensões no topo e fundo da mancha, exercidas pela atuação dos ventos e movimentos de água; e pelas forças viscosas internas devidas a gradientes horizontais, estes de pequena magnitude (Paladino, 2000).

Numa descrição mais ampla, a viscosidade pode ser imaginada como a "aderência" interna de um fluido, sendo responsável pelas perdas de energia associadas ao transporte de fluidos, tendo um papel primário na geração de turbulência (Potter & Wiggert, 2004).

Conforme DHI (2008), para o módulo hidrodinâmico o coeficiente de viscosidade adotado pode ser especificado de três formas:

- Como valor constante em todo domínio computacional;
- A partir de um arquivo com variação espacial, definindo um valor para cada ponto da grade;
- Em função de uma variação temporal do gradiente local no campo das velocidades.

Esta formulação baseia-se no "Conceito de Smagorinsky", dado por:

$$E = C_S^2 \Delta_x{}^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right], \qquad \textbf{...(8)}$$

Onde U, V são componentes em x e y da velocidade média, Δ_x é o espaçamento da grade e C_s é a constante de Smagorinsky a ser escolhida entre 0,25 e 1,0. Conforme Rudi (1980) e Wang (1990) *apud* DHI (2008), esta aplicação

é combinada com o recurso de Smagorinsky com a seguinte formulação de tensão de corte:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{2}hE\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right] \quad \textbf{...(9)}$$

6.7 Vento

Conforme atestado por vários dos autores citados neste estudo, o sistema de ventos atuantes no Canal de São Sebastião é o mecanismo preponderante no comportamento hidrodinâmico local, condicionando principalmente a circulação interna na forma de correntes. Dessa forma os dados de ventos se tornam fundamentais, no processo de modelamento hidrodinâmico proposto com a utilização do programa MIKE 21.

A região norte do litoral do Estado de São Paulo, como em toda região costeira, tem suas características meteorológicas inerentes a sua posição geográfica e suas características geomorfológicas. No caso específico do Canal de São Sebastião o controle sobre a dinâmica atmosférica é mais intenso, com a Ilha de São Sebastião atuando como um agente condicionante intenso das interações atmosfera – oceano. Por isso é fundamental que os dados de séries temporais de ventos sejam oriundos da porção interna do canal para melhor cumprimento dos objetivos propostos.

Os dados de ventos foram fornecidos pelo LIO (Laboratório de Instrumentação Oceanográfica do Instituto Oceanográfico da USP), tendo sido obtidos pela estação meteorológica instalada na Ilha da Universidade, próxima ao CEBIMAR (Centro de Biologia Marinha da USP) em São Sebastião. Esta estação está localizada na porção central do Canal, junto a face continental, e no topo de um monte com elevação de 28 metros do nível médio relativo do mar nas coordenadas de latitude 23º49.7’S e longitude 45º25.4’W.

O equipamento é da marca Campbell do Brasil com unidade registradora do tipo CR10X. Os sensores instalados possibilitam a aquisição de dados tais como temperatura do ar, umidade, velocidade do vento, direção do vento e pressão atmosférica.

6.8 Análise e Previsão de Maré

A elaboração de uma tábua de previsão de maré através do módulo respectivo do MIKE 21 é necessária para a definição das condições de contorno e nas etapas de calibração e validação do modelo a ser gerado. Este programa tem os recursos para realizar análises de altura e correntes de maré e elaborar cartas de previsão dos mesmos parâmetros. Neste estudo será utilizada somente a opção de previsão de altura de maré.

Os métodos nos quais se baseiam são denominados “Método do Almirantado” e “Método IOS”. No primeiro são levadas em consideração apenas quatro constantes harmônicas: M_2, S_2, O_1 e K_1, admitindo-se entretanto fatores de correção para que se possa levar em conta constituintes geradas por fatores astronômicos ou por efeitos de águas rasas (DHI, 1998).

O método IOS permite que se utilize um pacote de até 69 constituintes padrão, compostas de 45 principais e 24 componentes de águas rasas, sendo que deste total serão selecionadas 8 principais que seriam: Q_1, O_1, P_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2. Os dados disponíveis para elaboração das condições de contorno apresentam essas constantes, sendo que este método será a opção a ser utilizada.

Segundo, DHI (1998) a representação das séries temporais é feita conforme a formulação de desenvolvimento harmônico:

$$x(t) = \sum_{j=1}^{N} f_j(t)\, a_j \cos\left[V_j(t) + u_j(t) - g_j\right] \quad \text{...(10)}$$

Onde a_j e g_j são amplitudes e atraso de fase em Greenwich, $f_j(t)$ é a amplitude de modulação nodal, $u_j(t)$ é o fator de correção de fase e $V_j(t)$ é o argumento astronômico da constituinte j.

O argumento astronômico $V_j(t)$ é calculado como:

$$V_j(t) = V_j(t_0) + (t - t_0)\,\omega_j \,, \qquad \text{... (11)}$$

Onde t_0 é o tempo de referência da origem.

6.9 Análise comparativa de derrames de óleo reais e simulados

Inicialmente o procedimento de modelagem foi definido com base em séries temporais de marés, correntes e meteorológicos, correspondentes ao período de outubro de 2003, que se compõe de séries completas de medidas. Com relação às condições de contorno, os dados sobre marés foram gerados através do modelo de previsão do Mike 21, com base nos valores das constantes harmônicas de três pontos situados nas bordas da área de estudo. Esses dados medidos permitem que se faça uma calibração precisa do modelo para o Canal de São Sebastião, considerando os ajustes nos parâmetros como coeficiente de Manning, Smagorinsky e coeficiente de atrito do vento sobre a superfície da água.

Analisando-se o comportamento hidrodinâmico do Canal de São Sebastião é possível estabelecer comparativamente o comportamento do espalhamento de manchas de óleo em superfície, considerando dados pré-existentes que mostram esse comportamento. Para isso foi realizado um levantamento dos acidentes ocorridos na área, em que a mancha tivesse apresentado comportamentos distintos, de forma a abranger diferentes cenários onde se pudesse criar um banco de informações que fosse representativo das diversas extensões do impacto no plano espacial.

Essa seleção baseou-se no relatório sobre a dinâmica dos vazamentos de óleo no Canal de São Sebastião entre 1974 e 1994, realizado pela CETESB (1996). Procurou-se focar a atenção sobre eventos que apresentassem condições atmosféricas diferentes e conseqüentemente comportamentos diferenciados.

A possibilidade de se comparar os resultados da modelação numérica, com os croquis descritivos desses eventos, conforme realizado pela CETESB (1996), permite uma avaliação geral do modelo de comportamento em relação a uma verdade de campo. Os períodos selecionados correspondem aos seguintes casos de vazamentos no Canal de São Sebastião, referindo-se à operação conforme denominação da Cetesb e apresentados na tabela 3.

1) OPERAÇÃO MARINA: 18/03/1985
2) OPERAÇÃO HOEGH HILL: 28/09/1986
3) OPERAÇÃO TEBAR 3: 02/05/1988
4) OPERAÇÃO CAIRU: 08/08/1990
5) OPERAÇÃO PENÉLOPE: 13/08/1991
6) OPERAÇÃO KATINA: 13/08/1991
7) OPERAÇÃO TEBAR 5: 15/05/1994

Tabela 3. Acidentes com vazamentos de óleo utilizados na comparação com os resultados do modelamento.

Foram considerados também, como forma de validação do modelo, situações geradas representativas de eventos de caráter natural, tais como padrões hidrodinâmicos descritos na literatura e evidências de observações visuais de feições geomórficas, indicativas da dinâmica sedimentar. Essas informações foram então avaliadas e comparadas, em sua coerência com resultados do modelo.

6.10 Sensoriamento Remoto por Imagem de Satélite

O processamento digital de imagens de satélite tem sido aplicado de forma efetiva em diversas áreas de pesquisa e aplicações, em diversas escalas espaciais e com diferentes objetivos, pois, embora possa haver questionamento quanto à precisão em alguns casos, a quantidade de informações que podem ser geradas e a abrangência espacial torna esta ferramenta especialmente hábil na geração de dados.

As amplas possibilidades de caracterização de parâmetros bióticos e abióticos, principalmente em regiões costeiras, contrastam com a aplicação de outros métodos quantitativos de amostragem *in situ*, que são limitados por medidas pontuais com distribuição espaço-temporal às vezes inadequadas, restringindo o entendimento sinótico dos fenômenos mapeados INPE (1980).

Uma imagem de satélite geralmente é representada através de uma matriz bidimensional de 256 níveis de cinza (NC) de uma imagem raster onde o valor de cada pixel representa a quantidade de energia eletromagnética refletida e/ou transmitida pela superfície em um determinado intervalo de comprimento de onda (banda espectral do sensor) (Conti, 1998). Segundo Bonetti Filho (1995), nesta relação entre a intensidade da resposta e comprimento de onda, estão contidas as características físico-químicas intrínsecas de um determinado alvo.

A imagem digital em questão foi obtida através do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite LANDSAT 5, para identificação da extensão do alcance da mancha de óleo oriunda do vazamento de 2.700m^3 de petróleo do tipo Sergipano terra, a partir do oleoduto da PETROBRÁS nas proximidades da Costa do Navio/ Praia Brava, no km 139 da rodovia Prestes Maia. O vazamento ocorreu no dia 15/05/1994 por volta das 13:00H, sendo que a imagem foi adquirida pelo satélite em 17/05/1994 às 18:05:57, portanto 2 dias e 5 horas aproximadamente após o acidente. O tratamento da imagem foi realizado utilizando-se o programa de geoprocessamento Er Mapper.

A aplicação de processamento digital de imagem neste trabalho visa demonstrar o comportamento do espalhamento de uma mancha de óleo em sistema marinho, através do registro de um momento específico após o derrame, e analisar conjuntamente com resultados obtidos nas simulações para melhor elucidação do comportamento desse processo de impacto ambiental

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Introdução

Os resultados obtidos neste trabalho consistem de dois grupos distintos, um primeiro grupo obtido a partir do tratamento de dados das séries temporais medidas, que auxiliaram na composição dos modelos, e os índices de seus coeficientes de correlação com as séries geradas pelo resultado das simulações, que representam, de forma geral, a fase de calibração do modelo.

Um segundo grupo corresponde ao conjunto de resultados efetivamente obtidos com as simulações geradas pelo módulo HD do software MIKE 21, depois do modelo calibrado e validado. Os resultados permitiram prever o comportamento do espalhamento de óleo no Canal de São Sebastião em situações hidrodinâmicas distintas. Esta previsão está inicialmente baseada na comparação entre resultados descritos na literatura que demonstraram, através da aplicação de outros métodos ou modelos numéricos, ou de comparação com evidência geomorfológicas, a validade dos resultados obtidos neste trabalho.

Posteriormente foram elaborados mapas comparando-se resultados do modelo com descrições de alguns vazamentos históricos selecionados, de forma a melhor visualização o deslocamento da mancha e as condições hidráulicas atuantes. Foram também realizadas simulações em condições oceanográficas e meteorológicas distintas visando ampliar o conhecimento das possibilidades de impacto na área de estudo em diversos cenários.

7.2 Calibração do Modelo

Na calibração do modelo foram utilizados dados de maré medida e dados de marés previstas, além de dados de correntes. Os dados de correntes apresentaram grandes limitações, com períodos com dados anômalos considerados incoerentes, e dessa forma poucos períodos tiveram qualidade e estas informações são bastante reduzidas.

Os dados de maré medida tiveram boa correlação nos períodos em que não houve marés meteorológicas, porém apresentaram elevado índice de correlação estatística quando comparados com os dados de previsão de maré gerados pela DHN.

Os parâmetros variáveis do modelo, utilizados na calibração, foram a resistência do leito, pelo coeficiente de Manning, a viscosidade obtida pela fórmula de Smagorinsky e o coeficiente de atrito do vento em relação à superfície da água.

Foram realizadas diversas simulações onde esses parâmetros foram sendo testados e avaliados, sendo, dos resultados obtidos, extraídas séries temporais simuladas de alturas de maré, com as quais foram realizadas análises estatísticas de correlação. O valor do coeficiente de Manning adotado foi o de $40m^{1/3}/s$. O parâmetro viscosidade teve como opção a utilização da fórmula de Smagorinsky definida neste estudo com o valor de 0,5.

A calibração do modelo baseada na sensibilidade ao coeficiente de atrito do vento permitiu alcançar maior concordância com as correntes superficiais. Desta forma os valores do coeficiente de atrito foram considerados de 0,00125 para ventos até 5 m/s e de 0,00445 para ventos acima de 25 m/s.

Os resultados obtidos estão apresentados nos itens subseqüentes, onde foram apresentados os gráficos e as análises estatísticas resultantes da etapa de calibração do modelo.

7.3 Validação do Modelo

A validação dos resultados obtidos pelas simulações teve dois métodos aplicados:

- Um tradicional, de origem matemática, onde foram comparadas séries temporais de alturas de marés e direção de correntes gerados pelo modelamento com séries reais medidas no Canal de São Sebastião.

- A outra forma utilizada neste processo foi o de comparação com dados obtidos de outros estudos de modelamento, em estudos de dinâmica sedimentar e registros visuais de campo de feições geomórficas na costa, que poderiam ter suas condições de formação repetidas pela simulação. Os resultados das análises estatísticas de dados de marés estão apresentados nos itens 7.5 e 7.7, onde se analisa e discute esses resultados, inclusive quanto à validação do modelo.

Segundo Furtado (1978) e Furtado *et al.*; (1987), na desembocadura norte do canal ocorre um giro nas correntes provenientes de sul para o sentido da linha de costa. Este padrão pode ser observado tanto por análise da distribuição de parâmetros estatísticos granulométricos e suas respectivas interpretações da dinâmica sedimentar, como por elementos traçadores e por derivadores lançados ao longo do canal. A figura 13 mostra o comportamento destes derivadores na boca norte.

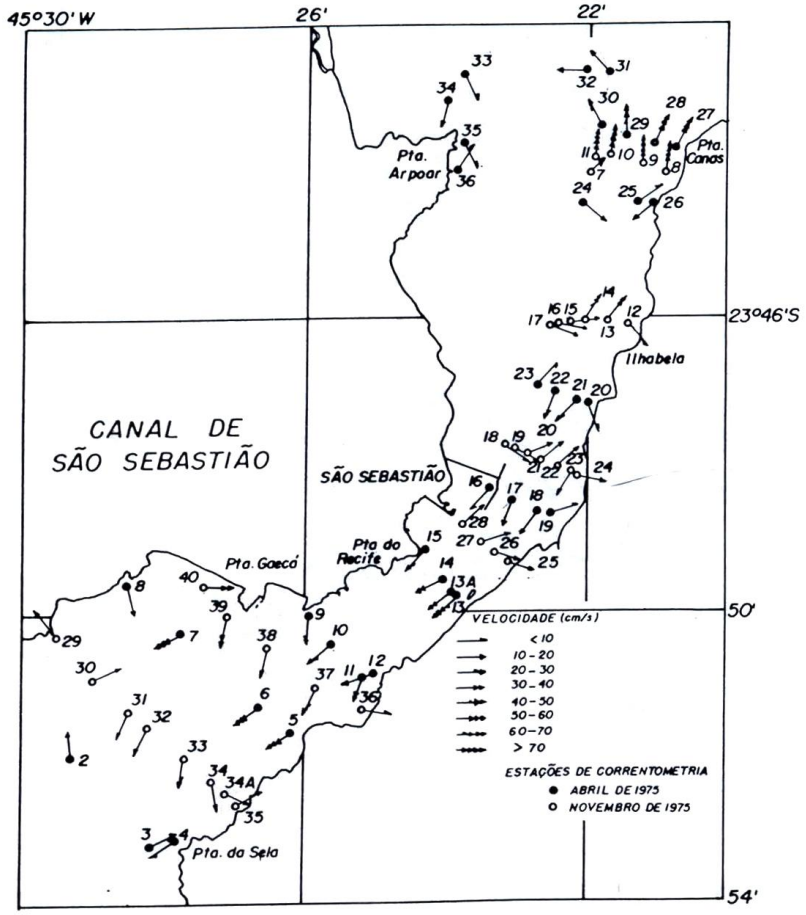


Figura 13. Rumos e intensidade de correntes no canal de São Sebastião (Furtado *et al.*, 1986)

Este comportamento descrito é corroborado pelas simulações no Canal de São Sebastião obtidas por Castro (1990), onde o mesmo comportamento foi simulado pelo modelo aplicado.

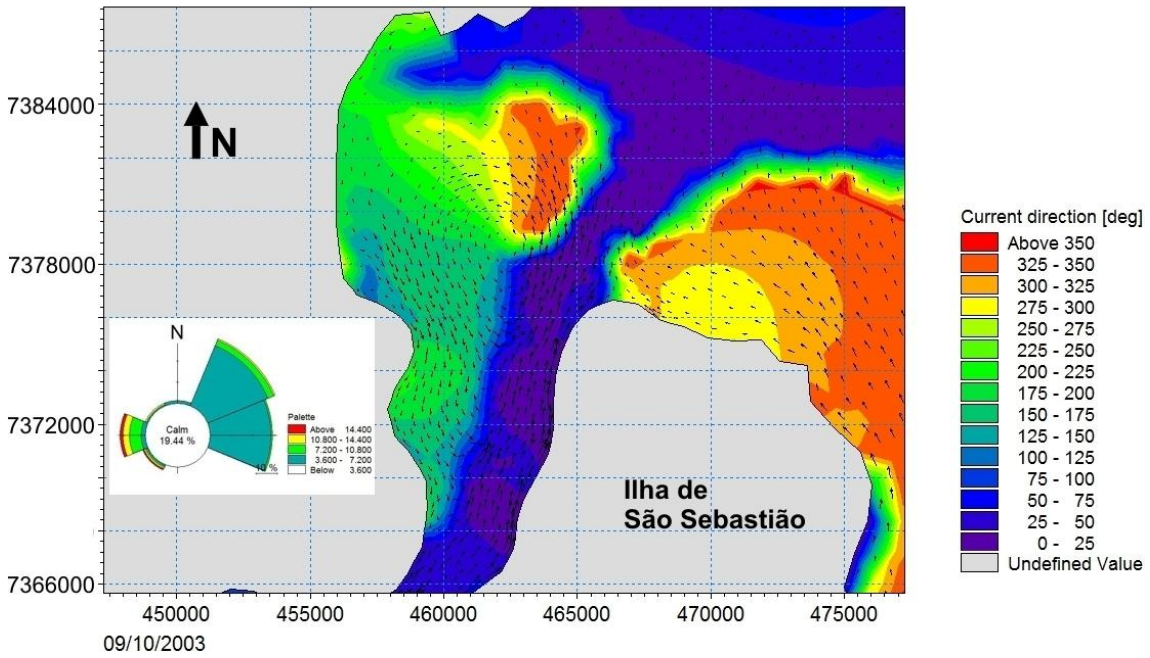


Figura 14. Giro na direção das correntes na Enseada de Caraguatatuba, retornando ao interior do Canal.

A simulação mostrando este padrão de comportamento também corrobora a teoria de que o material lamoso presente na região adjacente à desembocadura norte do canal, onde ocorre um sub-ambiente tipo planície de maré (Souza, 1990), teria como origem a única fonte disponível, a foz do rio Juqueriquerê, o que seria explicado por este comportamento das correntes naquela área conforme apresentado na figura 14.

Outro fato que evidencia a validade do modelo gerado está na corrente de deriva defletindo para o interior da planície de maré, trazendo sedimentos arenosos que compõem as feições de barras arenosas junto à costa, conforme a foto registrada na figura 15, que associa esta condição às condições hidrossedimentológicas geradas pelo modelo.

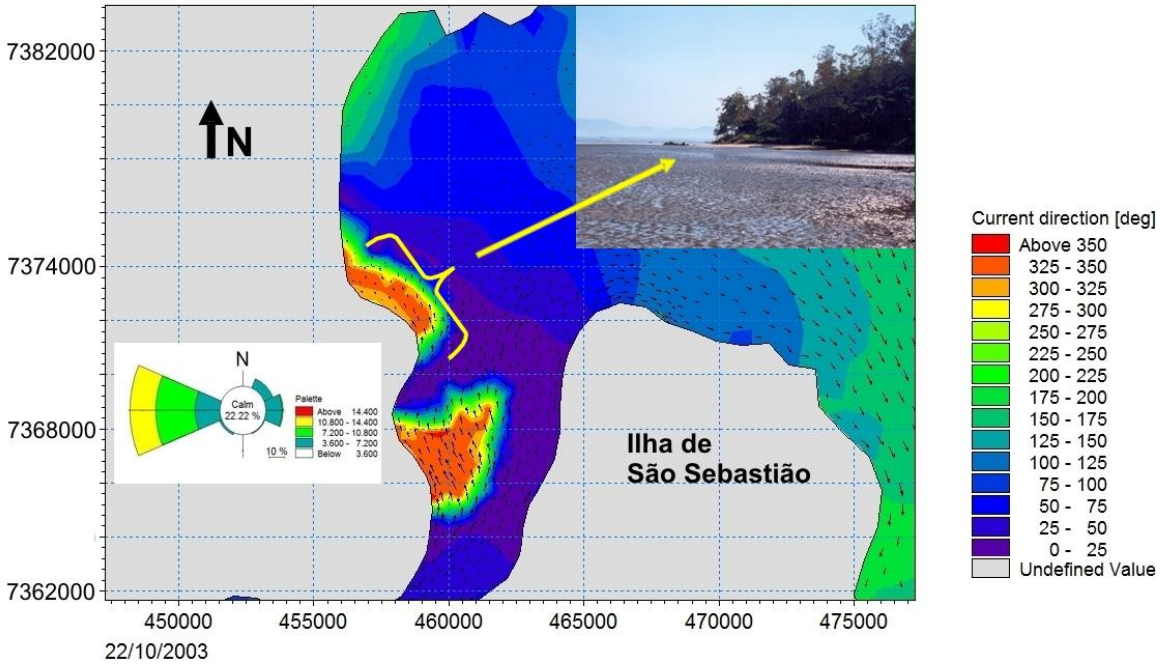


Figura 15. Modelo mostrando correntes de deriva junto à costa continental norte do Canal de São Sebastião defletindo para a enseada.

7.4 Análise dos dados de Ventos

Foram obtidas séries temporais de dados de ventos cobrindo o ano de 2003, a partir da estação meteorológica localizada nas proximidades do CEBIMAR (Centro de Biologia Marinha da Universidade de São Paulo) conforme descrito no item sobre metodologia. Esses dados foram avaliados e consolidados de forma a separar informações completas e de maior seqüência possível, em período coerente com dados completos dos outros parâmetros necessários.

Estes dados foram convertidos para os formatos requeridos pelo programa MIKE 21 e através deles foram geradas rosas dos ventos indicando as orientações preferenciais e velocidades respectivas no período de outubro de 2003, conforme apresentado na figura 16.

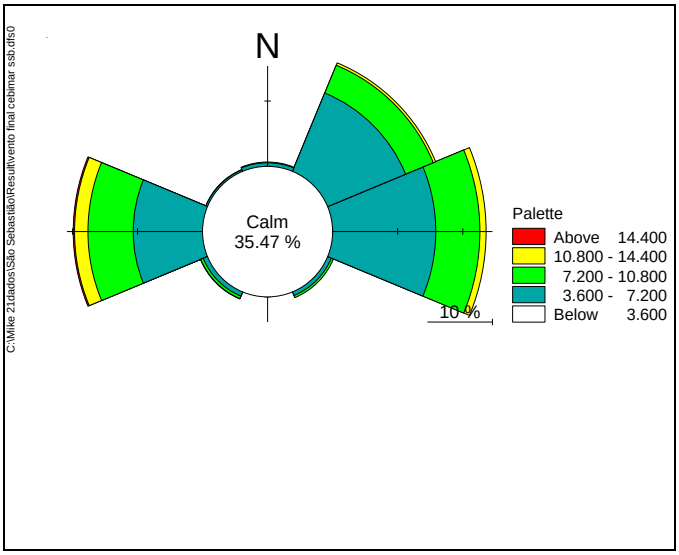


Figura 16. Rosa dos ventos para o período de outubro de 2003, no Canal de São Sebastião mostrando orientação preferencial W/SW e E/NE.

