

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL  
MESTRADO PROFISSIONAL EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL**

**José Maria de Castro Junior**

**Modelagem computacional da hidrodinâmica e  
do transporte de óleo. Estudo de caso para o  
Terminal de Ponta Negra, Maricá.**

**Niterói, RJ**

**2019**

José Maria de Castro Junior

**Modelagem computacional da hidrodinâmica e do transporte de óleo. Estudo de caso para o Terminal de Ponta Negra, Maricá.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Defesa e Segurança Civil. Área de Concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos. Linha de Pesquisa: Instrumentos de Gestão para a Redução de Riscos de Desastres.

Orientador: Prof. Jorge Luiz Fernandes de Oliveira, D.Sc.

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BFD  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C355m Castro junior, José Maria de  
Modelagem computacional da hidrodinâmica e do transporte de  
óleo. : Estudo de caso para o Terminal de Ponta Negra,  
Maricá. / José Maria de Castro junior ; Jorge Luiz Fernandes  
de Oliveira, orientador. Niterói, 2019.  
78 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDSC.2019.m.83045759734>

1. Modelagem computacional. 2. Derrame de óleo. 3. Porto de  
Ponta Negra. 4. Trajetória. 5. Produção intelectual. I.  
Oliveira, Jorge Luiz Fernandes de, orientador. II.  
Universidade Federal Fluminense. Faculdade de Direito. III.  
Título.

CDD -

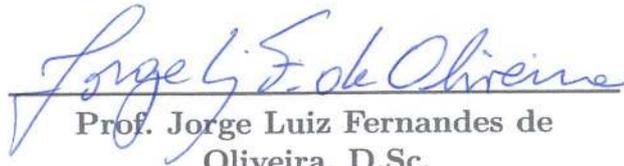
José Maria de Castro Junior

## **Modelagem computacional da hidrodinâmica e do transporte de óleo. Estudo de caso para o Terminal de Ponta Negra, Maricá.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Defesa e Segurança Civil. Área de Concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos. Linha de Pesquisa: Instrumentos de Gestão para a Redução de Riscos de Desastres.

Aprovado em: 10 de abril de 2019

Banca Examinadora



**Prof. Jorge Luiz Fernandes de  
Oliveira, D.Sc.**  
Orientador



**Reiner Olíbano Rosas, D.Sc.**  
UFF



**Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.**  
COPPE/UFRJ

Niterói, RJ  
2019



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
MESTRADO PROFISSIONAL EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL

Ata da sessão de julgamento do Trabalho Final de Conclusão de Mestrado em Defesa e Segurança Civil, do aluno **José Maria de Castro Júnior**, realizada em 10 de abril de 2019.

Ao décimo dia do mês de abril de 2019, às 14:00 horas, na sede da Coordenação do Mestrado na Rua Tiradentes, 17, anexo II, sala 26, Ingá - Niterói - RJ, reuniu-se a Banca Examinadora designada na forma regimental pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Defesa e Segurança Civil, para julgar o trabalho final de conclusão do curso, apresentado pelo aluno **José Maria de Castro Júnior**, sob o título: “**Modelagem computacional da hidrodinâmica e do transporte de óleo. Estudo de caso para o Terminal de Ponta Negra - TPN**”, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Defesa e Segurança Civil.

A Banca foi presidida pelo Orientador:

**Prof. Dr. Jorge Luiz Fernandes de Oliveira (UFF).**

Tendo ainda como membros os Professores:

**Prof. Dr. Reiner Olibano Rosas (UFF) e Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman (UFRJ).**

Aberta a sessão pública, foi concedido ao aluno o tempo de 40 minutos para expor o conteúdo de seu trabalho. Finda a exposição, seguiu-se o exame do aluno, através da arguição de cada examinador. Encerrada a arguição, a Comissão reuniu-se em caráter reservado e considerando os questionamentos formulados pelos examinadores e as correspondentes respostas apresentadas, concluiu pela aprovação (\*) do candidato. De acordo com o Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação desta Universidade, foi lavrada a presente Ata que após lida e julgada conforme, vai assinada pelos membros presentes. Niterói, 10 de abril de 2019.

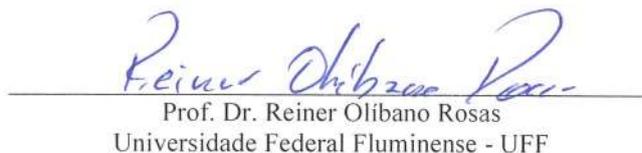
SUGESTÕES E/OU CONDIÇÕES E PRAZO DA BANCA EXAMINADORA:

Aprovação do discente sem ressalvas.

\*

- (a) aprovação
- (b) não aprovação

  
Prof. Dr. Jorge Luiz Fernandes de Oliveira  
Universidade Federal Fluminense - UFF

  
Prof. Dr. Reiner Olibano Rosas  
Universidade Federal Fluminense - UFF

  
Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

*Dedico este trabalho à minha mãe, por todo apoio e confiança, fundamentais para a conclusão deste.*

*À minha família, Lúcia e Yasmin, pelo suporte e paciência ao longo desta jornada.*

# AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as incontáveis bênçãos que me permitiram chegar até aqui.

Ao Prof. Jorge Luiz Fernandes de Oliveira, por seu incentivo, apoio e pela excelente orientação. Seu estímulo foi fundamental em todas as fases, desde a ideia de me candidatar ao mestrado até a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman pelos cursos de Modelagem Ambiental Aplicada, base para o desenvolvimento desta dissertação, e por todas as valiosas dicas e orientações no uso e aplicação do SisBaHiA®.

À minha família, esposa e filha, por todo apoio durante esta longa caminhada.

À todos que de alguma forma contribuíram para a consecução deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original”  
Albert Einstein*

# RESUMO

Com a possibilidade da instalação do porto e terminal petroquímico em Ponta Negra, surgem as preocupações com riscos de desastres e consequentes danos ao meio ambiente. A fim de embasarmos planos e ações emergenciais, devemos lançar mão de sistemas de modelagem numérica para simularmos os eventos e estudar a possível dinâmica em caso de derramamento de óleo. Através do uso da modelagem computacional, podemos simular vários eventos em curto espaço de tempo, para várias condições, e obter um resultado estatístico de como se comportaria a pluma de óleo.

O presente estudo utiliza o SisBaHiA® como sistema de modelagem computacional. São apresentados os seus modelos e a configuração de cada um deles para viabilizar um estudo do transporte da pluma de óleo no mar.

São simulados dois cenários, um em condições de tempo normal e outro sob os efeitos de um sistema frontal, onde ventos de sudoeste atingiram a área forçando o deslocamento da pluma em direção à costa.

Além da visualização do movimento da pluma, temos como resultado um estudo probabilístico onde é feita a análise de 100 derramamentos de óleo distribuídos ao longo de um mês e gerada uma figura com a probabilidade de passagem da mancha de óleo.

Para o cenário simulado sob a ação de um sistema frontal, foram calculadas trajetórias aéreas com o HYSPLIT a fim de se determinar a população atingida pelos componentes do óleo evaporados.

**Palavras-chave:** SisBaHiA®. modelagem computacional. derrame de óleo. porto de Ponta Negra. HYSPLIT. trajetória.

# ABSTRACT

With the possibility of installing the port and petrochemical terminal in Ponta Negra, there are concerns about the risks of disasters and consequent damages to the environment. In order to support emergency plans and actions, we must use numerical modeling systems to simulate events and study possible dynamics in the event of an oil spill. Through the use of computational modeling, we can simulate various events in a short time, for various conditions, and obtain a statistical result of how the oil plume would behave.

The present study uses SisBaHiA® as a computational modeling system. Their models and the configuration of each of them are presented to make feasible a study of the transportation of the oil plume in the sea.

Two scenarios are simulated, one under normal weather conditions and the other under the effects of a frontal system, where significant southwest winds reached the area forcing the plume to move towards the coast.

In addition to the visualization of the movement of the boom, we have a probabilistic study where the analysis of 100 oil spills distributed over a month is generated and a figure with the probability of passing the oil spot is generated.

For the simulated scenario under the action of a frontal system, air trajectories with the HYSPLIT were calculated in order to determine the population affected by the evaporated oil components.

**Keywords:** SisBaHiA®. computational modeling. oil spill. port of Ponta Negra. HYSPLIT. trajectory.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização de Maricá (RJ). . . . .	3
Figura 2 – Infraestrutura do empreendimento portuário. . . . .	5
Figura 3 – Processo de “intemperismo” do óleo derramado. . . . .	9
Figura 4 – Classes de Petróleo segundo o °API. . . . .	10
Figura 5 – Carta náutica com as cotas batimétricas. . . . .	12
Figura 6 – Aplicação da Equação de balanço a um elemento da malha. . . . .	14
Figura 7 – Exemplo de malha de discretização. . . . .	15
Figura 8 – Superposição das cartas 1506 e 1508. . . . .	25
Figura 9 – Pontos de grade da Reanálise ERA Interim. . . . .	31
Figura 10 – Pontos de grade da Reanálise ERA Interim selecionados. . . . .	31
Figura 11 – Dados de ventos observados no mês de março de 2010. . . . .	32
Figura 12 – Dados de ventos observados entre os meses de abril e maio de 2010. . . . .	33
Figura 13 – Distribuição dos ventos em Maricá para o mês de abril de 2010. . . . .	34
Figura 14 – Curva de maré com data inicial em 05/03/2010 00:00 GMT. . . . .	36
Figura 15 – Tela do SisBaHiA® com as opções de configuração do Modelo Lagrangeano. . . . .	37
Figura 16 – Curva de evaporação/dispersão do óleo obtida com o ADIOS2 . . . . .	40
Figura 17 – Mapa base criado para os experimentos. . . . .	42
Figura 18 – Malha de elementos finitos usada nas simulações. . . . .	43
Figura 19 – Curvas batimétricas na área de interesse. . . . .	43
Figura 20 – Rugosidade. . . . .	44
Figura 21 – Campo de velocidade das correntes para o dia 03/04/2010 00:00 GMT. . . . .	45
Figura 22 – Campo de velocidade das correntes para o dia 08/04/2010 00:00 GMT. . . . .	45
Figura 23 – Evolução da mancha de óleo após o derrame iniciado em 05/03/2010 12:00 GMT . . . . .	47
Figura 24 – Evolução da mancha de óleo após o derrame iniciado em 05/04/2010 12:00 GMT . . . . .	49
Figura 25 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 1 hora após o início do derrame - abr/2010 . . . . .	50
Figura 26 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 2 horas após o início do derrame - abr/2010 . . . . .	51
Figura 27 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 3 horas após o início do derrame - abr/2010 . . . . .	51
Figura 28 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 6 horas após o início do derrame - abr/2010 . . . . .	52

