

FERNANDO ROVERSI

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL DE DERRAMES DE ÓLEO EM
CORPOS D'ÁGUA: UM ESTUDO DE CASO NA
REGIÃO DO PORTO DE SANTOS**

Monografia apresentada à Comissão de Trabalho de Formatura do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como parte das exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de Formatura no ano letivo de 2009.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

Rio Claro – SP

2009

FERNANDO ROVERSI

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL DE DERRAMES DE ÓLEO EM
CORPOS D'ÁGUA: UM ESTUDO DE CASO NA
REGIÃO DO PORTO DE SANTOS**

Orientador: Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

Monografia apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Rio Claro (SP), para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro – SP

2009

628.092 Roversi, Fernando
R873m Modelagem matemática e simulação computacional de
derrames de óleo em corpos d'água: um estudo de caso na
região do Porto de Santos / Fernando Roversi. - Rio Claro :
[s.n.], 2009
59 f. : il., figs., gráfs., tabs., mapas + CD-ROM

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia
Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Samuel Conceição de Oliveira

1. Engenharia ambiental. 2. SisBAHIA. 3. ADIOS2. 4.
Impacto ambiental. 5. Derramamento de óleo. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A Deus, por todas as oportunidades apresentadas em minha vida e principalmente pela saúde física e mental que me possibilitou chegar até aqui.

A meus pais, Ariovaldo e Lúcia, e meus irmãos, Luciano e Graziela, por todo apoio durante minha formação.

À minha namorada Bruna, por todo seu carinho e companheirismo em todos os momentos que passamos juntos.

A todos meus amigos, pelos momentos de diversão que sempre vivenciamos e pela camaradagem que mantemos.

À República Tississinguabe.

Ao Prof. Samuel Conceição de Oliveira pela orientação e correção deste projeto.

Ao Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman pela co-orientação deste trabalho, pelo treinamento ministrado na UFRJ e por todos os esclarecimentos sobre o SisBAHIA.

Às consultorias ambientais ASA - South America e Waterloo Brasil pela oportunidade de estágio durante minha formação.

Ao PRH-05 por financiar todas as despesas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho e pelos cursos fornecidos.

E a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para esse desfecho.

*“Quando verificares com tristeza que não sabes nada,
terás feito o primeiro progresso no aprendizado.”*

(Prof. Jigoro Kano)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar estudos de modelagem matemática e simulação computacional de derrames de óleo em corpos d'água. Para isso foi realizado um estudo de caso na região do Porto de Santos utilizando os *softwares* SisBAHIA e ADIOS2 para a simulação de diferentes cenários hipotéticos de derramamento de óleo na superfície d'água, visando obter informações que contribuam para a redução dos possíveis impactos ambientais que possam ser causados por tais acidentes. Os resultados gerados nas diferentes simulações mostraram que os dados obtidos podem ser extremamente úteis para subsidiar a elaboração de planos de mitigação, o mapeamento de áreas de risco ou ainda a proposição de estratégias emergenciais em casos de acidentes reais, configurando a modelagem e a simulação como importantes e modernas ferramentas para o planejamento e gestão ambiental.

Palavras-chave: modelagem matemática, simulação, derrame de óleo, SisBAHIA, ADIOS2 e Porto de Santos.

ABSTRACT

The objective of this work is to accomplish studies of mathematical modeling and computational simulation of oil spills in water bodies. For this reason, a case study in the region of the Port of Santos was developed using the softwares SisBAHIA and ADIOS2 for the simulation of different hypothetical scenarios of oil spilling on the surface of water, aiming to obtain information that contribute to the reduction of the possible environmental impacts that can be caused by such accidents. The results generated in the different simulations had shown that the obtained data can be extremely useful to subsidize the elaboration of mitigation plans, the mapping of risk areas or even the proposal of emergencial strategies in cases of real accidents, configuring the modeling and the simulation as important and modern tools for the environmental planning and management.

Keywords: mathematical modeling, simulation, oil spill, SisBAHIA, ADIOS2 and Port of Santos.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Significado dos termos da equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical na direção x (ROSMAN, 2009).	19
Tabela 2 – Valores recomendados para rugosidade equivalente de fundo ϵ (ROSMAN, 2009 – Adaptado de Abbot e Basco, 1989).	32
Tabela 3 - Vazões de cada rio adotadas para cada Nó tipo 3.	33
Tabela 4 – Intensidade e direção do vento utilizadas em cada cenário hidrodinâmico.....	34
Tabela 5 – Características do vazamento simulado.....	35
Tabela 6 – Parâmetros adotados nos modelos de derrame de óleo.	37
Tabela 7 – Características que diferenciam cada cenário determinístico proposto.....	37
Tabela 8 – Características que diferenciam cada cenário probabilístico proposto.....	37
Tabela 9 – Resultados das simulações dos cenários determinísticos propostos.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contornos de terra e contornos abertos delimitando o domínio espacial de aplicação do modelo.	28
Figura 2 – Malha de discretização do domínio espacial investigado.	29
Figura 3 – Mapa batimétrico da região de estudo gerado no Surfer 8.....	30
Figura 4 – Histogramas de intensidade e direção dos ventos medidas na região do Porto de Santos durante todo o mês de dezembro de 1999.....	31
Figura 5 – Localização dos Nós tipo 3.	33
Figura 6 - Curva de maré utilizada como condição de contorno para o contorno aberto.....	34
Figura 7 – Local escolhido para realização das simulações de derrame de óleo.....	36
Figura 8 (a),(b),(c),(d) – Área de influência de cada cenário determinístico proposto.	41
Figura 9 – Mapa de probabilidade de passagem da mancha de óleo para o Cenário Probabilístico I.....	42
Figura 10 – Mapa de probabilidade de passagem da mancha de óleo para o Cenário Probabilístico II.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADIOS2 - *Automated Data Inquiry for Oil Spills*

ASCE - *American Society of Civil Engineers*

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CODESP - Companhia Docas do Estado de São Paulo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação (Marinha do Brasil)

ELPN - Escritório de Licenciamento de Atividades do Petróleo e Nuclear

FIST - *Filtered in Space and Time*

HAZMAT - *Hazardous Materials Response and Assessment Division*

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

LES - *Large Eddy Simulation*

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OD - Oxigênio dissolvido

SISBAHIA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNISANTA - Universidade Santa Cecília (Santos-SP)

UTM - Sistema Universal Transverso de Mercator

2DH - Duas dimensões na vertical

3D - Três dimensões

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivos	12
3. Revisão Bibliográfica	13
3.1. A Modelagem de Derrames de Óleo	13
3.2. Fenômenos Envolvidos num Derrame de Óleo em Corpo D'água	14
3.3. O SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental).....	16
3.3.1. Modelo hidrodinâmico do SisBAHIA	18
3.3.2. Modelo de Transporte Lagrangeano do SisBAHIA.....	20
3.4. O ADIOS2	22
3.5. Legislação Pertinente ao Tema.....	23
3.5.1. Informação Técnica ELPN/IBAMA N°023/02.....	23
3.5.2. Resolução CONAMA n°398, de 11 de junho de 2008	24
4. Método e Etapas de Trabalho	25
4.1. Revisão da Literatura	25
4.2. <i>Softwares</i> Utilizados	25
4.3. Compreensão do Uso dos <i>Softwares</i>	26
4.4. Definição da Área de Estudo	26
4.5. Implementação do modelo na área escolhida	27
4.5.1. Contornos do corpo d'água.....	27
4.5.2. Malha de elementos finitos	28
4.5.3. Batimetria.....	29
4.5.4. Condições de contorno na superfície e no fundo do corpo d'água.....	30
4.5.5. Condições de contorno para os contornos de terra e os contornos abertos.....	32
4.5.6. Modelos hidrodinâmicos.....	34
4.5.7. Modelos de derrames de óleo	35
4.6. Considerações Sobre a Calibração dos Modelos	38

5. Resultados e Discussão.....	39
5.1. Resultados Determinísticos	39
5.2. Resultados Probabilísticos	42
5.3. Discussão dos Resultados	43
6. Conclusão	47
7. Referências bibliográficas	49
APÊNDICE A	51
APÊNDICE B.....	52
APÊNDICE C.....	53
APÊNDICE D	55
APÊNDICE E.....	56
APÊNDICE F	57
ANEXO A	58

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda e da produção de combustíveis derivados do petróleo intensifica-se o uso de diferentes meios de transporte em vias que liguem os locais de extração, de refino e os pontos de distribuição desses produtos, fazendo com que a possibilidade de acidentes envolvendo vazamentos de petróleo e seus derivados coloque em risco as diversas áreas do globo. Tendo em vista que as diferentes frações do petróleo apresentam alta toxicidade, tais acidentes podem causar severos impactos ao meio ambiente, refletindo sobre a saúde humana e os demais seres vivos.

Os organismos quando expostos aos hidrocarbonetos podem sofrer: morte por recobrimento (asfixia), morte direta por intoxicação, redução da taxa de fertilização, bioacumulação, perturbação nos recursos alimentares dos grupos tróficos superiores, incorporação de substâncias carcinogênicas ou efeitos indiretos subletais. Todos esses possíveis efeitos refletem em todo o ecossistema, uma vez que todo o meio está interligado por meio da transferência de energia, nutrientes, migração e ciclo reprodutivo de espécies (CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2009).

Tais efeitos também se refletem na saúde humana, uma vez que existe uma intrínseca necessidade de recursos naturais que estão sujeitos à contaminação num acidente. Como exemplo, pode-se imaginar um derramamento de óleo num corpo d'água utilizado para abastecimento público, criação de espécies aquáticas, irrigação agrícola, pesca, recreação, entre outros possíveis usos, demonstrando assim a abrangência dos possíveis impactos que um acidente desta natureza possa causar ao meio ambiente.

Analisando essa problemática sócio-ambiental gerada pelos acidentes envolvendo derramamento de óleos, percebe-se a necessidade de capacitação de pessoal em modernas técnicas de engenharia tais como modelagem matemática e simulação computacional, visando suprir a sociedade com profissionais habilitados a contribuir para a redução dos impactos ambientais causados por tais acidentes.

As técnicas de modelagem e simulação, quando utilizadas corretamente em análises de prognóstico, permitem: (i) simular cenários para estudos e projetos; (ii) mapear e determinar áreas de risco; (iii) localizar os destinos prováveis de contaminantes ou outras substâncias de interesse; (iv) definir estratégias de ação em caso de acidentes com derrames de poluentes ambientais; (v) fornecer informações para a elaboração de Planos de Mitigação e ainda, (vi) prever a evolução de eventos em tempo real (ROSMAN, 2009).

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal realizar estudos de modelagem matemática e simulação computacional de derrames de óleo em corpos d'água.

Para o cumprimento deste objetivo, busca-se ainda propor e simular diferentes cenários de derrames de óleo na região próxima ao Porto de Santos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A Modelagem de Derrames de Óleo

Quando se procura refletir sobre uma porção da realidade, na tentativa de explicar, de entender ou de agir sobre ela deve-se selecionar, no sistema, argumentos ou parâmetros considerados essenciais e formalizá-los por meio de um sistema artificial: o modelo. Um modelo matemático seria um conjunto de símbolos e relações matemáticas (sistema artificial) que representa de alguma forma o objeto estudado (uma porção da realidade), BASSANEZI (2006).

Segundo Bassanezi (2006), um modelo matemático expressa idéias em linguagem concisa, de maneira clara e sem ambigüidades, e ainda fornece resultados que podem ser obtidos por meio de métodos computacionais para cálculo de suas soluções numéricas.

A modelagem matemática consiste na elaboração e validação de modelos matemáticos. Em outras palavras, consiste na transformação de situações da realidade em problemas matemáticos cujas soluções devem ser interpretadas na linguagem usual. Uma modelagem eficiente permite fazer previsões, tomar decisões explicar e entender a realidade, fornecendo subsídios para influenciar suas mudanças. Trata-se de uma ferramenta que vem sendo usada nas mais diversas áreas como a Física, a Química e as Engenharias (BASSANEZI, 2006).

Até o ano de 1996 foram desenvolvidos mais de 50 modelos matemáticos capazes de simular a trajetória e o destino de manchas de óleo no mar. Estes modelos visam o combate à poluição gerada pelos derrames de óleo em ambiente aquático, trazendo informações importantes para resposta a acidentes, avaliação de impacto ambiental, planos de contingência e treinamentos de resposta (ASCE, 1996).

Alguns desses modelos foram desenvolvidos para previsões táticas de curto prazo, a fim de resolver situações decisivas no combate e controle de derrames acidentais, enquanto outros modelos se detiveram na avaliação de longo prazo para políticas de conservação. Os modelos podem ser probabilísticos ou determinísticos, de duas (2D) ou três (3D) dimensões, sendo governados, dentre outros aspectos, pelos processos de: advecção (vento e corrente), dispersão horizontal (linear, turbulenta e gravitacional), inércia, viscosidade, tensão superficial, emulsificação, transferência de massa, mudanças nas propriedades físico-químicas do óleo (evaporação, *entrainment* e dissolução) e interação do óleo com a linha de costa. Os modelos mais sofisticados abordam ainda o balanço de massa devido à destilação, ou curva de ponto de ebulição, relacionada aos elementos tóxicos, voláteis e aromáticos (ASCE, 1996).

3.2. Fenômenos Envolvidos num Derrame de Óleo em Corpo D'água

Os fenômenos mais importantes que ocorrem quando um óleo é derramado num corpo d'água são os seguintes:

Advecção: É o processo de transporte do óleo presente na superfície d'água devido ao arraste provocado pelas correntes marinhas superficiais e pelos ventos, ou ainda, o transporte do óleo dissolvido na coluna d'água provocado pelas correntes marinhas sub-superficiais (PALADINO, 2000). Segundo ASCE (1996), a advecção é o principal mecanismo que governa a previsão de localização do óleo após um derramamento.

Difusão turbulenta: É um processo de espalhamento do óleo provocado pelas tensões horizontais e verticais induzidas pela turbulência da água. Este fenômeno permite a simulação do aumento da mancha de óleo, calculando a difusão horizontal e vertical não representadas pelos campos de correntes advectivas, por meio de termos difusivos acrescentados às equações (ASCE, 1996).

Espalhamento: Consiste na expansão horizontal da área da mancha devido à tendência que o óleo tem de se espalhar sobre si mesmo. Segundo Paladino (2000), a teoria mais fortemente aceita é aquela apresentada por Fay em 1969, que divide o fenômeno em três etapas, dependendo das forças que dominam o espalhamento: Gravitacional-Inercial, Gravitacional-Viscoso e Tensão Superficial.

Evaporação: Ocorre desde o início do derrame, com os componentes mais voláteis sendo rapidamente dissipados para a atmosfera, aumentando a viscosidade e densidade da mancha. A taxa e a extensão da evaporação dependem do ponto de ebulição dos compostos, área superficial e espessura da mancha, pressões de vapor do óleo e coeficiente de transferência de massa. Por sua vez, tais parâmetros são funções da composição do óleo, velocidade do vento, estado do mar e temperatura do ar e da água (SOTO, 2004 e ASCE, 1996).

Dispersão: É um processo físico em que as gotículas de óleo são transportadas a partir da superfície do mar para a coluna de água, podendo voltar ou não para a superfície, dependendo do tamanho das gotículas e da turbulência da água. Tal fenômeno está ligado a

três fatores: viscosidade do óleo, temperaturas da água e do ar e estado do mar (SOTO, 2004 e ASCE, 1996).