Esses dados foram analisados e comparados com dados climáticos de forma a correlacioná-los com entradas de frentes frias, quando o sistema de ventos muda de orientação e dessa forma, sendo o principal agente condicionante das correntes superficiais, correlacionar com os resultados do modelo hidrodinâmico, quanto à orientação preferencial das correntes e conseqüentemente do espalhamento de uma mancha de óleo em um derrame.

Dados obtidos junto ao CPTEC (INPE) mostram a passagem dos sistemas frontais no período simulado. Para o mês de outubro, no dia seis o primeiro sistema frontal atuou no litoral da região Sudeste, se desviando para o Oceano no dia nove, quando da entrada da segunda frente nesta mesma região. O terceiro e quarto sistema frontal do mês atingiram a região entre Santos e Ubatuba entre os dias dezenove e vinte, associados a uma ciclogênese que se encontrava no oceano, e no dia 22, a um sistema de baixa pressão em superfície. No dia 26 de outubro um vórtice ciclônico manteve uma frente fria semi-estacionária entre o litoral de São Paulo e o Rio de Janeiro (figura 17).

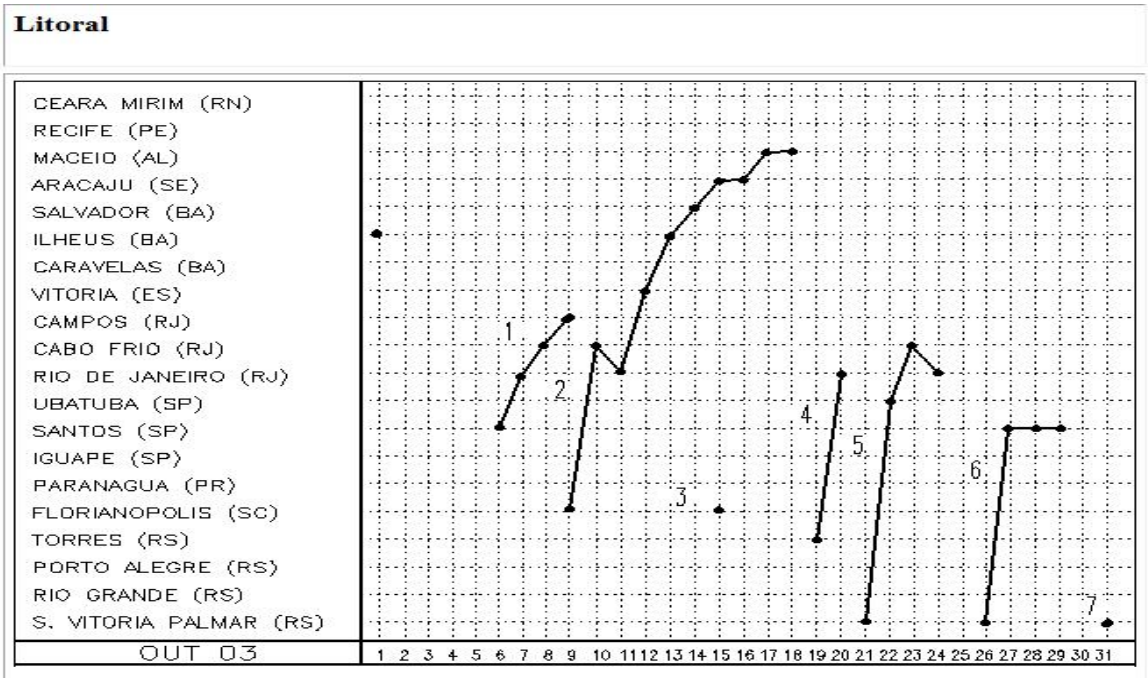


Figura 17. Posição dos sistemas frontais ao longo da costa brasileira e as datas da passagem pelo litoral brasileiro (Fonte Infoclima 2003. CPTEC – INPE).

De uma forma mais detalhada, estas análises permitem inferir sobre as relações entre a passagem de sistemas frontais e suas influências diretas no comportamento hidrodinâmico e atmosférico dentro do Canal de São Sebastião. As maiores velocidades de vento mostram sentidos coerentes com a orientação preferencial do canal (figura 18), mostrando um comportamento fortemente condicionado pelas características morfológicas do relevo do canal e de sua área

emersa, que é delimitada pelas altitudes da ilha e pela Serra do Juqueriquerê no continente.

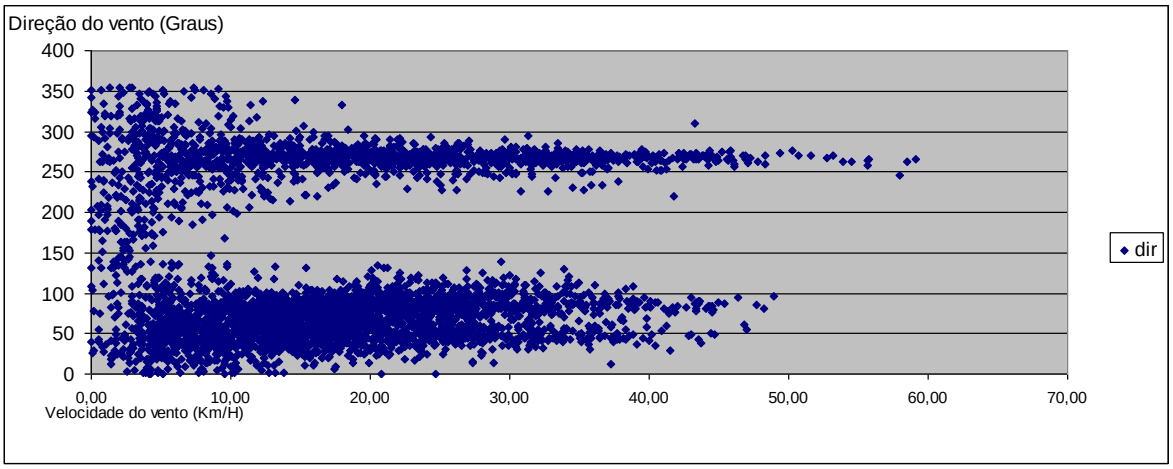


Figura 18. Gráfico de correlação entre direção e velocidade de ventos no mês de outubro de 2003.

Os períodos onde se registram as maiores velocidades de vento estão compreendidos entre os dias 9 e 10 de outubro e o dia 26 e 27 do mesmo mês, períodos estes que são correspondentes à passagem de sistemas frontais no litoral norte de São Paulo (Tabela 6).

DATA	VELOCIDADE (Km/h)	DIREÇÃO (Graus)
26/10/2003	59,14	39
26/10/2003	58,52	33
9/10/2003	58,00	43
10/10/2003	55,75	36
9/10/2003	55,69	64
10/10/2003	55,65	39
27/10/2003	54,53	44
9/10/2003	53,85	75
10/10/2003	53,21	159
26/10/2003	52,71	87
27/10/2003	51,56	231
27/10/2003	50,69	33
27/10/2003	50,26	163

Tabela 4. Maiores velocidades de vento e suas respectivas datas.

Como o regime de ventos é preponderante na geração e condução das correntes determinando seu comportamento ao longo do sistema, e com as respostas obtidas com os levantamentos de dados meteorológicos, pode-se afirmar que ao induzir os ventos a se orientar preferencialmente no sentido de sua conformação, o relevo já obriga os processos a seguirem direções restritas, facilitando o entendimento das correntes superficiais, que são responsáveis diretas pelas formas que uma mancha de óleo proveniente de um vazamento se comporta.

7.5 Análise dos dados de Maré

Os dados de marés utilizados neste trabalho são representados por três séries temporais de dados, uma gerada por simulação a partir de constantes harmônicas de pontos localizados nos eixos dos limites da área, e utilizados como

condição de contorno do modelo. Três pontos foram selecionados, a partir do qual o software interpolou valores para cada uma das bordas de contorno. As localizações desses pontos e das respectivas bordas estão representadas na figura 12 no item 6.4. Os valores das constantes harmônicas desses pontos estão representados na tabela 5.

Hora Greenwitch

Longitude	Latitude	UTM x	UTM y
-45,7671	-24,1443	422035,9353	7329537,86
-45,1962	-24,0184	480018,6914	7343679,99
-44,9589	-23,5852	504169,626	7391653,95

Q1		
Borda	Amplitude	Fase
W	2,56	98,95
S	2,52	99,74
L	2,52	100,65

O1		
Borda	Amplitude	Fase
W	10,4	120,7
S	10,19	121,68
L	10,15	122,83

P1		
Borda	Amplitude	Fase
W	2,41	177,26
S	2,36	178,24
L	2,34	179,42

K1		
Borda	Amplitude	Fase
W	6,77	184,34
S	6,62	185,21
L	6,56	186,23

N2		
Borda	Amplitude	Fase
W	4,94	204,57
S	4,58	200,22
L	4,65	197,33

M2		
Borda	Amplitude	Fase
W	33,34	173,79
S	30,5	172,26
L	31,28	172,46

S2		
Borda	Amplitude	Fase
W	18,98	174,03
S	17,14	173,99
L	17,1	175,43

K2		
Borda	Amplitude	Fase
W	5,48	178,47
S	4,94	178,22
L	4,98	178,99

Tabela 5. Constantes Harmônicas de marés da borda da área de estudo.

Os gráficos a seguir representam as variações nas alturas das condições de contorno, nas bordas sul, leste e oeste, geradas a partir das constituintes harmônicas apresentadas na tabela 5.

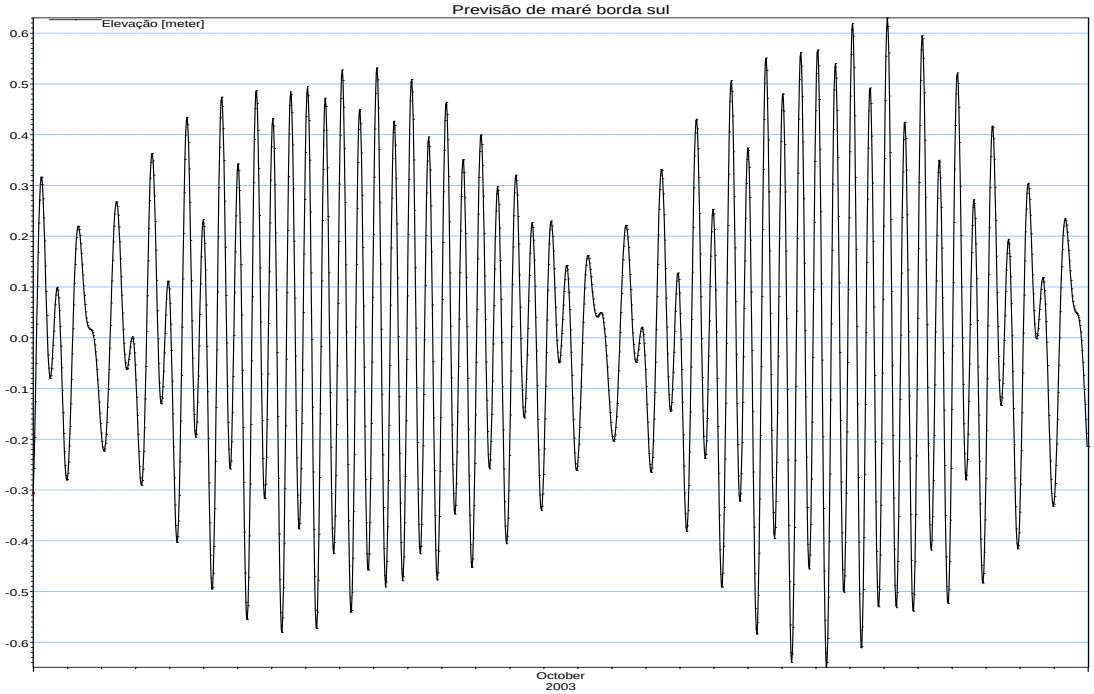


Figura 19. Curvas de altura das marés previstas pelo modelo a partir das constituintes harmônicas para a borda sul do contorno da área, no período de outubro de 2003. Elevação em metros (eixo y).

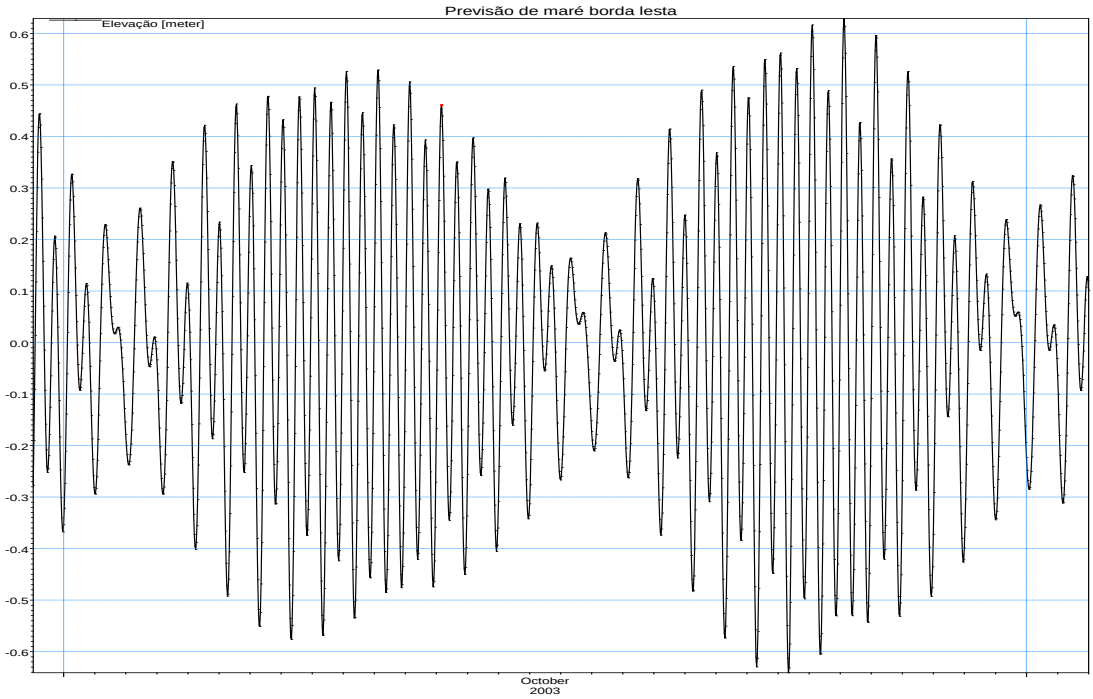


Figura 20. Curvas de altura das marés previstas pelo modelo a partir das constituintes harmônicas para a borda leste do contorno da área, no período de outubro de 2003. Elevação em metros (eixo y).

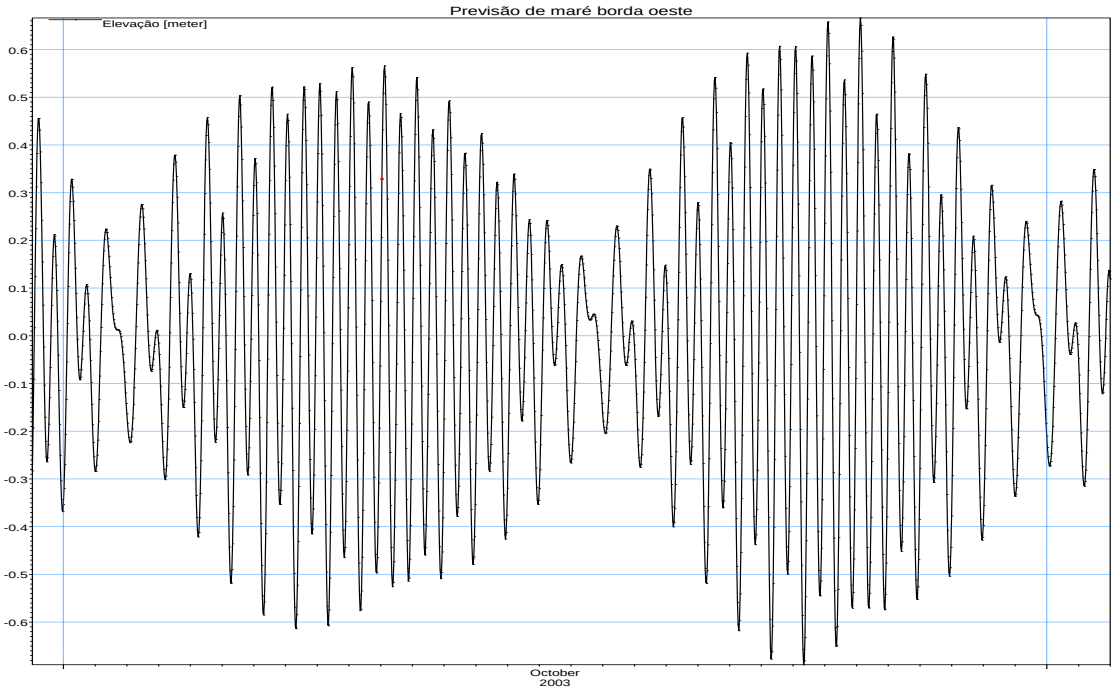


Figura 21. Curvas de altura das marés previstas pelo modelo a partir das constituintes harmônicas para a borda Oeste do contorno da área, no período de outubro de 2003. Elevação em metros (eixo y).

Os picos das marés de sizígia correspondente à série temporal estudada, determinados pela tábua das marés, Ubatuba, Santos e Cananéia (Harari & Mesquita, 2001) ocorreram nos dias 10 e 25 de outubro, quanto às marés de quadratura os picos ocorrem nos dias 02 e 18.

Uma outra série simultânea foi utilizada a partir de dados medidos através de um registrador de nível de água (*Water lever Recorder Model 7*) da marca Aanderaa, fundeado área adjacente à praia em frente ao CEBIMAR –USP (aproximadamente UTM 456939 E, 7664657 S).

Esta série de dados foi analisada e consolidada, levando em consideração as aproximações necessárias para adequar os dados de forma a se tornarem passíveis de comparações com outras séries, para aplicação de métodos estatísticos de correlação entre eles. Dos valores brutos obtidos foram então subtraídos a média geral, de forma a reduzir seu valor médio a zero, passando a apresentar valores positivos e negativos em concordância com os dados de

previsão gerados pelo Software MIKE 21, a partir das constantes harmônicas e pelas tábuas de marés do Porto de São Sebastião, gerado pela DHN.

Os dados obtidos representam a altura real na região do canal onde, durante o período amostrado, ocorreram passagens de cinco sistemas frontais com forte ocorrência de marés meteorológicas. Esse fenômeno foi responsável pela potencialização nas variações do nível do mar associados às marés. Os resultados mostraram valores acima dos valores registrados nos modelos de previsão, dificultando o processo de calibração e validação do modelo hidrodinâmico gerado.

Uma análise de correlação entre os dados simulados e medidos, onde se considerou a média diária dos valores, mostrou correlação positiva nos dias distantes das condições climáticas mais adversas. Este procedimento, descrito na tabela 6, revelou os indicativos de que os índices de correlação entre as séries medida e simulada do período existiam, porém somente em condições de baixa intensidade energética, o que levou à utilização do banco de dados de altura da maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação para calibração e validação do modelo. Essa análise estatística baseou-se no método de correlação simples de Pearson, através do programa STATISTICA 7®.

Dia	correlação (medida x modelo)		Dia	correlação (medida x modelo)
1	**0,51399**		16	0,206368
2	**0,68092**		17	**0,523599**
3	**0,80486**		18	0,276514
4	**0,85644**		19	0,275552
5	**0,89606**		20	0,106116
6	**0,94176**		21	0,069125
7	**0,94616**		22	0,029173
8	**0,804842**		23	0,074305
9	0,155873		24	0,079071
10	0,039806		25	0,007103
11	-0,084332		26	-0,046766
12	-0,003377		27	-0,127080
13	-0,155209		28	-0,078453
14	-0,045282		29	**0,351685**
15	-0,034323		30	**0,423190**
			31	**0,495794**

Tabela 6. Índice de correlação entre os valores de altura da maré medida no CEBIMAR e simulada pelo software MIKE 21.

Alguns dados mostram correlações negativas, mostrando uma grande divergência entre os valores medidos / simulados, porém em alguns dias as correlações são bastante significativas, indicando que os dados simulados tem correlação quando as condições meteorológicas não são predominantes nas resultantes das alturas de maré.

Através do módulo MIKE Zero, esses dados foram interpolados para homogeneizar os passos dos períodos amostrados, de forma a permitir o programa plotar os valores compostos em curvas. Este procedimento foi realizado nos dados das três fontes disponíveis.

As passagens dos sistemas frontais, a partir dos dias 06, 09, 19, 22 e 26 de outubro, mostram boa correlação com as diferenças entre os valores atingidos pela altura das marés, conforme se observa no gráfico presente na figura 22, mostrando coerência com as diferenças condicionadas pelas marés meteorológicas.

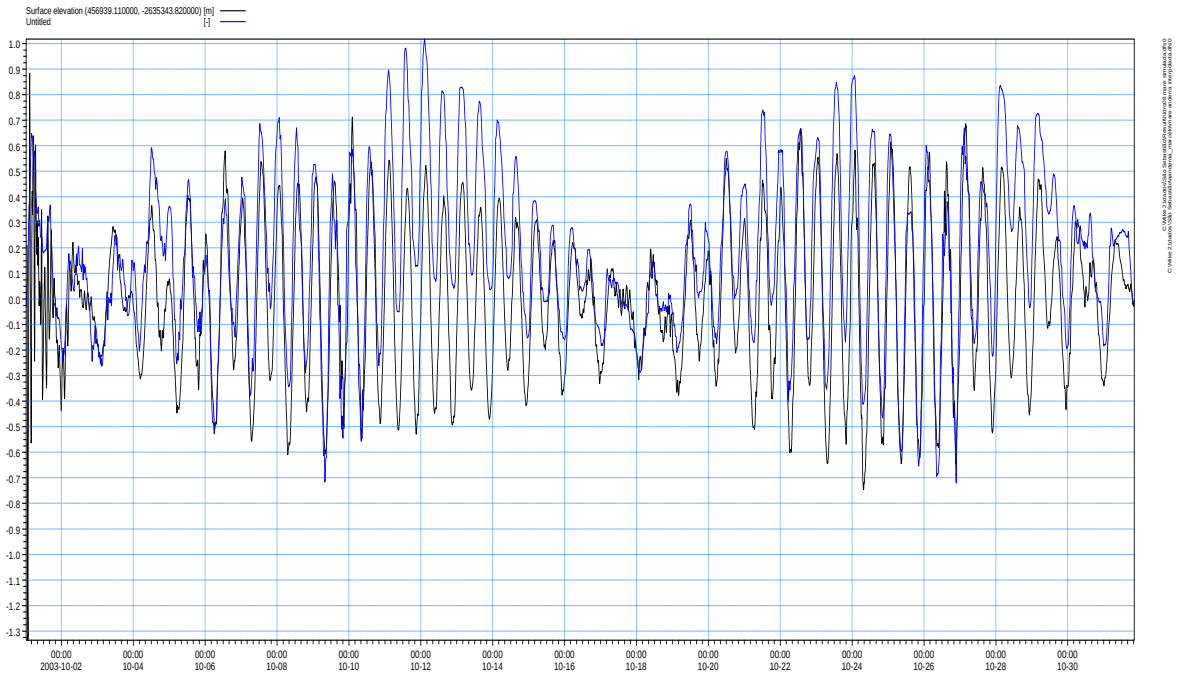


Figura 22: Comparação entre as curvas das séries gerada pelo modelo e medida. onde as linhas em preto representam os valores simulados e as linhas azuis os valores medidos. Elevação em metros (eixo y).