Figura 29 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 24 horas após o início do derrame - abr/2010 . . . . .	52
Figura 30 – Mancha de óleo às 12:00 GMT do dia 06/04/2010 . . . . .	53
Figura 31 – Pontos iniciais das trajetórias . . . . .	54
Figura 32 – Trajetória com o HYSPLIT a partir do ponto TRJ03 . . . . .	55
Figura 33 – Saída do Google Earth com as trajetórias geradas pelo HYSPLIT . . .	56
Figura 34 – IBGE - Censo 2010 - Sinopse por Setores - Maricá e Saquarema . . . .	57

# LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo, sem efeitos de ondas. . . . .	13
Quadro 2 – Constantes harmônicas de maré na Estação de Copacabana. . . . .	22
Quadro 3 – Constantes harmônicas de maré na Estação de Ponta Negra. . . . .	23
Quadro 4 – Principais características do óleo tipo VASCONIA . . . . .	24

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de elevação de maré a partir de 05/03/2010 00:00 GMT . . . . .	35
--	----

# SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Principais causas da variação do nível do mar</b>	<b>6</b>
2.1.1	Forças geradoras das marés	6
2.1.2	Maré atmosférica ou maré não astronômica	7
2.1.2.1	Efeitos da pressão atmosférica no nível do mar	7
2.1.2.2	Efeitos do vento na variação do nível do mar	7
2.1.3	Sistemas frontais	8
<b>2.2</b>	<b>Características do óleo</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Formulação Lagrangeana e Euleriana</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Batimetria</b>	<b>10</b>
<b>2.5</b>	<b>Amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo</b>	<b>13</b>
<b>2.6</b>	<b>Malha de discretização</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>MODELOS</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelo ADIOS 2</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>HYSPLIT</b>	<b>16</b>
<b>3.3</b>	<b>Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA®)</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Dados</b>	<b>21</b>
4.1.1	Modelo digital do terreno	21
4.1.1.1	Mapa digital	21
4.1.1.2	Constantes harmônicas	21
4.1.2	Modelo hidrodinâmico	24
4.1.2.1	Variáveis meteorológicas - vento	24
4.1.3	Modelo de transporte Lagrangeano	24
4.1.3.1	Características do óleo	24
<b>4.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>24</b>
4.2.1	Modelo digital do terreno	25
4.2.1.1	Mapa digital	25
4.2.1.1.1	Contorno de terra	26
4.2.1.1.2	Contorno da fronteira aberta	26

4.2.1.1.3	Mapa base . . . . .	26
4.2.1.1.4	Malha de elementos finitos . . . . .	26
4.2.1.1.5	Georreferenciamento . . . . .	27
4.2.1.1.6	Batimetria . . . . .	27
4.2.1.1.7	Amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo . . . . .	28
4.2.1.1.8	Constantes harmônicas . . . . .	28
4.2.2	Modelo hidrodinâmico . . . . .	28
4.2.2.1	Pasta parâmetros . . . . .	29
4.2.2.2	Pasta fronteiras . . . . .	29
4.2.2.2.1	Parâmetros . . . . .	29
4.2.2.2.2	Contornos . . . . .	29
4.2.2.2.3	Nível médio diferencial . . . . .	30
4.2.2.3	Variáveis meteorológicas - Vento . . . . .	30
4.2.2.4	Condições iniciais . . . . .	34
4.2.3	Modelo Lagrangeano . . . . .	37
4.2.3.1	Parâmetros . . . . .	37
4.2.3.2	Malha . . . . .	37
4.2.3.2.1	Dados hidrodinâmicos . . . . .	37
4.2.3.2.2	Simulação . . . . .	38
4.2.3.3	Fontes . . . . .	38
4.2.3.3.1	Definição das fontes . . . . .	38
4.2.3.3.2	Decaimento . . . . .	39
4.2.3.4	Absorção de óleo nas fronteiras . . . . .	39
4.2.4	Cálculo de trajetórias aéreas . . . . .	40
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTO NUMÉRICO COM O SISBAHIA® PARA OS MESES DE MARÇO E ABRIL/2010 . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Cenário para o experimento numérico . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>6.1</b>	<b>Malhas e domínios de modelagem . . . . .</b>	<b>42</b>
6.1.1	Mapa base . . . . .	42
6.1.2	Malha de elementos finitos . . . . .	42
6.1.3	Batimetria . . . . .	43
6.1.4	Amplitude efetiva da Rugosidade do fundo . . . . .	44
<b>6.2</b>	<b>Modelo hidrodinâmico . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>6.3</b>	<b>Modelo de transporte Lagrangeano . . . . .</b>	<b>45</b>
6.3.1	Derrame de óleo iniciado em 05/03/2010 . . . . .	46
6.3.2	Derrame de óleo iniciado em 05/04/2010 . . . . .	48
6.3.3	Modelo de transporte Lagrangeano probabilístico para o mês de abril de 2010 . . . . .	50

<b>7</b>	<b>RISCOS À SAÚDE DA POPULAÇÃO . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>60</b>

# INTRODUÇÃO

A poluição marinha é caracterizada como a introdução de substâncias ou energias, direta ou indiretamente no meio marinho, que possam provocar efeitos nocivos para os recursos biológicos assim, como para a saúde humana e, tendo como consequências problemas relacionados às atividades marítimas, incluindo a pesca, perda da qualidade da água do mar e redução das possibilidades no domínio do turismo (PEREIRA; SOARES-GOMES, 2002).

Os derrames de petróleo em áreas marítimas provocam impactos econômicos e ambientais, causando danos à indústria pesqueira ou qualquer indústria que utilize recursos marinhos como matéria prima e a destruição de ecossistemas sensíveis ao contato com o óleo (BÍCEGO *et al.*, 2008).

Segundo Piatt *et al.* (1990), em 24 de março de 1989, o petroleiro *Exxon Valdez* derramou 260 mil barris de petróleo bruto em *Prince William Sound*, no Alasca. O petróleo se espalhou por mais de 30.000 km<sup>2</sup> de águas costeiras e oceânicas ocupadas por aproximadamente um milhão de aves marinhas. Mais de 30.000 aves mortas, de 90 espécies, foram retiradas de áreas poluídas em 1º de agosto de 1989. Estimou-se que entre 100.000 a 300.000 aves morreram devido ao contato com o óleo. Este acidente foi causado pelo rompimento do casco do navio quando este se chocou com um recife chamado *Bligh Reef*, estando o enorme navio sob comando de um tripulante que não estava habilitado para tal função (HISTORY.COM EDITORS, 2018). Os esforços iniciais para conter o óleo derramado foram insuficientes e uma tempestade explodiu três dias após o acidente, com ventos de mais de 90 km/h, fazendo com que a mancha de óleo passasse de 6 km para 64 km de extensão (TAYLOR, 2014; LOUGHLIN, 2013). Embora, na prática, o óleo não pudesse mais ser visto, 25 anos depois ainda pôde ser encontrado a poucos centímetros na areia das praias (TAYLOR, 2014).

Em 18 de janeiro de 2000, um vazamento em uma das tubulações da Refinaria Duque de Caxias (REDUC) liberou cerca de 1,3 milhões de litros de óleo cru na Baía de Guanabara. A mancha de óleo se espalhou por mais de 50 km<sup>2</sup> atingindo o manguezal da área de proteção ambiental de Guapimirim e diversas praias. Inúmeras espécies da fauna e flora foram afetadas (CEPED/UFSC, 2015).

A previsão e simulação da deriva e degradação de manchas de petróleo são essenciais para a elaboração de planos de respostas e contingência a derramamentos, assim como para a avaliação de impactos ambientais que possam decorrer destes eventos (FERNANDES *et al.*, 2013).

No município de Maricá, litoral sudeste do Brasil, a construção do Terminais de

Ponta Negra (TPN) é motivo de preocupação, considerando o porte do empreendimento e o potencial de impactos aos ecossistemas terrestres e marinhos em caso de derramamento de petróleo ou seus derivados.

“No contexto de derrame de óleo no mar, os simuladores computacionais de modelagem numérica procuram contribuir através da quantificação dos processos fluidodinâmicos, físico-químicos e biológicos que acontecem quando o petróleo atinge o oceano. Assim, com um sistema de modelagem e simulação numérica, os agentes responsáveis por combater a poluição por óleo têm de uma ferramenta eficaz na detecção e monitoramento constante de manchas de óleo no meio marinho” (AMARO *et al.*, 2005).

Rosman (2000a) ressalta que os sistemas computacionais são ferramentas integradoras, sem as quais, dificilmente, se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais. Os modelos numéricos são ferramentas indispensáveis à gestão e ao gerenciamento de recursos hídricos, pois permitem as análises de diagnósticos e prognósticos.

A presente pesquisa tem como objetivo geral a aplicação de técnicas de modelagem computacional para simulação da deriva de óleo derramado no mar e cálculo de trajetórias aéreas. Como objetivo específico:

- (a) Aplicar o software Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA®) ao TPN, utilizando a modelagem hidrodinâmica e de transporte Lagrangeano;
- (b) Calcular a trajetória dos gases evaporados do óleo usando o modelo HYSPLIT.