Dissolução: É um processo que ocorre quando os hidrocarbonetos solúveis de menor peso molecular se fragmentam em partículas muito pequenas, misturando-se com a água e formando uma solução homogênea (SOTO, 2004). Apesar de ser o processo que menos afeta a trajetória do óleo, no qual apenas 1% da massa total se dissolve na água (ASCE, 1996), é um fenômeno muito importante do ponto de vista biológico, uma vez que os componentes mais solúveis em água são também os mais tóxicos (PALADINO, 2000).

Emulsificação: Consiste na dispersão de pequenas gotículas de água dentro do óleo formando emulsões, também chamadas de *mousse*. Estas emulsões são estáveis e persistentes, podendo conter de 50 a 80% de água e são capazes de aumentar de duas a cinco vezes o volume original do derramamento (ASCE, 1996). Sua ocorrência depende do conteúdo de asfaltenos e parafinas de petróleo presentes na fração derramada e também do estado de agitação do mar (SOTO, 2004).

Sedimentação: Ocorre devido à associação de parte do óleo com materiais em suspensão, tornando as partículas mais pesadas e promovendo seu movimento descendente na coluna de água até o fundo do mar (SOTO, 2004).

Interação com a linha de costa: Segundo Paladino (2000), o escoamento costeiro muda totalmente na região de arrebentação, surgindo vários fenômenos de difícil estudo e modelagem, como: a incorporação de sedimentos suspensos pelo óleo, a penetração do óleo na costa e a diminuição da capacidade da costa em reter óleo. Devido a essas complicações a maioria dos modelos de trajetórias de manchas de óleo cessa a simulação quando estas tocam a linha de costa (ASCE, 1996).

Biodegradação: É a transformação dos hidrocarbonetos por meio do metabolismo de microrganismos (algas, bactérias e fungos) presentes na água em compostos mais simples como CO₂ e água. Esse processo depende de vários fatores tais como temperatura, disponibilidade de nutrientes e oxigênio e também pela extensão da superfície de contato entre o óleo, a água e os microrganismos (SOTO, 2004).

Foto-oxidação: É um processo químico que degrada o petróleo pela ação da radiação ultravioleta do sol (fotólise). A foto-oxidação se dá na presença de oxigênio e está relacionada com a espessura da mancha, a presença de sais minerais dissolvidos na água, composição do petróleo e quantidade de radiação com comprimento de onda inferior a 400nm (SOTO, 2004).

3.3. O SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental)

É um sistema profissional de modelos computacionais, registrado pela Fundação Coppetec (órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro), desenvolvido para projetos, estudos e gestão ambiental de recursos hídricos. Em tal sistema, os modelos são utilizados para previsão do escoamento e movimento das águas, bem como do transporte de grandezas escalares de interesse.

O SisBAHIA pode ser empregado em simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, reservatórios, lagos ou lagoas, visando a compreensão da dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais (ROSMAN, 2009). O SisBAHIA possui os seguintes módulos (ROSMAN, 2009):

Modelo Hidrodinâmico: é um modelo da linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*) capaz de simular a circulação hidrodinâmica bidimensional na vertical (2DH) ou tridimensional (3D) em corpos d'água naturais sob diferentes cenários meteorológicos, oceanográficos, fluviais ou lacustres. A linha FIST representa um sistema de modelagem de corpos d'água com superfície livre composto por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes às empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*).

Modelo de Transporte Euleriano: é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações, para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D.

Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização: trata-se de um conjunto de modelos de transporte Euleriano, para simulação acoplada de até 11 parâmetros de qualidade de água e indicadores de eutrofização: sal, temperatura, OD-DBO, nutrientes compostos de nitrogênio e de fósforo e biomassa.

Modelo de Transporte Lagrangeano - Determinístico: é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Este modelo é adequado para simulações de problemas como:

- Plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa;
- Derrames de óleo, instantâneos ou por período definido;
- Mistura de massas de água, tempos de troca e renovação de massas de água entre diferentes setores de um corpo d'água;
- Determinação de tendências de deriva de sedimentos, substâncias dissolvidas ou partículas flutuantes.

Modelo de Transporte Lagrangeano - Probabilístico: acoplado ao modelo anterior, permite obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de N eventos ou de resultados ao longo de um período de tempo T. Exemplos de resultados: probabilidade de toque no litoral, probabilidade de passagem de manchas ou plumas de contaminantes, probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite, etc.

Modelo de Geração de Ondas: é um modelo para geração de ondas por campos de vento permanentes ou variáveis. O modelo permite calcular, ao longo do tempo, a distribuição no domínio espacial dos parâmetros referentes às ondas geradas tais como: alturas significativas e médias quadráticas, períodos de pico, tensões oscilatórias no fundo devido a ondas, etc.

Módulo de Análise & Previsão de Marés: por meio deste módulo é possível realizar análises harmônicas de registros de níveis ou correntes para obtenção de determinadas constantes. Fornecidas as constantes harmônicas de níveis ou de correntes, previsões de valores em séries temporais com intervalos de tempo definidos pelo usuário, bem como previsões de valores de máximos e mínimos entre uma data inicial e uma final específicas podem ser realizadas neste módulo.

3.3.1. Modelo hidrodinâmico do SisBAHIA

Os modelos hidrodinâmicos implementados no SisBAHIA podem ser de duas ou três dimensões (2DH ou 3D). No módulo 2DH são calculadas, por passo de tempo, a elevação da superfície livre e as velocidades médias de corrente na vertical, enquanto que, no módulo 3D é calculado, por passo de tempo, o campo tridimensional de velocidades de corrente. No caso da modelagem 3D, os dois módulos funcionam acoplados e são interdependentes. Primeiramente são calculados os valores de elevação da superfície livre por meio do módulo 2DH, e em seguida, o campo de velocidades, por meio do módulo 3D (ROSMAN, 2009).

Segundo Rosman (2009), a mecânica do movimento para escoamentos em regime turbulento é governada pelas equações de Navier-Stokes. Tais equações representam o princípio da conservação da quantidade de movimento, que em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo d'água.

A seguir são apresentadas as três equações necessárias para determinar a circulação hidrodinâmica em um escoamento 2DH:

- Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\phi \text{sen}\theta V - \frac{U}{H} \sum q \quad (1)$$

- Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) + 2\phi \text{sen}\theta U - \frac{V}{H} \sum q \quad (2)$$

- Equação da continuidade integrada na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q \quad (3)$$

Utilizando a equação da quantidade de movimento na direção x como exemplo, a Tabela 1 explica o significado de cada termo da Equação (1). Para a equação de quantidade de movimento na direção y , Equação (2), os termos semelhantes possuem o mesmo significado.

Tabela 1 – Significado dos termos da equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical na direção x (ROSMAN, 2009).

$\frac{\partial U}{\partial t} \rightarrow$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \rightarrow$	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x , por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \rightarrow$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x . Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.
$\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) \rightarrow$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x , por unidade de massa. Por exemplo, esses termos são responsáveis pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.
$2\Phi \text{sen}\theta V \rightarrow$	Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, i.e. em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Guanabara, por exemplo.
$\frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S) \rightarrow$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^B) \rightarrow$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.
$\frac{U}{H} \underbrace{(q_P - q_E + q_I)}_{\sum q} \rightarrow$	Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_P , evaporação q_E e infiltração q_I .

Para a Equação (3), pode-se observar que altura da coluna d'água ($\zeta + h$) varia no tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna d'água nas direções x e y respectivamente dados por $\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz$ e $\frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz$, e do balanço dos fluxos de precipitação q_P , evaporação q_E e infiltração q_I , por unidade de área.

Resumidamente, a modelagem 3D analítico-numérica com o sistema FIST procede da seguinte forma:

Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção x e y , $U(x, y, t)$ e $V(x, y, t)$, respectivamente, e as elevações da superfície livre, $z = \zeta(x, y, t)$, por meio de um esquema numérico implícito de segunda ordem para a discretização temporal, e via elementos finitos, com elementos sub-paramétricos lagrangeanos quadráticos, para a discretização espacial. Por meio de uma solução analítico-numérica são então calculados os perfis de velocidade $u(x, y, z, t)$ e $v(x, y, z, t)$, em função de: ζ, U, V , da rugosidade equivalente de fundo (ε) e da velocidade do vento na superfície (W_{10}). Os vetores solução de $(\zeta, U, V, u \text{ e } v)$ são atualizados e retorna-se ao módulo 2DH para o cálculo das soluções para o próximo passo de tempo. Esse processo se repete até que o tempo de simulação especificado seja completado (ROSMAN, 2009).

3.3.2. Modelo de Transporte Lagrangeano do SisBAHIA

O Modelo Lagrangeano do SisBAHIA (também chamado de modelo de transporte lagrangeano advectivo-difusivo com reações) é utilizado para simular o transporte de escalares que sejam pequenos em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico e que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna d'água, como por exemplo: manchas de óleo oriundas de eventuais derrames e plumas de emissários. Junto ao modelo pode ser incluso qualquer processo reacional de geração ou consumo de quantidade do escalar transportado, que seja função do tempo transcorrido após o lançamento do contaminante em questão (ROSMAN, 2009).

Os contaminantes transportados são representados por um dado número de partículas lançadas numa dada região fonte em intervalos de tempo regulares e carregadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. A posição de qualquer partícula no instante seguinte (P^{n+1}) é determinada por meio da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida (P^n):

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2P^n}{dt^2} + T. A. D. \quad (4)$$

Onde:

- T.A.D. são termos de alta ordem desprezados
- $\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w)$
- $\frac{d^2P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}$

Admite-se que as velocidades que promovem o transporte advectivo das partículas, $\vec{V}(u, v, w)$, são iguais às velocidades obtidas por meio do modelo hidrodinâmico. Após determinada a posição de uma dada partícula, as velocidades difusivas (movimentos em escalas não resolvíveis) podem ser incluídas por meio de um desvio aleatório em função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas (ROSMAN, 2009).

Após conhecida a posição das partículas, determina-se então o campo de concentração da mancha, formada pelo conjunto de partículas (nuvem). Para efluentes saindo de uma fonte, a quantidade de massa, M_a , de uma dada espécie a , presente em cada partícula quando essa entra no domínio especificado é dada por:

$$M_a = \frac{QC_a \times \Delta t}{N_p} \quad (5)$$

Onde:

- Q é a descarga proveniente da fonte;
- C_a é a concentração da substância a presente na descarga da fonte; e
- N_p é o número de partículas que entra no domínio pela fonte por passo de tempo Δt .

A quantidade de massa de cada partícula, cujo centro encontra-se na posição (x, y, z) , é então distribuída nas células que formam a malha de discretização do modelo, sendo a quantidade de massa de uma espécie a presente em cada célula i calculada por:

$$m_{ai}(x, y, z) = \frac{M_a R(t_v) f}{\sum_{n=1}^{NP} f_n} \quad (6)$$

Onde:

- f é a função de distribuição espacial (Gaussiana);
- $R(t_v)$ é uma função da cinética da reação;
- t_v é o tempo de vida, ou idade, da partícula;
- NP é o número de partículas que contribui para a quantidade de massa em uma dada célula i da malha de concentrações.

A concentração é então calculada pela divisão da quantidade de massa da substância presente na célula pelo volume da célula.

3.4. O ADIOS2

ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*) é uma ferramenta geralmente usada para uma resposta rápida de como agir perante um derramamento de óleo. Agrega um modelo de intemperismo do óleo, o qual utiliza uma base de dados contendo mais de mil tipos de óleos crus e produtos refinados. O programa fornece previsões rápidas acerca das características e do comportamento do óleo derramado no ambiente marinho. As estimativas feitas, apresentadas em forma de gráficos e de texto, são projetadas para ajudar a responder às perguntas comumente levantadas durante a resposta aos derrames de óleo e sua limpeza. Utilizando equações matemáticas baseadas no conhecimento científico existente e regras empíricas da indústria do petróleo, o programa é capaz de prever: mudanças durante o tempo na densidade, na viscosidade e no índice de água de um óleo ou produto; as taxas com que o óleo evapora da superfície do mar e se dispersa na água; e a taxa em que uma emulsão de óleo-em-água pode se formar (NOAA, 2009).

Foi desenvolvido para ser utilizado com a menor quantidade de informações possíveis, podendo as mesmas serem rapidamente estimadas ou obtidas em campo, tal como a velocidade do vento, a altura das ondas, a temperatura, a salinidade ou a densidade da água, o tipo e a quantidade de óleo derramado, e a taxa e a duração do derrame (NOAA, 2009).

Fatores importantes tais como a trajetória do óleo são excluídos por não serem modelados facilmente sem grandes quantidades de informação de entrada e habilidade do usuário. Outros processos que podem ser relevantes apenas a longo prazo, como a biodegradação e a foto-oxidação, também não são modelados pelo programa (NOAA, 2009).

3.5. Legislação Pertinente ao Tema

3.5.1. Informação Técnica ELPN/IBAMA N°023/02

A “Informação Técnica ELPN/IBAMA N°023/02” é um acordo de cooperação e apoio técnico científico entre o Ministério do Meio Ambiente e a Agência Nacional do Petróleo que versa sobre as diretrizes para apresentação da modelagem hidrodinâmica e de derramamento de óleo no mar para o licenciamento ambiental de atividades ligadas ao setor do petróleo.

No citado documento, a modelagem de derramamento de óleo é apresentada como uma ferramenta fundamental para o estudo e a gestão ambiental das atividades de exploração e produção do petróleo, podendo ser empregada para:

- Determinação da Área de Influência Indireta da atividade, na qual se baseia todo o diagnóstico ambiental;
- Definição de cenários por meio da realização de simulações que permitem a elaboração de estratégias necessárias ao atendimento emergencial de acidentes que envolvem derramamentos de óleo no mar, no contexto do Plano de Emergência Individual, previsto na Resolução CONAMA n°398.

Define-se ainda na citada informação que:

“A Área de Influência Indireta da atividade é determinada a partir da simulação dos piores cenários de toque de óleo na costa, de acordo com a análise probabilística de séries temporais de dados meteorológicos e oceanográficos.”

“Atendendo as diretrizes da Resolução CONAMA n°293, o Plano de Emergência Individual deve ser elaborado considerando, entre outras informações, a probabilidade do óleo atingir determinadas áreas e a sensibilidade destas áreas ao óleo.”

No ANEXO A está apresentado o Modelo de Termo de Referência que relaciona as premissas básicas para a elaboração das simulações a serem incorporadas nos estudos para licenciamento.

3.5.2. Resolução CONAMA nº398, de 11 de junho de 2008

A Resolução CONAMA nº398, determina o conteúdo mínimo do plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional e orienta sua elaboração.

Em seu Anexo II (Informações Referenciais para Elaboração do Plano de Emergência Individual), Item 3 (Análise da Vulnerabilidade) estão apresentados os aspectos a serem considerados para avaliação dos efeitos dos incidentes de poluição por óleo, sobre a segurança da vida humana e o meio ambiente, nas áreas passíveis de serem atingidas por estes incidentes:

“A análise de Vulnerabilidade deverá levar em consideração:

- a) a probabilidade do óleo atingir determinadas áreas;**
- b) a sensibilidade destas áreas ao óleo.”**

“As áreas passíveis de serem atingidas deverão ser determinadas por meio:

- a) da comparação com incidentes anteriores de poluição por óleo, se aplicável;**
- b) da utilização de modelos de transporte e dispersão de óleo.”**

4. MÉTODO E ETAPAS DE TRABALHO

4.1. Revisão da Literatura

Para uma compreensão global do tema proposto neste trabalho foram consultadas publicações que abordassem os seguintes tópicos principais:

- Fenômenos físicos, químicos e biológicos envolvidos no derrame de óleos em corpos d'água;
- Modelagem matemática de derrames de óleo em corpos d'água;
- Estudo de casos envolvendo a aplicação de modelos matemáticos a derrames de óleo em corpos d'água;
- Legislações pertinentes ao tema; e
- *Softwares* disponíveis para a simulação de tais modelos.