As variações identificadas para o interior do canal de São Sebastião mostram que os fatores determinantes no comportamento hidráulico da área são fortemente influenciados pelo vento, conforme já descrito em Emilsson (1962), Castro (1985) e Castro (1990), que afirma que a forçante principal no canal é o campo de ventos.

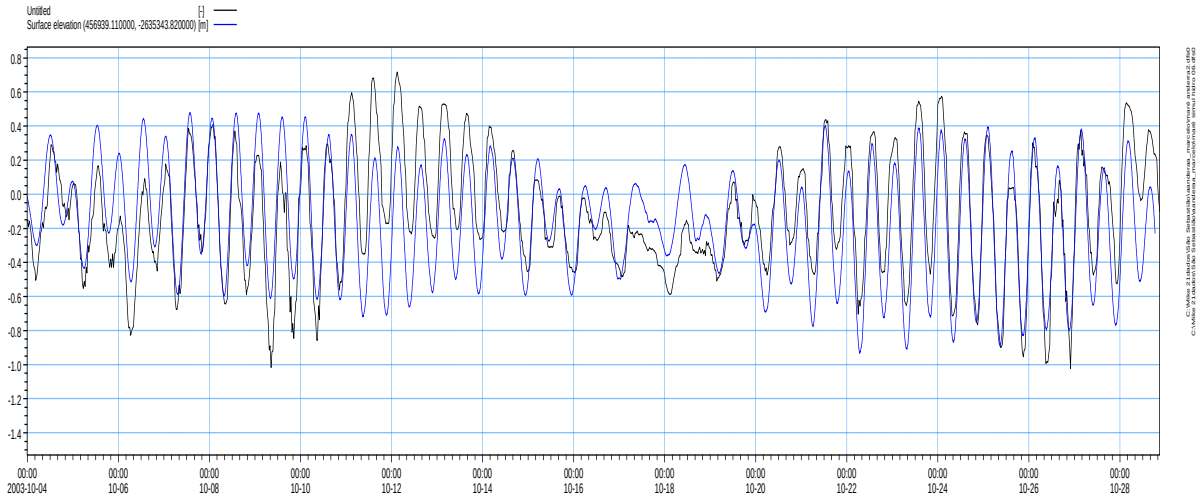


Figura 23. Composição com os dados de maré simulada e da DHN, onde as linhas em azul representam os valores simulados e as linhas pretas os valores medidos. Elevação em metros (eixo y).

Os dados apresentaram coeficiente de correlação de Pearson de 0,74 que em termos de significância estatística tem grau alto, indicando que a calibração do modelo é coerente com as condições que o modelo pretende simular e reproduzir.

Estes dados foram também avaliados estatisticamente para validação do modelo através da comparação entre os dados modelados com os amostrados, utilizando o método proposto por Willmott (1981) conforme descrito por Oliveira (2009), e que se baseia no cálculo da quantidade adimensional ou índice, denominado de Skill e apresentado na formulação abaixo.

$$\mathrm{SKILL} = 1 - \frac{\sum \left| X_{mod} - X_{obs} \right|^2}{\sum \left(\left| X_{mod} - < X_{obs} > \right| + \left| X_{obs} - < X_{obs} > \right| \right)^2} \qquad \textbf{...(12)}$$

Este índice varia entre 0 e 1, e quanto maior a correlação do modelo com os dados medidos, este índice tenderá a 1, sendo no caso contrário tendendo para zero. Na análise dos dados de alturas de maré este valor foi de 0,84, apresentando alta correlação.

7.6 Derrames Significativos abordados

Os derrames a serem comparados com os cenários gerados nos modelos foram selecionados com base em critérios como rumo do deslocamento da mancha, regime de ventos e volume de óleo derramado.

Neste trabalho são descritos os tipos de acidentes e as características físico-químicas do óleo derramado. Serão apresentados também adaptações dos croquis do relatório CETESB (1996), com o comportamento inicial da mancha, para cada um dos respectivos derramamentos.

As descrições servirão como base de informações de caráter atmosférico, dos locais atingidos, do tipo de óleo, ou seja, das características gerais que compões o quadro em que se inserem os acidentes.

Os croquis servirão como base de comparação entre as descrições entre o deslocamento das manchas de óleo com os resultados obtidos nas simulações, atuando como a representação gráfica espacial do processo de espalhamento.

Esses derrames representam cenários de padrões meteorológicos distintos e, segundo as descrições contidas nos respectivos croquis presentes em CETESB (1996), a mancha de óleo se comporta com espalhamento em diferentes sentidos ao longo do canal, o que torna interessante do ponto de vista da validação para sua aplicação em derrames de óleo.

Além disso, a imagem de satélite processada neste trabalho, concomitante ao acidente TEBAR V, serve como uma ótima referência para confirmar as descrições presentes no relatório técnico da CETESB, que retrata este acidente.

Para complementar, as condições do tempo nos períodos concomitantes a esses acidentes foram obtidas e analisadas a partir de séries de dados temporais de ventos, baseadas em dados do BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Marinha do Brasil).

Esses dados foram processados de forma a se melhor visualizar as velocidades e direções predominantes no período de duração de cada acidente e estão apresentadas em gráficos no formato de rosas dos ventos. Os eventos selecionados a serem descritos são:

OPERAÇÃO N/T MARINA

Data: 18/03/1985 – 15:45H

Local: Terminal da Petrobrás de São Sebastião.

Causa: Colisão Dolfim de atracação

Tipo de óleo: Maya pesado

Volume vazado: 2.500 m^3

Deslocamento: Para setores ilha e continente norte até Ubatuba (Figura 24).

Áreas afetadas: Praias, costões e estruturas

Praias atingidas: Ilhabela: Sino, Siriuba, Pinto, Ponta Azeda e Armação; Caraguatatuba: Pan-Brasil, Frecheiras, Palmeiras, Massaguaçu, Indaiá, Porto Novo e Martin de Sá; Ubatuba: Lagoa, Maranduba, Lagoinha, Grande, Toninhas, Enseada, Tenório, Itaguá e Prumirim, Ilhas Anchieta e do Mar Virado; São Sebastião: Pontal da Cruz, São Francisco, Olaria e Arrastão.

Ventos: No registro anterior ao vazamento estavam fortes, de sul, que também predominaram sobre os demais ventos, com bastante alternância entre os quadrantes. Quanto à intensidade os fracos foram os mais freqüentes (Ministério da Marinha, 1985. registros Meteorológicos da DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. Rio de Janeiro, RJ, *apud* CETESB, 1996) (Figura 25).

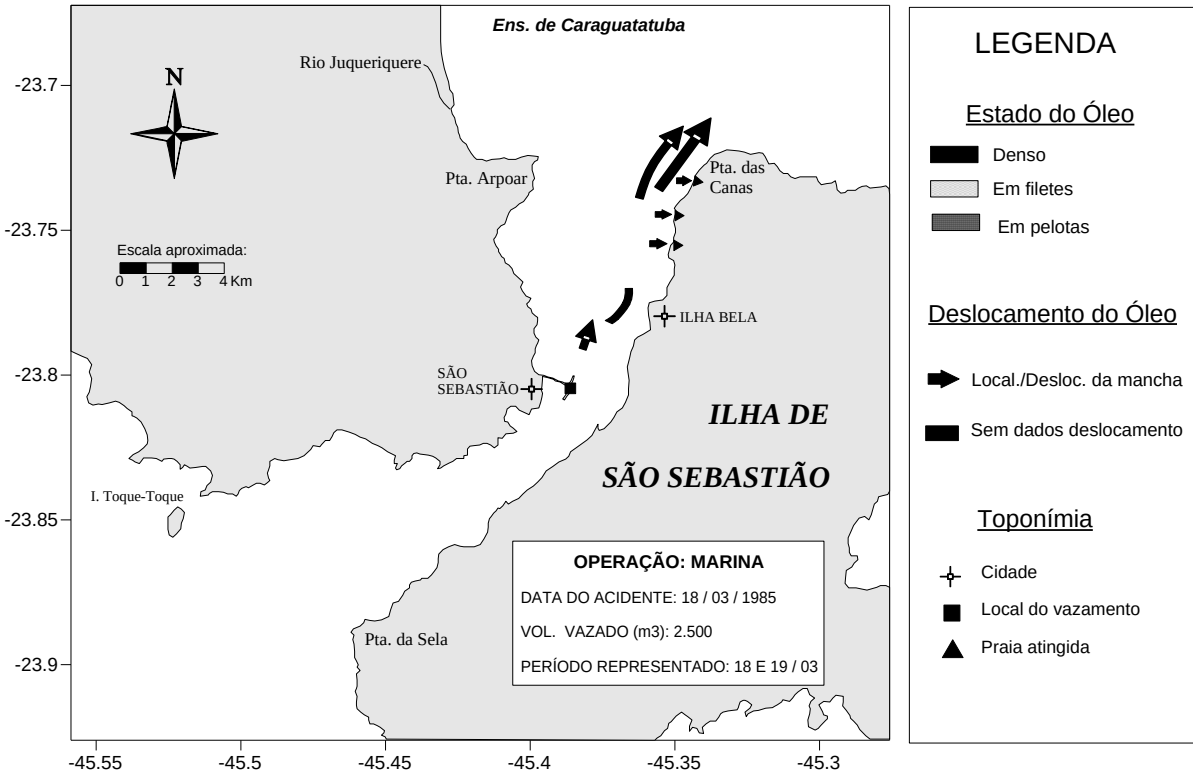


Figura 24. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO MARINA (1985). Adaptado de CETESB (1996).

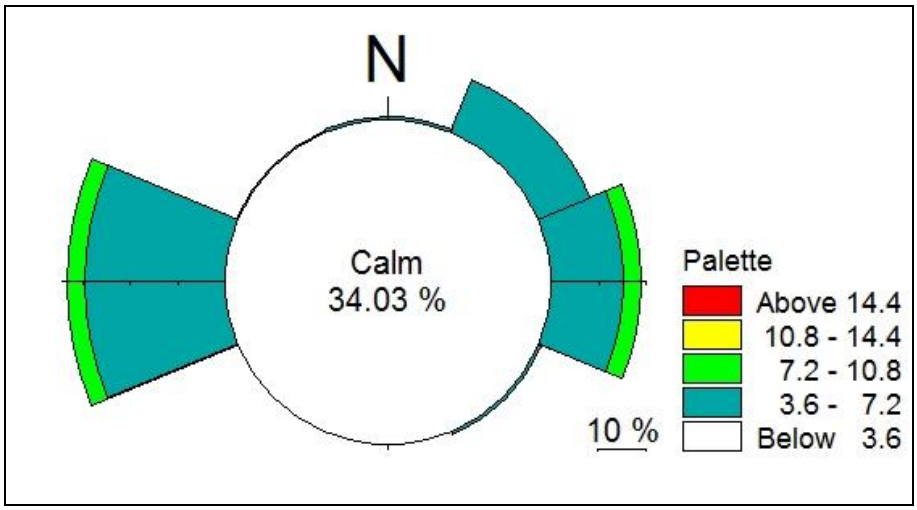


Figura 25. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade dos ventos (m/s) durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Marina. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

OPERAÇÃO N/T HOEGH HILL

Data: 28/09/1986 – 08:45H

Local: Terminal da Petrobrás de São Sebastião.

Causa: Transbordamento do tanque do navio

Tipo de óleo: Árabe pesado

Volume vazado: 50 m^3

Deslocamento: Para setor continente centro (Figura 26).

Áreas afetadas: Praias e costões.

Praias atingidas: São Sebastião: Preta, Cabelo Gordo (CEBIMAR), Madalena e Ponta do Araçá.

Ventos: Durante a manhã do primeiro dia, houve maior freqüência dos ventos de noroeste, variando de nordeste à oeste no segundo dia, para depois predominarem de sul. Os moderados foram dominantes, havendo um registro de norte-noroeste a 14,5 m/s (força de tempestade) (Figura 27).

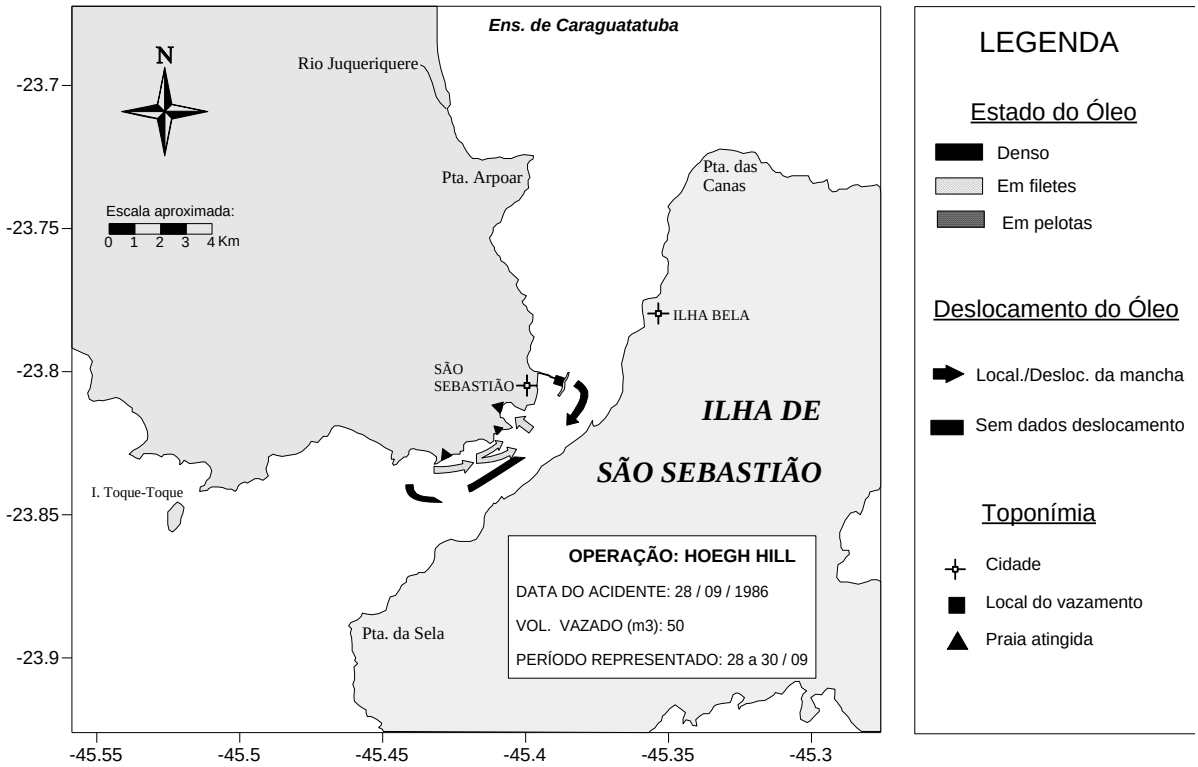


Figura 26. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO HOEGH HILL. Adaptado de CETESB (1996).

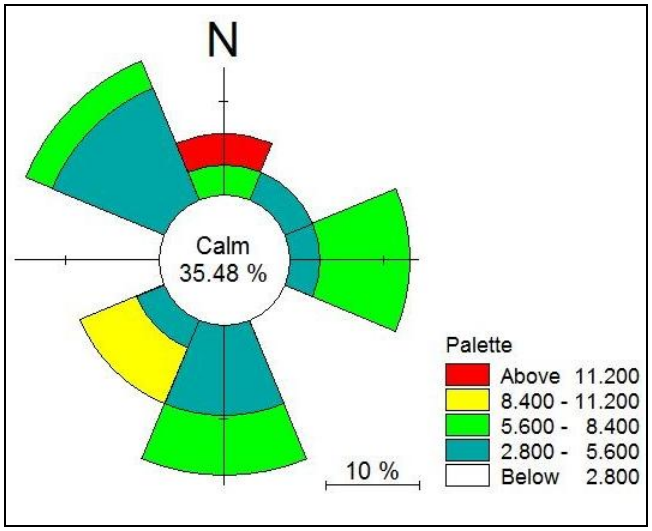


Figura 27. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade (m/s) dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Hoegh Hill. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

OPERAÇÃO N/T TEBAR III

Data: 02/05/1988 – 00:30H

Local: Terminal da Petrobrás de São Sebastião.

Causa: Rompimento do Oleoduto.

Tipo de óleo: Shengly

Volume vazado: 1.000 m^3

Deslocamento: Para setores continente sul e centro e setor ilha norte sentido Ubatuba (Figura 28).

Áreas afetadas: Praias, costões, vegetação terrestre e CEBIMAR

Praias atingidas: São Sebastião: Brava, Guaecá, Baraqueçaba, e Grande; Ubatuba: Enseada, Vermelha, Grande, Tenório e Toninhas.

Ventos: Os de quadrante sul-sudoeste foram os predominantes, houve porém variação por todos os quadrantes. Quanto a intensidade os ventos fracos e moderados foram os mais freqüentes, havendo registros de até 13 m/s de sul-sudoeste (força de tempestade) (Petrobrás, 1990. Registros Meteorológicos do DTCS. São Sebastião, SP, *apud* CETESB, 1996) (Figura 29).

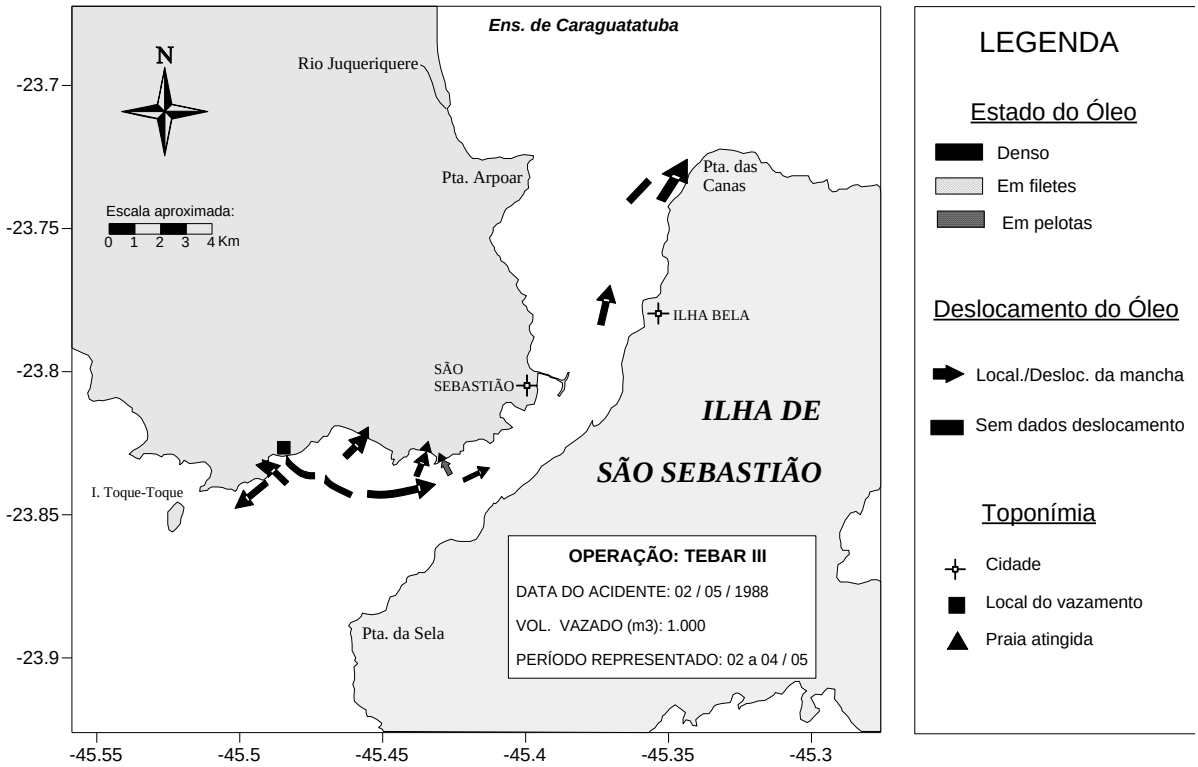


Figura 28. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO TEBAR III. Adaptado de CETESB (1996).

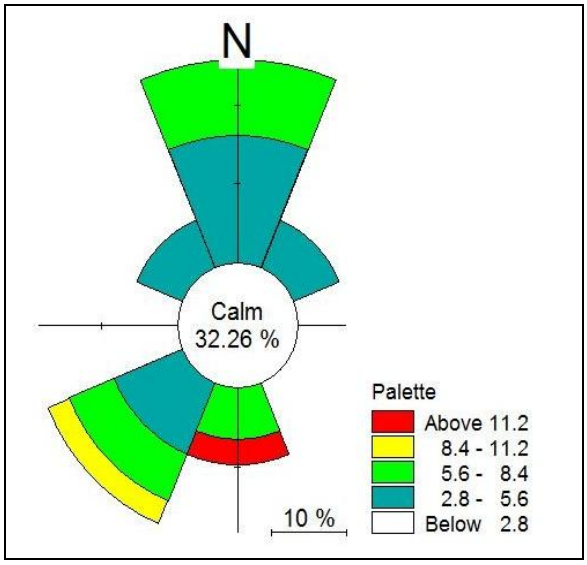


Figura 29. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade (m/s) dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo no vazamento de oleoduto no acidente denominado TEBAR 3. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

OPERAÇÃO N/T CAIRU

Data: 08/08/1990 – 03:45H

Local: Terminal da Petrobrás de São Sebastião.

Causa: Não apurada.

Tipo de óleo: Iraque leve

Volume vazado: 80 m^3

Duração: 1 dia

Deslocamento: Para setor Ilha sul (Figura 30).

Áreas afetadas: Praias e costões

Praias atingidas: Veloso, Curral e Ponta da Sela.

Ventos: das 03:00 às 06:0h estavam de noroeste, de moderados a forte passando a norte-nordeste, moderados seguindo um período de calmaria (Petrobrás, 1990. Registros Meteorológicos do DTCS. São Sebastião, SP *apud* CETESB, 1996). Após a calmaria houve ventos predominantemente de sul-sudoeste (Figura 31).

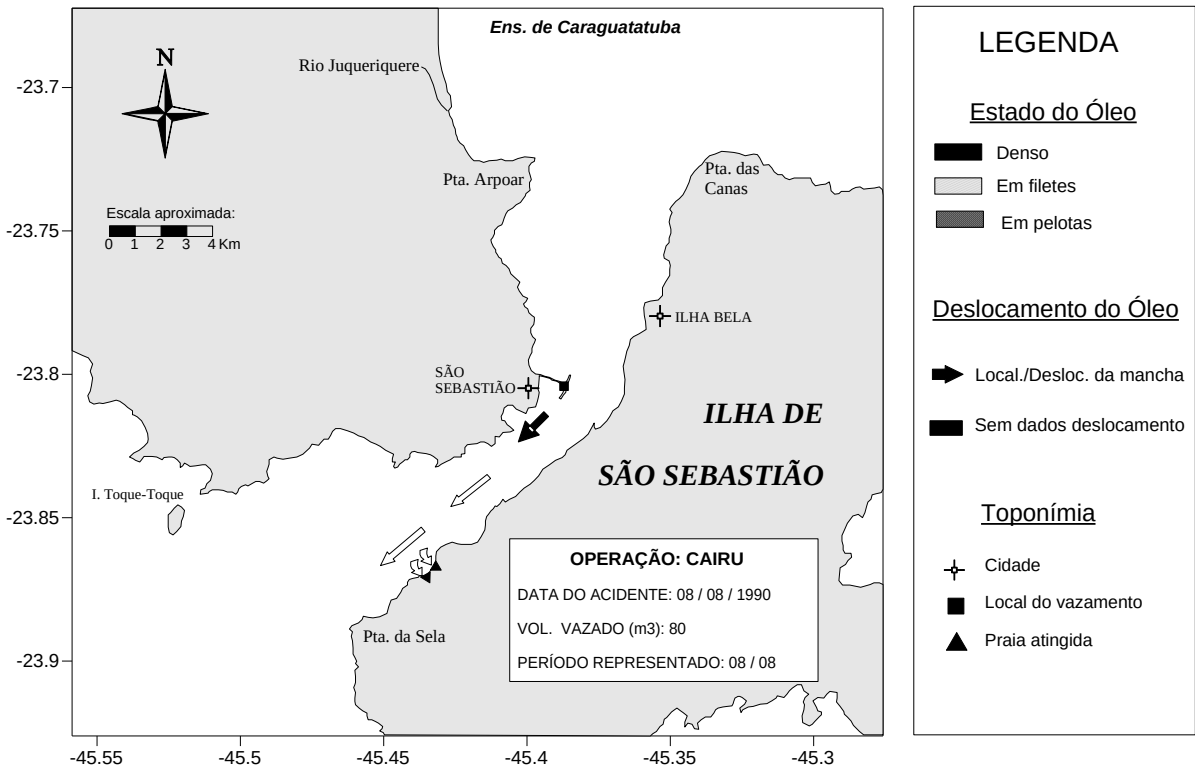


Figura 30. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO CAIRU. Adaptado de CETESB (1996).