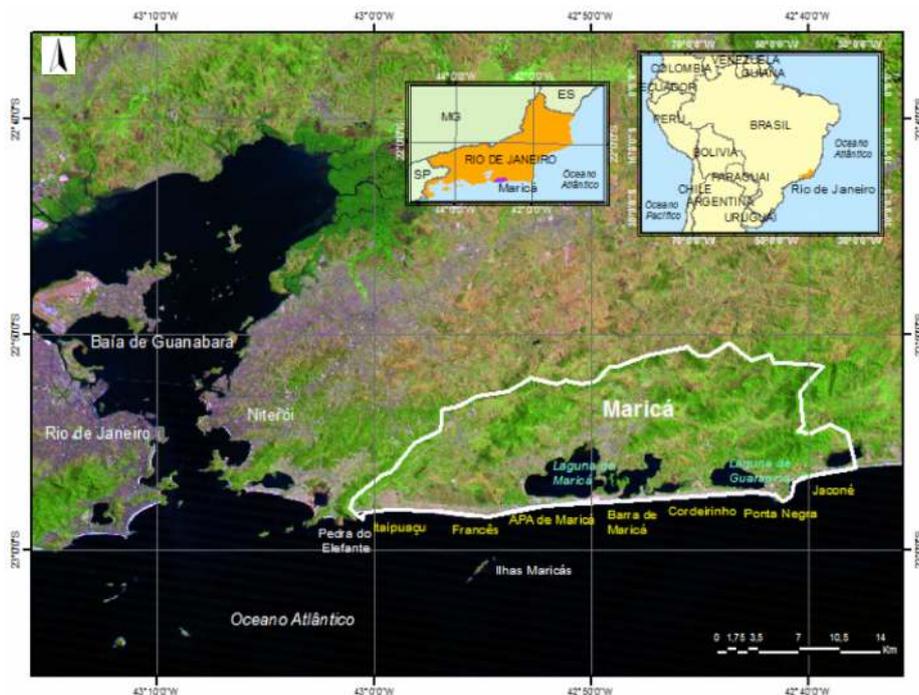
# 1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Maricá (Fig. 1), está localizado a leste da Baía de Guanabara, entre os municípios de Niterói e Saquarema. Maricá pertence ao chamado Compartimento Região dos Lagos, cuja paisagem é marcada pela presença de extensos arcos praias associados a cordões litorâneos (MUEHE; VALENTINI, 1998). À retaguarda dos cordões litorâneos se desenvolveu um complexo lagunar, dando origem ao nome da região.

“No litoral de Maricá encontram-se duplos cordões arenosos dispostos paralelamente entre si e separados por uma depressão estreita onde ocorrem pequenas lagunas” (LINS DE BARROS *et al.*, 2016, p. 149).

“O TPN será instalado no Município de Maricá - praia do Jaconé, [...] Quanto à conformidade com o zoneamento municipal, o TPN estará à oeste da praia de Jaconé, [...] Esta área, conforme a lei municipal 037/2013, é classificada como ‘área de Especial Interesse Urbanístico e Econômico’, voltada para atividades de Logística, Portuária e Industrial (AEIUE-LPI), na ‘Unidade de Planejamento 05 – Jaconé’, portanto, em conformidade com as diretrizes de zoneamento municipal” (DTA Engenharia, 2014, p. 18).

Figura 1: Localização de Maricá (RJ).



Fonte: Adaptado de Lins de Barros *et al.* (2016, p. 150)

“A instalação do TPN pode ser considerada estratégica devido à oferta de uma nova infraestrutura para apoio logístico à exploração e produção de petróleo e gás provenientes das bacias de Campos e de Santos. Ganha importância devido à proximidade com as futuras instalações do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), do novo sistema viário denominado Arco Metropolitano do Estado do Rio de Janeiro e de estar inserido na segunda região metropolitana mais importante do Brasil” (DTA Engenharia, 2014, p. 7).

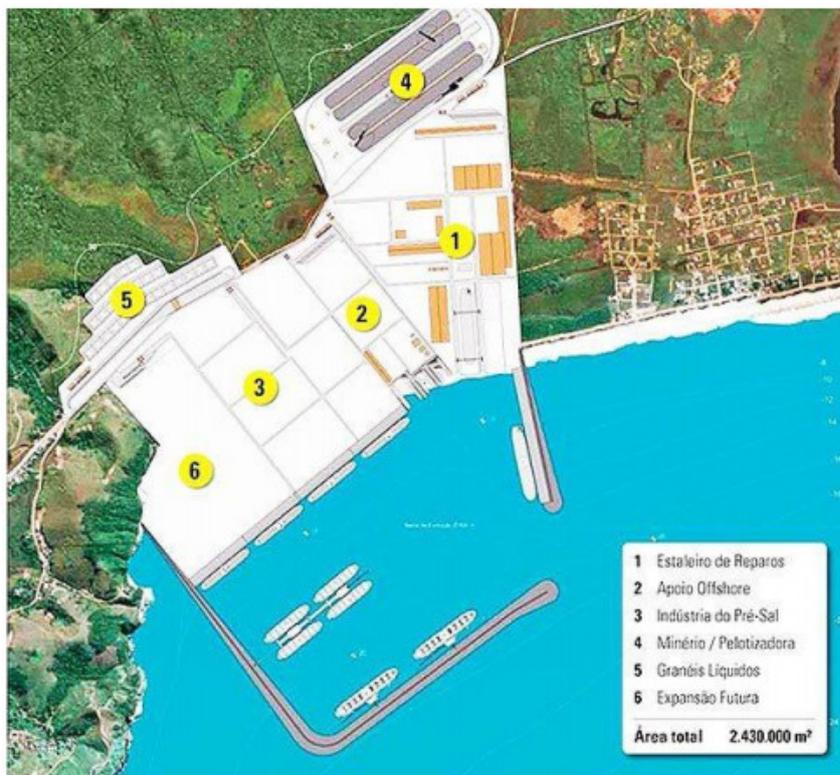
Segundo a DTA Engenharia (2014, p. 19):

Considera-se que o empreendimento será dividido em duas estruturas: infraestrutura terrestre e infraestrutura marítima, conforme pleiteado pela DTA – Engenharia, perante solicitação de Licença Prévia ao Instituto Estadual do Ambiente (INEA).

- Infraestrutura terrestre: Na porção terrestre serão construídos pátio para instalação futura dos terminais, centro administrativo e infraestrutura de serviços e saneamento ambiental (drenagem, água, esgoto, luz, telefonia entre outros); e
- Infraestrutura marinha: As estruturas marítimas compreendem os dois quebra-mares, canal de acesso e bacia de evolução e atracação dos navios, aterro hidráulico sobre lâmina d’água e equipamentos de sinalização e segurança para a navegação (Vessel Traffic Management Operation System – VTMOs, boias de sinalização e sistema de confinamento por barreira flutuante de vazamentos – stop oil).

Uma possível planta da infraestrutura pode ser vista na [Figura 2](#).

Figura 2: Infraestrutura do empreendimento portuário.



Fonte: O Saquí (2013).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica tem por objetivo dar uma visão geral dos elementos utilizados na modelagem hidrodinâmica.

### 2.1 Principais causas da variação do nível do mar

A circulação hidrodinâmica marinha tem como sua principal forçante a diferença de nível entre diferentes pontos da superfície. Esta diferença de nível gera gradientes de pressão que forçam o deslocamento de água, gerando as correntes.

São as principais causas de variação no nível do mar, em ordem de importância:

- Marés (astronômicas);
- Marés meteorológicas (devida a eventos não astronômicos):
  - Gradientes de pressão atmosférica;
  - Vento.

#### 2.1.1 Forças geradoras das marés

O movimento de fluxo e refluxo das águas do mar observados nas regiões costeiras é chamado, genericamente, de maré. Tal movimento resulta da ação das forças gravitacionais entre o sol, a lua e a terra e seu estudo só foi possível a partir de 1687, com a formulação da Lei da Gravitação Universal por Isaac Newton, a partir da qual se desenvolveu a Teoria das Marés ([OLIVEIRA, 2004b](#)).

Devido ao movimento relativo entre os astros (sol, lua e terra) e ao movimento de rotação da terra, cada ponto da superfície marinha está sujeito a uma resultante das forças gravitacionais, que gera os movimentos de fluxo e refluxo. A periodicidade destes movimentos (da maré) resulta da composição dos movimentos periódicos entre os astros e da terra em torno do seu eixo. Embora a massa da lua seja muitas vezes menor que a do sol, sua força gravitacional sobre a terra é muito maior devido à maior proximidade e consequentemente, maior a sua influência sobre as marés.

A partir do século XIX, vários pesquisadores formularam as bases matemáticas que permitiram a descrição de fenômenos naturais periódicos. O desenvolvimento matemático de séries permitiu o estudo das marés pelo método harmônico, onde o fenômeno é decomposto em componentes harmônicas (senos e cossenos) ou termos da série, cada qual com sua

amplitude, velocidade angular e fase. A este conjunto de amplitudes, velocidades e fases que permitem uma descrição matemática das marés dá-se o nome de constantes harmônicas das marés ou, simplesmente, constantes harmônicas. Conhecendo-se as constantes harmônicas de um determinado local, é possível a previsão do nível do mar para qualquer instante.

### 2.1.2 Maré atmosférica ou maré não astronômica

Define-se maré meteorológica como sendo a diferença entre a maré efetivamente observada e a maré astronômica. Algumas causas provocam a maré meteorológica: as variações da pressão atmosférica e a troca de *momentum* entre o campo de vento e a superfície do mar. “Em geral, os efeitos devidos unicamente à ação da pressão atmosférica são inferiores a 10% do efeito total observado, sendo o restante devido exclusivamente à tensão de cisalhamento do vento na superfície do oceano” (CAMARGO *et al.*, 2002). A maré meteorológica também depende do fundo ou da plataforma costeira (MELO FILHO, 2017). De acordo com Camargo *et al.* (2002):

A maré meteorológica é, portanto, responsável pelo aumento ou diminuição do nível do mar em relação às marés astronômicas observadas num dado local. Este fenômeno pode implicar em intrusão de água do mar em locais onde isso normalmente não ocorre, causando as grandes inundações; ou então, pode acarretar níveis extremamente baixos, impedindo a navegação nos canais de acesso a portos. É importante enfatizar que ambas as situações apresentam impactos do ponto de vista ecológico nas áreas costeiras.