4.2. *Softwares* Utilizados

Para o estudo de cenários foi necessário buscar na literatura *softwares* que contemplassem modelos matemáticos de derrames de óleo em corpos d'água, possibilitando a realização das simulações pretendidas.

A busca dos *softwares* baseou-se em critérios tais como disponibilidade de uso e possibilidade de capacitação (treinamento) para a correta utilização e manipulação. Neste contexto, os *softwares* escolhidos foram:

- O Sisbahia 7.0 (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental):

Foi utilizado para a modelagem hidrodinâmica e para a modelagem de transporte lagrangeano. É um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e pode ser utilizado gratuitamente para fins não-lucrativos.

- O ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*):

Foi utilizado para avaliar a quantidade de óleo remanescente, evaporado e dissolvido para um determinado derrame. É uma ferramenta desenvolvida pela *Hazardous Materials*

Response and Assessment Division (HAZMAT) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), e pode ser “baixado” pela internet e utilizado gratuitamente.

4.3. Compreensão do Uso dos *Softwares*

Para a correta utilização e manipulação dos *softwares* escolhidos para a simulação dos cenários propostos, foi realizado um treinamento na Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica do Programa de Engenharia Naval e Oceânica – PENO-COPPE/UFRJ no período de 10 a 14 de novembro de 2008, num total de 40 horas.

Esse treinamento foi ministrado pelo Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman, Coordenador da Área Interdisciplinar de Engenharia Ambiental e docente do Programa em Engenharia Oceânica, com o apoio de alguns alunos da Pós-graduação, ocasião na qual foram abordados os seguintes temas:

- Considerações, conceitos e fundamentos básicos sobre modelagem matemática;
- Diferentes usos e aplicações da modelagem matemática para resolução de problemas relacionados a recursos hídricos utilizando como ferramenta o *software* Sisbahia 7.0;
- Utilização do Sisbahia 7.0 para simulação de cenários de derrame de óleo em corpo d’água, consistindo das seguintes etapas: (i) Criação de Base de Dados; (ii) Definições de Contornos e Mapa Base; (iii) Criação da Malha de Elementos Finitos; (iv) Modelagem Hidrodinâmica; (v) Modelagem de Transporte Lagrangeano;
- Utilização do ADIOS2 e inserção dos seus dados de resposta no Sisbahia 7.0.

4.4. Definição da Área de Estudo

Visando propor alguns cenários hipotéticos para estudo de casos foi necessário primeiramente definir uma área de estudo onde ocorreriam as simulações de derrames de óleo. Foi então escolhida a região próxima ao Porto de Santos – SP, levando em consideração os seguintes aspectos relevantes da área:

- Grande número de embarcações que atracam no Porto de Santos;

- Elevada quantidade de derivados de petróleo movimentada pelas embarcações;
- Maior índice de ocorrências de vazamentos de óleo no mar relacionados diretamente ao transporte por navios.

Segundo o resumo estatístico dos últimos cinco anos, realizado pela Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP, 2009), no ano de 2008 houve o movimento de 5.763 navios no Porto de Santos e foram transportadas 1.436.000 toneladas de óleo diesel e 1.262.000 toneladas de outros óleos combustíveis, sendo que em 2008 o óleo diesel esteve entre as dez principais mercadorias movimentadas (CODESP, 2008).

De acordo com o histórico de vazamentos de óleo apresentado pela CETESB, as principais ocorrências de vazamentos de óleo registradas entre os anos de 1974 e 2000 estão relacionadas, em primeiro lugar, aos acidentes de navegação, com 36% das ocorrências, seguidos pelas falhas operacionais e mecânicas nos navios, com 22% e 19%, respectivamente (POFFO et al, 2001).

A localização da área de estudo escolhida pode ser visualizada no APÊNDICE A.

4.5. Implementação do modelo na área escolhida

Todos os dados meteorológicos, oceanográficos e hidrológicos inseridos nos modelos, bem como a malha de elementos finitos utilizada, foram fornecidos pelo Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman e referem-se ao trabalho de mestrado não concluído do Eng. José Manoel Ferreira Gonçalves na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ entre 1999-2000. Os dados de maré, ventos e vazões dos rios foram medidos nas vizinhanças da área de interesse, no âmbito do convênio UNISANTA/CODESP.

4.5.1. Contornos do corpo d'água

Os contornos de terra ou fronteiras de terra representam as margens do domínio de modelagem, enquanto o contorno aberto, ou fronteira aberta (também chamado de contorno de água ou de mar), representa um limite de conveniência demarcando o domínio em água, ou seja, o encontro da massa d'água a ser modelada com a massa d'água exterior (COPPE-UFRJ, 2009).

A definição dos contornos terrestres do corpo d'água foi obtida por meio da base de dados do *National Geophysical Data Center* da NOAA-USA. Os dados obtidos foram manipulados no programa *Surfer 8*, de forma a reproduzir os contornos de terra e o contorno aberto que limitam o domínio do modelo, como mostra a Figura 1:

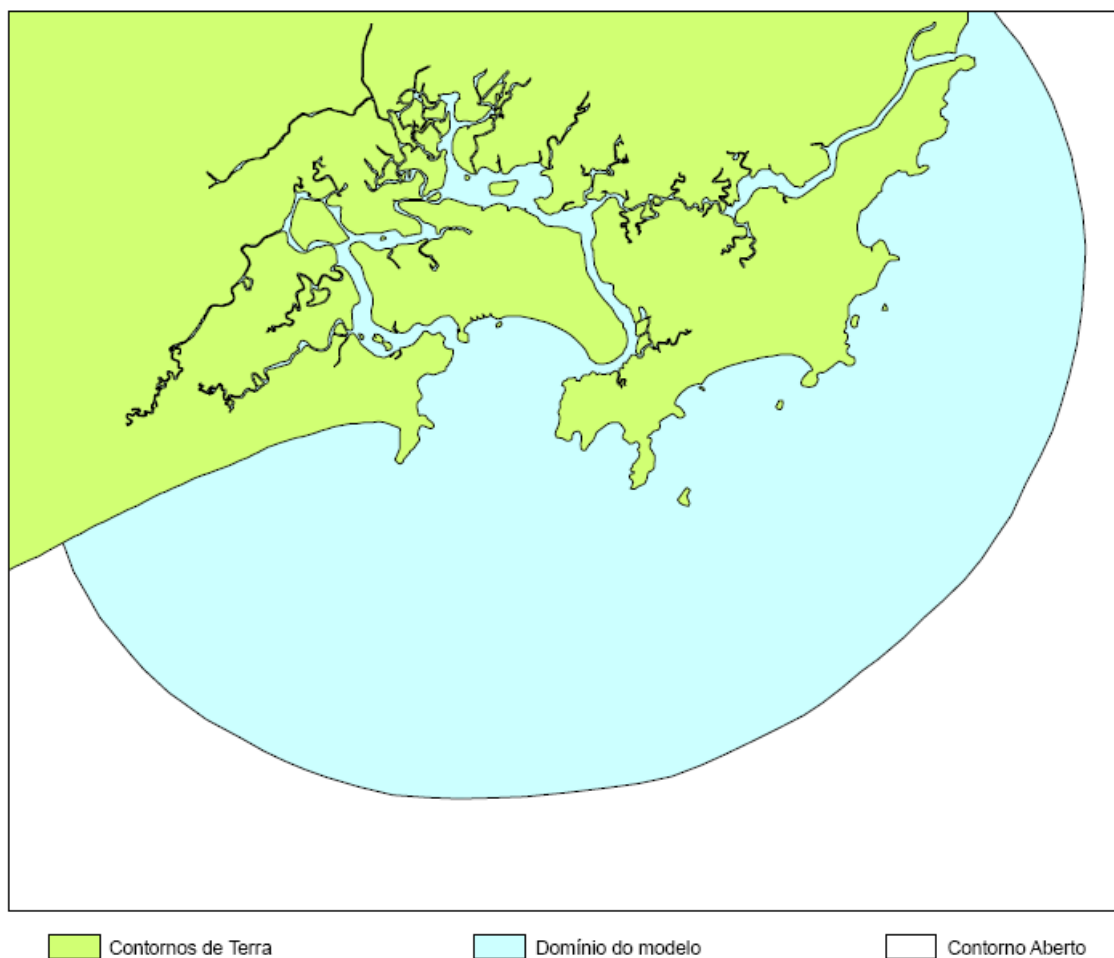


Figura 1 - Contornos de terra e contornos abertos delimitando o domínio espacial de aplicação do modelo.

4.5.2. Malha de elementos finitos

O domínio espacial foi discretizado na forma de uma malha de elementos finitos, a qual foi gerada usando-se o *software ArgusOne*. Nessa malha, o domínio foi subdividido em 1.082 elementos quadrangulares, com 5.626 nós no plano horizontal e 21 níveis verticais, totalizando 118.146 pontos de cálculo.

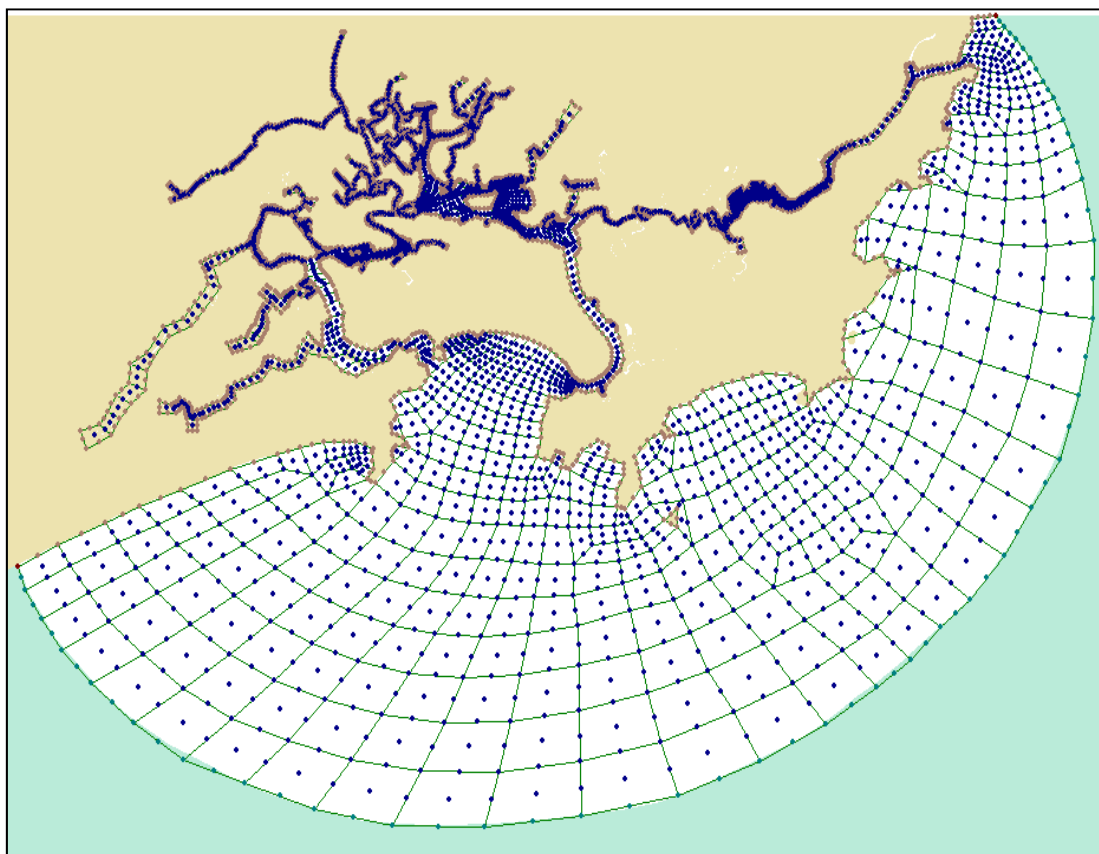


Figura 2 – Malha de discretização do domínio espacial investigado.

4.5.3. Batimetria

A batimetria da área de estudo foi gerada a partir da vetorização das seguintes cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) – Marinha do Brasil:

- Brasil - Costa Sul: **Proximidades do Porto de Santos**. Escala 1:80.000, Projeção de Mercator. Levantamentos efetuados pela Marinha do Brasil até 1982. Sondagens em metros.
- Brasil - Costa Sul: **Porto de Santos**. Escala 1:23.000, Projeção de Mercator. Levantamentos efetuados pela Marinha do Brasil até 1975. Sondagens em metros.

As cartas foram vetorizadas com auxílio do programa AutoCAD 2008, no qual foram criados e editados todos os pontos para os quais constavam valores de profundidade. Estes dados gerados foram exportados para uma planilha organizada em três colunas: x, y e z, sendo x e y as coordenadas UTM do ponto e z a sua profundidade.

Os dados organizados foram interpolados no *software Surfer 8* usando-se o método de interpolação de *Kriging*. O mapa batimétrico gerado é mostrado na Figura 3 e em maiores detalhes no APÊNDICE B.

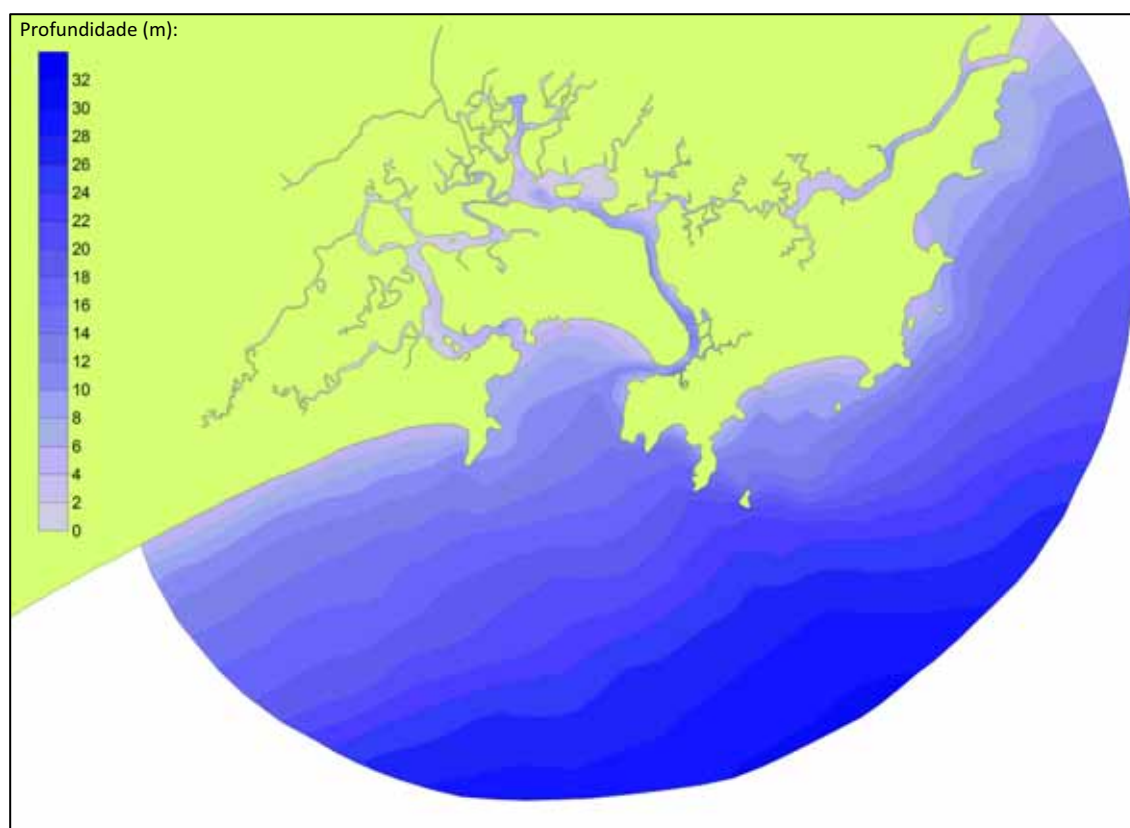


Figura 3 – Mapa batimétrico da região de estudo gerado no Surfer 8.