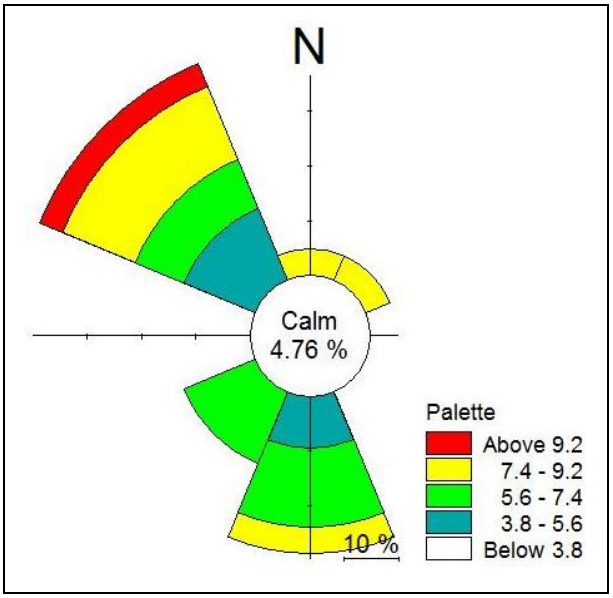


Figura 31. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade (m/s) dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Cairu. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

OPERAÇÃO N/T PENÉLOPE

Data: 26/05/1991 – 12:53H

Local: Canal de São Sebastião

Causa: Colisão com outro navio

Tipo de óleo: Bonito. Tem como características físico-químicas densidade de 0,8566 e grau API de 25,6 e é do tipo leve, com classificação do Grupo III quanto a densidade específica.

Volume vazado: 280 m^3

Deslocamento: Para setores Ilha Norte, Ilha centro e continente centro (Figuras 32 e 33).

Áreas afetadas: Praias, costões e estruturas.

Praias atingidas: Ilhabela: Ponta do Pequeá, do Pinto, Saco da Capela, Viana, Santa Teresa, Siriuba, Engenho D'água, Sino, Centro, Barreiros, Itaguassu, Pedra Miúda, P rainha da Ilha das Cabras, Armação, Barra Velha e Perequê; São Sebastião: Preta, Cabelo Gordo, Deodato, Araçá.

Ventos: As condições de ventos não estão descritas no relatório da CETESB, e os dados de ventos obtidos junto a DHN, para o Porto de São Sebastião estão representados na rosa dos ventos presente na Figura 34.

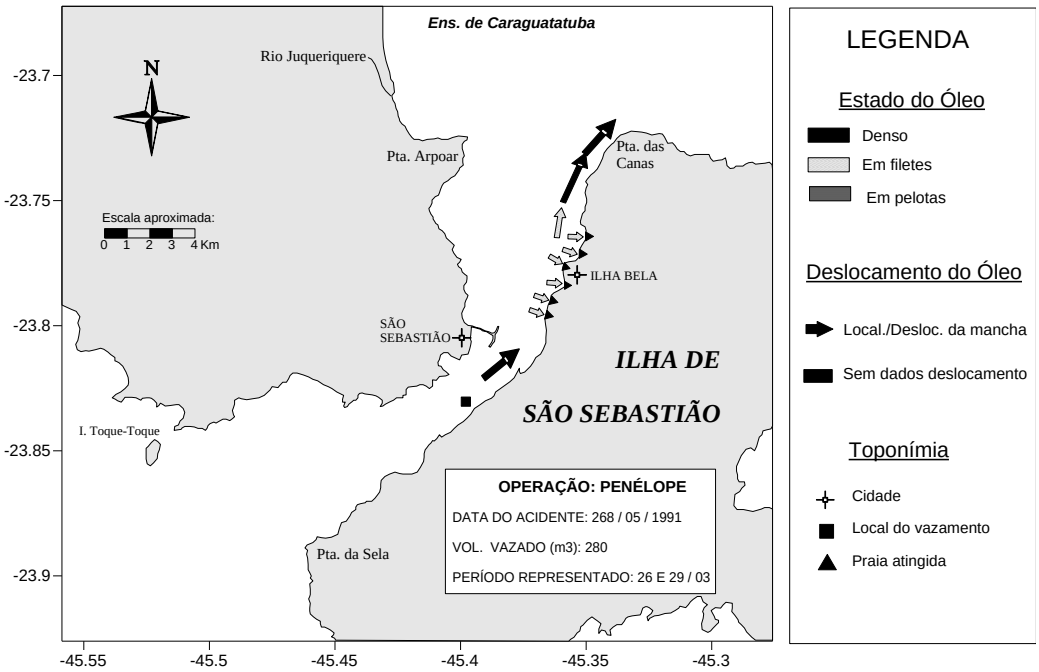


Figura 32. Croqui do deslocamento das manchas de óleo (26/05/1991). OPERAÇÃO N/T PENÉLOPE. Adaptado de CETESB (1996).

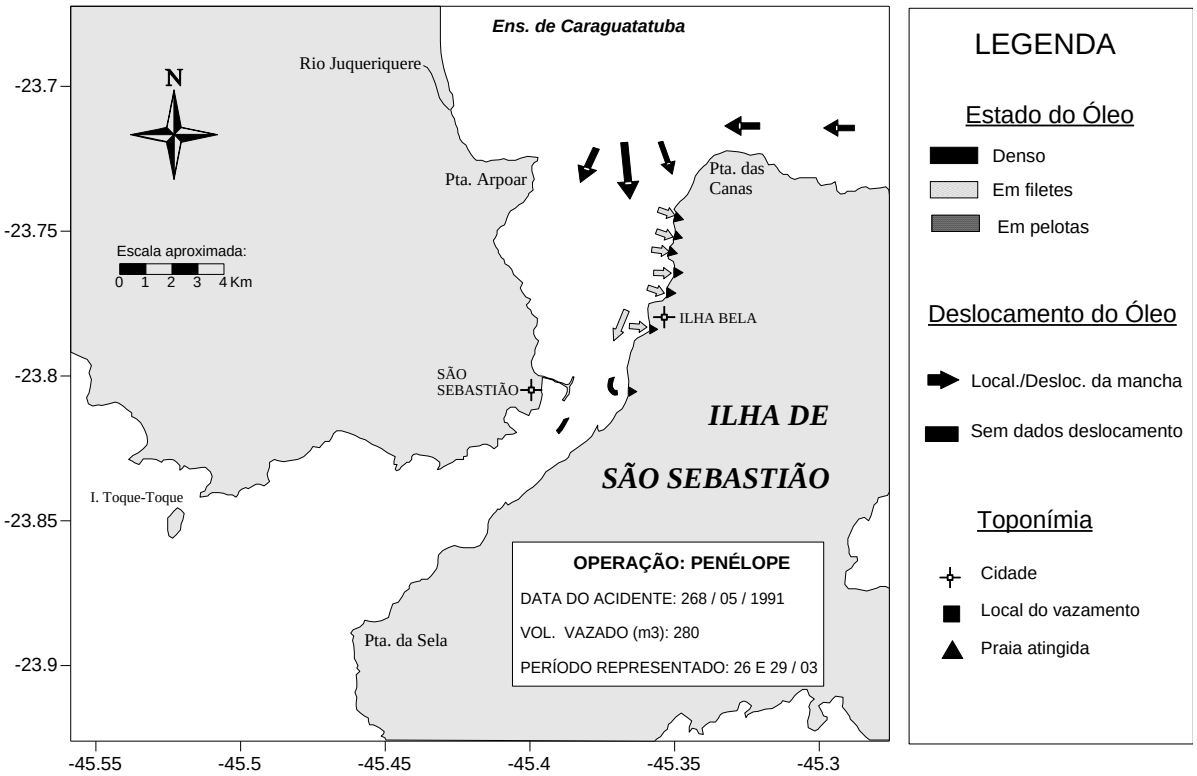


Figura 33. Croqui do deslocamento das manchas de óleo (27/05/1991). OPERAÇÃO N/T PENÉLOPE. Adaptado de CETESB (1996).

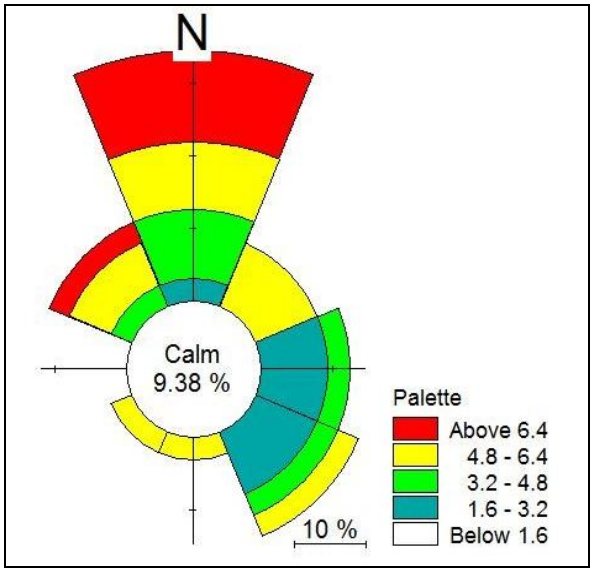


Figura 34. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade (m/s) dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Penélope. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

OPERAÇÃO N/T KATINA

Data: 13/08/1991 – 07:40H

Local: Terminal da Petrobrás de São Sebastião.

Causa: Não apurada.

Tipo de óleo: Marlim. O petróleo de Marlim, é do tipo pesado com 19,6 graus API e densidade específica de 0,90, classificado no grupo III.

Volume vazado: 60 m^3

Deslocamento: Para setores Ilha centro e sul (Figura 35).

Áreas afetadas: Praias, costões e estruturas

Praias atingidas: Ilhabela: Portinho, Grande Miúda, Feiticeira.

Ventos: Apesar das atividades de remoção terem se estendido até 23 de agosto, as manchas de óleo só foram vistas em 13 de junho. Portanto, apresentamos somente os dados de ventos dos dois primeiros dias: tanto antes como depois do vazamento predominaram ventos de noroeste, moderados a fortes, para no segundo dia variarem de norte-noroeste a sudoeste, fracos (Figura 36).

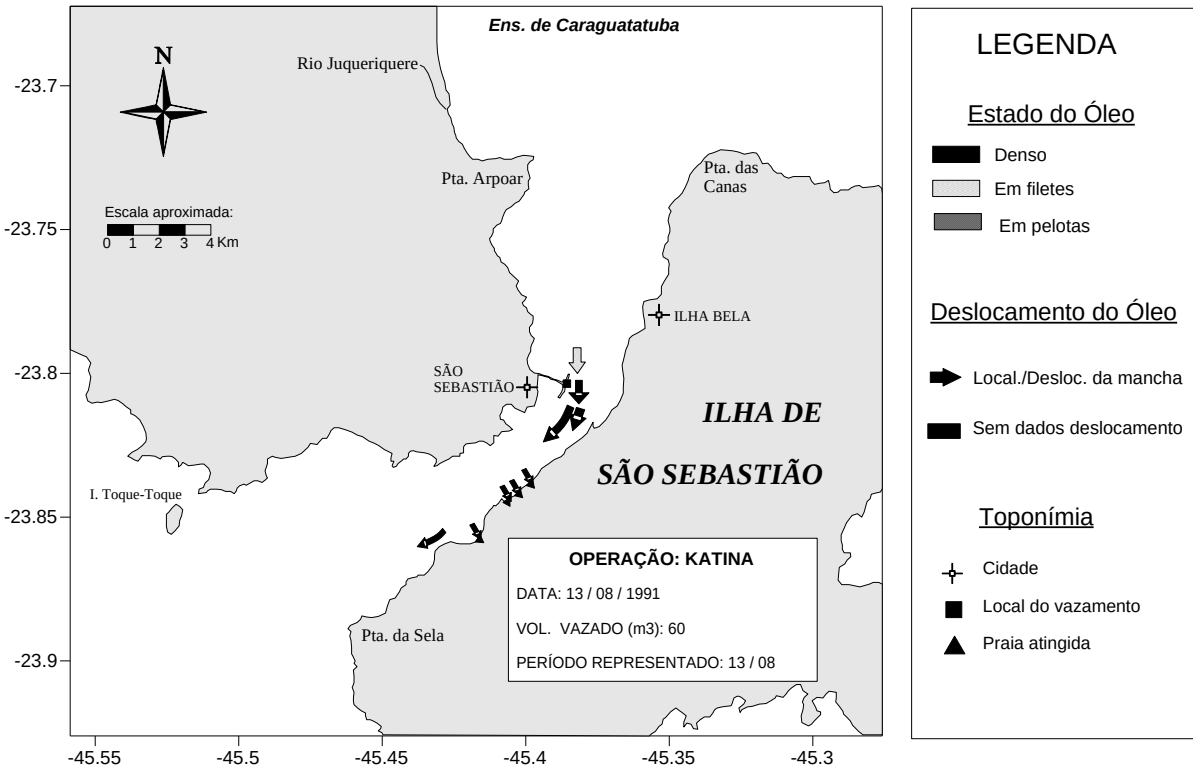


Figura 35. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO KATINA. Adaptado de CETESB (1996).

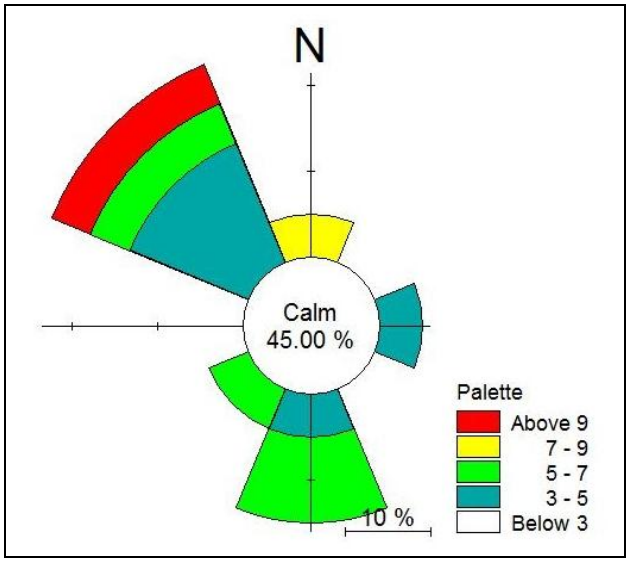


Figura 36. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade (m/s) dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo do N/T Katina. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

OPERAÇÃO TEBAR V

Data: 15/05/1994 – 14:25H

Local: Terminal da Petrobrás de São Sebastião

Causa: Rompimento de oleoduto

Tipo de óleo: Sergipano tipo Terra O óleo tipo Sergipano Terra tem como características físico-químicas densidade de 0,9033 e grau API de 24,5 e é do tipo pesado, com classificação do Grupo III quanto a densidade específica.

Volume vazado: 2.700 m^3

Deslocamento: Para setores continente e Ilha sul, centro,norte (Figura 37).

Áreas afetadas: Praias e costões.

Praias atingidas: Ilhabela: Pinto, Barreiros, Centro Itaquanduba, Engenho D'água, Itaguassu, Perequê, Feiticeira, Grande Curral, Julião, Estácio e Serraria, Ilhas Vitória e Búzios; Caraguatatuba: Palmeiras e Massaguaçu; Ubatuba: ilhas Anchieta e mar Virado; São Sebastião: Cigarras, Pontal da Cruz, São Francisco, Olaria e Arrastão, Deserta, Porto Grande, TEBAR Praia Clube, Centro, Araçá, Preta, Grande, Cabelo Gordo, Segredo, Baraqueçaba, Guaecá e Brava.

Ventos: Não havia aparelhos funcionando no período, foram feitas apenas observações visuais. Sendo assim, dentre os poucos registros existentes, pode-se perceber que houve bastante variação entre os sentidos dos ventos, basicamente entre os de sul-sudoeste e de norte-nordeste. Quanto à intensidade, a incidência dos ventos fracos foi apenas um pouco maior do que dos fortes e moderados, mas os registros não são exatos para afirmar seu real comportamento (CETESB, 1996).

Não foi possível se obter dados em série temporal para o período deste derrame, apenas informações regionais através de cartas sinóticas da DHN, dessa forma uma aproximação com o registro geral dos sistemas atmosféricos dominantes no período estão plotados na Figura 38.

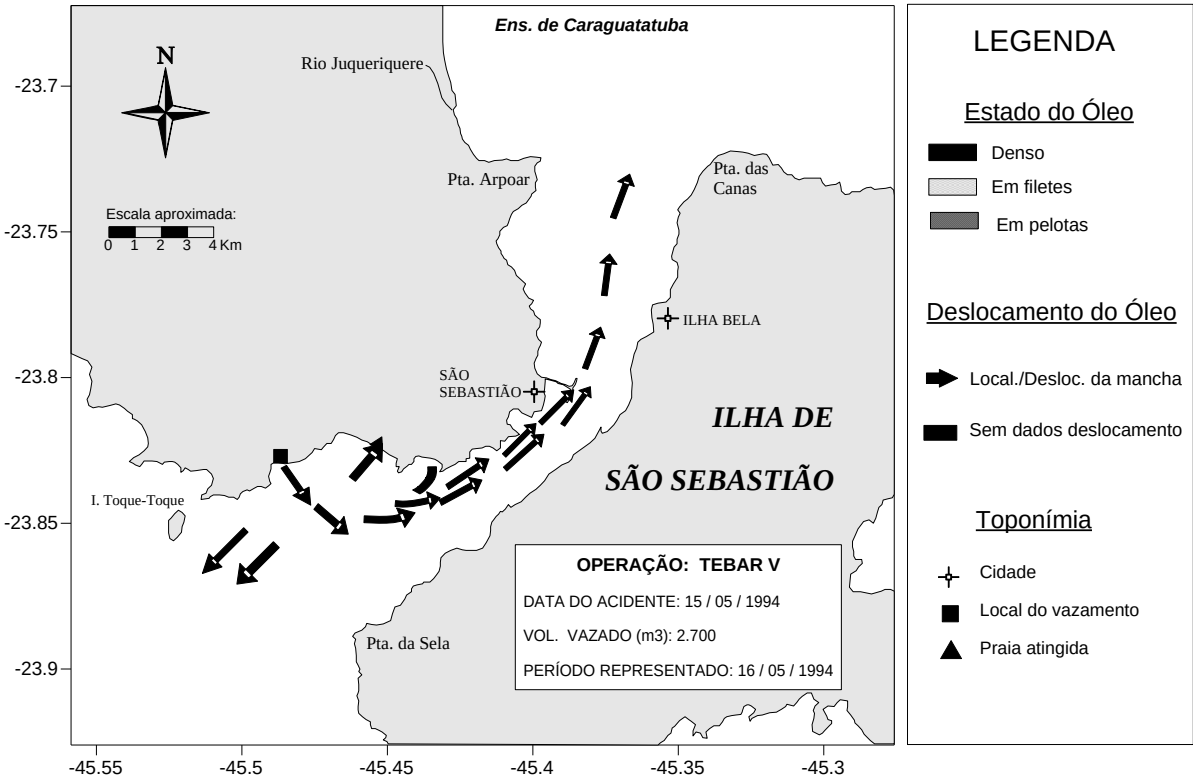


Figura 37. Croqui do deslocamento das manchas de óleo. OPERAÇÃO TEBAR V Adaptado de CETESB (1996).

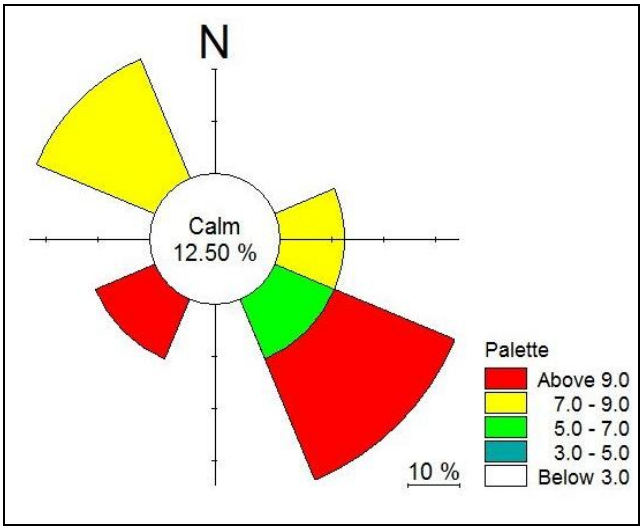


Figura 38. Gráfico tipo rosa de ventos indicando as variações na direção (grau) e velocidade (m/s) dos ventos durante o período de ocorrência do derrame de óleo no vazamento de oleoduto no acidente denominado TEBAR 3. Fonte dos dados: BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos – Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil).

Os resultados obtidos da integração entre os dados meteorológicos dos períodos pré e pós- acidentes e, as posições espaciais das respectivas manchas de óleo, serão comparadas conjuntamente com as condições hidrodinâmicas geradas pelo modelo, em cenários compatíveis com os eventos representados, de forma a mostrar a viabilidade na aplicação deste modelamento matemático também por comparação com eventos ocorridos, que expressam a realidade ambiental deste tipo de acidente.

7.7 Aplicação de sensoriamento remoto em derrames de óleo.

A imagem total utilizada neste estudo apresenta resolução de 30x30 metros cobrindo a região que vai de São Sebastião até Caraguatatuba em um total de aproximadamente 400Km^2. Esta imagem digital foi adquirida junto ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), e recebeu tratamentos prévios, tais como correção atmosférica e georeferenciamento. Apresenta órbita/ponto 218/76 + 6 segundos. É apresentada neste trabalho de forma a cobrir especificamente a área deste estudo.

O sensor do satélite opera com 6 bandas correspondentes à energia eletromagnética refletida, TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7, com resolução espacial de 30x30 metros uma banda operando no infravermelho termal (TM6). Detalhes sobre a resolução espectral das bandas estão presentes na Tabela 7.

BANDA	Comprimento de onda (µm)	Características
TM1	0,45 a 0,52	Azul-Verde; Máxima penetração na água
TM2	0,52 a 0,60	Verde; máxima reflectância da clorofila na região do visível
TM3	0,63 a 0,69	Vermelho; máxima absorção da clorofila
TM4	0,76 a 0,90	Infravermelho próximo; absorção total pela água
TM5	1,55 a 1,75	Infravermelho médio;
TM6	10,40 a 12,50	Infravermelho emitido
TM7	2,08 a 2,35	Infravermelho

Tabela 7. Resolução espectral das bandas TM 1 a 7 da imagem Landsat 5. (Sains Jr., 1987).

No caso deste estudo foi feita uma limiarização utilizando-se a banda infravermelha (no caso deste trabalho a banda TM 4) que é 100% absorvida pela água, definindo a linha de costa nos limites entre áreas emersas e submersas. Posteriormente aplicaram-se técnicas de realce, que melhoram a discriminação da imagem pela utilização de funções de transformação do histograma. Por fim a imagem foi classificada, cuja idéia é definir categorias agrupadas por similaridade nos valores espectrais ou definir alvos específicos a partir do mesmo conceito.