#### 2.1.2.1 Efeitos da pressão atmosférica no nível do mar

Um dos componentes responsáveis pela maré meteorológica é o efeito da pressão atmosférica sobre a superfície do mar. É conhecido como “Efeito do Barômetro Invertido”, onde uma redução na pressão atmosférica causa um aumento do nível do mar. Tal efeito pode resultar em variações de 1 cm a cada 1 hPa, ou seja, uma redução de 10 hPa na pressão atmosférica ao nível do mar leva a uma elevação de 10 cm.

#### 2.1.2.2 Efeitos do vento na variação do nível do mar

O vento produz tensões na superfície do mar e há uma troca de *momentum* entre eles. O efeito do vento paralelo à superfície pode ser sentido nas camadas mais profundas de acordo com o tempo de ação deste e com a estratificação da densidade na coluna d’água, que controla a transferência vertical do *momentum*.

De acordo com a intensidade, duração e direção do vento, pode-se observar eventos tais como as ressacas (*storm surges*) e ressurgências.

### 2.1.3 Sistemas frontais

A passagem de sistemas frontais é de suma importância, pois atua fortemente determinando mudanças bruscas nas condições de tempo das regiões por eles atingidos. Na América do Sul estes sistemas transientes são responsáveis, principalmente por quedas súbitas de temperatura e aumento significativo da pluviosidade, causando grandes problemas à população (ANDRADE; CAVALCANTI, 2004). Os sistemas frontais são os mais comuns, atuando principalmente na região subtropical e de latitudes médias e altas.

Os sistemas que atingem a América do Sul geralmente são originados no Pacífico, deslocam-se para leste e, após ultrapassar a Cordilheira dos Andes, seguem em direção ao Equador. De acordo com Cavalcanti (1985), Satyamurty *et al.* (1998) e Seluchi *et al.* (1998), citados por Andrade & Cavalcanti (2004), eles podem seguir pelo continente ou desviar-se para o oceano Atlântico. Com atuação no Brasil durante o ano todo (CAVALCANTI; KOUSKY, 2003 *apud* ANDRADE; CAVALCANTI, 2004), as frentes frias atingem principalmente as regiões Sul e Sudeste, podendo chegar a afetar significativamente o sul da Região Nordeste (KOUSKY, 1979), sendo responsáveis pelas chuvas nestas regiões.

O trabalho de Kousky & Ferreira (1981 *apud* ANDRADE; CAVALCANTI, 2004) mostrou a importância das frentes nas chuvas de inverno na Região Norte. Analisando imagens de satélite, Oliveira (1986), citado por Andrade & Cavalcanti (2004), relacionou as frentes frias com a convecção sobre a Amazônia. Lemos & Calbete (1996 *apud* ANDRADE; CAVALCANTI, 2004), dando continuidade ao trabalho de Oliveira, analisaram cartas sinóticas e estabeleceram a climatologia dos sistemas frontais para o período de 1987 a 1995. Justi Silva & Silva Dias (2002 *apud* ANDRADE; CAVALCANTI, 2004) e Cavalcanti & Kousky (2003) analisaram dados de reanálises do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) e estabeleceram uma climatologia mais recente dos sistemas frontais para América do Sul.

O estudo de Cavalcanti & Kousky (2003) estabeleceu que os sistemas frontais seguem dois caminhos principais sobre a América do Sul: Um pelo interior, do norte da Argentina até a Região Amazônica e outro seguindo a costa do Brasil. A frequência de passagem das frentes frias passa por um máximo no inverno, início da primavera e um mínimo no verão. Ondas de ar frio podem ser sentidas até 4 dias antes da chegada da frente.

## 2.2 Características do óleo

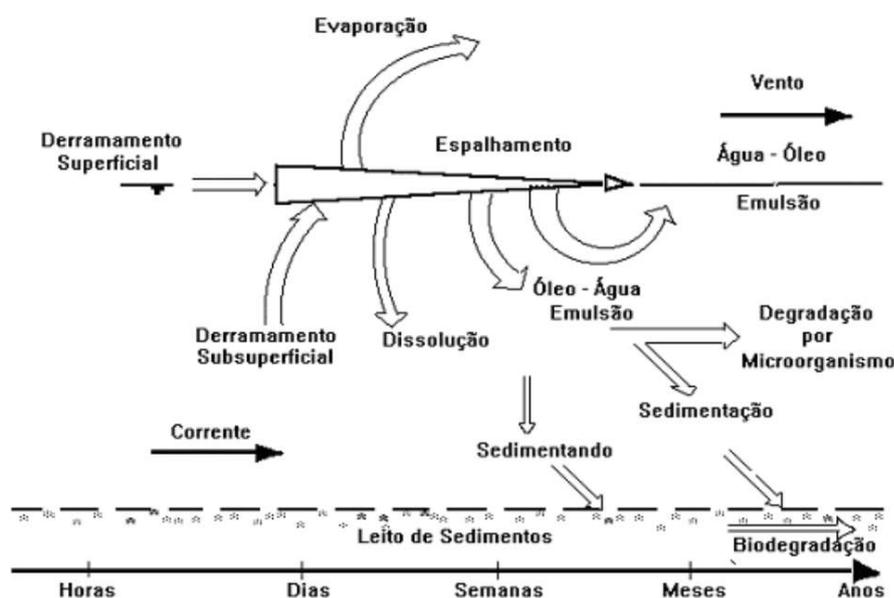
Segundo Brasil (2007 *apud* GURGEL, 2016, p. 36):

Quando o óleo é derramado no mar, ele se espalha e se move sobre a superfície, sendo assim submetido a vários processos que provocam mudanças

químicas, físicas e biológicas que são conhecidas como “intemperismo” [...].

Os processos de espalhamento, evaporação, dispersão e dissolução são os mais importantes nos períodos iniciais de um derrame. A emulsificação tende a se tornar mais expressiva após dias/semanas da exposição inicial do poluente ao ambiente, enquanto a oxidação, biodegradação e sedimentação – embora menos expressivas – ocorrem a longo prazo (SIQUEIRA, 2015). Tais processos estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3: Processo de “intemperismo” do óleo derramado.



Fonte: Gurgel (2016, p. 37)

Após o derrame, o óleo começa a se espalhar, mesmo que o meio esteja em repouso. Chama-se espalhamento inicial de espalhamento mecânico e é o considerado para determinar a região fonte. Existe outro tipo de espalhamento que é acrescido quando o óleo é despejado em um corpo de água em movimento, decorrente do transporte de advecção e difusão turbulenta no meio físico receptor (NOAA, 2009).

O *American Petroleum Institute* (API) classifica os óleos de acordo com sua densidade e para isto define o grau de densidade API ( $^{\circ}API$ ):

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho} - 131,5$$

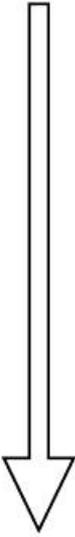
Quanto menor o valor API, mais características de óleo pesado o produto derramado possui, e quanto mais pesado o óleo, menor é a sua taxa de evaporação (NOAA, 2009).

A Figura 4 mostra uma classificação do petróleo de acordo com o grau de densidade API.

Figura 4: Classes de Petróleo segundo o °API.

API	PETRÓLEO
<15	Asfáltico
15-19	Extra-Pesado
19-27	Pesado
27-33	Médio
33-40	Leve
40-45	Extra-Leve
>45	Condensado

MAIOR VALOR AGREGADO (US\$/Barril)



Fonte: <<http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/1285870/313/Petroleo.pdf>>

## 2.3 Formulação Lagrangeana e Euleriana

O campo de escoamento de um fluido, pode ser estudado através de dois métodos: euleriano e lagrangeano. O método euleriano permite uma visão instantânea do movimento de várias partículas do escoamento. Nesse método traçam-se linhas tangentes às velocidades observadas, simultaneamente em diferentes pontos do escoamento, denominadas linhas de corrente. O método lagrangeano permite visualizar as sucessivas posições de uma mesma partícula ao longo do tempo. As linhas do vetor velocidade das partículas, ao longo do tempo são tangentes e denominadas de trajetórias (OLIVEIRA, 2004a).

## 2.4 Batimetria

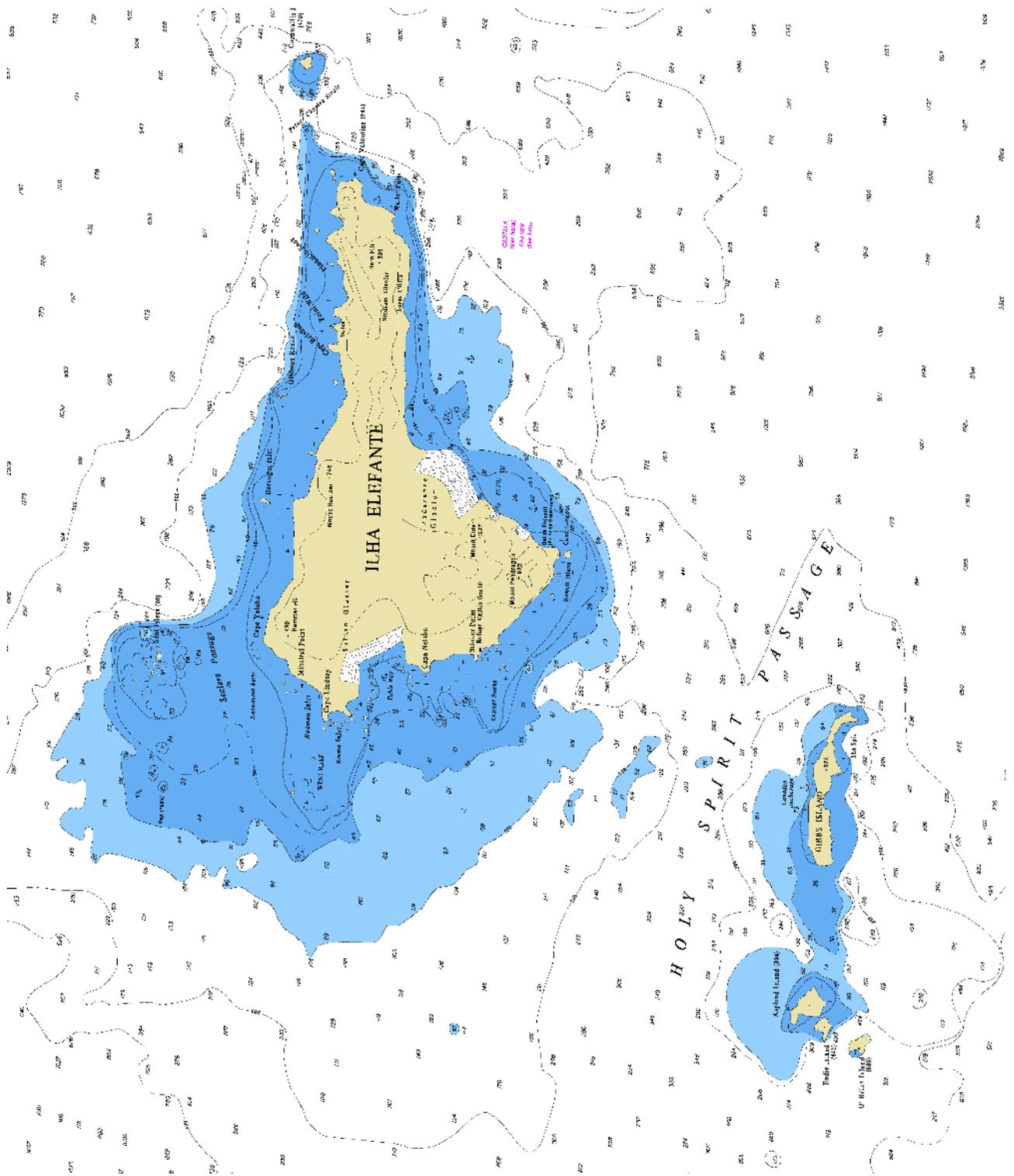
O termo batimetria vem do grego *bathus* que significa profundo, e *metron* que significa medida. É um levantamento das medidas da profundidade de um determinado corpo d'água. Semelhante às curvas de nível topográfico, a batimetria pode ser expressa