4.5.4. Condições de contorno na superfície e no fundo do corpo d'água

A condição de contorno na superfície do corpo d'água é a tensão de atrito do vento na superfície livre calculada a partir das velocidades de vento fornecidas. Já as condições de contorno no limite inferior do corpo d'água são velocidades nulas no fundo e tensões de atrito calculadas um nível acima do fundo usando-se valores de amplitude da rugosidade equivalente (ϵ) fornecidos de acordo com o tipo de leito. (ROSMAN, 2009).

Os valores de intensidade e direção do vento utilizados basearam-se numa série temporal medida na região do Porto de Santos durante todo o mês de dezembro de 1999.

Esses dados coletados foram separados em dois grupos amostrais: um grupo apenas com os valores medidos de intensidade do vento (m/s) e o outro apenas com os valores medidos de direção do vento (graus em relação ao norte).

A partir dos dados de cada grupo foram feitos dois histogramas, os quais são apresentados na Figura 4.

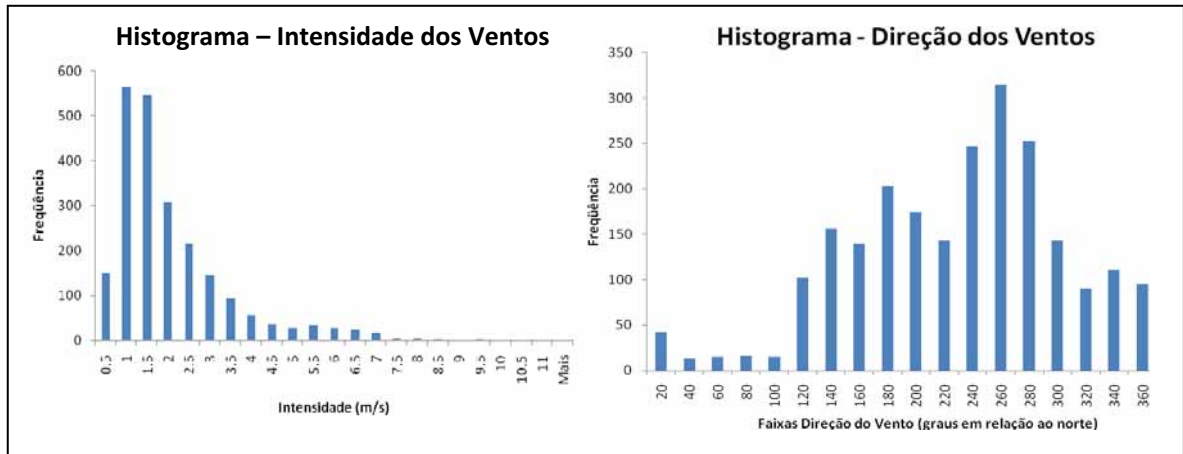


Figura 4 – Histogramas de intensidade e direção dos ventos medidas na região do Porto de Santos durante todo o mês de dezembro de 1999.

Analisando-se os histogramas gerados, é possível identificar que a intensidade mais freqüente dos ventos medida durante o mês de dezembro de 1999 é de aproximadamente 1m/s e que a direção mais freqüente dos ventos medida no mesmo período, é de aproximadamente 250° em relação ao norte.

Sendo assim, para algumas simulações os valores adotados para a intensidade e direção do vento foram de 1m/s e 250° em relação ao norte. Entretanto, para simular alguns cenários mais críticos, a intensidade do vento foi aumentada quatro e oito vezes em algumas simulações. Nesses cenários o vento é considerado permanente e uniforme, ou seja, o vento atuante no domínio de modelagem tem a mesma intensidade e direção em todo o espaço durante todo o tempo de simulação.

Foi utilizada ainda uma condição de vento variável no tempo e homogêneo no espaço, ou seja, os valores de intensidade e direção do vento são iguais para todos os nós da malha, variando temporalmente de acordo com os dados medidos na região durante o mês de dezembro de 1999.

Para a condição de contorno no fundo, o valor de ϵ utilizado foi de 0,03m para todo o domínio, considerando que ocorre transporte de sedimento em todo o leito do corpo d'água. Na Tabela 2 estão apresentados os valores de ϵ recomendados (ROSMAN, 2009):

Tabela 2 – Valores recomendados para rugosidade equivalente de fundo ϵ (ROSMAN, 2009 – Adaptado de Abbot e Basco, 1989).

Leito de sedimentos	
Leito com transporte de sedimentos	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0500\text{m}$
Leito com vegetação	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1500\text{m}$
Leito com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \epsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \epsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias	$0.0150\text{m} < \epsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas	$0.1000\text{m} < \epsilon < 0.2000\text{m}$
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$

4.5.5. Condições de contorno para os contornos de terra e os contornos abertos

A imposição de condições de contorno é feita de forma diferente para contornos de terra e contornos abertos. Para contornos de terra são adotados fluxos ou velocidades normais à fronteira e para contornos abertos, adota-se a elevação da superfície livre (ROSMAN, 2009).

Para os contornos de terra foram adotadas as seguintes condições de contorno:

- Nós 673, 907, 130, 1560 e 2889:

Vazão normal é dada; vazão tangencial igual a zero (Nós tipo 3).

- Demais Nós:

Vazão normal é dada (sempre igual a zero); vazão tangencial é calculada (Nós tipo 0).

Os nós tipo 3 representam os rios que deságuam no corpo d'água e os nós tipo 0 representam todas as margens do corpo d'água. A posição de cada Nó tipo 3 é mostrada na Figura 5.

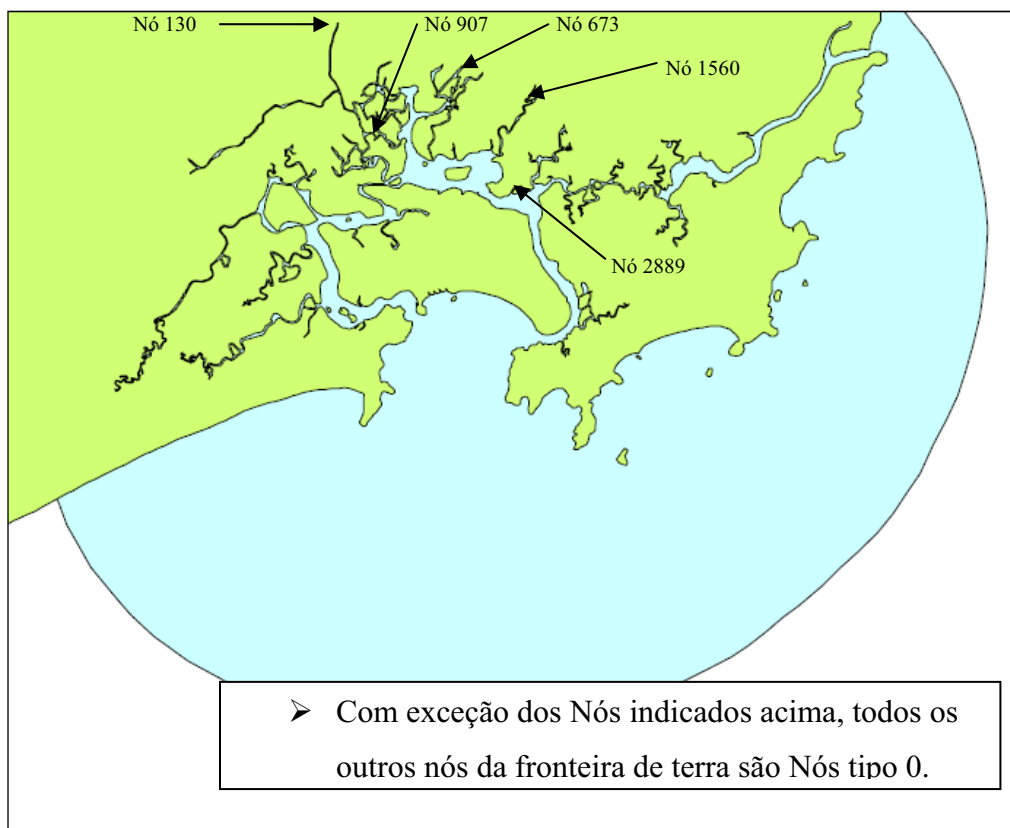


Figura 5 – Localização dos Nós tipo 3.

Na Tabela 3 estão apresentados os rios que cada Nó tipo 3 representa e os valores adotados para as vazões de cada rio:

Tabela 3 - Vazões de cada rio adotadas para cada Nó tipo 3.

Nó	Rios	Vazão média anual (m ³ /s)
673	Rio Quilombo	3,050
907	Rio Cubatão	10,840
130	Rio Perequê	2,370
1560	Rio Jurubatuba	25,050
2889	Rio Diana/Sandi	5,070

Essas vazões, divididas pela largura da seção de cada rio na posição onde está o nó, representam as vazões nodais, cujos valores obtidos foram inseridos como condição de contorno em cada Nó tipo 3 na forma de vazão normal dada.

Para o contorno aberto, foi imposta como condição de contorno a variação da maré na região do porto de Santos, descrita por meio de funções periódicas com constantes harmônicas dadas. Na Figura 6 está apresentada a curva de maré utilizada, referente a um período de 30 dias, na qual estão representados os diferentes períodos de maré (sizígia e quadratura).

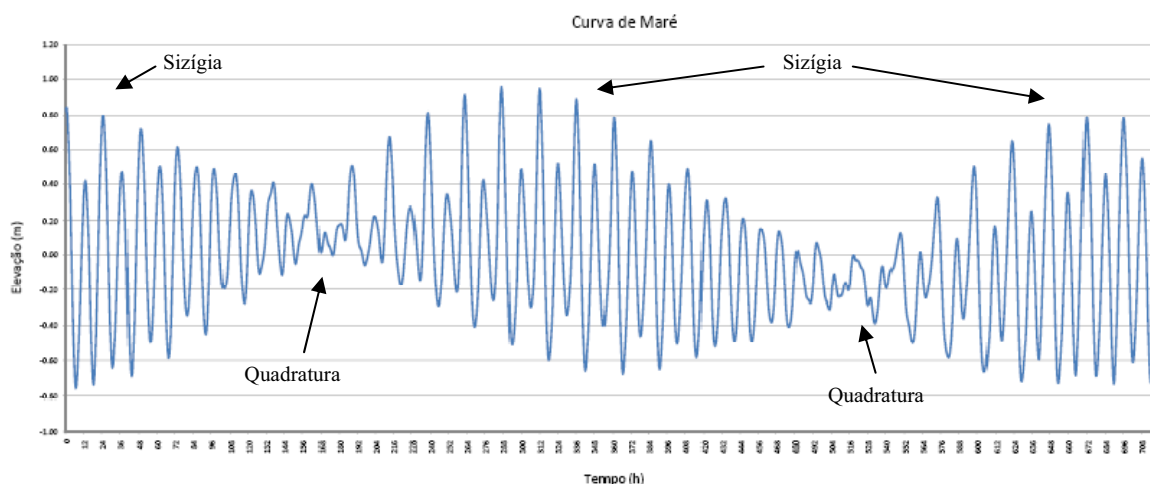


Figura 6 - Curva de maré utilizada como condição de contorno para o contorno aberto.

4.5.6. Modelos hidrodinâmicos

Para realização da modelagem hidrodinâmica foram propostos quatro cenários com aproximadamente 20 dias de simulação cada um, variando-se apenas as características do vento em cada cenário e mantendo-se fixas as demais condições de contorno. Na Tabela 4 estão descritas as características que diferenciam cada cenário hidrodinâmico.

Tabela 4 – Intensidade e direção do vento utilizadas em cada cenário hidrodinâmico.

CENÁRIO HIDRODINÂMICO	INTENSIDADE DO VENTO	DIREÇÃO DO VENTO
I	1,0 m/s	250°
II	4,0 m/s	250°
III	8,0 m/s	250°
IV	Variável	Variável

As simulações foram feitas usando-se o módulo 3D analítico-numérico do Sisbahia 7.0, sendo que o passo de tempo selecionado foi de 60 segundos, obtendo Número de Courant Médio (Cr) igual a 3,3 e um ganho médio de 84 vezes o tempo real.

A condição inicial para as simulações foi considerada igual para todos os nós: elevação igual a 0,8m, velocidade em X (U) igual a 0m/s e velocidade em Y (V) igual a 0m/s. O valor da condição inicial de elevação igual a 0,8m foi utilizado visando evitar diferenças significativas em relação ao valor apresentado pela curva de maré imposta como condição de contorno (ROSMAN, 2009).

Os valores calculados para o campo de velocidades (u e v) e elevação (ζ) foram salvos em intervalo de 1 hora, tanto para a média da coluna d'água quanto para a profundidade de 0,15m, profundidade esta de interesse para o modelo de derrame de óleo.

4.5.7. Modelos de derrames de óleo

Para realização da modelagem dos derrames de óleo foram adotadas as seguintes características para o vazamento:

Tabela 5 – Características do vazamento simulado.

Tipo de vazamento	Vazamento na superfície d'água
Quantidade vazada	1.000 m ³
Duração do vazamento	1 hora
Tipo de óleo	Óleo Diesel
Densidade do óleo a 20°C	805 Kg/m ³
Local do Vazamento (Coordenadas UTM)	X: 361.507,96 ; Y: 7.340.265,55

O local do vazamento está apresentado na Figura 7.