Informações quantitativas, obtidas a partir os parâmetros de resposta de cada pixel e qualitativas, que levam em consideração a distribuição geral dos fenômenos, são passíveis de serem obtidas a partir de uma imagem digital, porém em processos oceanográficos a variabilidade temporal dos parâmetros gera uma restrição considerável nas operações de classificação (Conti, 1988).

No caso da imagem processada neste trabalho, essa limitação foi contornada pela existência dos mapas de acompanhamento do deslocamento da mancha de óleo, descritos no relatório Dinâmica dos vazamentos de óleo no Canal de São Sebastião – São Paulo (1974-1994) da CETESB (1996), de onde se pode comparar com as informações qualitativas obtidas no processamento digital.

O primeiro passo relativo ao processamento da imagem objetivando a detecção da mancha de óleo no Canal de São Sebastião, se dá a partir da separação terra-água; tal processo visa restringir toda a informação espectral da imagem para áreas cobertas por água.

Foi obtido através da utilização da banda TM4 como “máscara”, uma vez que a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho próximo é intensamente absorvida pela água. Este procedimento, entretanto, fez com que nuvens posicionadas na porção central do canal também adquirissem o padrão de absorção semelhante às áreas emersas, totalmente separadas do corpo aquoso.

Foram realizadas composições coloridas, principalmente a partir da utilização das bandas do espectro visível (TM-1, 2 e 3), uma vez que é esperado que os maiores níveis de resposta para manchas de petróleo se dêem nesses comprimentos de onda (Kampel & Amaral, 2001; Brekke & Solberg, 2004).

Deste modo foi produzida uma imagem em composição colorida RGB TM3,2,1, e posteriormente realizado um processo de realce através de espalhamento do histograma, em que 99% da informação da imagem foi preservada. Esta imagem apresenta padrões bastante complexos, sendo possível identificar claramente a dispersão da mancha de óleo.

Foi definida, a partir desse procedimento, uma série de onze pontos alvos localizados conforme a figura 39, a seguir, em que foram extraídos os respectivos valores de resposta para cada uma das bandas disponíveis na imagem de modo a se obter assinaturas espectrais de cada alvo.

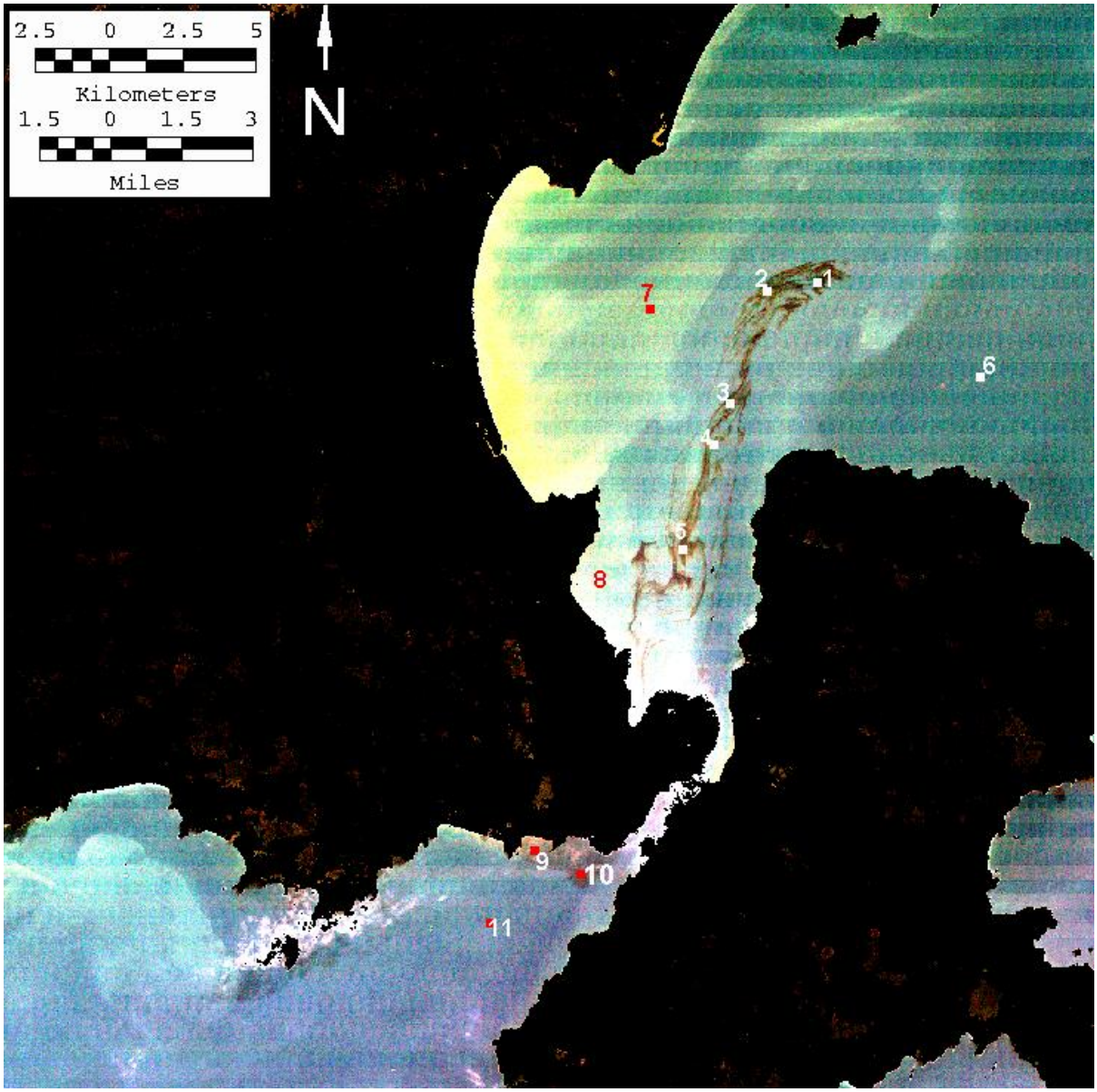


Figura 39. Localização dos pontos de amostragem dos valores espectrais

Esses pontos pré-selecionados foram determinados baseando-se nas variações da reflectância da composição, em função de uma pré-classificação visual da imagem. A tabela 8 mostra os pontos e seus respectivos atributos:

Pontos	Classificação
1 a 5	Mancha de óleo
6	Água oceânica
7	Água intermediária
8	Água costeira
9 e 10	Água com suspeita de película de óleo
11	Água da desembocadura sul

Tabela 8. Classificação dos pontos segundo seus atributos por análise visual.

Os valores de resposta espectral (%) de cada ponto estão apresentados na figura 40.

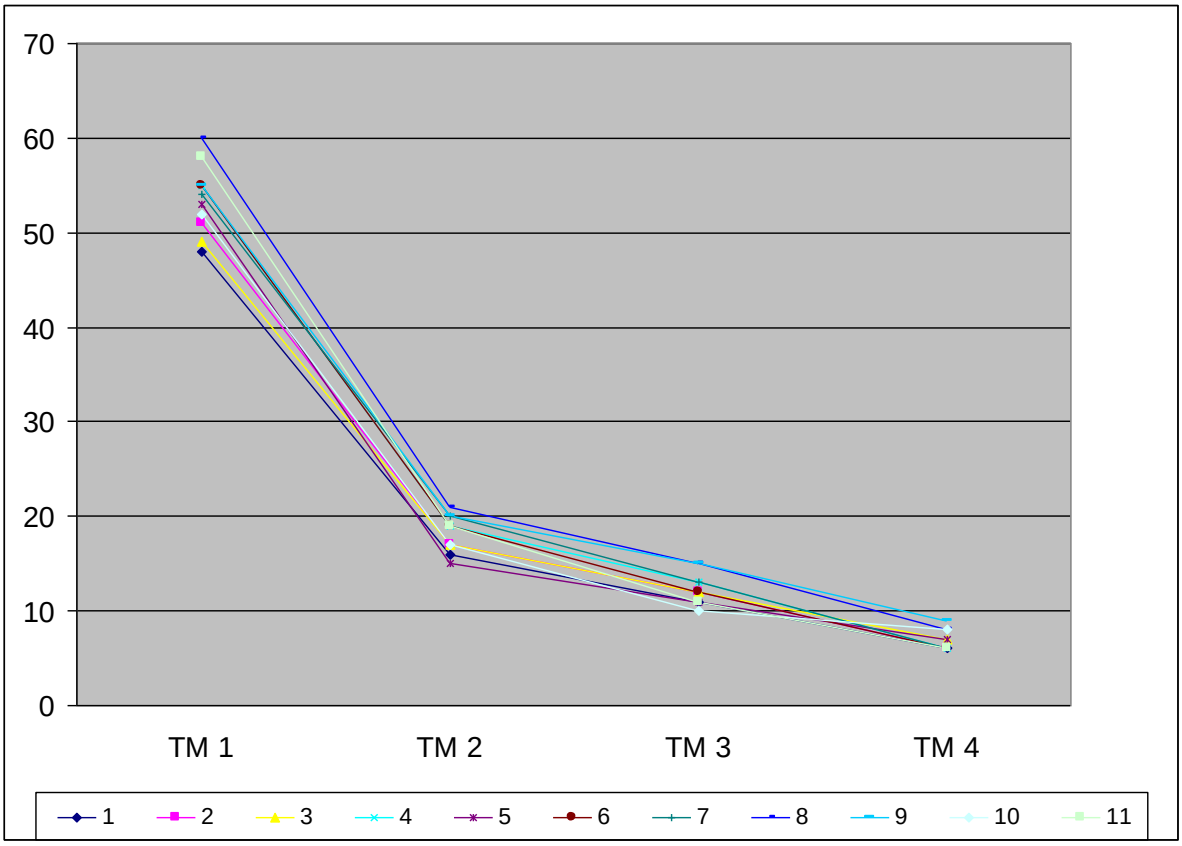


Figura 40. Valores da resposta espectral dos pontos de amostragem.

Esta figura mostra uma tendência de proximidade de valores nos primeiros pontos espectrais de 1 a 5, correlacionados à mancha de óleo, enquanto que os demais pontos apresentam tendências gerais semelhantes, mas valores diferenciados. Estas variações estão possivelmente associadas ao fato de a mancha de óleo apresentar um maior grau de reflexão (principalmente no espectro visível – Banda TM 3, 2 e 1) em relação ás águas não poluídas.

Com relação ao ponto dez, que está localizado próximo da costa continental, na desembocadura sul do canal, ou seja, na região a partir de onde o óleo entrou no ambiente marinho, os valores espectrais encontram-se muito semelhantes aos valores obtidos no ponto 1 (Figura 41), localizado bem sobre a mancha. Isto indica que após dois dias do início do evento ainda havia presença de petróleo na superfície da água próxima a origem do derrame.

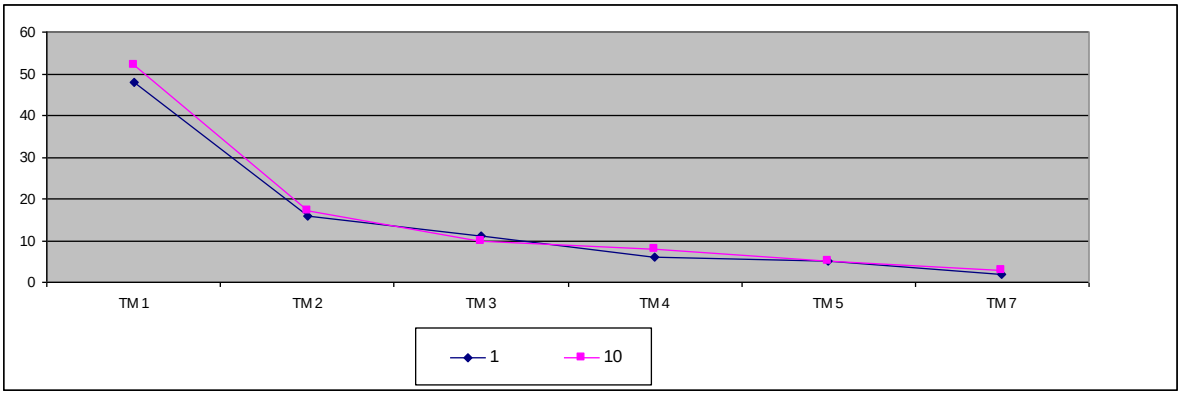


Figura 41. Valores espectrais dos pontos 1 e 10 da imagem de satélite.

Uma análise da banda que opera no infravermelho termal, a TM 6, mostra o contraste entre as águas e a mancha de óleo, sendo que esta última apresenta uma assinatura térmica bem marcante, também realça o sentido de deslocamento da mancha (figura 42).

A imagem subseqüente presente na figura 43, mostra a mancha em detalhe, com todos os nuances do seu espalhamento e nas formas com que isto acontece. Pode-se identificar junto com a película de óleo as plumas de material em suspensão acompanhando o formato da mancha e mostrando a tendência geral do transporte na boca norte e região adjacente.

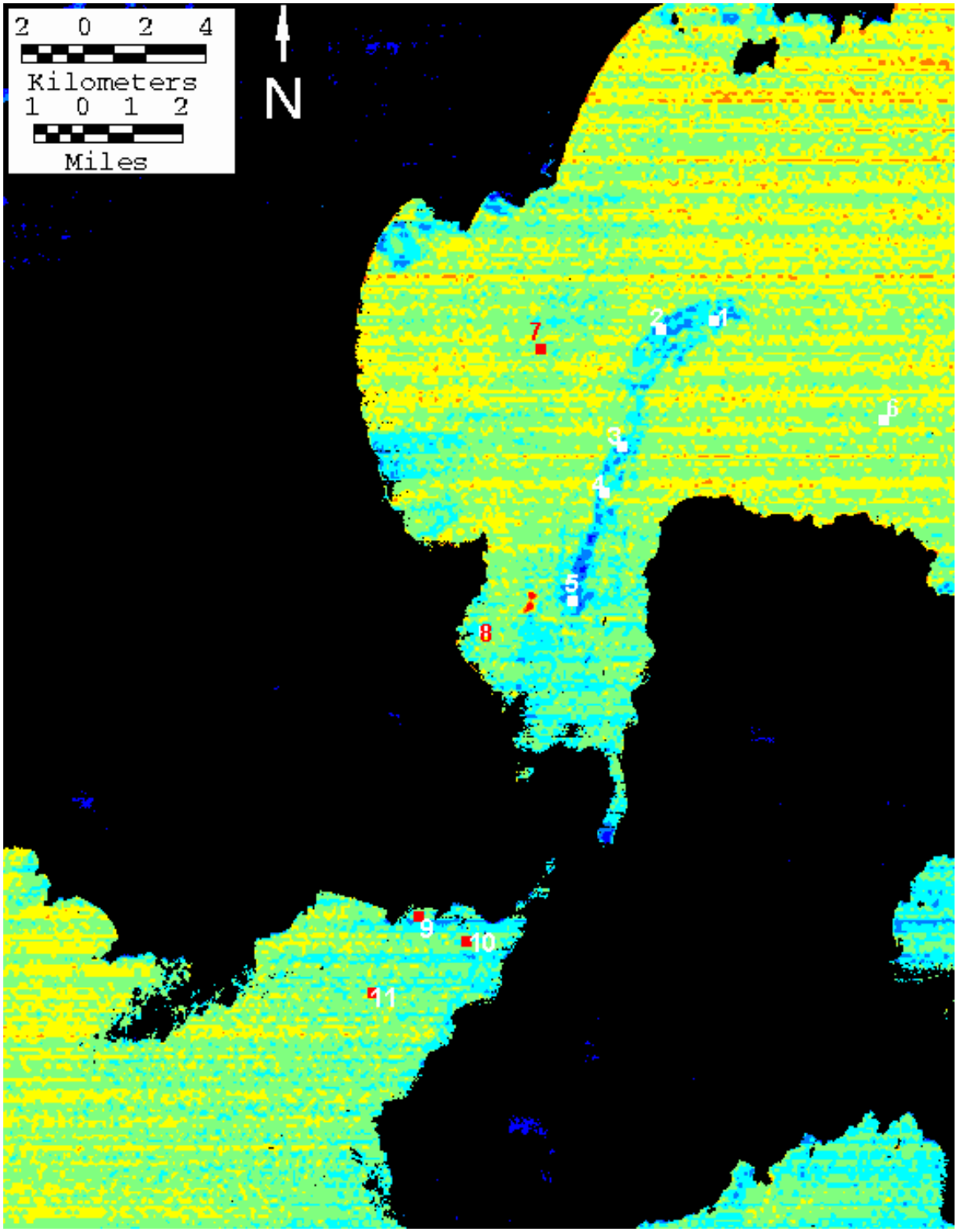


Figura 42. Imagem da banda infravermelho termal, TM6.

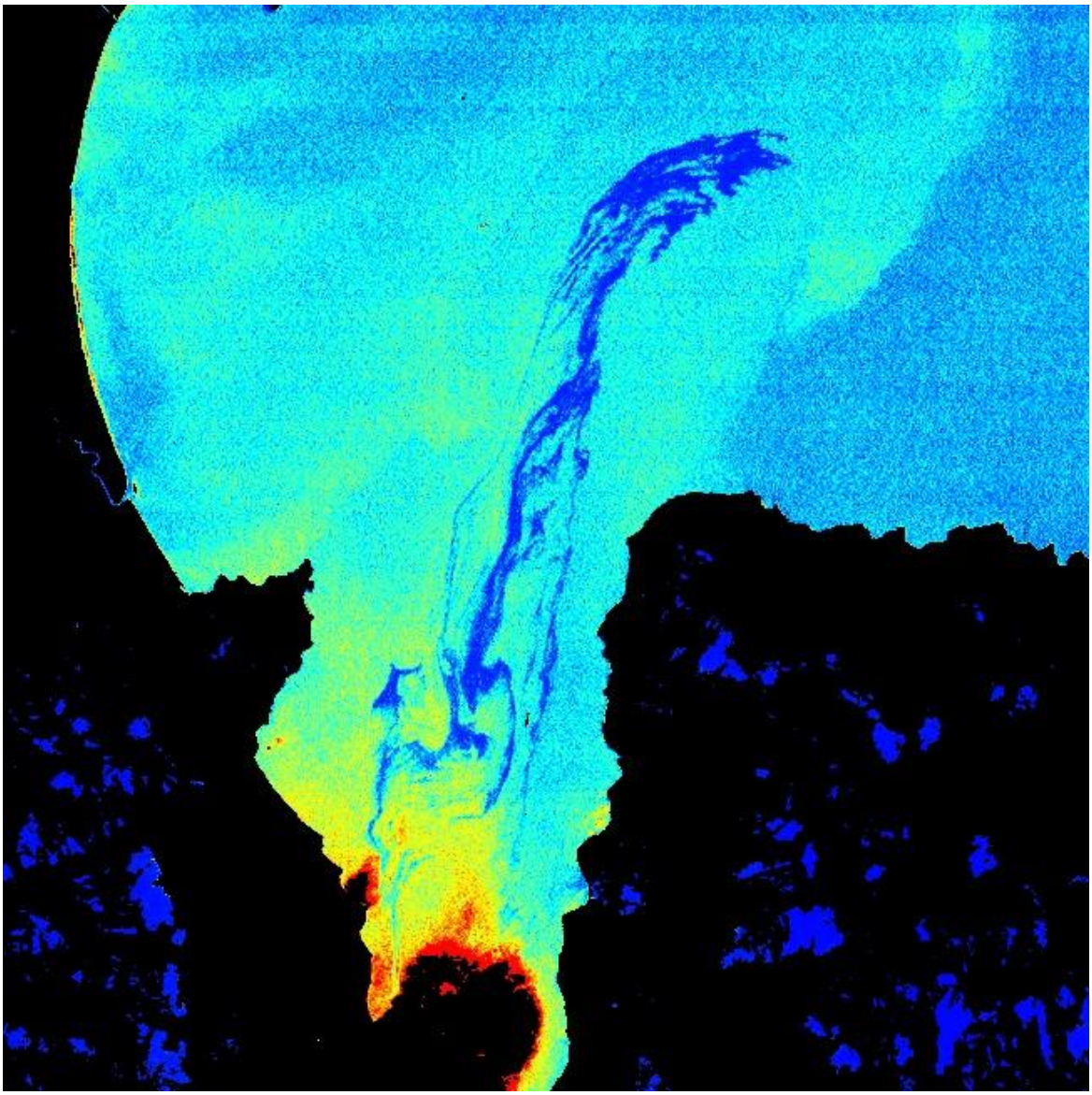


Figura 43. Imagem de composição RGB das bandas TM 1, 2 e 3

Este procedimento de análise de derrames através de sensoriamento remoto mostrou o real comportamento de uma mancha de óleo no Canal de São Sebastião dando um implemento no conhecimento das formas com que isso acontece em uma determinada situação.

Desta forma, tendo sido comparado os resultados entre a imagem de satélite e croquis dos acidentes, foram feitas correlações entre essas informações levantadas e os resultados das simulações, de forma a validar a aplicação do software MIKE 21(2008) e seu módulo hidrodinâmico nos planos de contingência para á área, conforme será apresentado nos itens subseqüentes.

7.8 Resultados da modelagem numérica no estudo de derrames de óleo

7.8.1 – Introdução

A aplicação do modelo hidrodinâmico da DHI na caracterização do comportamento de manchas de óleo, provenientes de acidentes, apresenta-se como uma metodologia com reais possibilidades de aplicação em função do deslocamento das manchas apresentar forte correlação com o agente hidrodinâmico e seus fatores condicionantes. A disponibilidade restrita de dados de longo prazo fez optar por um período em que houvesse a maior variabilidade nas condições atmosféricas na região.

Os acidentes envolvendo vazamentos têm, na maioria dos casos, um período curto de ocorrência, logo seguido das medidas de contingência. Desta forma as simulações procuraram representar as condições hidrodinâmicas de cenários em escala temporal diária, indicando a provável destinação das manchas e a extensão possível do espalhamento.

Para comprovar a viabilidade deste procedimento, foram comparados cenários recorrentes na simulação com croquis representativos de acidentes reais ocorridos até meados da década de 1990, e descritos em relatórios da CETESB, conforme especificados no respectivo item anterior. Foi feita uma aproximação entre os vetores de posição e deslocamento dos croquis com os vetores gerados pelo modelo, respeitando as limitações de escala, porém mantendo a significância e representatividade dos mesmos.

A correlação entre o resultado obtido pelo processamento digital de imagem de satélite, e o modelo, foram evidentes, porém a imagem nos dá uma real avaliação da extensão do espalhamento e da dimensão espacial de como ele ocorre, auxiliando na compreensão dos resultados obtidos pelo modelo e permitindo ter uma análise crítica estruturada sobre este tipo de estudo.

Verificada a coerência entre as duas formas informações e a representatividade do modelo gerado quanto ao espalhamento da mancha de óleo, procurou-se estabelecer uma série de cenários em que foram considerados fatores como as variações astronômicas na altura de marés e condições meteorológicas vigentes, de forma a se apresentar quadros que retratem essas variáveis envolvidas de forma integrada, gerando quadros específicos e recorrentes, visando auxiliar nas tomadas de decisões em casos efetivos de futuros acidentes na área de estudo e também na consideração da aplicação desta metodologia neste tipo de caso em outras áreas afins.

7.8.2 – Derrames de óleo e resultados da simulação – análise comparativa

A proposta deste estudo de caracterizar o comportamento de mancha de óleo no Canal de São Sebastião através de modelagem numérica tem, como um de seus embasamentos práticos, informações sobre acidentes reais pré-existentes. A integração destas informações gerou quadros em que foram superpostos os

vetores de posição e deslocamento das manchas descritos na literatura, com os vetores gerados pelo modelo.

Foram considerados 7 derrames já descritos anteriormente e, neste contexto foram discutidas as formas em que esses diagramas vetoriais de direção e intensidade de correntes, gerados pelas simulações das condições hidrodinâmicas se aplicam. As informações integradas representam uma aproximação entre o processo real, desenvolvido no período de horas ou dias, conforme o caso específico e momentos representativos de uma situação análoga ao comportamento do derrame.