cartograficamente por curvas batimétricas que são curvas que unem pontos de mesma profundidade (MORAES, 2015).

Além de extremamente importante para a navegação, o conhecimento da batimetria é fundamental na concepção de um modelo hidrodinâmico pois esta tem grande influencia na propagação das correntes oceânicas (SANTOS; PINHO, 2005).

A [Figura 5](#) mostra parte de uma carta náutica com a indicação da batimetria.

Figura 5: Carta náutica com as cotas batimétricas.



## 2.5 Amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo

Outro elemento extremamente importante para a modelagem hidrodinâmica é a amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo ( $\varepsilon$ ), referida neste trabalho como “rugosidade do fundo” ou simplesmente “rugosidade”. Juntamente com a batimetria, o tipo de fundo tem grande influência na dinâmica das correntes marinhas pois determina o atrito entre estas e o fundo. Quanto maior a rugosidade, maior o atrito e maior a resistência oferecida ao deslocamento da corrente.

O [Quadro 1](#) apresenta sugestões para valores de  $\varepsilon$  de acordo com o tipo de fundo.

Quadro 1: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo, sem efeitos de ondas.

<b>Leito de sedimentos com rugas e similares</b>	
Predominância de siltes e finos	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0.0100\text{m} < \varepsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \varepsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1200\text{m}$
Sedimentos com vegetação	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1500\text{m}$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \varepsilon < 0.4000\text{m}$
<b>Fundo de pedra ou rochoso</b>	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \varepsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho ( $d_{50} < 3$ cm)	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias ( $d_{50} < 8$ cm)	$0.0150\text{m} < \varepsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras ( $d_{50} < 20$ cm)	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas ( $d_{50} < 50$ cm)	$0.1000\text{m} < \varepsilon < 0.2500\text{m}$
<b>Fundo de Concreto:</b>	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$

Fonte: [Rosman \(2000a\)](#).

## 2.6 Malha de discretização

A fim de podermos trabalhar com a modelagem de grandes áreas, torna-se necessária a divisão da área total em áreas menores, em pequenos elementos de forma quadrática

ou triangular, chamados elementos finitos, que compõem a malha de elementos finitos ou malha de discretização. A cada um destes elementos podemos aplicar a equação de balanço, para qualquer grandeza  $G$  que se queira estudar. De acordo com Rosman (2018a), a equação de balanço pode ser enunciada como:

A taxa temporal de variação do estoque de qualquer grandeza  $G$  em um volume de controle é igual à taxa de depósitos vindos de fora, menos a taxa de saques para fora, mais a taxa resultante de reações internas de produção e consumo de  $G$  no interior do volume.

Esta equação está representada na Figura 6.

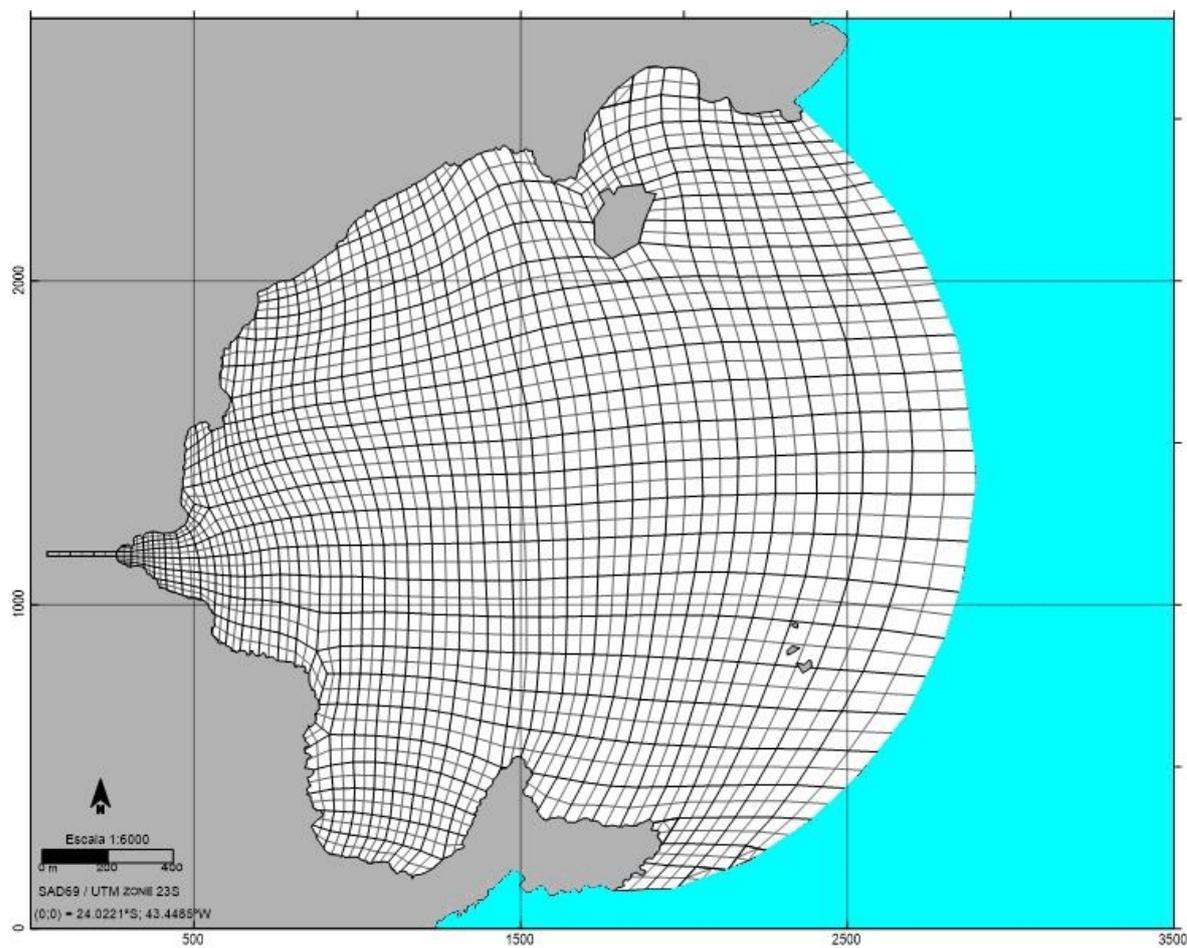
Figura 6: Aplicação da Equação de balanço a um elemento da malha.



Fonte: Rosman (2018a)

A dimensão e a quantidade dos elementos depende do detalhamento que se deseja dar à área representada. Nota-se no lado esquerdo da Figura 7, um adensamento dos elementos próximos à uma área onde é necessário um maior detalhamento, pois trata-se da área de descarga da refrigeração das usinas nucleares Angra I e II.

Figura 7: Exemplo de malha de discretização.



O adensamento dos elementos observado no lado esquerdo deve-se à necessidade de maior detalhamento da área. Fonte: [Gomes & Lauria \(2015\)](#)

## 3 MODELOS

Neste item são apresentados os modelos utilizados no transporte hidrodinâmico.

### 3.1 Modelo ADIOS 2

O modelo *Automated Data Inquiry for Oil Spills* (ADIOS 2) é uma ferramenta da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) utilizada para modelar as alterações sofridas pelo óleo derramado em contato com o ambiente marinho (intemperismo). O programa usa uma base de dados de centenas de tipos de óleos crus e produtos refinados e consegue rapidamente estimar o comportamento do óleo derramado. As estimativas feitas são projetadas para ajudar a responder às perguntas comumente levantadas durante a resposta aos derrames de óleo e sua limpeza (NOAA, 2009).

O modelo 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).

### 3.2 HYSPLIT

O modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT), desenvolvido pelo *Air Resources laboratory* (ARL) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), é um dos modelos mais usados para estudo de transporte atmosférico e dispersão de poluentes (STEIN *et al.*, 2015).

O modelo usa um método de cálculo híbrido, usando a aproximação lagrangeana para calcular a advecção e difusão de parcela de ar e a aproximação euleriana para calcular as concentrações de poluentes (STEIN *et al.*, 2015).

De acordo com Stein *et al.* (2015), um das aplicações mais comuns do modelo é o cálculo de *back-trajectory* para determinação da origem de massas de ar. Outros exemplos de aplicações são o acompanhamento e previsão da trajetória de material radioativo

liberado no ar, fumaça originada em incêndios, cinzas vulcânicas, vários outros poluentes emitidos para a atmosfera.