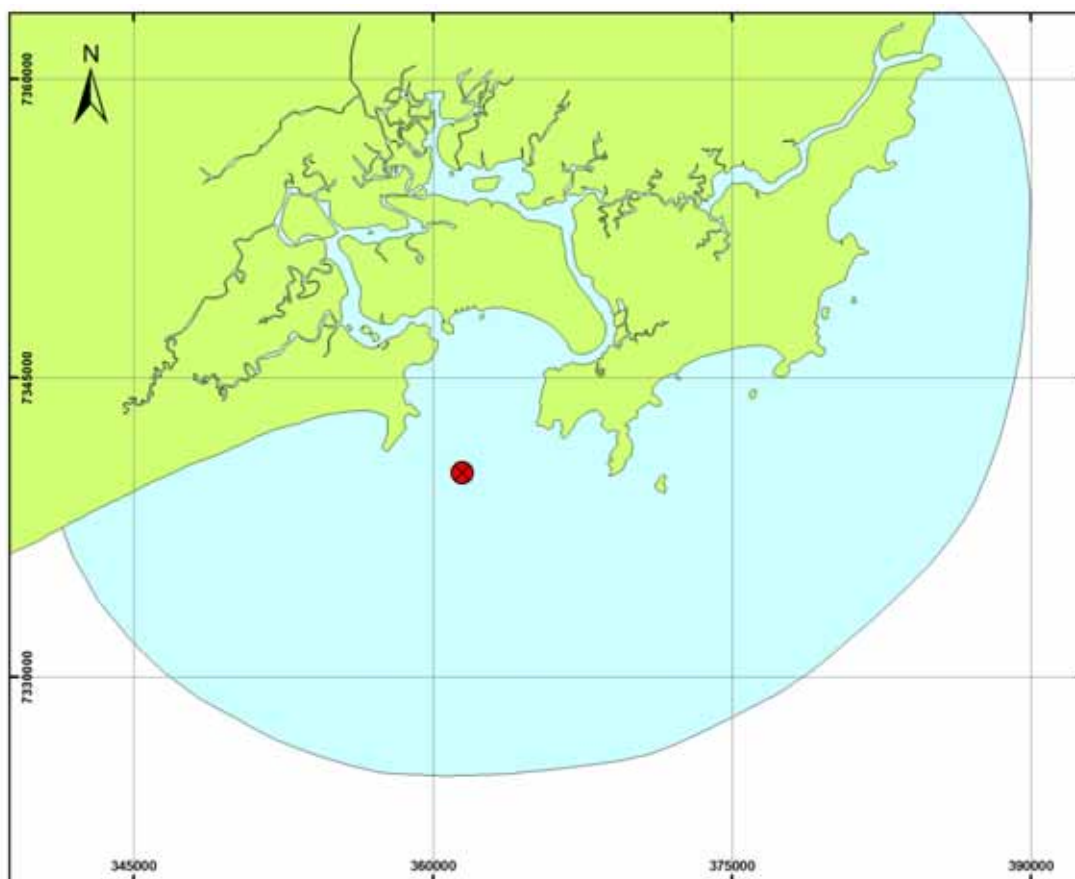


Figura 7 – Local escolhido para realização das simulações de derrame de óleo.

O tipo de óleo derramado escolhido foi o óleo diesel por este ser o óleo mais transportado pelos navios no porto de Santos (Relatório Anual – 2008, CODESP), enquanto que a quantidade derramada de óleo adotada baseou-se no fato de que apenas 1,72% dos vazamentos registrados durante os anos de 1974 a 2000 foram vazamentos superiores a 1.000m^3 (POFFO et al, 2001).

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de alguns parâmetros do modelo de derrame de óleo empregados na simulação dos diversos cenários. Tais valores foram adotados a partir de dados da literatura bem como por meio de comunicação pessoal feita por ROSMAN (2009).

Tabela 6 – Parâmetros adotados nos modelos de derrame de óleo.

Passo de tempo	60 segundos
Profundidade do escoamento 3D utilizada	0,15 m
Número de partículas lançadas por passo de tempo	100
Espessura da pluma utilizada para o cálculo das concentrações	0,805 m
Concentração mínima detectável	0,0003 Kg/m ³
Coeficiente de absorção	0,2 para todas as fronteiras de terra
Intervalo de tempo dos resultados	30 minutos

Após adoção desses parâmetros, foram propostos quatro cenários determinísticos. A diferença entre os cenários foi o instante inicial do vazamento, podendo ocorrer num período de maré de sizígia ou de quadratura, e também o modelo hidrodinâmico utilizado para cada um pela variação da intensidade do vento. Na Tabela 7 estão descritas as características que diferenciam cada cenário determinístico.

Tabela 7 – Características que diferenciam cada cenário determinístico proposto.

CENÁRIO DETERMINÍSTICO	MARÉ	INTENSIDADE DO VENTO	DIREÇÃO DO VENTO
I	Quadratura	1,0 m/s	250°
II	Sizígia	1,0 m/s	250°
III	Sizígia	4,0 m/s	250°
IV	Sizígia	8,0 m/s	250°

Foram propostos ainda dois cenários probabilísticos utilizando o cenário hidrodinâmico I (vento de 8m/s) e o cenário hidrodinâmico IV (vento variável), no qual por meio de um método de sorteio realizado numa planilha elaborada no Excel, foram gerados 50 vazamentos com instantes iniciais diferentes. Esses vazamentos ocorrem dentro de um período de aproximadamente 15 dias, contemplando assim tanto um período de quadratura quanto de sizígia da maré. Na Tabela 8 estão descritas as características que diferenciam cada cenário probabilístico.

Tabela 8 – Características que diferenciam cada cenário probabilístico proposto.

CENÁRIO PROBABILÍSTICO	MARÉ	INTENSIDADE DO VENTO	DIREÇÃO DO VENTO
I	Quadratura/Sizígia	Variável	Variável
II	Quadratura/Sizígia	8,0 m/s	250°

Todas as condições criadas foram simuladas previamente no ADIOS2, que forneceu o balanço de massa do óleo derramado. Os resultados fornecidos podem ser visualizados em forma de gráficos no APÊNDICE C, representando, por meio de três curvas, a quantidade de óleo remanescente, evaporado e dissolvido para cada cenário.

Os dados referentes à fração de óleo remanescente fornecidos pelo ADIOS2 foram inseridos no Sisbahia 7.0 na forma de uma curva de decaimento do óleo. As simulações de derrames de óleo foram feitas usando-se o modelo lagrangeano de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas do Sisbahia 7.0.

4.6. Considerações Sobre a Calibração dos Modelos

Segundo Rosman (2009), para uma calibragem adequada de modelos hidrodinâmicos e de transporte, é necessária a verificação e ajuste dos seguintes aspectos em ordem seqüencial:

- Compatibilidade das escalas de discretização espaciais e temporais do modelo com o fenômeno de interesse;
- Representação adequada de geometria do domínio de interesse;
- Inserção de valores adequados de condições de contorno;
- Representação correta da variação dos níveis d'água;
- Representação correta dos valores de velocidades das correntes;
- Ajuste de parâmetros difusivos para o modelo de transporte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados fornecidos pelos modelos de derrame de óleo foram compilados em forma de gráficos, tabelas, mapas e animações, visando apresentar informações como:

- A área de influência de cada cenário;
- A posição e a concentração da mancha de óleo em qualquer instante da simulação;
- A previsão de tempo e o acúmulo de óleo na costa;
- A probabilidade de alcance da mancha de óleo.

Para elaboração desses resultados foram utilizados, além do Sisbahia 7.0 e do ADIOS2, os *softwares*: Surfer 8, ArcGIS 9.2, Excel 2007 e PowerPoint 2007.

5.1. Resultados Determinísticos

Os resultados gerados pelas simulações determinísticas para cada cenário compreenderam a posição da nuvem de partículas e a concentração da mancha de óleo dentro do domínio espacial modelado em intervalos de tempo de 30 minutos. Sendo assim, foram compiladas as seguintes informações mais relevantes sobre cada cenário simulado:

CENÁRIO DETERMINÍSTICO I:

A área de influência no entorno do local do vazamento, ou seja, toda a área onde a concentração de óleo calculada foi maior que a limite ($0,0003 \text{ Kg/m}^3$), foi de $7,85 \text{ Km}^2$, sendo que o óleo perdurou na superfície d'água, apresentando concentração maior que a limite, por 36 horas e meia.

O óleo não tocou a costa em nenhum momento da simulação, não apresentando assim, nenhum acúmulo no litoral.

A concentração máxima de óleo na superfície d'água, 3 horas após o vazamento, foi de $13,1040 \text{ Kg/m}^3$.

A área de influência do Cenário Determinístico I está mostrada na Figura 8 (a).

CENÁRIO DETERMINÍSTICO II:

A área de influência no entorno do local do vazamento, ou seja, toda a área onde a concentração de óleo calculada foi maior que a limite ($0,0003 \text{ Kg/m}^3$), foi de $12,94 \text{ Km}^2$, sendo que o óleo perdurou na superfície d'água, apresentando concentração maior que a limite, por 36 horas e meia.

O óleo não tocou a costa em nenhum momento da simulação, não apresentando assim, nenhum acúmulo no litoral.

A concentração máxima de óleo na superfície d'água, 3 horas após o vazamento, foi de $19,7450 \text{ Kg/m}^3$.

A área de influência do Cenário Determinístico II está mostrada na Figura 8 (b).

CENÁRIO DETERMINÍSTICO III:

A área de influência no entorno do local do vazamento, ou seja, toda a área onde a concentração de óleo calculada foi maior que a limite ($0,0003 \text{ Kg/m}^3$), foi de $18,53 \text{ Km}^2$, sendo que o óleo perdurou na superfície d'água, apresentando concentração maior que a limite, por 18 horas.

O óleo tocou a costa 12 horas após o instante do vazamento, sendo que no momento do primeiro toque na costa a concentração máxima na superfície d'água era de $1,88 \text{ Kg/m}^3$.

A concentração máxima de óleo na superfície d'água, 3 horas após o vazamento, foi de $9,63 \text{ Kg/m}^3$ e durante toda a simulação houve um acúmulo de $30,7$ toneladas ($38,14 \text{ m}^3$) de óleo no litoral.

A área de influência do Cenário Determinístico II está mostrada na Figura 8 (c).

CENÁRIO DETERMINÍSTICO IV:

A área de influência no entorno do local do vazamento, ou seja, toda a área onde a concentração de óleo calculada foi maior que a limite ($0,0003 \text{ Kg/m}^3$), foi de $18,24 \text{ Km}^2$, sendo que o óleo perdurou na superfície d'água, apresentando concentração maior que a limite, por 11 horas.

O óleo tocou a costa 7 horas e 45 minutos após o instante do vazamento, sendo que no momento do primeiro toque na costa a concentração máxima na superfície d'água era de $0,775 \text{ Kg/m}^3$.

A concentração máxima de óleo na superfície d'água, 3 horas após o vazamento, foi de 2,74 Kg/m³ e durante toda a simulação houve um acúmulo de 76,9 toneladas (95,53 m³) de óleo no litoral.

A área de influência do Cenário Determinístico II está mostrada na Figura 8 (d).

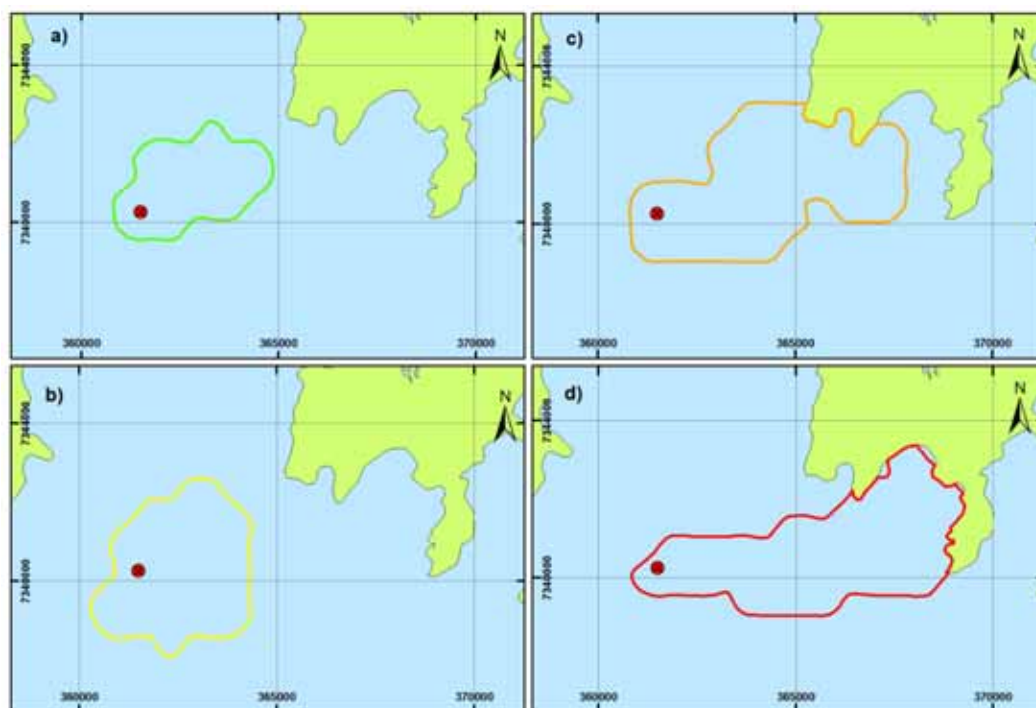


Figura 8 (a),(b),(c),(d) – Área de influência de cada cenário determinístico proposto.

Na Tabela 9 estão apresentados de forma resumida os resultados mais relevantes obtidos para cada cenário determinístico.

Tabela 9 – Resultados das simulações dos cenários determinísticos propostos.

Cenário	Área de influência	Concentração máxima 3h após o vazamento	Tempo previsto para primeiro toque na costa (t)	Concentração máxima no instante t	Massa acumulada na costa	Último instante registrado
Cenário Determinístico I	7,85 Km ²	13,1040 Kg/m ³	∞	0	0	36,50 horas
Cenário Determinístico II	12,94 Km ²	19,7450 Kg/m ³	∞	0	0	36,50 horas
Cenário Determinístico III	18,53 Km ²	9,6331 Kg/m ³	12,03 horas	1,8706 Kg/m ³	30.700 Kg	18,0167 horas
Cenário Determinístico IV	18,24 Km ²	2,7369 Kg/m ³	7,76 horas	0,77463 Kg/m ³	76.900 Kg	11,0167 horas

A área de influência de cada cenário determinístico proposto pode ser melhor visualizada no APÊNDICE C.

5.2. Resultados Probabilísticos

Após a compilação dos resultados obtidos pelas simulações probabilísticas, foi gerado para cada cenário, um mapa de isolinhas de probabilidade de alcance da mancha de óleo. O modelo probabilístico considera cada um dos 50 vazamentos, simulados em instantes iniciais diferentes, como eventos independentes e registra a passagem de cada evento em todos os pontos do domínio. Com esses dados o modelo calcula a quantidade de eventos que passaram em cada ponto, gerando então um mapa de isolinhas de passagem da mancha, apresentadas em termos de probabilidade.

A Figura 9 e a Figura 10 mostram os mapas de probabilidade de passagem da mancha de óleo gerados para o Cenário Probabilístico I e para o Cenário Probabilístico II, respectivamente.