As figuras 44 a 51 mostram as análises integradas entre as várias fontes de informações levantadas, constando o resultado da modelação, as setas dos croquis e o regime de vento do momento histórico do acidente, seguido pela rosa dos ventos com os valores de direção e velocidades de vento representativo no momento escolhido da simulação.

A aplicação deste modelo hidrodinâmico na caracterização do comportamento de manchas de óleo provenientes de acidentes, pode ser considerada como um importante método neste tipo de determinação, visto que os resultados obtidos apresentaram correlações evidentes com informações reais de acidentes, como poderá ser visto a seguir.

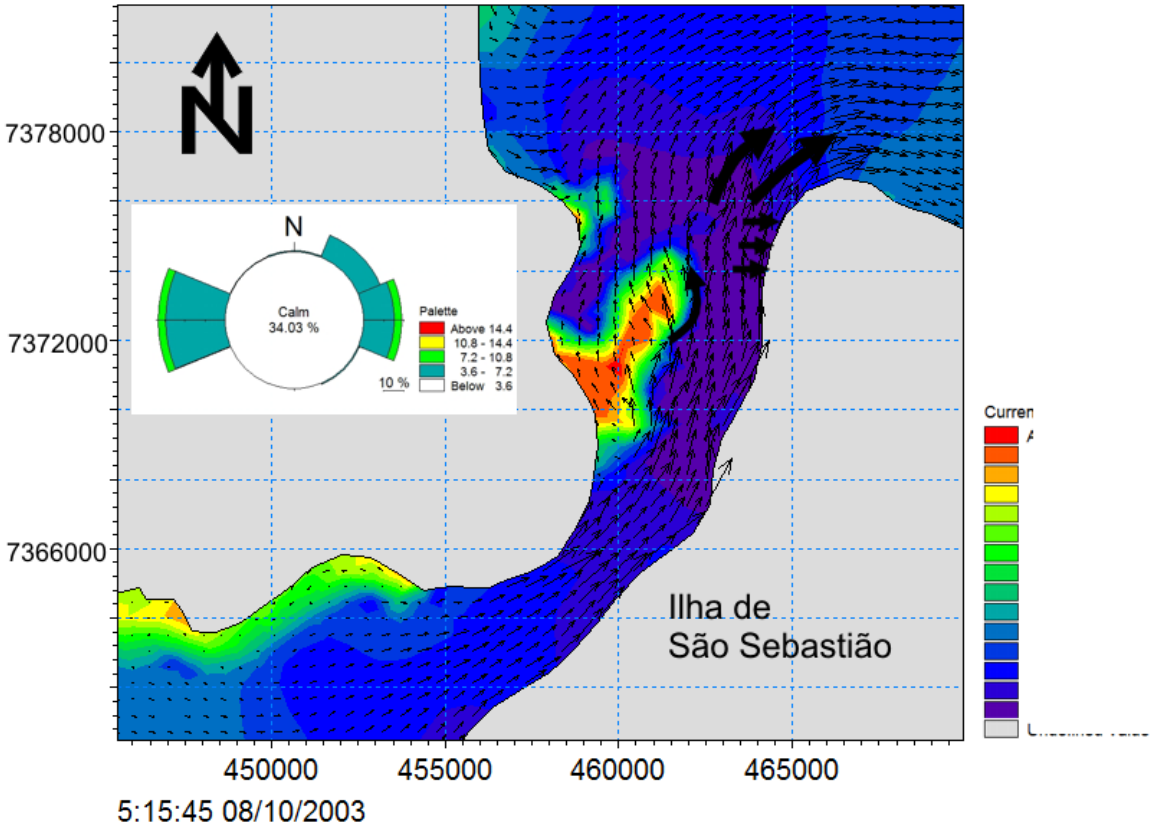


Figura 44. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Marina e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

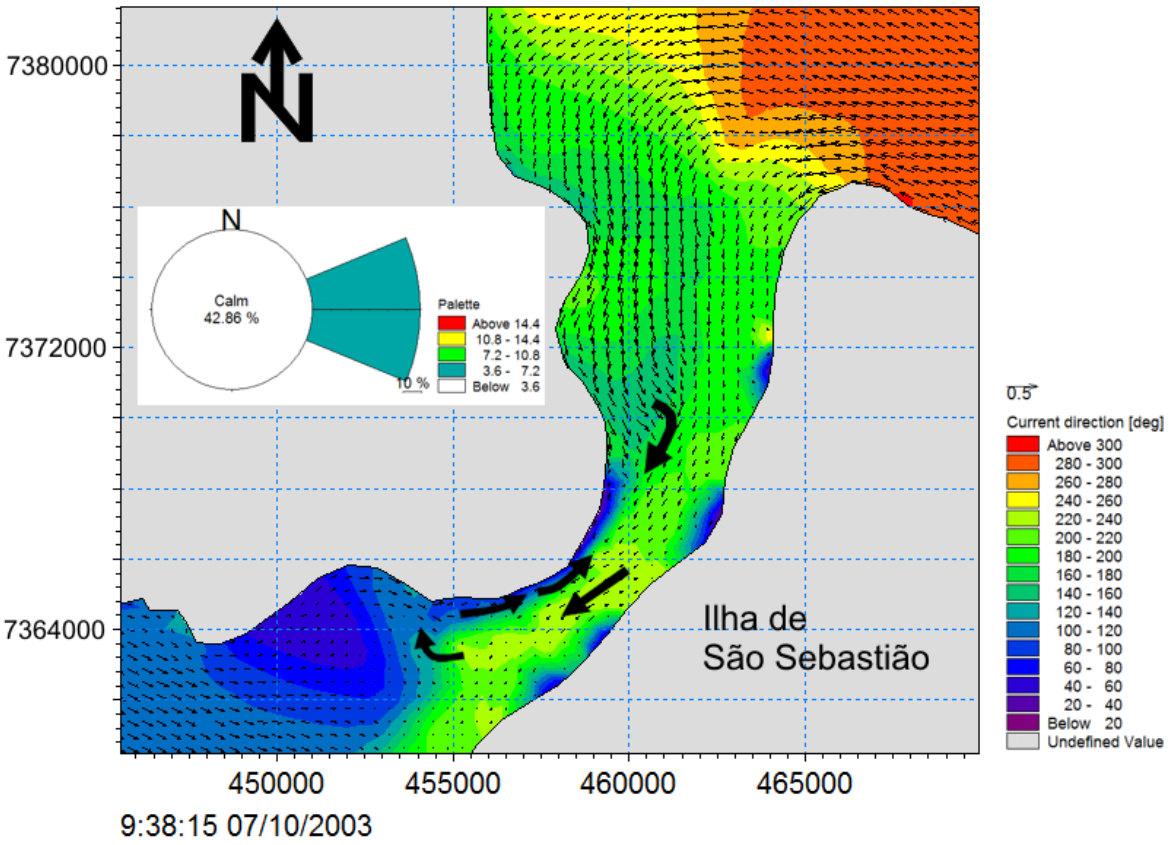


Figura 45. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Hoegh Hill e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

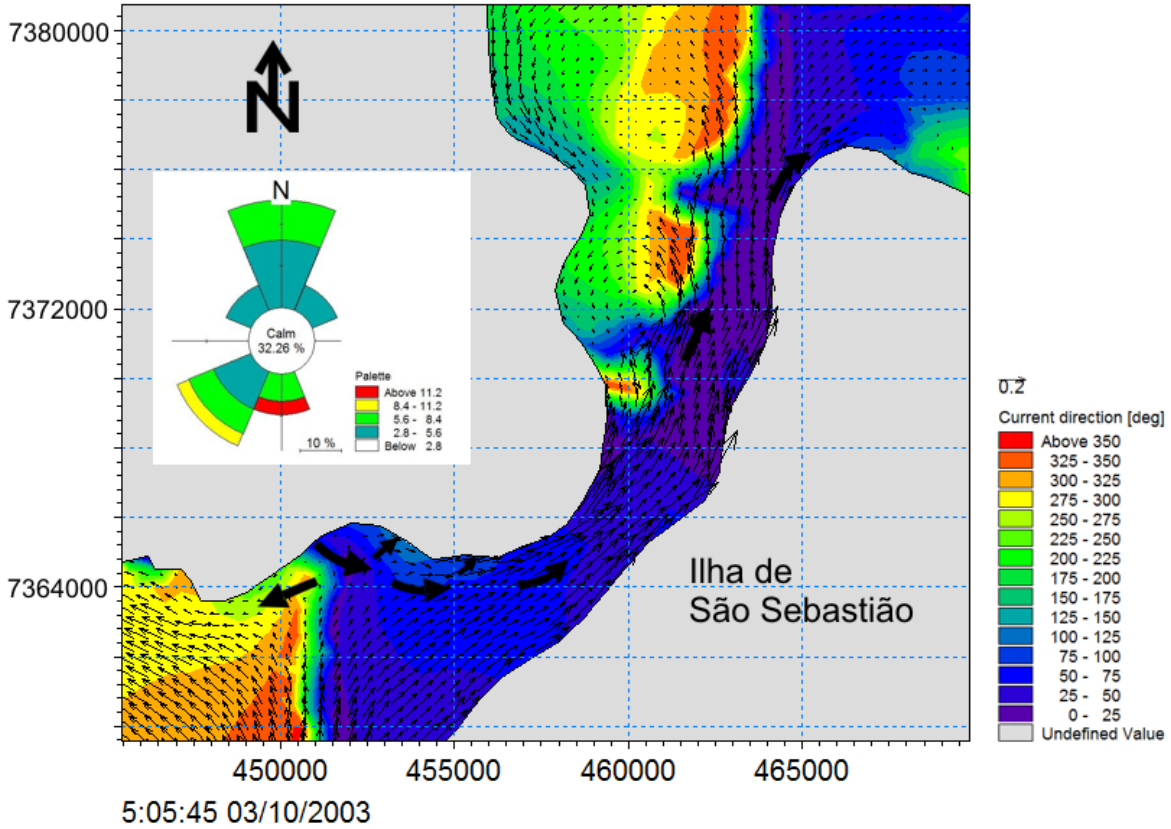


Figura 46. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo em vazamento de oleoduto do acidente Tebar III e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

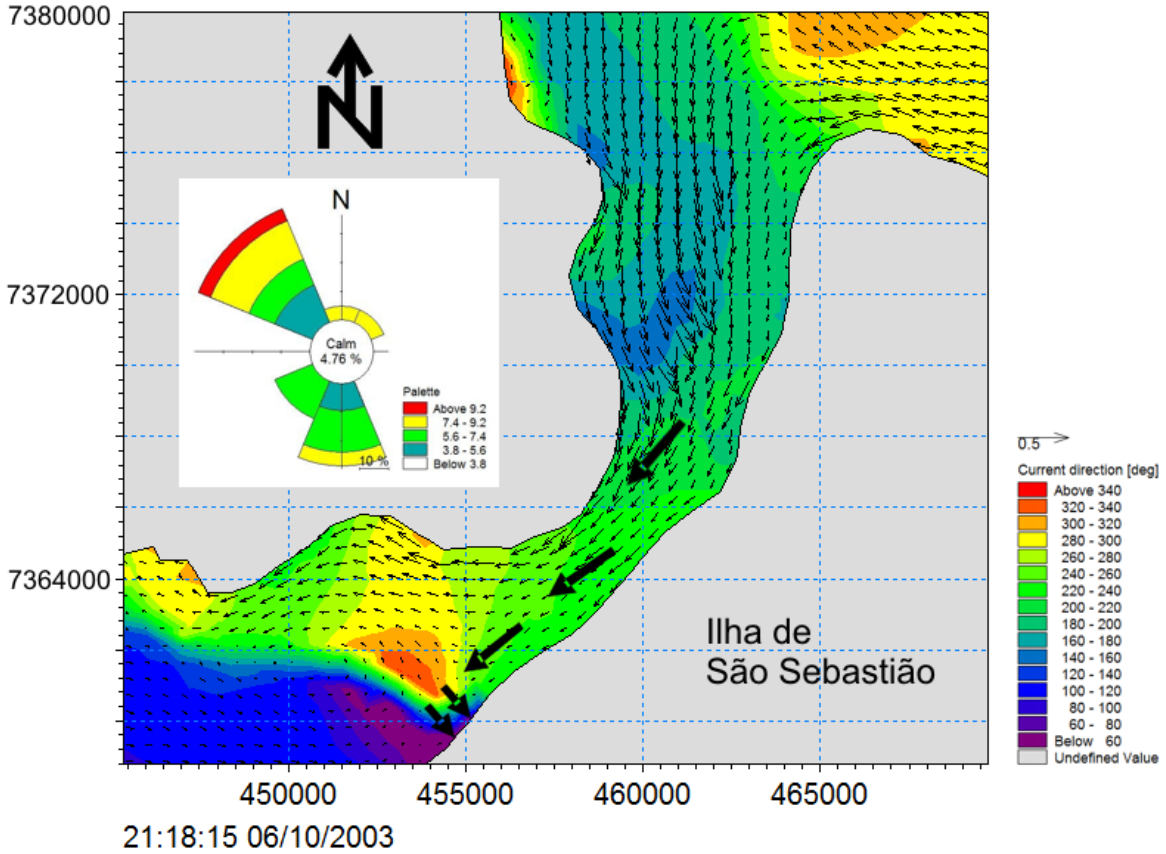


Figura 47. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Cairu e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

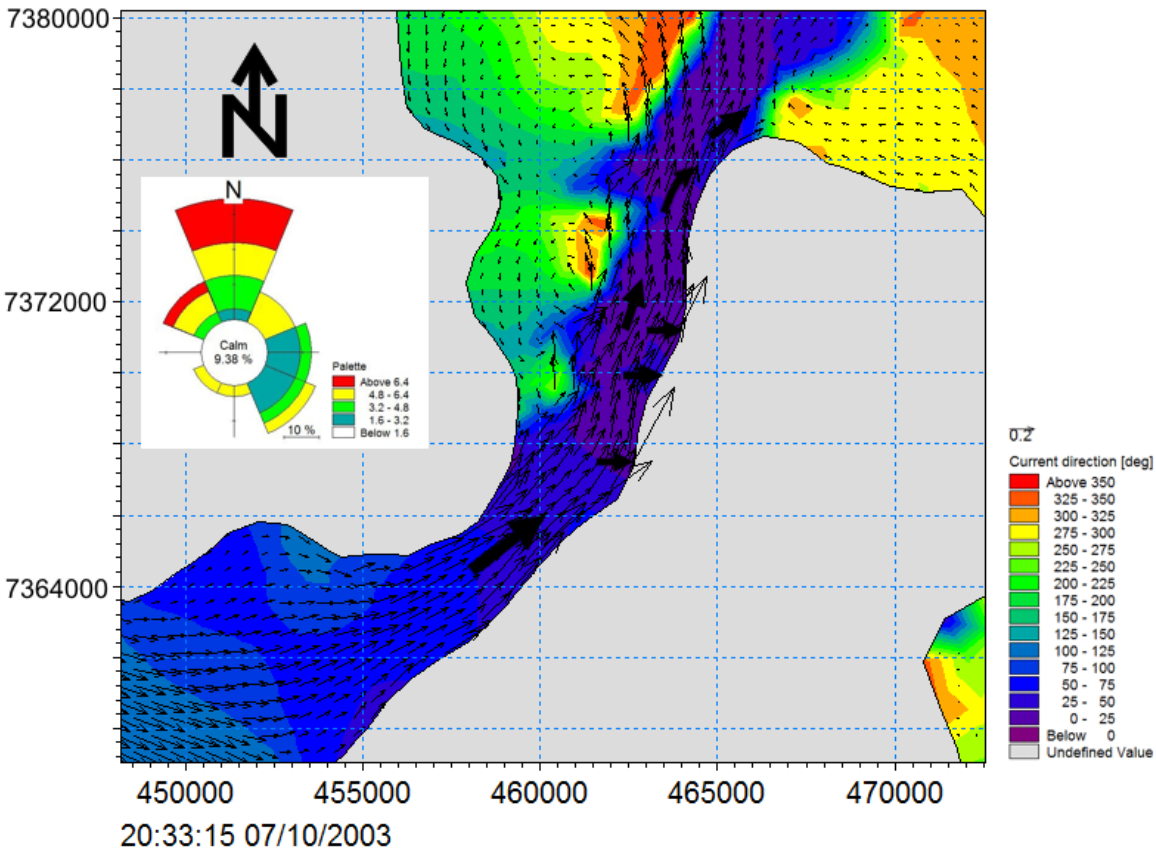


Figura 48. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Penélope e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

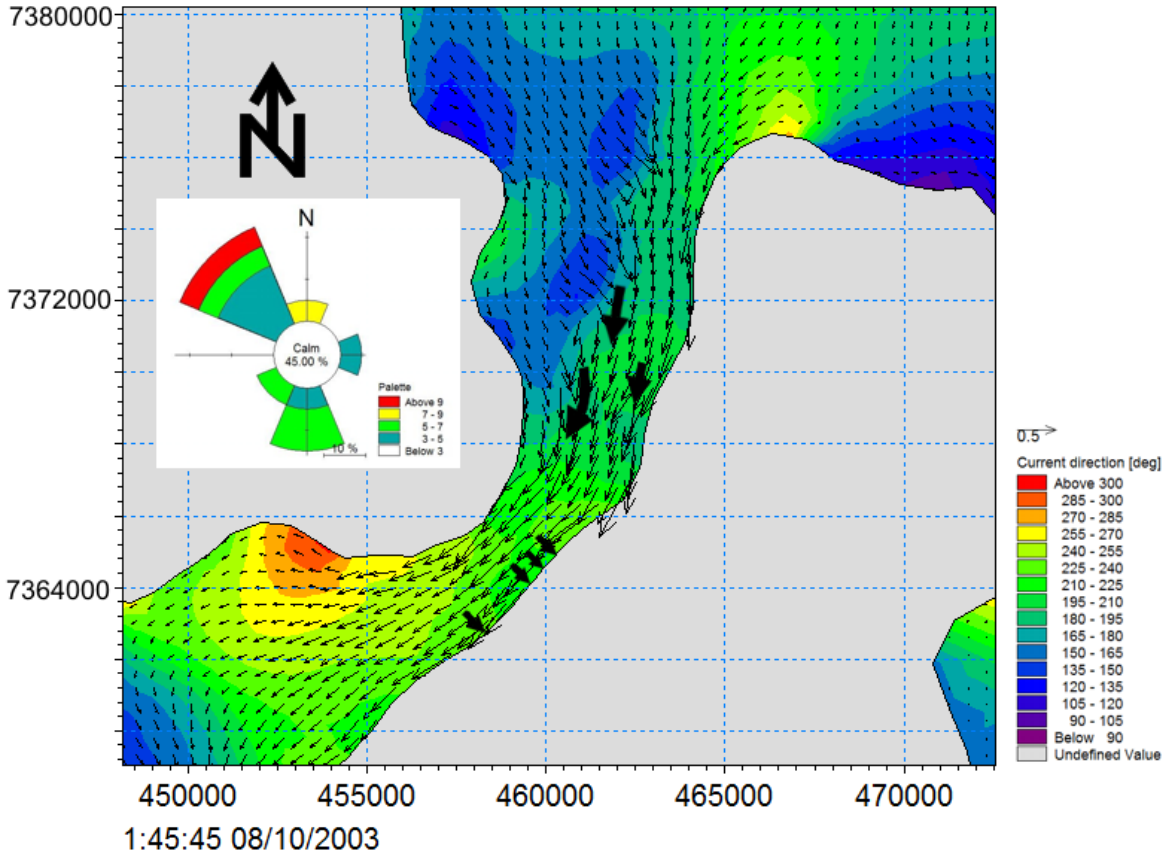


Figura 49. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo derramado pelo N/T Katina e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

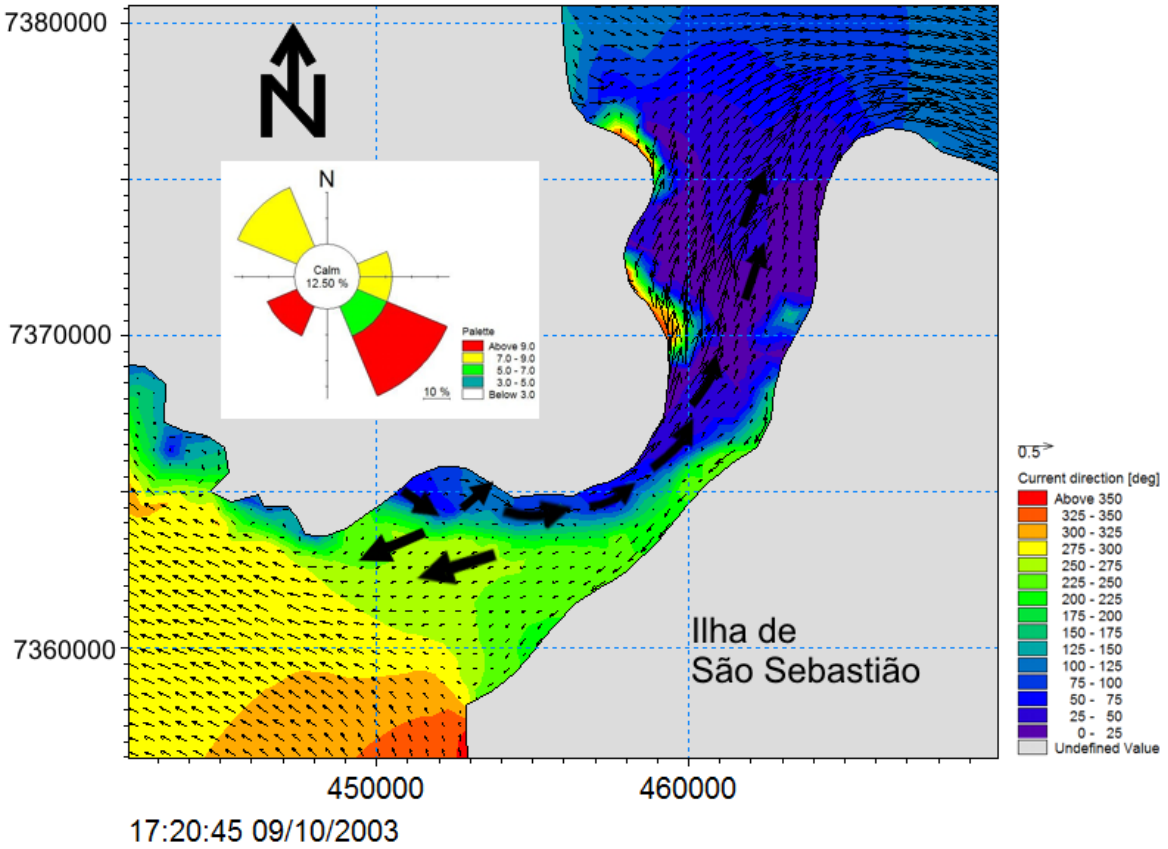


Figura 50. Comparação entre os vetores do espalhamento do óleo em vazamento de oleoduto do acidente Tebar V e um exemplo de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

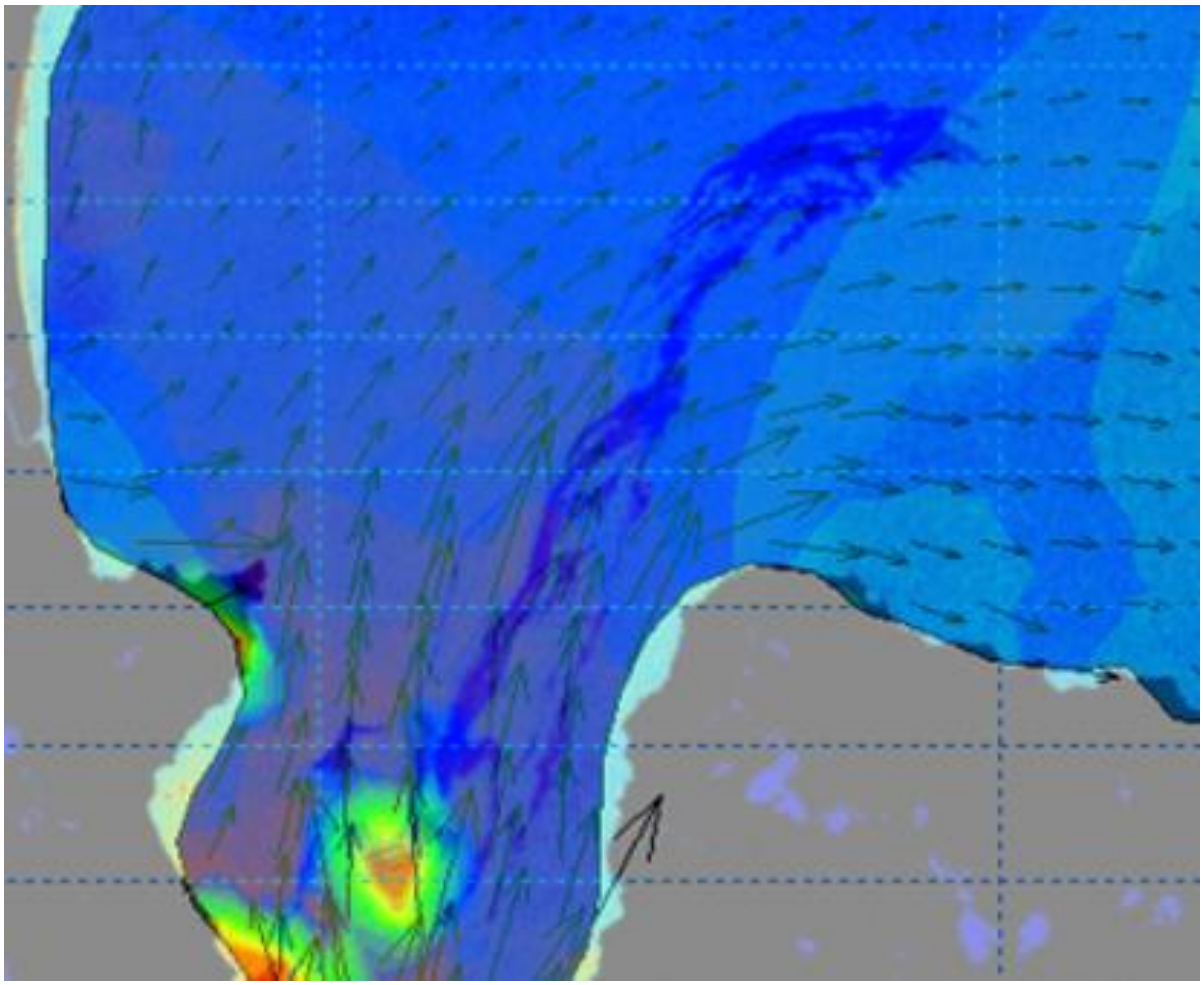


Figura 51. Comparação entre uma imagem de satélite contemporânea ao vazamento do oleoduto no acidente Tebar V e um de resultado da modelação com os vetores de direção de correntes.