O cálculo de trajetórias simples pode ser conseguido através do site <[https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)>, de forma *online*, sem necessidade de *download* e/ou instalação de programa no computador.

### 3.3 Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA®)

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA®), foi desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e tem sido continuamente aperfeiçoado desde 1987, através de várias dissertações de mestrado e teses de doutorado, além de projetos de pesquisa, sendo adotado em dezenas de estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos de água naturais (ROSMAN, 2000a).

O SisBaHiA® é capaz de realizar a modelagem de corpos de água costeiros e continentais, através da análise da circulação hidrodinâmica bidimensional horizontal (2DH) ou tridimensional (3D) (ROSMAN, 2000a).

O SisBaHiA® possui os seguintes módulos (ROSMAN, 2000a):

**Modelagem Digital do Terreno:** no módulo Malhas e Domínios de Modelagem há muitas ferramentas para modelagem digital do terreno de interesse. Na tela “Visualiza” há ferramentas diversas para importar mapas e linhas de contorno de terra e de água de mapas, definir contornos de modelagem, gerar e editar malhas de elementos finitos triangulares e quadrangulares. O SisBaHiA® opera com coordenadas geográficas, longitudes e latitudes em graus decimais, ou métricas UTM, opera também com coordenadas métricas locais. Há várias ferramentas para interpolação de batimetria e dados de rugosidade equivalente do fundo, etc.

**Modelo Hidrodinâmico:** é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH otimizado para corpos de água naturais. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. “Otimizado” é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformações, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multi-escala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). Pode-se incluir efeitos de gradientes de densidade acoplando modelos de transporte de sal e calor dos Modelos de Qualidade de Água, vide abaixo, a modelos hidrodinâmicos. Pode-se também incluir evolução morfológica do fundo, com acoplamento de Modelos de Transporte de Sedimentos, de Geração e de Propagação de Ondas descritos abaixo. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos.

**Modelos de Transporte de Sedimentos Coesivos e Não Coesivos e Evolução Morfológica do Fundo:** trata-se de modelos que computam transporte de sedimentos e taxas de erosão e sedimentação no

fundo. O usuário pode prescrever curvas granulométricas e estoques de sedimentos erodíveis diferentes em qualquer ponto da região modelada. Pode funcionar dinamicamente acoplado a um modelo hidrodinâmico, permitindo assim realizar estudos de evolução morfológica de fundo. Para sedimentos não coesivos, o modelo permite múltiplas opções de formulações de transporte por arraste: Meyer-Peter Müller, Nielsen, Madsen, Van Rijn (1984) e Yalin; bem como de transporte total (arraste e suspensão): Ackers & White, Engelund-Hansen e Van Rijn (2007). Outras formulações podem ser incluídas. Pode funcionar também de modo desacoplado, apenas para estimação de vazões sólidas. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos.

**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. Tais modelos podem ser aplicados para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos.

**Modelos de Transporte Euleriano:** são modelos de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas de escalares dissolvidos ou partículas em suspensão na massa d'água. Os modelos podem ser aplicados a escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. Permitem a utilização de praticamente qualquer tipo de reação cinética de decaimento ou produção do contaminante sendo modelado, inclusive através de curvas de decaimento fornecidas através de tabelas e valores. Pode-se também simular processos de perda ou ganho de massa por sedimentação e erosão. Este modelo opera o transporte de sedimentos coesivos com evolução morfológica do fundo. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos.

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

- Plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa. Permite a simulação de plumas de esgoto com vazões variáveis e taxas de decaimento (T90) variáveis de acordo com época do ano, horas do dia, condições de cobertura de nuvens, etc.
- Derrames de óleo, instantâneos ou por período definido. No caso o modelo pode seguir as mesmas curvas de balanço de massa do ADIOS 2, e pode incluir efeitos da dinâmica de Fay na fase inicial do derrame. Pode incluir efeitos de barreiras fixas ou móveis e remoção de óleo por sugadores.
- Mistura de massas de água, tempos de troca e renovação de massas de água entre diferentes setores de um corpo de água.
- Transporte de detritos flutuantes, inclusive óleos e graxas.
- Determinação de tempos de residência em corpos de água naturais, permitindo obter mapas de isolinhas de tempos de residência em diferentes setores de corpos de água com geometria complexa.
- Determinação de tendências de deriva de sedimentos, substâncias dissolvidas ou particuladas flutuantes.
- Determinação de correntes residuais Lagrangeanas.
- Estudos de dragagens, com determinação de plumas no sítio de dragagem e em locais de bota fora.
- Determinação de massa e altura de material sedimentado, por exemplo, em bota fora de dragagens.
- O modelo permite optar por transporte livre ou condicionado. Modelagens com transporte condicionado são especialmente úteis em análises

de processos sedimentológicos. O transporte pode ser condicionado por valores mínimos de velocidade, ou de tensão no fundo exercida só por correntes, ou de tensão no fundo exercida conjuntamente por ondas e correntes.

- O Modelo Lagrangeano permite a utilização de praticamente qualquer tipo de reação cinética de decaimento ou produção do contaminante sendo modelado, inclusive através de curvas de decaimento fornecidas através de tabelas e valores. Pode-se também simular processos de perda de massa por sedimentação.

**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 (ou de visita) de manchas ou plumas contaminantes, probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite, probabilidade de passagem com tempo de vida inferior a um limite dado, etc.

**Modelo de Campo Próximo e Decaimento Bacteriano para Emissários e Fontes Pontuais:** este módulo está inserido no bloco de Modelo de Transporte Lagrangeano e funciona acoplado a um modelo hidrodinâmico. O modelo considera as características geométricas de linhas difusoras, perfis verticais variáveis de densidade no meio receptor, turbidez variável da água no cálculo da incidência de radiação solar. A radiação solar é computada em função da latitude e longitude da localidade, variando a partir da data e hora de início da simulação, com variação de cobertura de nuvem, etc. No caso de análises de balneabilidade, o modelo de decaimento bacteriano aceita diferentes tipos de bactéria, tais como coliformes termotolerantes, *Escherichia coli* e *Enterococcus*, além de curvas de decaimento prescritas pelo usuário.

**Modelo de Geração de Ondas:** é um modelo para geração de ondas por campos de vento permanentes ou variáveis. O modelo determina se a geração de ondas será limitada pela pista ou pela duração do vento. O modelo permite calcular, ao longo do tempo, a distribuição espacial no domínio de parâmetros do clima de ondas gerado tais como: alturas significativas e médias quadráticas, períodos de pico, velocidades orbitais e tensões oscilatórias no fundo devido a ondas, etc. Modelo de Propagação de Ondas trata-se de um programa de propagação de ondas monocromáticas, ou espectros de ondas, com efeitos de refração, difração, dissipação e arrebentação. O programa implementado no SisBaHiA® é similar ao conhecido REFDIF. Há amplas possibilidades de analisar resultados em forma de mapas e gráficos. Pode funcionar acoplado a modelos hidrodinâmico e de transporte de sedimentos.

**Módulo de Análise & Previsão de Marés:** através deste módulo pode-se realizar análises harmônicas de registros de níveis ou correntes para obtenção das constantes. Com o módulo de Previsão, fornecendo as constantes harmônicas de níveis ou de correntes, faz-se previsões de valores em séries temporais a intervalos definidos pelo usuário, bem como de séries de máximos e mínimos entre uma data inicial e uma final especificadas pelo usuário. Os algoritmos de Análise e Previsão adotados são os mesmos empregados pelo The Global Sea Level Observing System (GLOSS), que é um projeto internacional patrocinado pela Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM), World Meteorological Organization (WMO) e pela Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC).

**Ferramentas diversas, tais como:**

- Gerente de Animações: produz animações mostrando os resultados em forma dinâmica de todos os modelos.

- Inquiridor de banco de dados: para buscar informações na base de dados dos modelos desenvolvidos através de ferramenta de consulta, integrada na interface, programável em SQL.
- Conversor de tempo entre dados: a partir de uma série temporal com dados em intervalos diversos, produz outra série com dados em intervalo T definido pelo usuário com variados métodos de interpolação.
- Várias ferramentas para tratamento de dados de vento.
- Várias ferramentas para tratamento de dados espaciais e temporais.
- Filtros para dados espaciais e temporais.
- Cópia de malhas e modelos, mudança de escala, etc.
- Interface de trabalho Todos os modelos são integrados em uma interface de trabalho amigável, com ajuda contextual

## 4 DADOS E METODOLOGIA

Este capítulo relaciona os dados e as metodologias utilizadas na preparação do ambiente para a execução das três etapas da simulação no SisBaHiA® Malhas e domínios de modelagem, Modelo hidrodinâmico e Modelo de transporte Lagrangeano.

### 4.1 Dados

Neste item são apresentados os dados e as informações utilizadas no SisBaHiA®.

#### 4.1.1 Modelo digital do terreno

O modelo digital do terreno, no âmbito deste trabalho, é uma representação digital das áreas (contornos) de terra e água do domínio de modelagem, juntamente com outras informações para caracterização do ambiente hidrodinâmico: batimetria, amplitude da rugosidade equivalente do fundo, constantes harmônicas etc. Parte-se do mapa digital para a construção do mapa base, representação do mapa usado pelo SisBaHiA®.

##### 4.1.1.1 Mapa digital

Para construção do mapa digital foram utilizadas as seguintes cartas náuticas, editadas e publicadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN, 2017):

- Carta Náutica 1506 – Proximidade da Baía de Guanabara - Escala 1:75.000.
- Carta Náutica 1508 – Do Cabo Frio a Ponta Negra - Escala 1:75.000.

Das cartas acima foram extraídas as informações da batimetria e nível médio do mar (MSL).

##### 4.1.1.2 Constantes harmônicas

As constantes harmônicas foram obtidas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR). Os Quadros 2 e 3 apresentam as constantes harmônicas obtidas nas estações maregráficas de Copacabana e Ponta Negra respectivamente.

Quadro 2: Constantes harmônicas de maré na Estação de Copacabana.

**FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR** *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

<b>Nome da Estação :</b> COPACABANA – RJ					
<b>Localização :</b> Pier do Salvamar (Posto Seis)					
<b>Organ. Responsável :</b> IBGE / DHN .					
<b>Latitude :</b> 22° 59,1' S		<b>Longitude :</b> 43 ° 11,2' W			
<b>Período Analisado :</b> 23/06/93 a 06/03/94			<b>N° de Componentes :</b> 29		
<b>Análise Harmônica :</b> Método Almirante Santos Franco.					
<b>Classificação :</b> Maré de Desigualdades Diurnas					
<b>Estabelecimento do Porto:</b> (HWF&C)		II H 50 min		<b>Nível Médio</b> (Zo): 64 cm acima do NR.	
<b>Média das Preamares Superiores (MHHW) :</b>		118 cm acima do NR.		<b>Média das Preamares Inferiores (MLHW) :</b> 105 cm acima do NR	
<b>Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :</b>		26 cm acima do NR.		<b>Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :</b> 7 cm acima do NR.	
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
<b>Componentes</b>	<b>Semi-amplitude</b> (H) cm	<b>Fase (g)</b> graus (°)	<b>Componentes</b>	<b>Semi-amplitude</b> (H) cm	<b>Fase (g)</b> graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	1,5	083
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	3,8	121
Mm	-	-	NU <sub>2</sub>	-	-
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	30,3	079
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	-	-
Msf	-	-	T <sub>2</sub>	-	-
Q <sub>1</sub>	2,8	058	S <sub>2</sub>	17,2	087
O <sub>1</sub>	10,7	086	K <sub>2</sub>	-	-
M <sub>1</sub>	0,9	126	MO <sub>3</sub>	0,5	038
P <sub>1</sub>	-	-	M <sub>3</sub>	0,5	196
K <sub>1</sub>	6,3	152	MK <sub>3</sub>	-	-
J <sub>1</sub>	-	-	MN <sub>4</sub>	1,5	351
OO <sub>1</sub>	-	-	M <sub>4</sub>	3,4	034
MNS <sub>2</sub>	-	-	SN <sub>4</sub>	-	-
2N <sub>2</sub>	-	-	MS <sub>4</sub>	1,5	126
<b>Referências de Nível:</b> RN-IBGE cravada na base da estátua (busto) na entrada do Forte Copacabana.					
<b>Obs:</b> Não há referências a outros períodos.					

Código BNDO: 50159

Quadro 3: Constantes harmônicas de maré na Estação de Ponta Negra.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

<b>Nome da Estação :</b> PONTA NEGRA – RJ					
<b>Localização :</b> Em frente ao Farol de Ponta Negra					
<b>Organ. Responsável :</b> DHN					
<b>Latitude :</b> 22° 58,2' S	<b>Longitude :</b> 42° 41,6' W				
<b>Período Analisado :</b> 20/11/64 a 21/12/64	<b>Nº de Componentes :</b> 36				
<b>Análise Harmônica :</b> Método do Tidal Liverpool Institute					
<b>Classificação :</b> Maré de Desigualdades Diurnas					
<b>Estabelecimento do Porto:</b> (HWF&C)	I H 30 min	<b>Nível Médio</b> (Zo):	62 cm acima do NR.		
<b>Média das Preamares Superiores (MHHW) :</b>	110 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares Inferiores (MLHW) :</b>	99 cm acima do NR.		
<b>Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :</b>	30 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares Inferiores (MLLW) :</b>	8 cm acima do NR.		
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	4,6	151
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	4,2	157
Mm	11,1	356	NU <sub>2</sub>	,08	157
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	28,6	075
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	3,8	322
Msf	8,4	008	T <sub>2</sub>	0,8	063
Q <sub>1</sub>	2,7	070	S <sub>2</sub>	14,2	063
O <sub>1</sub>	10,5	106	K <sub>2</sub>	3,9	063
M <sub>1</sub>	1,8	129	MO <sub>3</sub>	1,6	262
P <sub>1</sub>	2,1	122	M <sub>3</sub>	0,8	063
K <sub>1</sub>	6,4	122	MK <sub>3</sub>	1,2	315
J <sub>1</sub>	2,4	219	MN <sub>4</sub>	1,2	329
OO <sub>1</sub>	1,3	311	M <sub>4</sub>	3,7	266
MNS <sub>2</sub>	-	-	SN <sub>4</sub>	1,7	326
2N <sub>2</sub>	0,6	239	MS <sub>4</sub>	2,7	199
<b>Referências de Nível:</b> RN-1 situada em uma pedra a 100 m do Farol de Ponta Negra no lado esquerdo de quem olha para o mar					
<b>Obs:</b> Não há referência a outros períodos.					

Código BND0: 50154

### 4.1.2 Modelo hidrodinâmico

Para construção do modelo hidrodinâmico é necessário obter as informações sobre o comportamento do vento na área e período de simulação.

#### 4.1.2.1 Variáveis meteorológicas - vento

As informações de vento utilizadas neste trabalho foram extraídas dos dados de reanálise atmosférica global *ERA-Interim*, disponibilizados pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que podem ser acessados em <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>. O SisBaHiA® usa a informação do vento (intensidade e direção) medido a 10 m da superfície.

### 4.1.3 Modelo de transporte Lagrangeano

Para preparação do modelo Lagrangeano são necessárias as informações sobre as características do óleo (crú ou seu derivado) para o qual se deseja simular o derrame.

#### 4.1.3.1 Características do óleo

Para a simulação de um cenário de derrame de óleo, faz-se necessário o conhecimento *a priori* das características do produto que será derramado. Para este trabalho foi selecionado o Grau API médio do petróleo brasileiro, que no mês de Janeiro/2017 esteve com valor de 26,3 °API (ANP, 2017). No modelo ADIOS2, o óleo com este mesmo valor de densidade API é o VASCONIA, produzido na Colômbia. O Quadro 4 apresenta as principais características desse óleo.

Quadro 4: Principais características do óleo tipo VASCONIA

Tipo de produto	Óleo cru
°API	26,3
Densidade	0,894 g/cc a 0°C
Viscosidade	47,2 cSt a 0°C
Adesão	0,39 g/m <sup>2</sup>
Aromáticos	26% de seu peso

## 4.2 Metodologia

A metodologia desenvolvida neste trabalho está baseada na modelagem hidrodinâmica e de transporte do óleo derramado no mar com o SisBaHiA® e no cálculo das trajetórias com o modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT), dos componentes originados na evaporação do óleo.

## 4.2.1 Modelo digital do terreno

A partir de cartas náuticas gera-se um mapa digital que servirá de base para a definição das características da área de estudo, para a criação de um modelo digital do terreno.

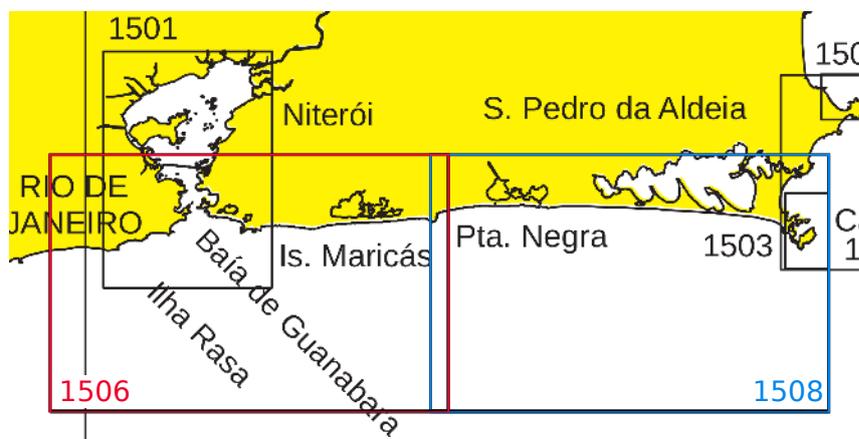
Concluído o mapa digital serão definidos: contornos de terra, fronteira aberta (mar), mapa base, malha de elementos finitos, onde serão colocadas as informações de batimetria e rugosidade.

As constantes harmônicas fazem parte da caracterização do domínio de modelagem e também serão incluídas neste módulo do SisBaHiA®.

### 4.2.1.1 Mapa digital

Foram utilizadas as cartas náuticas 1506 e 1508 como molde para o criação do mapa digital, uma vez que Ponta Negra se situa na borda de cada uma delas, conforme Figura 8.

Figura 8: Superposição das cartas 1506 e 1508.



Para a cobertura de toda a área de interesse, foi necessária a montagem de uma carta com a superposição das cartas 1506 e 1508. Fonte: Imagem adaptada de DHN (2019, p. 85).

As cartas foram baixadas do site da DHN e convertidas com o programa *NOAA Chart Projector* (NOAA, 2017). A conversão tanto transformou o tipo de imagem (do formato de arquivo KAP/BSB para TIFF georreferenciado) bem como mudou o sistema de coordenadas de Lat/Lon para UTM.

A Figura 2 (Infraestrutura do empreendimento portuário) foi georreferenciada, e usada para delimitar o porto, fisicamente, no mapa. Tendo feito isto, foi usado o programa *Surfer* para carregar as cartas e a imagem do porto em camadas e manipulá-las a fim de obter uma figura completa abrangendo toda a área de interesse. Assim, tem-se o mapa digital.

#### 4.2.1.1.1 Contorno de terra

Com o mapa finalizado, o próximo passo é a criação do contorno de terra. O contorno de terra é gerado usando-se a função *Digitize* do programa *Surfer*, onde cada ponto clicado no mapa gera um par X,Y que será salvo, posteriormente, em um arquivo no formato *Golden Software Blanking* (\*.bln). Este é um arquivo texto com um cabeçalho descrevendo o número de pontos do arquivo e pares de pontos X,Y, onde X é a longitude do ponto e Y a latitude (em metros). Com isto o SisBaHiA® consegue recriar o contorno internamente, “ligando” os pontos. Cabe ressaltar que o arquivo de contorno de terra descreve um contorno fechado onde, obrigatoriamente, o primeiro ponto (par X,Y) do arquivo é igual ao último.

Além do contorno de terra do litoral, também foi digitalizado o contorno da lagoa de Guarapina e seu canal de ligação com o mar.