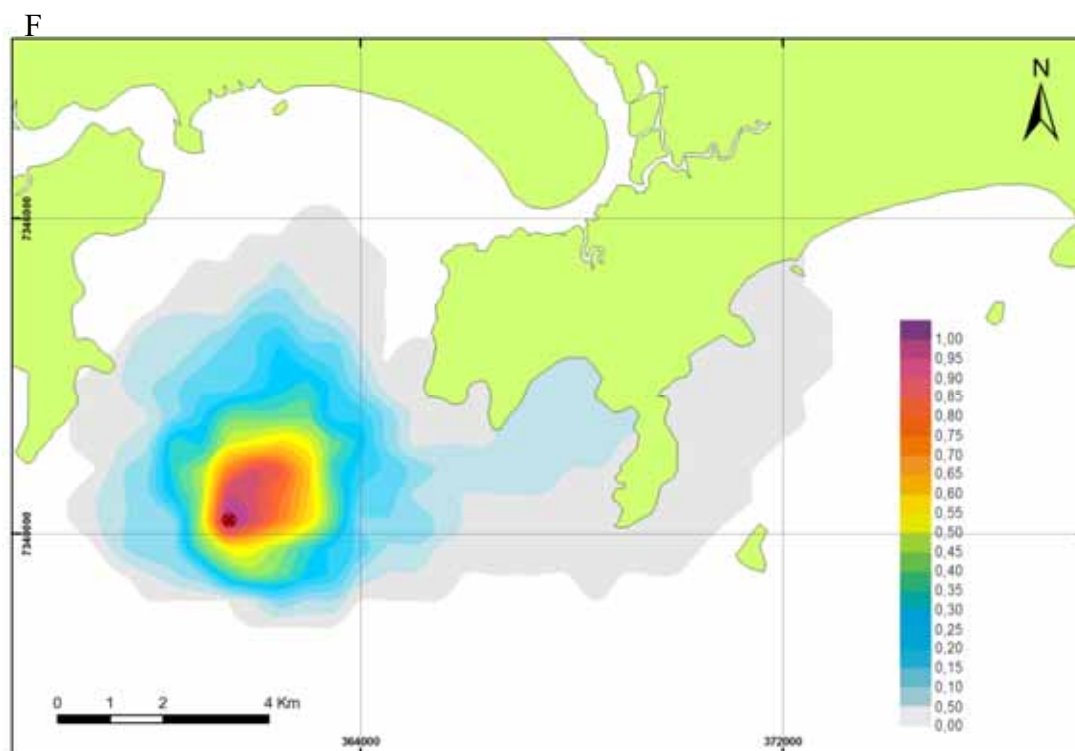


Figura 9 – Mapa de probabilidade de passagem da mancha de óleo para o Cenário Probabilístico I.

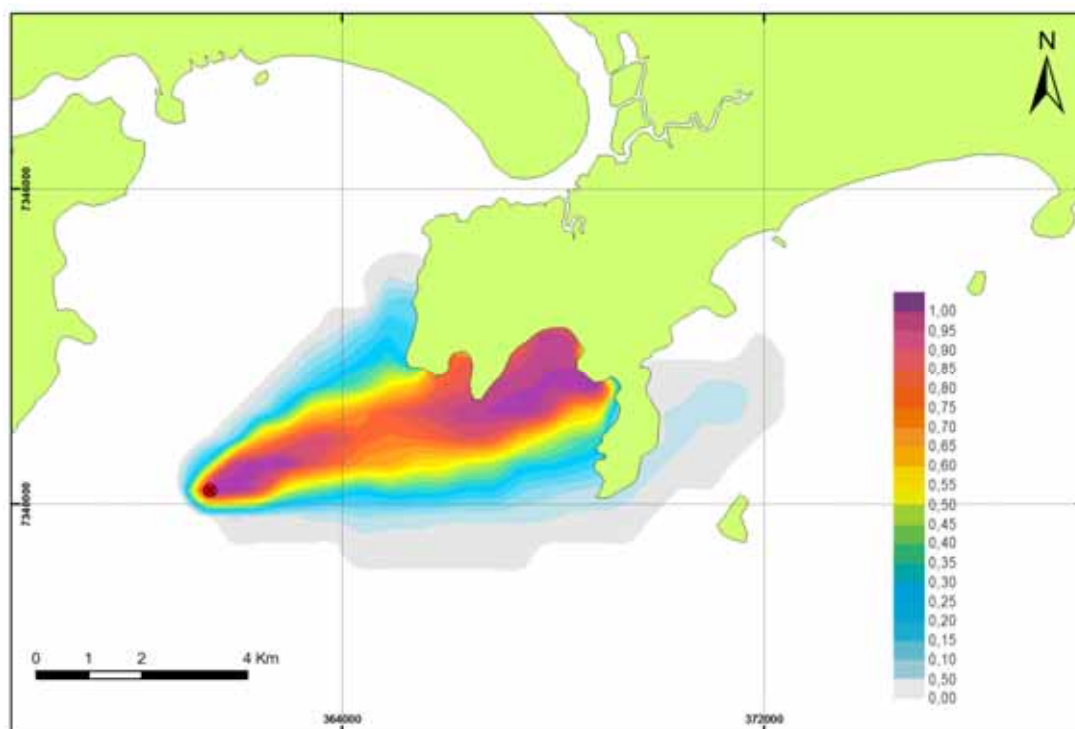


Figura 10 – Mapa de probabilidade de passagem da mancha de óleo para o Cenário Probabilístico II.

Os mapas de probabilidade de passagem da mancha de óleo para o Cenário Probabilístico I e para o Cenário Probabilístico II podem ser melhor visualizados no APÊNDICE E e no APÊNDICE F, respectivamente.

5.3. Discussão dos Resultados

Analisando-se os resultados gerados pelos modelos determinísticos é possível afirmar que as simulações realizadas foram capazes de representar os seguintes aspectos:

➤ A variação da área de influência da mancha de óleo devido ao período de maré em que ocorre o vazamento:

Comparando-se os Cenários Determinísticos I e II, que se diferenciavam apenas pelo período de maré utilizado (a intensidade e a direção do vento e as demais características do derrame foram as mesmas nos dois cenários), pôde-se observar que durante a maré de quadratura a área de influência da mancha de óleo foi de 7,85 Km² e que durante a maré de

sizígia foi de 12,94 Km², ou seja, 1,65 vezes maior. Essa variação se deve ao fato de que maiores amplitudes de variação do nível d'água proporcionam um aumento na intensidade das correntes advectivas, implicando assim numa maior extensão do deslocamento da mancha de óleo. A comparação entre as amplitudes do nível d'água durante a maré de sizígia e de quadratura pode ser feita por meio da curva de maré utilizada, apresentada na Figura 6.

➤ O deslocamento da mancha de óleo em função da intensidade de vento utilizada no modelo hidrodinâmico:

Apesar do SisBAHIA não considerar o efeito do vento diretamente sobre o óleo, o modelo hidrodinâmico utilizado para o transporte lagrangeano considera o efeito induzido do vento sobre a superfície d'água para o cálculo do campo de correntes hidrodinâmicas. Sendo assim, por meio dos resultados dos Cenários Determinísticos II, III e IV, pode-se observar a influência da intensidade do vento sobre o deslocamento da mancha de óleo, uma vez que todos ocorreram num mesmo período de maré (sizígia) e representaram derrames com as mesmas características. Quanto maior a intensidade do vento utilizado, maior foi o deslocamento da mancha de óleo na direção ENE (lés-nordeste), como mostram as Figuras 8 b); c); e d), e menor foi o tempo que o óleo levou para tocar a linha de costa, como apresentado na Tabela 9.

➤ O acúmulo de óleo na costa em cada cenário:

Para os Cenários Determinísticos III e IV, nos quais o óleo tocou o litoral, o modelo calculou a massa total de óleo retida considerando o coeficiente de absorção igual 0,2 para toda a linha de costa (fronteiras de terra). Isto implica que quando uma partícula de massa M toca o litoral, $0,2M$ fica retido no ponto atingido e a partícula retorna para a água com sua massa igual a $0,8M$. Podem ser atribuídos outros valores de coeficientes de absorção em cada seguimento da linha de costa, visando simular a absorção provocada por diferentes tipos de ambientes como: costões rochosos, praias arenosas ou manguezais, porém não existe metodologia para defini-los e seu uso acaba sendo um tanto empírico.

Devido ao deslocamento mais intenso da mancha de óleo no Cenário Determinístico IV, no qual o óleo acaba alcançando a costa 4 horas e 15 minutos antes que no Cenário Determinístico III, houve um acúmulo de 76.900Kg, ou seja, uma quantidade de óleo 2,5 vezes maior que a acumulada no Cenário Determinístico IV (30.700Kg).

Apesar do modelo não considerar o efeito de saturação do ambiente pelo óleo, o que implica na perda de sua capacidade de absorver o excesso de óleo, esses valores são de grande relevância para a estimativa da quantidade de óleo que deverá ser removida do ambiente em casos de toque na costa.

➤ O tempo que o óleo permanece na superfície d'água em função da curva de decaimento inserida:

Quando a concentração máxima de uma mancha de óleo for menor que a concentração limite estabelecida ($0,0003\text{Kg/m}^3$) o modelo não apresenta resultados, isto é, considera que não há mais óleo na superfície d'água naquele instante. Sendo assim, pode-se notar que para a Curva C (APÊNDICE C), referente ao Cenário Determinístico IV, a quantidade de óleo remanescente na superfície d'água diminui no decorrer do tempo fazendo com que a simulação transcorra por um período de tempo menor que as demais (aproximadamente 11 horas). Para o Cenário Determinístico II, por exemplo, a curva de decaimento inserida (Curva A – APÊNDICE C) representa um decaimento da massa de óleo remanescente menos acentuado, fazendo com que a simulação decorra num período de tempo maior (aproximadamente 36 horas e 30 minutos).

A diminuição da massa de óleo remanescente na superfície d'água, contabilizada pelo ADIOS2, está relacionada diretamente com os processos de evaporação e dispersão sofridos pelo óleo derramado. Conforme se aumenta a intensidade do vento em cada cenário simulado, aumenta-se significativamente a quantidade de óleo disperso na coluna d'água devido aos efeitos da agitação do mar, diminuindo conseqüentemente a quantidade evaporada e a quantidade remanescente na superfície d'água.

Analisando-se os mapas gerados pelos modelos probabilísticos é possível afirmar que as simulações realizadas foram capazes de representar o seguinte aspecto:

➤ A identificação das áreas mais suscetíveis à passagem da mancha de óleo para os derrames propostos.

As Figuras 9 e 10 mostram a probabilidade do óleo alcançar qualquer local do domínio espacial modelado, dentro do corpo d'água ou nos limites da linha de costa, ou seja, por meio

da visualização dos mapas gerados é possível ponderar cada área quanto à sua suscetibilidade aos derrames propostos.

Comparando os dois mapas, pode-se observar que as manchas de óleo se deslocaram de forma mais variada nas simulações realizadas no Cenário Probabilístico I, para o qual o vento adotado possuía intensidade e direção variáveis no tempo, enquanto que no Cenário Probabilístico II, observa-se uma direção predominante (direção ENE) no deslocamento das manchas, para o qual foi utilizada direção do vento constante.

Pode-se visualizar que em ambos cenários a mancha de óleo pode alcançar a linha de costa em determinados pontos do domínio espacial modelado. No Cenário Probabilístico I, a costa localizada na direção ENE (em relação ao vazamento) apresenta probabilidade de 0,00 a 0,10 de ser atingida pelo óleo enquanto que a costa localizada na direção NO (noroeste) apresenta probabilidade de 0,00 a 0,05. No Cenário Probabilístico II, pode-se observar que a costa localizada na direção ENE apresenta probabilidade variando de 0,00 a 1,0. Esses valores de probabilidade podem ainda ser interpretados em termos de porcentagem, apenas multiplicando o valor da probabilidade por 100. Desta forma pode-se ler que: “Determinada área possui x por cento de chance de receber o óleo derramado”.

A Figura 9 mostra ainda, que as manchas de óleo simuladas no Cenário Probabilístico I podem alcançar maiores extensões na direção ENE, o que pode ser comparado com o Histograma de Direção dos Ventos na Figura 4, que apresentou a direção de 250° em relação a norte como a mais freqüente (a direção dos ventos é medida de onde eles vêm).

6. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi possível compreender de forma global os fenômenos relacionados a um derrame de óleo em um corpo d'água e reconhecer ainda a dificuldade de se realizar a simulação de todos os processos envolvidos em tais situações.

Os *softwares* SisBAHIA e ADIOS2, após serem adequadamente manipulados, mostraram ser capazes de simular os principais processos referentes à trajetória e ao intemperismo de uma mancha de óleo derramada num corpo d'água, sendo que o estudo de caso realizado na região do Porto de Santos foi de grande importância para praticar e compreender o uso e as aplicações de tais *softwares*, bem como perceber suas limitações.

A compilação dos dados determinísticos e probabilísticos gerados a partir da simulação de cenários possibilitou a obtenção de informações relevantes, as quais foram organizadas em forma de mapas e tabelas mostrando:

- A variação da área de influência da mancha de óleo devido ao período de maré em que ocorre o vazamento;
- O deslocamento da mancha de óleo em função da intensidade de vento utilizada no modelo hidrodinâmico;
- O acúmulo de óleo na costa em cada cenário;
- O tempo que o óleo permanece na superfície d'água em função da curva de decaimento adotada;
- O mapeamento das áreas mais suscetíveis à passagem da mancha de óleo para os derrames propostos.

Para a realização das simulações, os dados disponíveis para a região foram introduzidos nos *softwares* sem proceder a uma calibragem dos modelos hidrodinâmicos e de transporte lagrangeano, uma vez que o objetivo era a simulação de cenários e não a validação de modelos. Dessa forma, foi obtida uma representação aproximada da região investigada, a qual será mais ou menos realista de acordo com os dados disponíveis utilizados nas simulações.

Para que as informações geradas pelas simulações sejam capazes de subsidiar a elaboração de planos de mitigação, o mapeamento de áreas de risco ou ainda o delineamento de estratégias emergenciais em casos de acidentes reais é necessário uma grande quantidade de dados para calibração e validação dos modelos. Tais informações devem ser obtidas a partir de um levantamento de dados preciso e atualizado, realizado em um programa adequado de monitoramento ambiental da região de interesse.

Os resultados de simulações realizadas a partir de modelos previamente validados que calculem a probabilidade do óleo em atingir determinadas áreas (mapas probabilísticos)

podem ainda ser correlacionados com as Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO), gerando assim os mapas de vulnerabilidade, que são ferramentas importantes utilizadas para o gerenciamento e o planejamento ambiental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE - American Society of Civil Engineers. **State-of-the-art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills**. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, n. 11, p. 594 – 609, 1996.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática**. 3. ed. – São Paulo: Contexto, 2006. 389 p.

BRASIL. **Informação Técnica ELPN/IBAMA nº023, de 03 de outubro de 2002**. Rio de Janeiro - RJ. Ministério do Meio Ambiente. Escritório de Licenciamento de Atividades do Petróleo e Nuclear.

BRASIL. **RESOLUÇÃO nº 293, de 12 de dezembro de 2001**. Brasília - DF. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. **RESOLUÇÃO nº 398, de 11 de junho de 2008**. Brasília - DF. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente.

Carta Náutica da DHN: **Brasil - Costa Sul: Porto de Santos**. Escala 1:23.000, Projeção de Mercator. Levantamentos efetuados pela Marinha do Brasil até 1975. Sondagens em metros.

Carta Náutica da DHN: **Brasil - Costa Sul: Proximidades do Porto de Santos**. Escala 1:80.000, Projeção de Mercator. Levantamentos efetuados pela Marinha do Brasil até 1982. Sondagens em metros.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Gerenciamento de Riscos – Vazamentos de Óleo**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 7 jul. 2009.

CODESP - Companhia Docas do Estado de São Paulo. **Resumo Estatístico dos Últimos Cinco Anos**. Disponível em: <http://www.portodesantos.com/doc/nav.php?a=historico_carga&d=negocios>. Acesso em: 04 set. 2009.

CODESP - Companhia Docas do Estado de São Paulo. **Relatório Anual - 2008**. Disponível em: <<http://www.portodesantos.com.br/relatorio/Relatorio2008.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2009.

COPPE-UFRJ. **Manual do Usuário do Sisbahia**. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisbahia>>. Acesso em: 10 jul. 2009.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (EUA). **National Geophysical Data Center**. Disponível em: <<http://rimmer.ngdc.noaa.gov/coast/>>. Acesso em: 27 jan. 2009.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (EUA). **Software & Data Sets Supporting Responding to Oil Spills: ADIOS2**. Disponível em: <<http://response.restoration.noaa.gov/>>. Acesso em: 04 out. 2009.