7.8.3 – Cenários simulados em condições ambientais distintas

De forma a se reproduzir várias possibilidades nas formas de deslocamento de óleo proveniente de vazamentos, este estudo levou em consideração várias situações onde condições de marés e diferentes regimes climáticos compõem cenários que poderão ser utilizados como referências em caso de acidentes, com o provável deslocamento do óleo dentro do canal.

Uma avaliação imediata das condições hidrodinâmicas e meteorológicas, vigentes no momento do acidente, podem ser então comparadas com estes cenários, dando subsídios para a avaliação do futuro deslocamento do óleo e para os procedimentos iniciais de contenção, reduzindo as possibilidades do acidente atingir níveis severos de impacto ambiental na área de estudo.

Para isto foram selecionados 06 cenários, que representam as condições hidrodinâmicas predominantes nos períodos observados. As simulações que foram consideradas correspondem as seguintes situações:

- Maré de quadratura em sistemas pré-frontal.
- Maré de quadratura durante passagem de sistema frontal.
- Maré de quadratura em condição de posterior à passagem do sistema frontal.
- Maré de sizígia em sistemas pré-frontal.
- Maré de sizígia durante passagem de sistema frontal.
- Maré de sizígia em condição de posterior à passagem do sistema frontal.

Estas simulações estão apresentadas nas figuras de 51 a 56.

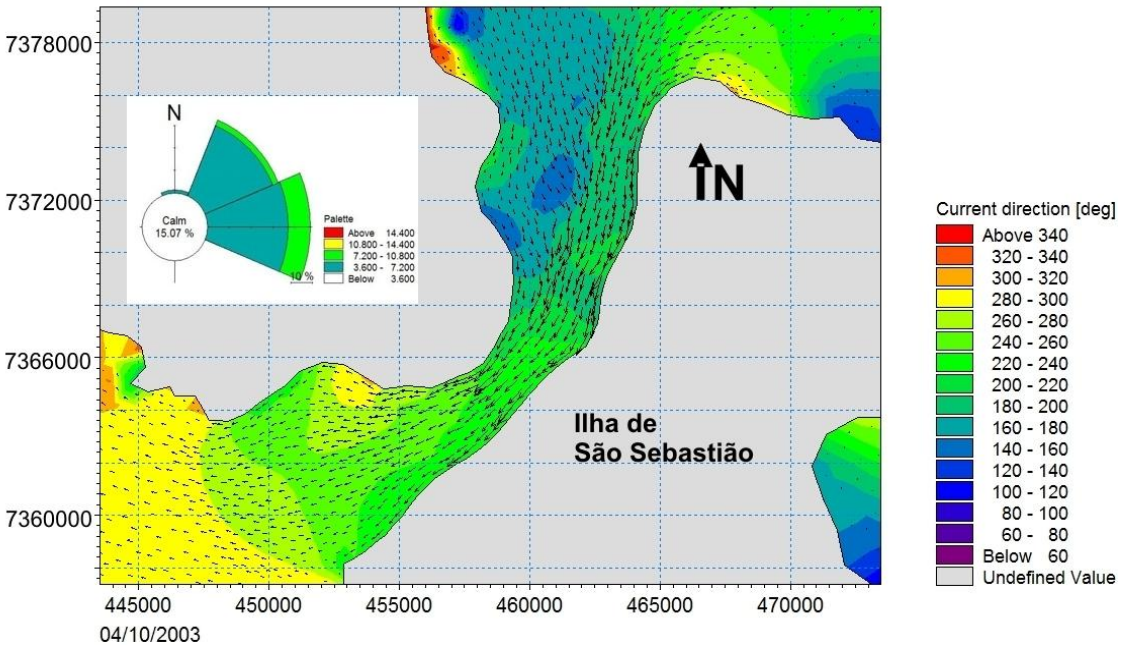


Figura 52. Condição de maré de quadratura em período de maré enchente, com atuação de sistema meteorológico em situação de pré-frontal.

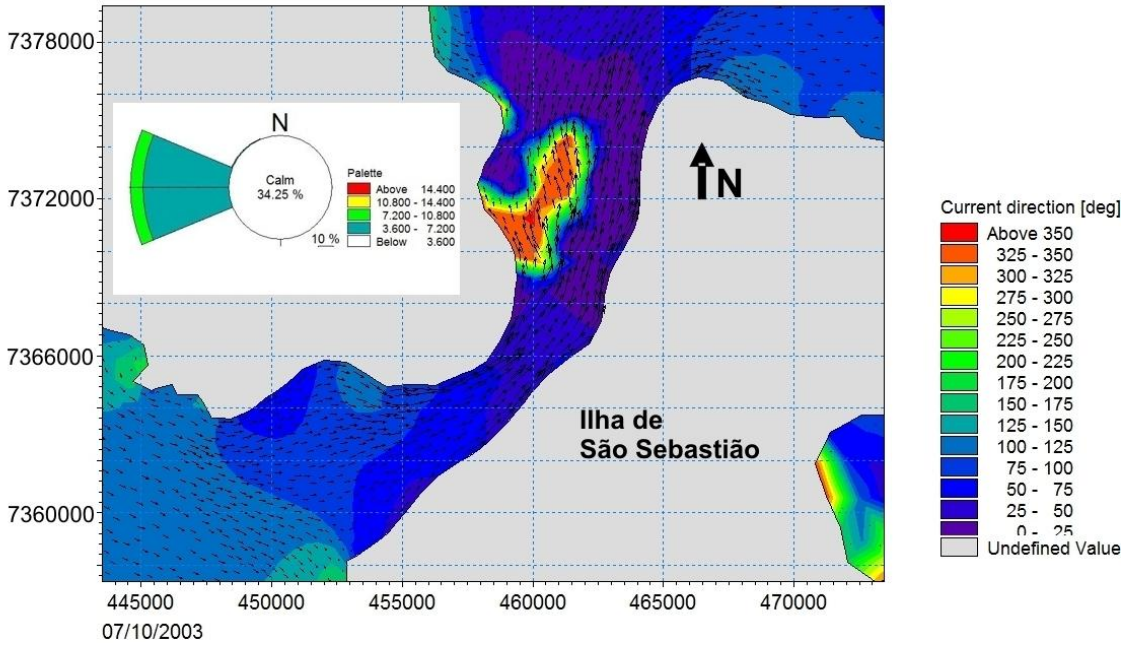


Figura 53. Condição de maré de quadratura em período de maré enchente durante a passagem de um sistema frontal.

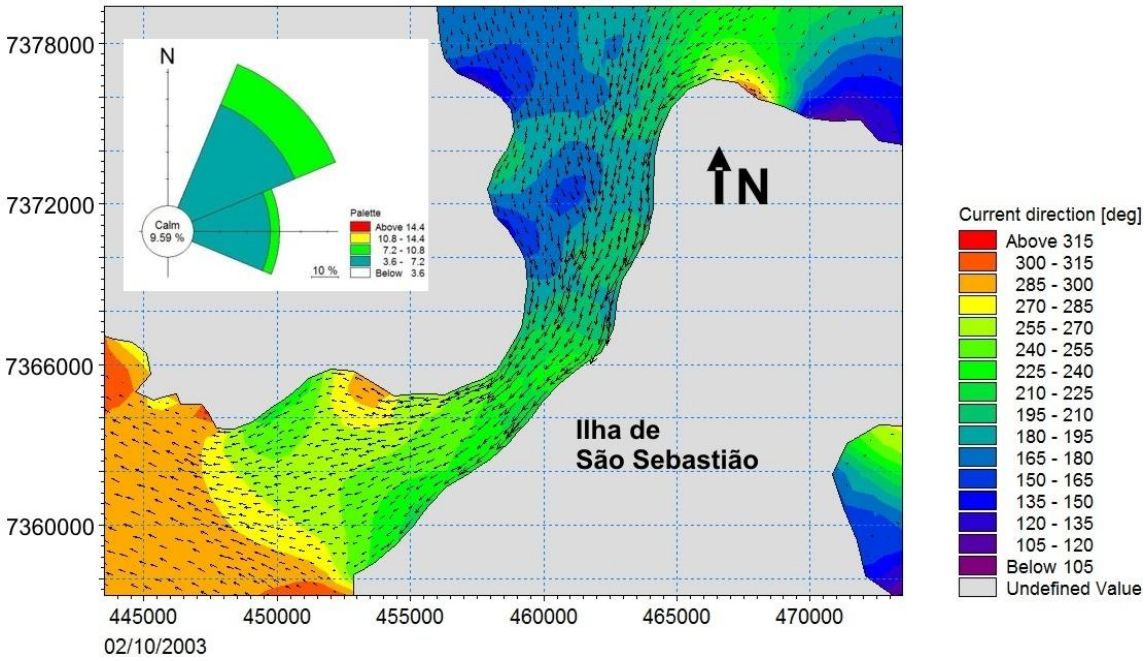


Figura 54. Condição de maré de quadratura em período de maré enchente, com sistema meteorológico em situação posterior a passagem do sistema frontal.

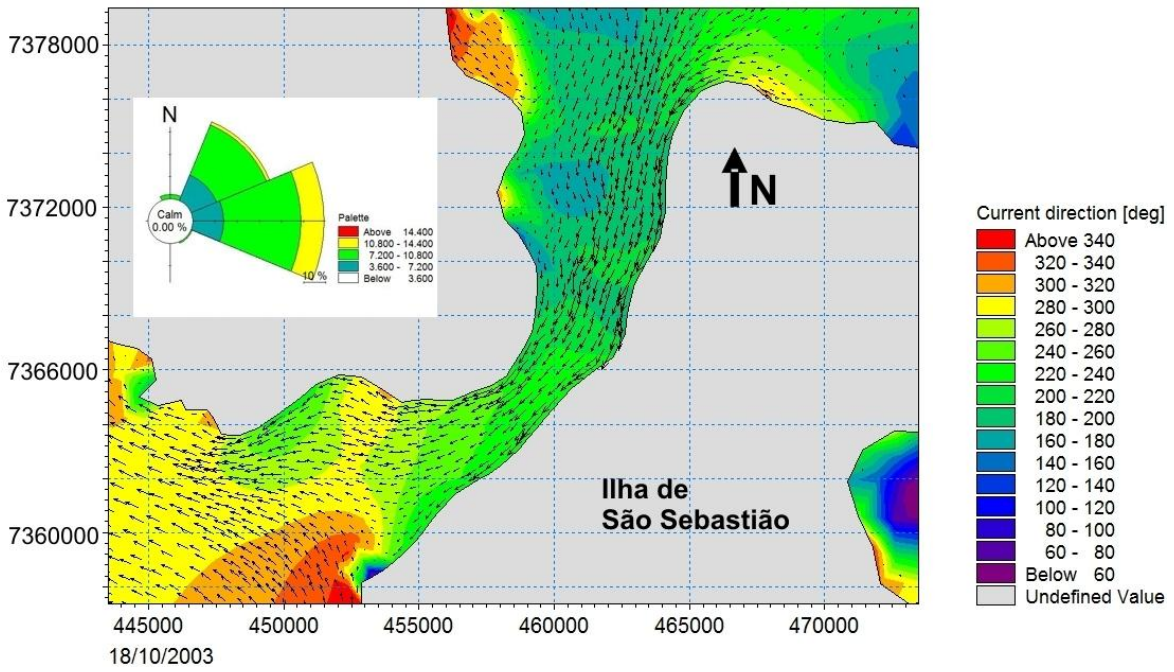


Figura 55. Condição de maré de sizígia em período de maré enchente, com sistema meteorológico em situação de pré-frontal.

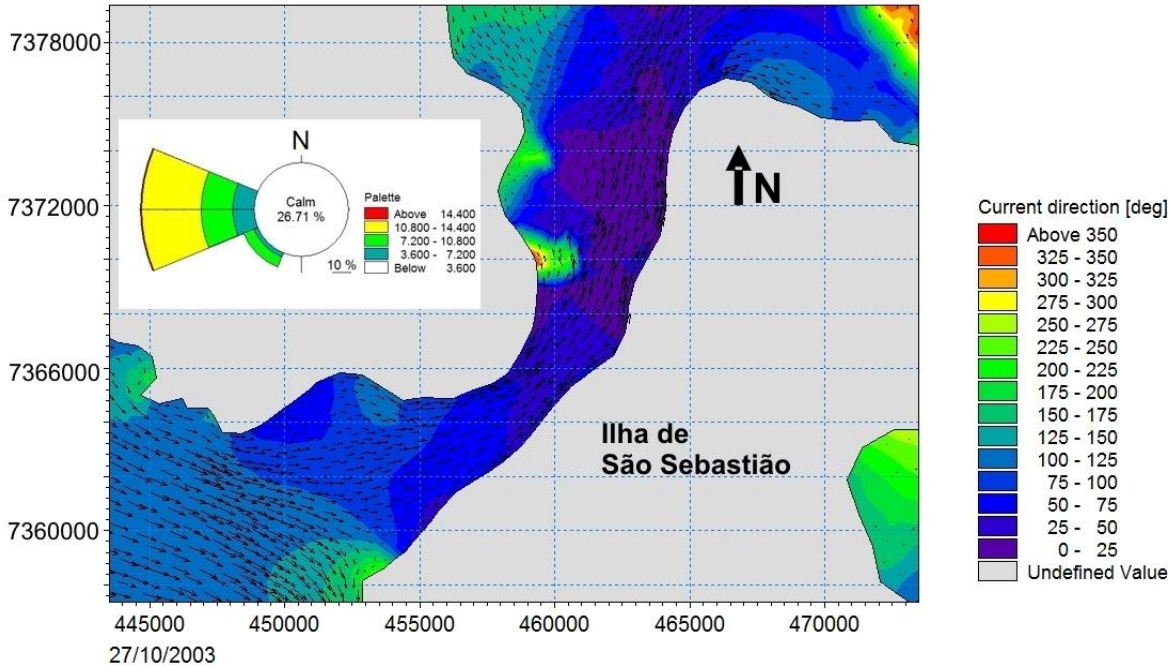


Figura 56. Condição de maré de sizígia em período de maré vazante e durante a passagem de um sistema frontal.

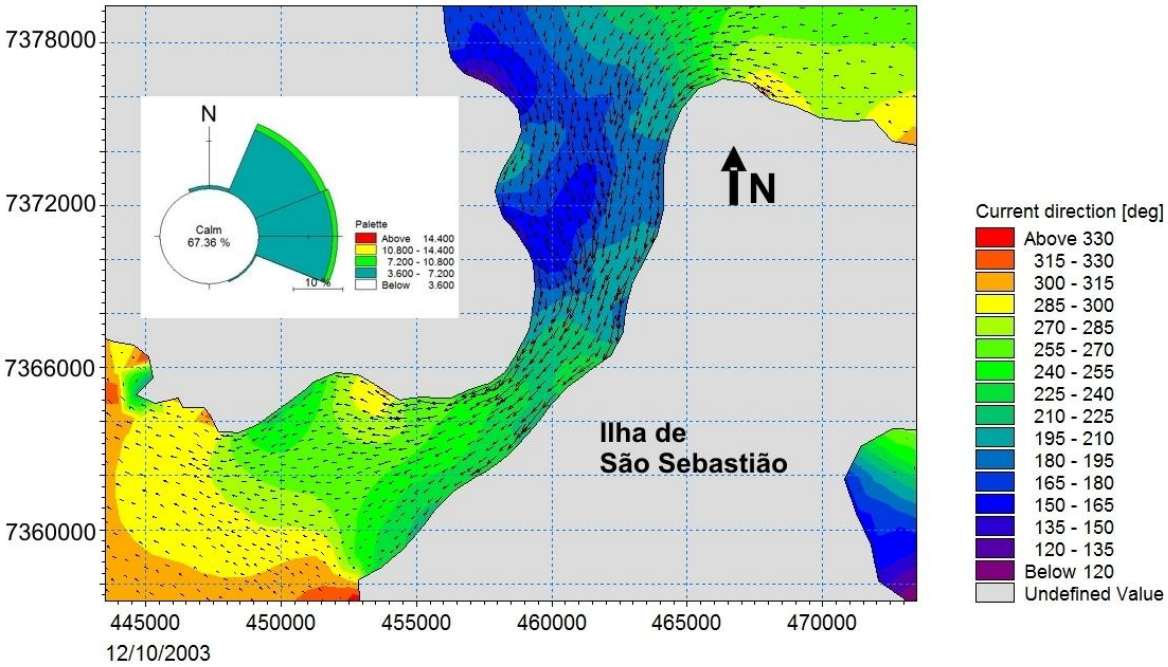


Figura 57. Condição de maré de sizígia em período de maré vazante com sistema meteorológico em situação posterior à passagem do sistema frontal.

Estes resultados evidenciam claramente que o fator que rege as condições hidrodinâmicas no canal são os regimes de ventos. É notório observar que as condições de maré do período praticamente não geram alteração no sentido das correntes, semelhante ao descrito em Castro (1990).

Soares (1994) utilizando um modelo numérico de dispersão oceânica calculou que o tempo de residência para que uma mancha de óleo, derramada a partir das porções centrais do canal em um volume de 250.000 toneladas, é de 4 dias, em condições forçadas de ventos SW. Em um estudo sobre transporte de volume d'água Paixão (2008) define condições de transporte com tempo de residência das águas do Canal de São Sebastião geralmente entre 1 a dois dias exceto em condições de correntes de baixa intensidade e com ventos preferenciais de NE onde o valor máximo foi de 7,55 dias.

Em casos de derrames devem ser observadas as condições meteorológicas do período e, assim será possível, em comparação com estes resultados, prever o sentido geral do deslocamento da mancha, antecipando sua destinação e tomando medidas adequadas, rápidas e mais eficientes de contingência.

7.8.4 – Considerações finais

Em se considerando os resultados obtidos pelas simulações pode-se qualificar positivamente estas metodologias aplicadas ao estudo do espalhamento de manchas de óleo em ambiente marítimo. Porém seria fundamental que fossem obtidas séries temporais de dados de maior extensão e de qualidade, obtidas em locais pré-determinados, de forma a serem os mais representativos possíveis das condições dinâmicas preponderantes neste tipo de ambiente.

Essas foram as maiores limitações deste trabalho, associadas às dificuldades de obtenção de dados que viessem contribuir na comparação entre os resultados do modelo e séries temporais medidas de dados físicos, tais como

correntes no interior do canal, ventos nas áreas de plataforma interna fora do domínio do canal, informações sobre o nível médio do mar nas bordas, que determinam correntes residuais nas porções interiores.

Entretanto, os resultados obtidos apresentaram-se satisfatórios, apesar das limitações que apresenta um modelo barotrópico em ambientes de grande profundidade, como o Canal de São Sebastião. As correlações obtidas demonstraram que, neste tipo de ambiente, onde o fator que predomina na formação das correntes superficiais é o vento, o Modelo computacional MIKE 21 pode ser aplicado e tem grande valia na identificação do comportamento da mancha de óleo, devido ao fato que o óleo tem seu espalhamento e impacto inicial preponderantemente nas camadas superficiais da lâmina d'água.

A opção de se avaliar diferentes cenários, em condições hidráulicas e climáticas diferentes em um período simulado de um mês teve como fator determinante o fato de que, este período em que se foi possível obter os dados temporais, teve grandes variações atmosféricas, com várias passagens de frentes frias. Sendo também condicionado pelas características geomorfológicas, os processos físicos e a resposta do meio acabam se repetindo com grande freqüência, sendo os resultados obtidos representativos da maioria das condições hidrodinâmicas da área de estudo.

Dessa forma, este trabalho contribui para que se ampliem e se consolidem as informações referentes aos aspectos ambientais da região, fornecendo subsídios para que se realizem controles ambientais mais rígidos na implementação dos métodos de gestão ambiental quantos aos impactos decorrentes de acidentes com óleo.

Um dos conceitos que regem as relações entre os impactos decorrentes de vazamento de óleo e o meio ambiente está o de valoração econômica. A valoração econômica consiste na tentativa de atribuir valores quantitativos aos bens e serviços ambientais, queiram eles estejam ou não representados no mercado.

Segundo o estudo de Campos Jr. (2003), os custos de um derrame podem ser classificados como:

- ***Custos Diretos:***

∗ *Custos de controle ou prevenção*: são todos aqueles envolvidos em ações que venham evitar a ocorrência de um derramamento;

∗ *Custos de mitigação:* são os custos decorrentes das atividades de remoção do derrame e recuperação do meio ambiente.

∗ *Custos de Compensação:* ocorrem quando existem prejuízos geradas pelo para os diversos ramos da sociedade devido à perda, mesmo que temporária, do bem natural os quais demandam uma compensação pelos prejuízos sofridos.

- ***Custos indiretos:***

∗ *Custos de Degradação:* são aqueles causados pelas externalidades geradas pelo derrame, ou seja, danos afligidos a terceiros.

Diante dessas considerações, é fundamental que se ampliem e avancem os estudos e as atitudes na forma de monitoramento e na elaboração de diagnósticos ambientais em derrames de óleo, prevendo e gerenciando adequadamente os riscos da atividade petroleira em ambiente marinho.

Dentre os métodos preventivos estão as análises potenciais de risco, as ações para reduzira esses riscos, elaboração de modelos de sensibilidade e vulnerabilidade ambiental com base em técnicas de sensoriamento remoto e estudos de previsão de impacto por modelagem numéricas e a conseqüente elaboração de diversos cenários que componham as condições ambientais características e predominantes nas áreas de estudo.

8. CONCLUSÕES

Os estudos hidrodinâmicos através de modelagem numérica têm evoluído muito na sua precisão, assim como nas diferentes formas de aplicações em estudos ambientais. Atualmente existem vários módulos com soluções matemáticas que permitem uma grande aproximação das condições reais de fenômenos com transporte de material particulado em suspensão, sedimentos de fundo, e inclusive manchas de óleo, que é o foco deste trabalho.

Derrames de óleo são acidentes que têm sido recorrentes no Canal de São Sebastião, região portuária onde aporta e se transporta todo o petróleo para o Estado de São Paulo. Deste fato remonta-se à necessidade de estudos cada vez mais detalhados sobre o comportamento desse óleo em meio marinho.

Este trabalho teve como objetivo a aplicação de modelação numérica através do Software MIKE 21 do DHI, utilizando-se o modulo hidrodinâmico e comparando seus resultados com descrições de antigos acidentes, de forma a evidenciar as relações entre os resultados obtidos na modelagem e as informações reais dos vazamentos através de descrições no acompanhamento do deslocamento da mancha.

Esta tese ampliou o conhecimento sobre o comportamento do óleo no mar na região de estudo, e atestou a viabilidade da utilização desta metodologia, fornecendo subsídios para estudos de prevenção e mitigação do impacto causado, permitindo uma atuação mais rápida e eficiente nos procedimentos de contenção, reduzindo as áreas afetadas e permitindo a preservação dos segmentos da costa mais vulneráveis.

Quanto à abordagem ligada ao geoprocessamento, os resultados mostram que a utilização de imagens TM/LANDSAT, apesar de não ser de uso comum nos estudos de dispersão de manchas de óleo em ambiente marinho, pode ser usada com qualidade. A despeito das limitações geradas pelo alto tempo do ciclo de passagem e da possibilidade de cobertura de nuvens, quando se obtém uma

imagem, como a trabalhada neste estudo, é possível realizar um excelente trabalho na caracterização da trajetória da mancha e no espalhamento superficial.

Seu uso foi bastante produtivo, não apenas pela demonstração das formas como o óleo se desloca e espalha na área, como pela validação do modelo e também na confirmação da excelência das descrições feitas no croqui de acompanhamento da mancha do derrame denominado “Operação TEBAR V” (CETESB,1996).

Os resultados mostram um forte controle dos ventos no Canal, condicionando o deslocamento do óleo, variando o sentido para NE e SW, conforme o regime meteorológico vigente. As comparações entre o modelo e os vetores reais realçam as pequenas nuances hidrodinâmicas, que fazem com que o óleo atinja algumas áreas e não outras, com maior ou menor intensidade.

Pequenos vazamentos podem ser agentes de maior impacto do que grandes vazamentos, dependendo da localização do acidente e das condições hidrodinâmicas, pois podem atingir locais mais sensíveis e cujos efeitos sejam danosos ao meio.

Um conceito que também deve estar sempre em evidência é o da identificação das áreas em que os efeitos de vazamentos de óleo contínuos e em pequenos volumes ocorrem. Dentre os resíduos gerados inclui-se a água oleosa provenientes de navios sem lastro segregados, que é diretamente lançada no ambiente constitui-se em um dos resíduos mais preocupantes em termos ambientais.

Dessa forma todo estudo que venha contribuir e ampliar o conhecimento deste processo está de acordo com as regulamentações do CONAMA, que prevê a utilização de modelagem numérica como procedimento para monitoramento de derrames de óleo, pois a limpeza de ambientes afetados por derramamentos pode ter seu custo reduzido entre 15 a 20% com o uso do método (Barret & Curtis 1992).

Deve-se ressaltar que a falta de dados de séries temporais mais longas, e as conseqüentes dificuldades inerentes aos processos de calibração e validação do modelo, fazem com que seja necessário afirmar as necessidades da ampliação de estudos aplicados de caráter ambiental, principalmente pela importância da região estudada. Evidencia-se a necessidade da implementação de uma sistematização nos estudos e na produção de informações cada vez mais precisas, que auxiliem de forma eficaz os procedimentos de contingência dos vazamentos.

Com esta modelagem hidrodinâmica implementou-se um sistema que permite fazer uma previsão das correntes de maré e induzidas pelo vento dentro do Canal de São Sebastião e conseqüentemente criou-se um banco de dados para se avaliar as condições futuras em caso de novos acidentes, obtendo uma aproximação do comportamento do óleo.

Como objetivos futuros este estudo propõe a aplicação de ferramentas computacionais mais avançadas, onde possam ser avaliadas as variações nas concentrações do óleo na superfície ao longo do tempo e seus espalhamento dentro do sistema, tais como o módulo específico de análise de derrames, como o SA (Spill Analysis) do programa MIKE 21, que pode ampliar ainda mais o conhecimento nesta área de estudo e estender sua aplicação a outras áreas que estejam sujeitas a este tipo de acidente.

09 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, R.C.L. & AMARO, V.E. – 2007 – Aplicação do sensoriamento remoto e do sistema de informações geográficas no monitoramento de derramamento de óleo na região costeira do pólo petrolífero de Guamaré/RN. [on line].
http://www.iepa.ap.gov.br/temp1/IEPA/CPAq/PETRORISCO/OUTROS/RenataAlbuquerque_resumo_Petrorisco_RN.pdf

ALFREDINI, P. – 2002 – Projeto de preparo de base batimétrica digitalizada para a costa do estado de São Paulo. Laboratório de Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Convênio DAEE-USP.

ALMEIDA, F.F.M. – 1964 – Fundamentos geológicos do relevo paulista. In: Instituto Geográfico e Geológico. Geologia do Estado de São Paulo. São Paulo: IGG p.167-263 (IGG Boletim 41).

ALVES, F.N.A. – 2006 - Estudo do transporte de manchas de óleo por um modelo lagrangeano de partículas na Bacia de Pelotas. Dissertação de mestrado. FURG. 161p.

ARAÚJO, R.N. - 2005 - A propagação e deformação das ondas, a dinâmica do transporte litorâneo e a evolução de linhas de costa em localidades do litoral paulista. Tese de Doutorado. Laboratório de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 438p.

ASSAD, L.P.F. - 2000 - Circulação no Canal de São Sebastião (SP) durante o inverno: estudos numéricos. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 138p.

BAPTISTELLI, S.C. – 2003 – Modelação numérica da circulação de correntes de maré induzidas pelo vento aplicada a estudos de disposição oceânica de efluentes na Praia Grande – São Paulo. Dissertação de mestrado.

Laboratório de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 168p.

BARCELLOS, R.L.B. – 2000 – Processo sedimentar atual e a distribuição da matéria orgânica sedimentar (C, N e S) do Canal de São Sebastião e plataforma continental adjacente. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 187 p.

BARRETT, E.C., CURTIS, L.F. 1992. Introduction to Environmental Remote Sensing. 3ª ed. Chapman e Hall.

BENTZ, C.M.; POLITANO, A.T.; GENOVEZ, P. – 2005 - Monitoramento ambiental de áreas costeiras e oceânicas com múltiplos sensores orbitais. Revista Brasileira de Cartografia No 57/01. (ISSN 1808-0936)

BÍCEGO, M.C. – 1988 – Contribuição ao estudo de hidrocarbonetos biogênicos e o petróleo no ambiente marinho. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 156p.

BÍCEGO, M.C. – 1996 – Alguns aspectos sobre a degradação fotoquímica e a determinação de hidrocarbonetos do petróleo no ambiente marinho. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto de Química. 112 p.

BONETTI FILHO – 1995 – Transporte de sedimentos por suspensão nas proximidades da Barra de Cananéia – SP. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2v. 260p.

BREKKE, C. & SOLBERG, A.H.S. – 2005 – Oil spill detection by satellite remote sensing. Remote sensing of Environment 95. p1-13.

CABRAL, A.P.; GHERARDI, D.F.M.; BAPTISTA, E.; MUEHE, D.; NICOLODI, J.L.; CARVALHO, L.R. – 2007 - Cartas de sensibilidade ambiental à poluição por óleo: bacias de Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba. Anais XIII

Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3785-3788.

CAMPANHA, G.A.C.; ENS, H.H.; PONÇANO, W.L. – 1994 – Análise morfotectônica do Planalto do Juqueriquerê, São Sebastião. Revista Brasileira de Geociências. 24(1): 32-42.

CAMPOS JUNIOR, J.J. F.. Valoração econômica de danos ambientais: o caso dos derrames de petróleo em São Sebastião. 2003. 128 p. Tese (Doutorado em planejamento de sistemas energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CASTRO, B.M. – 1985 - Subtidal response to wind forcing in the South Brazil bight during winter. Tese de Doutorado. University of Miami. 211p.

CASTRO, B.M. - 1990 - Wind driven currents in the Channel of São Sebastião: Winter 1979. Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 38(2): 111-132.

CASTRO, B.M. – 1996 – Correntes e massas de água da Plataforma Continental Norte de São Paulo. Tese de Livre Docência. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 248p.

CASTRO, B.M.; MIRANDA, L.B. - 1998b - Hidrogaphic properties in the São Sebastião Channel (SP): dauly variations observed in March, 1980. Revista Brasileira de Oceanografia. 46(2) 111-123.

CETESB – 1996 – Dinâmica dos vazamentos de óleo no Canal de São Sebastião – São Paulo. Relatório técnico. v 1 e 2, 42 p.

CETESB – 2007b – [on line] http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/impactos/ecossistemas.asp (visto em 30/07/2007).

COELHO, A.L. - 1997 - Massas d'água e circulação no Canal de São Sebastião (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 244p.

COMISSÃO MIUNDIAL INDEPENDENTE SOBRE OS OCEANOS – 1999 – O Oceano: nosso futuro. Relatório. 248p.

CONTI, L.A. - 1998 - Aplicação de técnicas de geoprocessamento na caracterização de aspectos morfo-sedimentares no Canal de São Sebastião - Litoral Norte do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 184p.

CONTI, L.A. - 2004 - Geomorfologia da plataforma continental do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 210 p

CRUZ, O. - 1974 - A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba. tese de doutorado, Instituto Geografia USP. Série de teses e monografias, nº 11, 181p.

DHI – 1998 – Coastal hidraulic and oceanography. Tidal analysis and prediction module MIKE 21, Release 2.7, user guide. Danish Hidraulic Institute.

DHI – 2008 – Coastal hidraulic and oceanography. Hydrodinamic Module. MIKE 21, Reference manual and scientifc documentation.Danish Hidraulic Institute.

DiPIETRO, N.D., HUH, C., COX, R.G. -1978 - The Hydrodynamics of the Spreading of One Liquid in the Surface of Another, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 81, Part 3, pp. 529 – 549.

DIRETORIA DE VIAÇÃO – 1941 – Obras de melhoramentos dos portos de São Sebastião e Ubatuba – Secretaria de Estado dos Negócios da Viação e obras Públicas do Estado de São Paulo.

EMILSSON, I - 1961 – The shelf and coastal waters of southern Brazil. Boletim do Instituto Oceanográfico. São Paulo, 7(2) 101-112.

EMILSSON, I - 1962 - As correntes marítimas no Canal de São Sebastião. Ciência & Cultura, nº 14, v.4, p. 269-270.

ESA – 2002 – Agência Espacial Européia, Informação Local Portugal. http://www.esa.int/esaCP/ESA27F7708D_Portugal_1.html

FANNELOP, T.K, WALDMAN, G.D. – 1971 - *Dynamics of Oil Slicks*, AIAA Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 506 – 510.

FAY, J.A. -1969 - The spread of oil slicks on a calm sea. Oil on the sea. Plenum, New York, pp. 53 – 64.

FINGAS, M.F. & BROWN, C.E. – 1997 – Review of oil spill remote sensing. Spill& Tecnology Bulletin. V. 4, nº4 p.199-208

FISCHER H.B., LIST E.J., KOH R.C., IMBERGER J., N.H. BROOKS – 1979 - Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, New York, 483 p.

FONTES, R. F.C. - 1995 - As correntes no Canal de São Sebastião. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 159 p.

FORTIS, R.M. – 2005 - Modelagem computacional da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR Petrobrás. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 181p.

FRANCO, A.S. – 1988 – Tides: fundamentals, analysis and predction. Publicação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo.

FURTADO, V.V.- 1978 - Contribuição ao estudo da sedimentação atual no canal de São Sebastião. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2v.

FURTADO, V. V.; GALLO, J.; LUEDEMANN, E.F. - 1986 - Análise do comportamento de correntes através de corpos de deriva no Canal de São Sebastião, São Paulo. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1. Porto Alegre, 1987. Anais. Porto Alegre, ABEQUA. p.93-102.

FURTADO, V.V.; BÍCEGO, M.C. ; WEBER, R.R. – 1987 - Modelo de dispersão de óleo na região do canal de São Sebastião. In: Simpósio sobre Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira. Cananéia, São Paulo. Volume 2, p. 371-388.

FURTADO, V.V.F. ; MAHIQUES, M.M. ; TESSLER, M.G. – 1992 – Utilização de feições topográficas submersas na correlação de paleoníveis marinhos: uma avaliação. In: 3º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Anais. ABEQUA Belo Horizonte, p.175-186.

FURTADO, V.V.F. ; BONETTI FILHO, J. ; CONTI, L.A. - 1995 – paleo river valley morphology and sea level changes at the southeastern brazilian continental shelf. In: regional conference on Global Changes: Brazilian Academy of Science, Institute for advances studies – USP, São Paulo. P.15-31.

GESAMP - 2001 - Protecting the Oceans from Land-based Activities. Landbased Sources and Activities Affecting the Quality and Uses of the Marine, Coastal and Associated Freshwater Environment. Rep. Stud. GESAMP No. 71, pp. 162.

HARARI, J. ; MESQUITA, A.R. – 2001 – Tábua das marés: Ubatuba, Santos e Cananéia. Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico. (48).

HEAPS, N.S. – 1978 – Linearized vertically-integrated equations for residual circulation in costal seas. Dt. Hydrogr. Z. 31:147169.

HOULT, D.P. - 1972 - Oil Spreading on the Sea, Annual Review of Fluid Mechanics. p. 341 – 367.

IHERING, I.Von - 1897 - A ilha de São Sebastião. Revista do Museu Paulista. São Paulo. 2:145 - 148, (Geologia).

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)– 1980 – Curso de treinamento: introdução às técnicas de sensoriamento remoto e aplicações. Material didático IX 1.

INPE - INFOCLIMA. 2003. Grupo de Previsão Climática. Ano 10 Volume 10. http://infoclima1.cptec.inpe.br/~rinfo/infoclima/out_2003.shtml.

IPIECA – 1991 – Guidelines on Biological Impacts of Oil Pollution. IPIECA Report Series, Volume1, International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, London. 15pp. [on line]: http://www2.petrobras.com.br/meio_ambiente/portugues/preservacao/pre_mar_estrategia.htm

KAMPEL, M. & AMARAL, S. – 2001- Imagem TM/LANDSAT na detecção de mancha de óleo na Baía da Guanabara – RJ – Brasil. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Paraná. Anais. INPE. p.801-809.

KUTNER, A.S. - 1969 - A sedimentação no canal de São Sebastião. Estudo realizado para a firma Brasconsult, destinado ao projeto básico do Porto de São Sebastião. SP.

KUTNER, A.S. -1976 - Levantamentos sedimentológicos de apoio na pesquisa e reconhecimento de áreas portuárias. *In:* Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1. vol. 2. Anais. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Rio de Janeiro. p. 47-65.

KVINGE, T. - 1967 - On the specials currents and water level variations in the Channel of São Sebastião. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 16(1):23-38

LEANDRO, R.P. - 1999 - Climatologia das águas do Canal de São Sebastião (SP). Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 162p.

LOEFGREN, A. - 1893 - Os sambaquis. Boletim da Comissão Geográphica e Geológica. São Paulo. (9):1-91.

MESQUITA A.R. & HARARI, J. – 1983 - Tides and Tide Gauges of Cananéia and Ubatuba. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. SP. (11): 1 - 14

MEHDI, N. – 2005 - Algoritmo Adaptativo Aplicado à Modelagem de Transporte de Óleo. Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro. 83 p.

MESQUITA A.R. & HARARI, J. – 2003 - Continental Shelf Research. Volume 23, Issues 11-13, July-August, Pages 1227-1237

MILANELLI, J. C. C. - 2003 - Biomonitoramento de costões rochosos instrumento para avaliação de impactos gerados por vazamentos de óleo na região do Canal de São Sebastião - São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 293p.

MIRANDA, L. B.; CASTRO FILHO, B. M. - 1995 - Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião. Publicação Especial do Instituto Oceanográfico, (11): 1-9.

NRC (National Research Council) – 2003 – Oil in the sea III. Inputs, fate and effects. The National Academy Press, Washington DC, 280p.

OCCHIPINTI, A.G. – 1963 – Climatologia dinâmica do litoral sul brasileiro. Contribuições avulsas do Instituto Oceanográfico. Oceanografia física, n.3. São Paulo.

OLIVEIRA, H. A. - 2009 - Aplicação do modelo numérico hidrodinâmico delft3d na Baía de Guanabara. Monografia de conclusão de curso de oceanografia. Unimonte. Santos, Estado de São Paulo.

OLIVEIRA, R.F. & MEYER, J.F.C.A. – 2006 - A elaboração de cenários de acidentes com derrame de óleo na região do Terminal de Angra dos Reis, RJ: modelagem, análise e simulação computacional. TEMA Tend. Mat. Apl. Comput., 7, No. 1 (2006), 101-108.

O'NEIL, R.A., NEVILLE, R.A. and THOMPSON, V. (1983). The Arctic Marine Oilspill Program (AMOP) Remote Sensing Study, Environment Canada Report EPS 4-EC-83-3, Ottawa, Ontario, 257 p.

PAIXÃO, S.V. – 2008 – Transporte de volume e condições hidrográficas no Canal de São Sebastião. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo.188p.

PALADINO, E.E. – 2000 - Modelagem matemática e simulação numérica de trajetórias de derrames de petróleo no mar. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 110p.

PAVLAKIS, P.; SIEBER, A.; ALEXANDRY, S. – 1996 -Monitoring Oil-Spill Pollution in the Mediterranean with ERS SAR. [online]. ESA EOQ52, n.52, 5p, June 1996. <http://esapub.erin.esa.it/eoq/eoq52/pav52.htm>. Mar. 1999.

PETERSON, R.G. ; L. STRAMMA, 1990 - Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26, 1-73.

POFFO, I. R.F. - 2000 - Vazamentos de óleo no litoral de São Paulo: análise histórica (1974-1999). Dissertação de Mestrado. PROCAM: Programa de Pós-Graduação em ciência ambiental. USP. São Paulo. 175p.

POFFO, I.R.F.; XAVIER, J.C.M.; SERPA, R.R. 2001. A História dos 27 anos de Vazamento de Óleo no Litoral Norte do Estado de São Paulo (1974-2000*). Revista Meio Ambiente Industrial no 30*, p.98-104.

POTTER, M.C.; WIGGERT, D.C. – 2004 - Mecânica dos fluidos. Ed. Thomson. 688p.

RODRIGUES, M.; FURTADO, V.V.F.; TESSLER, M.G.; MAHIQUES, M.M. - 2003 - Atlas sedimentológico da plataforma continental do Estado de São Paulo. Texto explicativo e mapas. Instituto Oceanográfico USP/ FUNDESPA.

SANT´ANNA NETO, J. L. – 1990 – Ritmo climático e a gênese das chuvas na zona costeira paulista. Dissertação de mestrado. FFLCH/USP. São Paulo.

SANT'ANNA NETO*,* J. L. – 2005 - Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro*.* Revista Brasileira de Climatologia*,* Rio de Janeiro, v.1, p. 43-60.

SANTOS, E.O. – 1965 – Características climáticas. In: Azevedo,A. org. A baixada santista – aspectos geográficos. São paulo, Ecusp. P. 95-150.

SANTOS, S.L.C. – 2005 – Um modelo de banco de dados geográficos para a resposta ao derramamento de óleo baseado na vulnerabilidade e sensibilidade do litoral paulista. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 216p.

SERPA, R.R.; - 1999- . Gerenciamento de Riscos Ambientais. Curso de Análise de Riscos Ambientais. Apostila. CETESB, SP.

SHEN, H. T. e YAPA, P. D. – 1988 - Oil Slick Transport in Rivers. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, N0 5, pp 529-543.

SILVA, L.S. - 1995 - Condições oceanográficas no Canal de São Sebastião e região costeira adjacente: variações sazonais entre fevereiro de 1994 e março de 1995. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 128p.

SILVA, L.S. - 2001 - Estudo numérico da circulação e da estrutura termohalina no Canal de São Sebastião. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 256 p

SILVA, G.C. - 2003 - Análise comparativa de metodologias de modelagem numérica da propagação de ondas aplicada à engenharia costeira e portuária. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 277 p.

SILVA, P.R. – 2004 -Transporte marítimo de petróleo e derivados na costa brasileira: estrutura e implicações ambientais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Rio de Janeiro. 148 p.

SILVA, D.A.M. – 2005 –Avaliação da contaminação por petróleo no Canal de São Sebastião, São Paulo: marcadores geoquímicos e metabólitos de compostos aromáticos. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo, 137p.

SOARES, I.D. - 1994 - Um modelo numérico de dispersão oceânica: aplicações ao Canal de São Sebastião e adjacências. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 126p.

SOUZA,C.R.G. – 1990 - Considerações sobre os Processos Sedimentares Quaternários e Atuais na Região de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado

de São Paulo, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, USP, Brasil. 334p.

SOUZA, C.F.; CASTRO, A.F.; AMARO, E.A.; VITAL, H. – 2005 - Sistema de informações geográficas para o monitoramento de derrames de óleo no litoral norte do Estado do Rio Grande do Norte. Anais do 3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.

TAUNAY, A.d'E. - 1922 - Collectanea de mappas da cartographia paulista antiga abrangendo nove cartas, de 1612 a 1837, reproduzidas da collecção do Museu Paulista e acompanhadas de breves commentarios por Affonso d'Escragnolle Taunay. Vol. I. São Paulo, Companhia Melhoramentos de S. Paulo. 7p. + 9 mapas.

TOMMASI, L. R. – 1994 –Diagnóstico ambiental oceãnico e costeiro das regiões sul e sudeste do Brasil. Rio de Janeiro: FUNDESPA/PETROBRÀS.v9/10v.: Poluição.

UNEP (United Nations Environment Programme) – 1991 – Determinations of petroleum hydrocarbons in sediments. Reference methods for marine pollution studies nº20. 97p.

VEMA, P. ; WATE, S. T. ; DEVOTTA, S. – 2008 - Simulation of impact of oil spill in the ocean – a case study of Arabian Gulf. Environ Monit Assess. 146:191–201.

VETHAMONY, P. ; SUDHEESH, K. , BABU, M.T., JAYAKUMAR, S. , MANIMURALI, R., SARAN A.K. , SHARMA, L.H. , RAJAN, B., SRIVASTAVA, M. - 2007.Trajectory of an oil spill off Goa, eastern Arabian Sea: Field observations and simulations. Environmental Pollution 148: 438 – 444.

WHEELER, R. B. – The fate of pretroleum in the marine environment. Exxon Research Company. Special Report, 31 p.

WILMOTT, C.J. – 1981- On the Validation Models. Physical Geography, vol. 2, p. 184-194.

ZANARDI, E. - 1996 - Hidrocarbonetos no Canal de São Sebastião e na plataforma interna adjacente - influência do derrame de maio de 1994. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo, 112p.