PALADINO, E. E. **Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Trajetórias de Derrames de Petróleo no Mar**. 2000. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

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

ROSMAN, P. C. C. (Editor) - **Referência Técnica do SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. www.sisbahia.coppe.ufrj.br. COPPE/UFRJ, 2009.




ROSMAN, Paulo César Colonna. **TCC - UNESP**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <Fernando Roversi> em: 24 abr. 2009.

SOTO, Y. J. M. **A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá – PR. 2004**. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

APÊNDICE A

Mapa de Localização da Área de Estudo

Legenda:

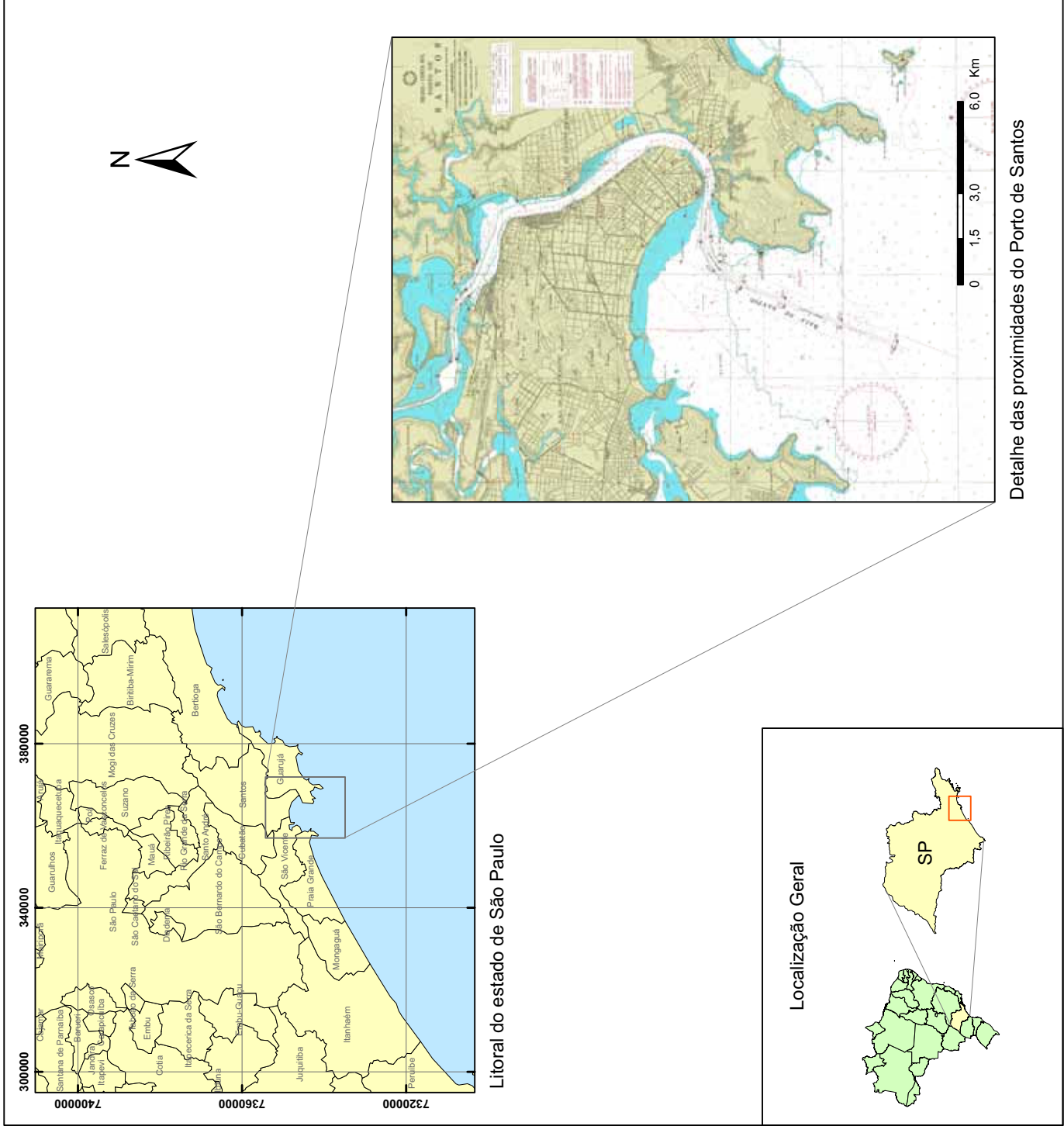
-  Território nacional
-  Estado de São Paulo
-  Oceano Atlântico

Fontes:
 Carta Náutica da Diretoria de Hidrografia e Navegação. DHN - Marinha do Brasil, 1975.
 Dados digitais do IBGE, 2009.

Projeção UTM SAD1969 - Zona 23S



Elaboração: Fernando Roversi
 DATA: 04/09/2009

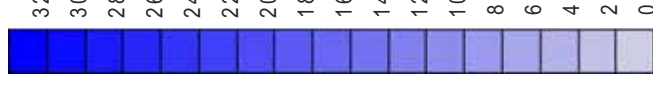


APÊNDICE B

Batimetria da Região de Estudo

Legenda:

Profundidade (m):



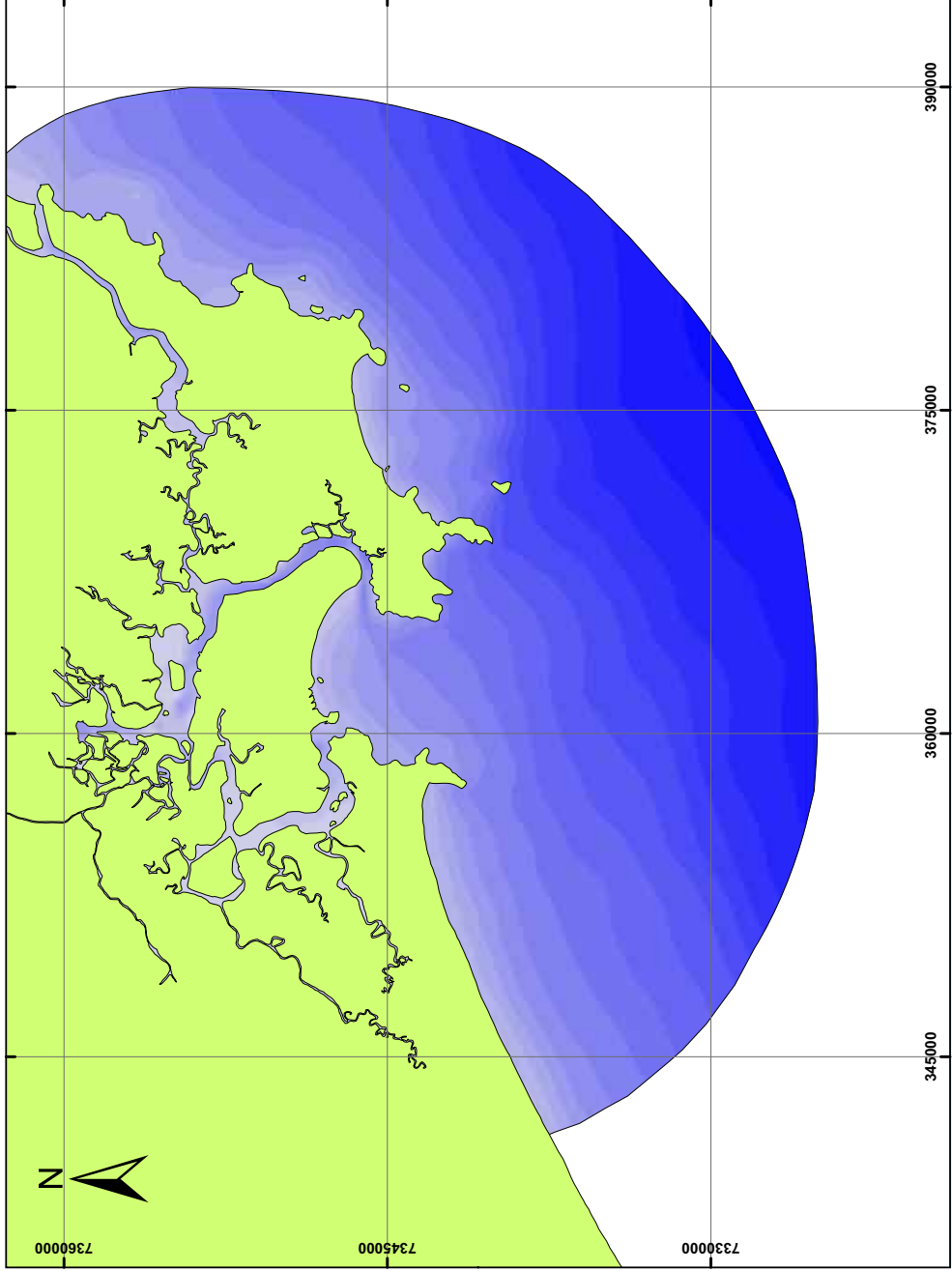
Contornos de Terra

Contorno Aberto



unesp

Elaboração: Fernando Roversi
DATA: 04/09/2009



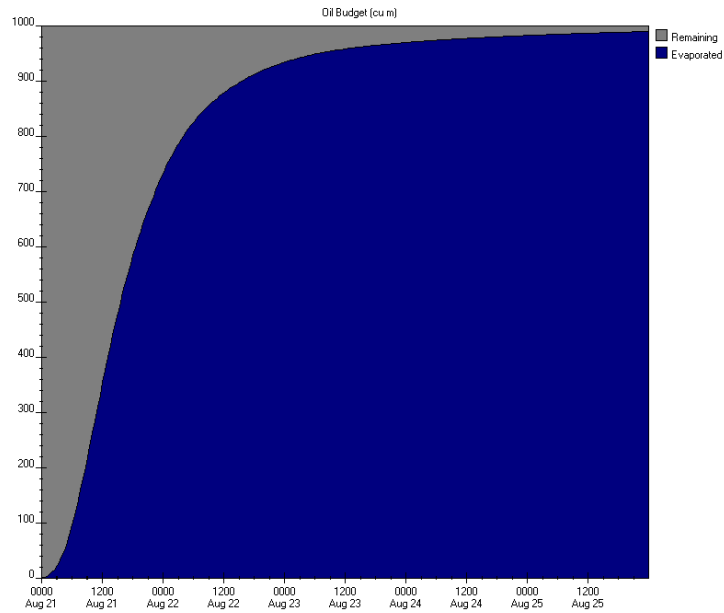
Projeção UTM SAD1969 - Zona 23S
Método de Interpolação: Kriging
Fonte: Cartas Náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação
DHN - Marinha do Brasil, 1975.

APÊNDICE C

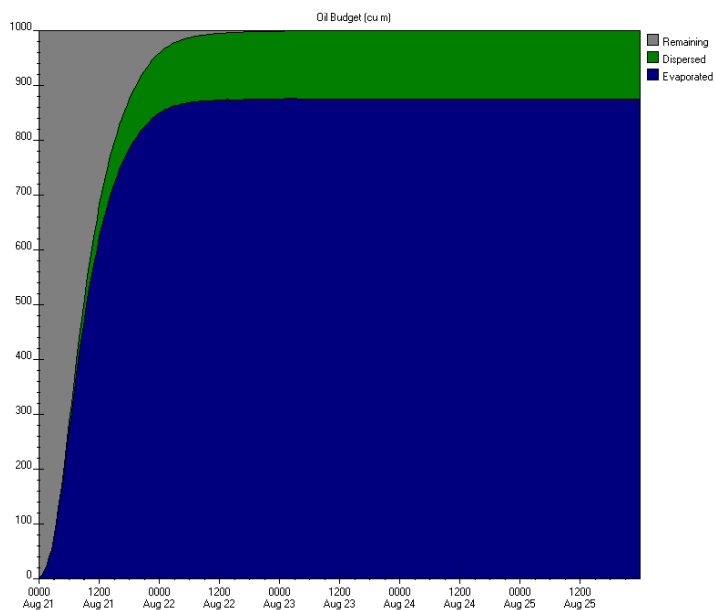
Curvas da quantidade de óleo remanescente, evaporado e dissolvido para cada cenário proposto, geradas no ADIOS2.

No eixo y está apresentada a quantidade de óleo em metros cúbicos e no eixo x está indicado o tempo decorrido após o instante do vazamento em intervalos de 12 horas.

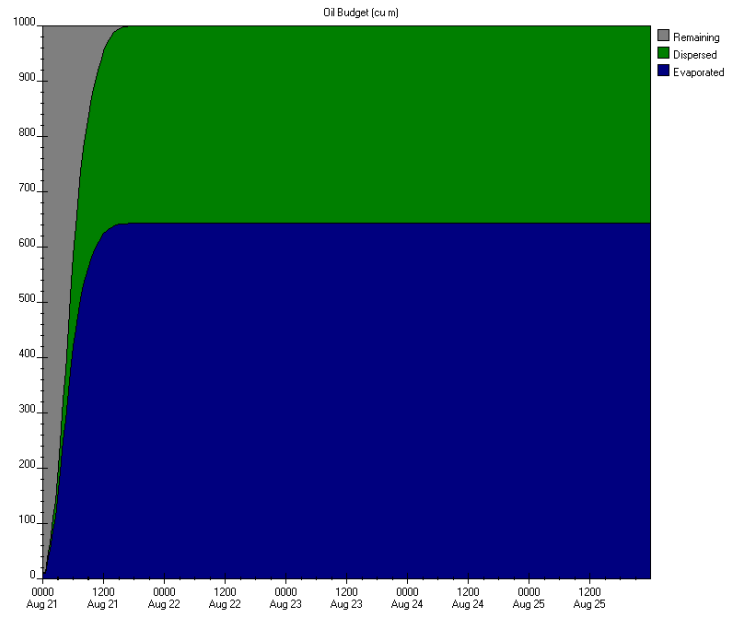
➤ Curva A - Cenários Determinísticos I e II e Cenário Probabilístico I



➤ Curva B - Cenário Probabilístico III



➤ Curva C - Cenário Determinístico IV e Cenário Probabilístico II



APÊNDICE D

Área de Influência dos Cenários Determinísticos

Legenda:

- Local do Vazamento
- Contornos de Terra
- Oceano
- Contorno Aberto

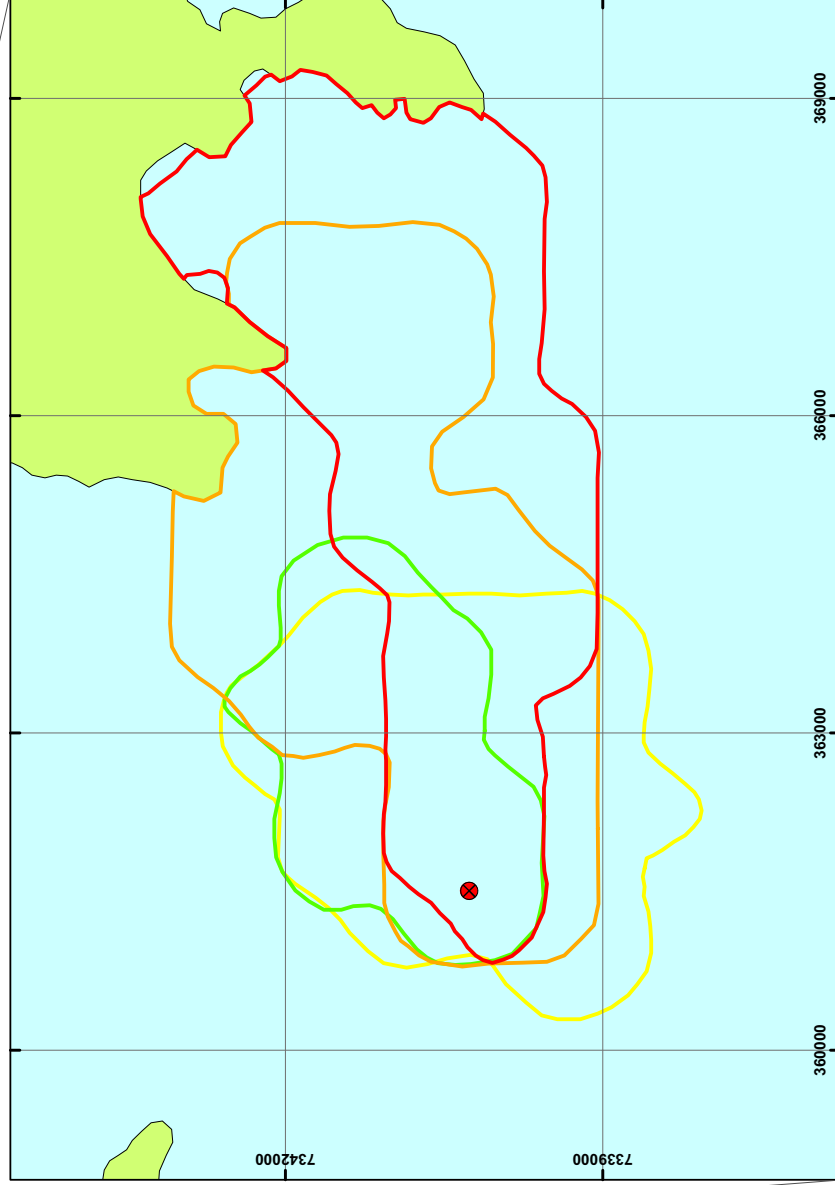
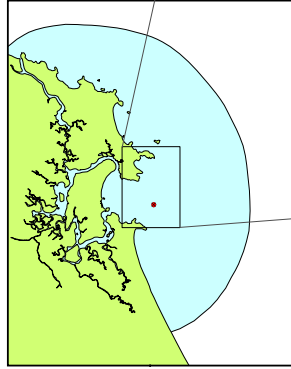
Limite das áreas com concentrações maiores que 0,0003 Kg/m³:

- Cenário Determinístico I
- Cenário Determinístico II
- Cenário Determinístico III
- Cenário Determinístico IV

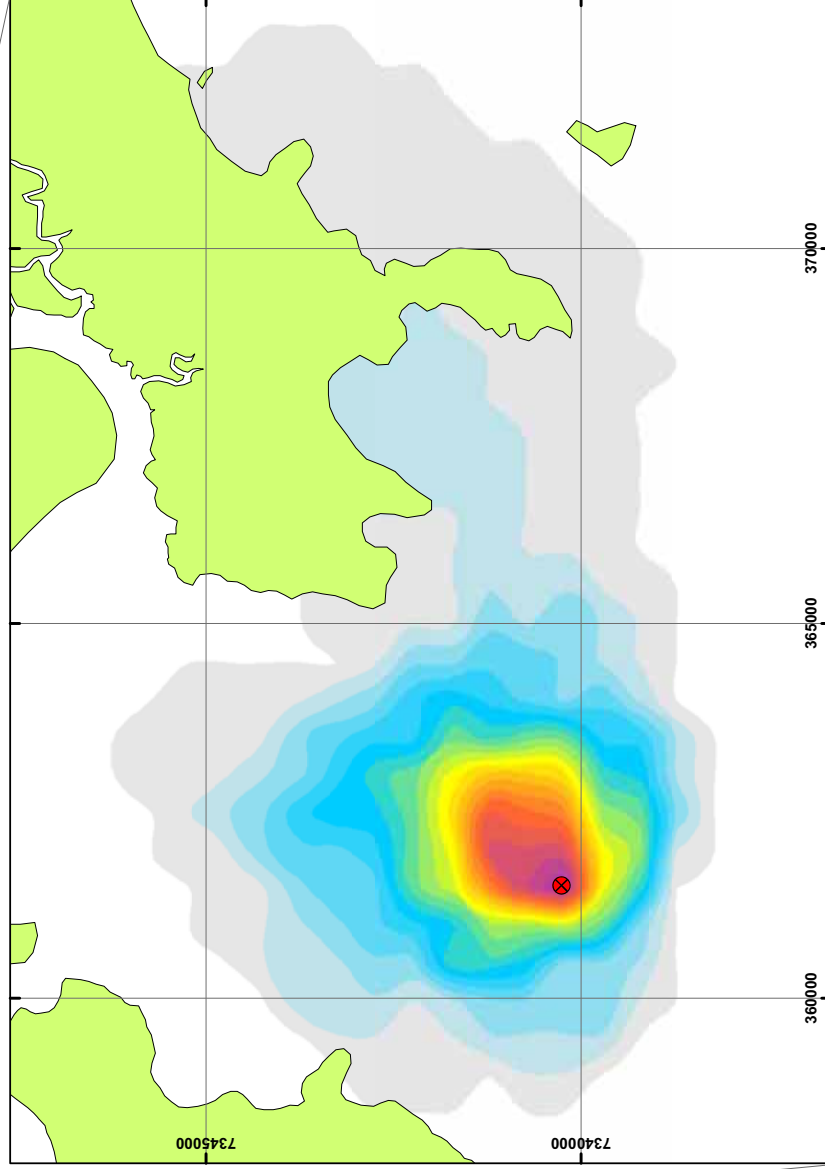
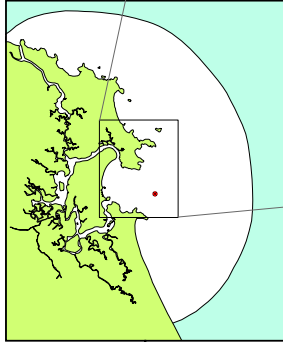


Elaboração: Fernando Roversi

DATA: 04/09/2009



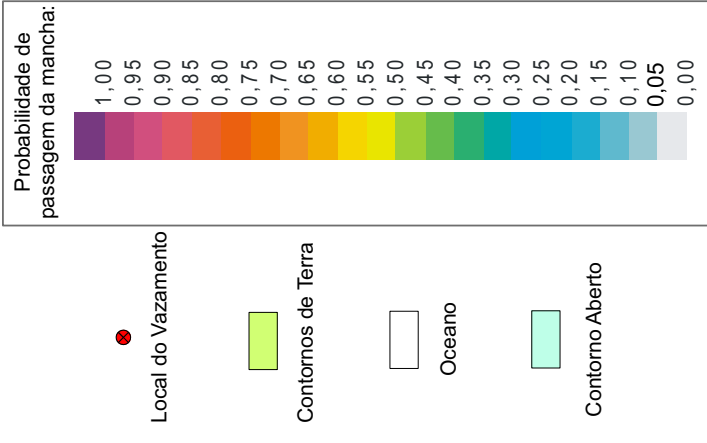
Projeção UTM SAD1969 - Zona 23S



APÊNDICE E

Cenário Probabilístico I

Legenda:

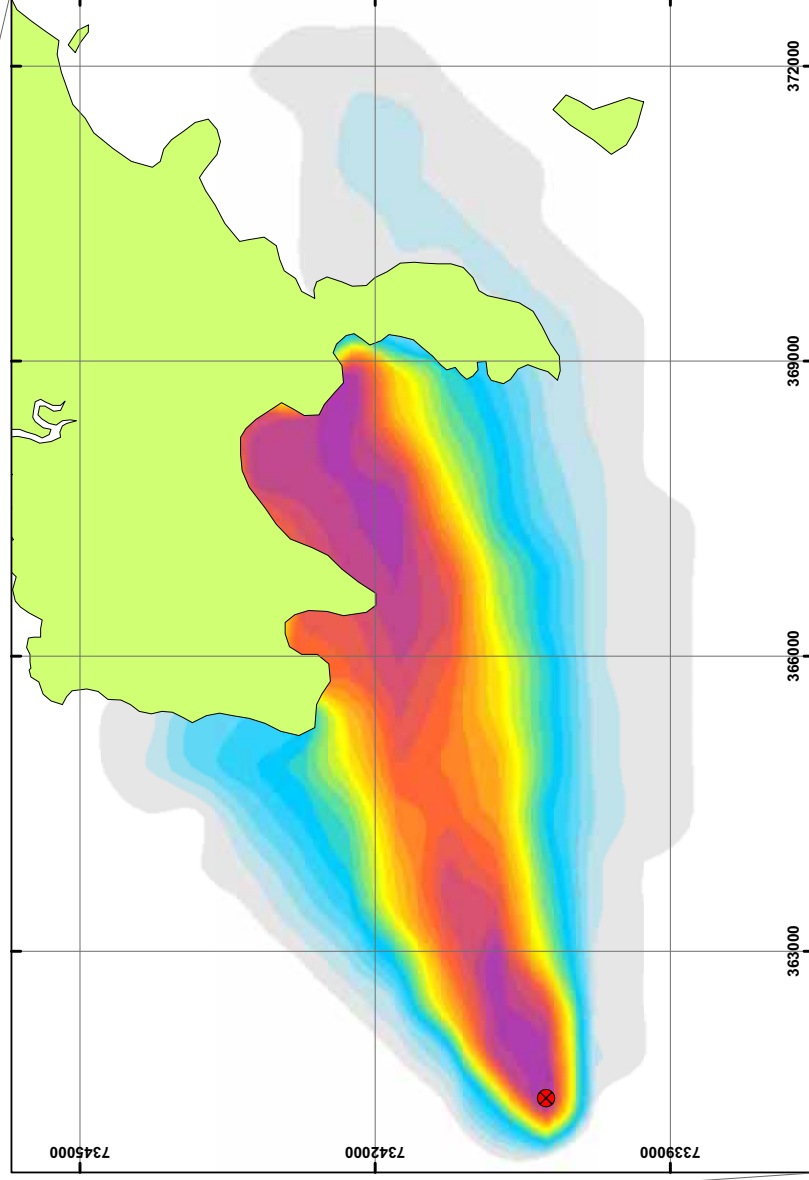
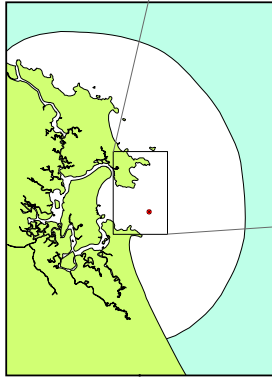


unesp

Elaboração: Fernando Roversi

DATA: 04/09/2009

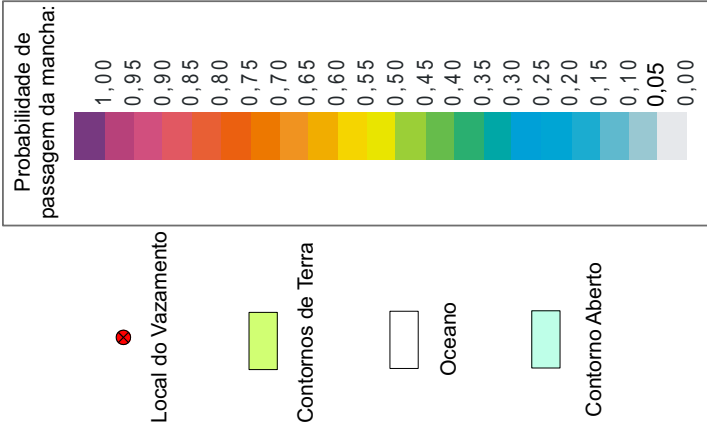
Projeção UTM SAD1969 - Zona 23S



APÊNDICE F

Cenário Probabilístico II

Legenda:



Elaboração: Fernando Roversi
 DATA: 04/09/2009

Projeção UTM SAD1969 - Zona 23S

ANEXO A

Modelo de Termo de Referência para a elaboração das simulações a serem incorporadas nos estudos para licenciamento ambiental das atividades (Informação Técnica ELPN/IBAMA nº023, de 03 de outubro de 2002)

A empresa deverá apresentar a simulação da dispersão e trajetória de uma mancha de óleo proveniente de um derramamento acidental, com cenários que atendam os seguintes aspectos da modelagem:

- i. Probabilística, considerando as condições sazonais;
 - ii. Determinística crítica, referindo-se aos piores cenários (que favoreçam a chegada do óleo na costa) dentre as condições sazonais, corroborada pela análise de frequência de fenômenos meteorológicos relevantes à área da atividade, como tempestades oceânicas.
- Deverão ser apresentados como requisitos mínimos, as premissas, parâmetros e valores empregados na modelagem, conforme anexo (*).
 - Nas áreas das atividades situadas fora da plataforma continental, a simulação realizada deverá englobar dados de vento e de corrente oceânica, sendo que tais dados deverão estar de acordo com o apresentado no diagnóstico do meio físico.
 - Para as atividades localizadas sobre a plataforma continental, em águas rasas (com profundidade menor que 60m), a modelagem deverá abranger, além dos dados de vento e correntes costeiras, parâmetros de ondas (deriva de Stokes) e correntes de maré, sendo que tais dados deverão estar de acordo com o apresentado no diagnóstico do meio físico.
 - A empresa deverá justificar o tipo de óleo e o local do vazamento (superfície, fundo) considerado na modelagem.
 - Com relação ao volume do derramamento a ser considerado na modelagem, deverá ser utilizado o critério de descarga de pior caso constante na Seção 2.2.1 do Anexo II da Resolução CONAMA nº293.
 - Os piores cenários deverão apresentar previsão de tempo e concentração de toque de óleo na costa;
 - O momento de finalizar o experimento de simulação severa considerar para áreas sensíveis a espessura de 0,0003mm, que corresponde ao filme de óleo denominado por arco-íris, limite visual de aproximadamente 5ppm;

- As áreas de impacto identificadas nos cenários deverão ser apresentadas de acordo com a seção 3 do Anexo II da Resolução CONAMA nº293. Cabe salientar que os impactos do derramamento de óleo nessas áreas deverão ser discutidos no item Identificação e Avaliação dos Impactos Ambientais.

***Anexo:**

Os itens (a,b) são apresentados para o diagnóstico ambiental do meio físico:

a) Grade batimétrica utilizada no modelo, com as fontes das informações e cotas batimétricas referenciadas, tipo de interpolação, acompanhados de mapas e figuras representativas;

b) Descrição das forçantes utilizadas como entrada no modelo (dados meteorológicos, oceanográficos e parâmetros do óleo), com referências à forma de obtenção (fonte, localização, equipamentos, referência bibliográfica, e validação de dados globais) e tratamento (filtros, médias, interpolações)destes dados;

c) Descrição das Considerações (Domínio, Condições de Contorno) e equações utilizadas na confecção do modelo numérico, levando em consideração as diferenças relativas à modelagem hidrodinâmica e de derrame de óleo;

d) As animações das simulações dos piores casos, de forma que os planos de emergência possam ser elaborados de acordo com a dinâmica apresentada pelo ambiente, além do enquadramento de áreas sensíveis expostas ao derrame;

e) Relatório de validação e calibração dos modelos hidrodinâmicos para o licenciamento da fase de produção.