#### 4.2.1.1.2 Contorno da fronteira aberta

Tal como foi gerado o contorno de terra, temos que gerar o contorno da fronteira aberta, uma fronteira fictícia para delimitar a área do domínio de modelagem. Os modelos hidrodinâmico e de transporte Lagrangeano rodam confinados entre a fronteira de terra e a fronteira aberta.

O arquivo de contorno é gerado da mesma forma que no caso da fronteira de terra, com a diferença de que não há limite físico para se acompanhar.

#### 4.2.1.1.3 Mapa base

De posse do arquivo do contorno de terra e do contorno da fronteira aberta, passa-se à construção do mapa base. Com a utilização do *Surfer*, além dos arquivos de contorno, já definidos, é possível a inclusão de outros elementos para que seja construído um mapa tecnicamente correto: Seta indicadora de norte, escala gráfica, bordas com informação de coordenadas etc. Foi incluído também o desenho das lagoas, mesmo as que não fazem parte da simulação.

#### 4.2.1.1.4 Malha de elementos finitos

Para a construção da malha de elementos finitos, foi usado o próprio SisBaHiA®. Com as informações do mapa base, contorno do mapa de terra e contorno de mapa de água preenchidos na aba “Informações” do menu “Malhas & Domínios de Modelagem”, usa-se o botão “Visualizar” para se ter acesso à visualização do mapa e malhas.

Nesta tela se tem acesso à função “Criar Contorno” onde serão marcado vários pontos (contorno da malha) ao longo do contorno do domínio de modelagem. É fundamental

nesta etapa um cuidado especial com o espaçamento entre os pontos do contorno pois eles vão definir o tamanho dos elementos, na borda do domínio. Cada ponto do contorno será um vértice de um (ou mais) elementos da malha. Quanto menos espaçados estiverem os pontos, menores serão os elementos, mais refinada será a malha naquela região e maior o esforço computacional para resolver a simulação.

O próximo passo é a criação da malha propriamente dita, através da função “Gerar Malha”. Nesta fase é necessário verificar e corrigir os vértices, caso existam vértices com ângulos muito agudos (menores que 20°) ou muito obtusos (maiores que 160°). Na função “Verificar” o programa informa o nó com problema, caso exista.

#### 4.2.1.1.5 Georreferenciamento

Após a criação da malha, pode-se calcular as coordenadas do centro da mesma:

$$x_{centro} = \frac{x_{máx} + x_{mín}}{2} \quad e \quad y_{centro} = \frac{y_{máx} + y_{mín}}{2}$$

Onde o máximo e o mínimo se referem ao máximo e mínimo das coordenadas dos vértices da malha.

Com o uso de uma calculadora geográfica (Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/calcula/>>) os valores são convertidos de UTM 23S para Lat/Lon e os campos *Latitude* e *Longitude* do quadro *Georreferenciamento em Malhas e Domínios de Modelagem*, do SisBaHiA®, preenchidos.

“Dados de georreferenciamento são usados por vários processos em diferentes modelos, por exemplo, no cálculo de força de *Coriolis* variada e no cálculo de radiação solar, entre outros” (COPPE, 2017).

#### 4.2.1.1.6 Batimetria

O SisBaHiA® necessita da informação de batimetria para cada vértice da malha. Nas aba “Nós” há um botão “Interpolar”. Dado um arquivo de batimetria formatado adequadamente, o SisBaHiA® faz a interpolação destes dados e preenche a informação da batimetria.

Para gerar o arquivo de batimetria será usada novamente a função *Digitize* do *Surfer* e o mapa digital gerado previamente.

Com o mapa digital aberto e a função *Digitize* acionada, cada ponto com cota de batimetria no mapa deve ser clicado e a informação X,Y será adicionada à janela do *Digitize*. A informação da cota é inserida manualmente a cada ponto incluído, transformando o par X,Y em X,Y,Z, onde X e Y são as coordenadas do ponto e Z a cota do fundo.

Para a batimetria do canal de ligação da lagoa de Guarapina com o mar, foram adotados os valores de 0,5 m nas margens e 1,5 m no meio do canal.

#### 4.2.1.1.7 Amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo

O processo para inserção da informação da rugosidade do fundo é semelhante ao processo usado para a definição da batimetria. O que muda é que onde se colocava a cota de fundo (Z), passa-se a colocar a rugosidade.

Aproveitando o arquivo gerado para a interpolação da batimetria, já com as coordenadas (X e Y) e a profundidade (Z) correspondente a cada ponto, definiu-se uma nova coluna com a rugosidade de acordo com os critérios a seguir:

- Região litorânea e oceânica
  - Rugosidade de 0,05 m (fundo com predominância de areias grossas), para profundidades de até 5 m;
  - Para profundidades acima de 5 m, rugosidade de 0,02 m (fundo com predominância de areias médias).
- Canal da Lagoa de Guarapina:
  - Rugosidade de 0,2 m (fundo com rochas), nos últimos 150 m na ligação do canal com o mar;
  - No resto do canal, rugosidade de 0,03 m (fundo com predominância de areias médias).

Novamente os dados serão interpolados pelo SisBaHiA® e a informação da rugosidade corretamente definida para cada vértice.

#### 4.2.1.1.8 Constantes harmônicas

O SisBaHiA® já tem predefinidas as constantes harmônicas e o período de cada uma delas, faltando apenas a informação de amplitude e fase.

Com os dados obtidos nos quadros 2 e 3, foram definidas duas estações maregráficas no SisBaHiA® e complementadas as informações de amplitude e fase para as constantes disponíveis.

## 4.2.2 Modelo hidrodinâmico

Neste modelo há várias pastas para configuração do mesmo.

#### 4.2.2.1 Pasta parâmetros

Nesta pasta definimos:

- O nome da malha que será usada na simulação (Item 4.2.1.1.4);
- O instante inicial da simulação;
- O instante final da simulação;
- O passo de tempo
- O nome do diretório para armazenar os resultados.

O modelo foi configurado para rodar 60 dias de simulação, com *Instante Inicial* = 0, *Instante Final* = 5.184.000 (segundos) e passo de tempo de 30 s.

#### 4.2.2.2 Pasta fronteiras

Nesta pasta foram configuradas as subpastas a seguir:

##### 4.2.2.2.1 Parâmetros

Na seção *Fronteira Aberta*, na caixa *Tipo*, foi selecionado o cálculo da elevação (altura da maré) por valores datados através das constantes harmônicas definidas anteriormente. Foi escolhida a data inicial de 05 de março de 2010.

##### 4.2.2.2.2 Contornos

Na pasta *Contornos*, configuramos as características dos contornos terrestres e abertos. Para os *Terrestres*, configurou-se talude vertical para todos os nós.

No caso dos contornos abertos (fronteira aberta):

- O ângulo da normal à fronteira foi definido paralelo à linha de costa, acompanhando o sentido das correntes costeiras e só é considerado no caso de afluxo. Ou seja, considera-se que qualquer fluxo hidráulico que ultrapasse a fronteira aberta, no sentido de fora para dentro da malha, obedece uma paralela à linha de costa. Os efluxos, no caso da fronteira aberta, são calculados pelo modelo;
- Para o nível médio do mar foi atribuído o valor de 0,70 m, conforme informação obtida nas cartas náuticas.

#### 4.2.2.2.3 Nível médio diferencial

O SisBaHiA® permite a configuração de um Gerador de Nível Médio Diferencial (GNMD) para simular os efeitos de correntes não associadas a marés astronômicas (ROSMAN, 2018a). Esta configuração é realizada na pasta *Nível Médio Diferencial*.

Foi configurado o segmento de fronteira aberta, com um nome e quais os nós inicial e final do segmento (Onde a fronteira aberta toca o contorno de terra) .

Para completa configuração do GNMD, além da definição do segmento de fronteira aberta, precisamos definir um *Eixo Pivot*, um *Fator de Escala* e uma *Série Geradora de NMD*.

O *Eixo Pivot* é um eixo imaginário mais ou menos perpendicular ao alinhamento geral da costa. No presente caso, perpendicular à reta que liga os pontos inicial e final do segmento de fronteira aberta. É recomendável que este eixo passe por um ponto central na região de fronteira aberta (nó do *Eixo Pivot*).

O *Fator de Escala* é um fator de calibração do modelo, para ajustar o efeito do GNMD nas correntes simuladas.

A *Série Geradora de NMD* é um conjunto de valores definidos em intervalos de tempo constantes que servem de referência para o GNMD.

Na prática, o efeito do uso do GNMD é o de modular a elevação ao longo da fronteira aberta, como se fosse uma gangorra apoiada no *Eixo Pivot*, sendo o movimento da gangorra controlado pela *Série Geradora de NMD*.

Para compor a *Série geradora de NMD*, foram usadas as informações da componente U da velocidade da corrente marinha (leste-oeste) obtidas no site do *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), em <<https://www.hycom.org/>>, para um ponto próximo ao do nó do *Eixo Pivot*. Como o HYCOM fornece dados em intervalos de 24 h, a ferramenta do SisBaHiA® *Muda Intervalo de Tempo Entre Dados* foi usada para gerar uma nova sequência em intervalos de 6 h (21600 s).

#### 4.2.2.3 Variáveis meteorológicas - Vento

As informações de vento a 10 m da superfície foram extraídas dos dados disponibilizados pela Reanálise ERA Interim, disponíveis em <<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>>.

Foi desenvolvido um *script* na linguagem *Python* para plotar os pontos de grade disponíveis na área do domínio de modelagem, num total de 126 pontos, e o resultado pode ser visto na [Figura 9](#).

Dos 126 pontos, optou-se por usar apenas 6 pontos, 3 no mar e 3 em terra, conforme

Figura 9: Pontos de grade da Reanálise ERA Interim.



Figura 10. Tal opção foi feita pois os 6 pontos são suficientes para o SisBaHiA® interpolar a condição para todo o domínio de modelagem e para evitar uma sobrecarga do modelo com o excesso de pontos, o que prejudicaria a sua performance.

Figura 10: Pontos de grade da Reanálise ERA Interim selecionados.



As figuras 11 e 12 mostram o vento no ponto de grade 27 (EV27), para os períodos de março de 2010 e abril/maio de 2010, respectivamente.

Figura 11: Dados de ventos observados no mês de março de 2010.

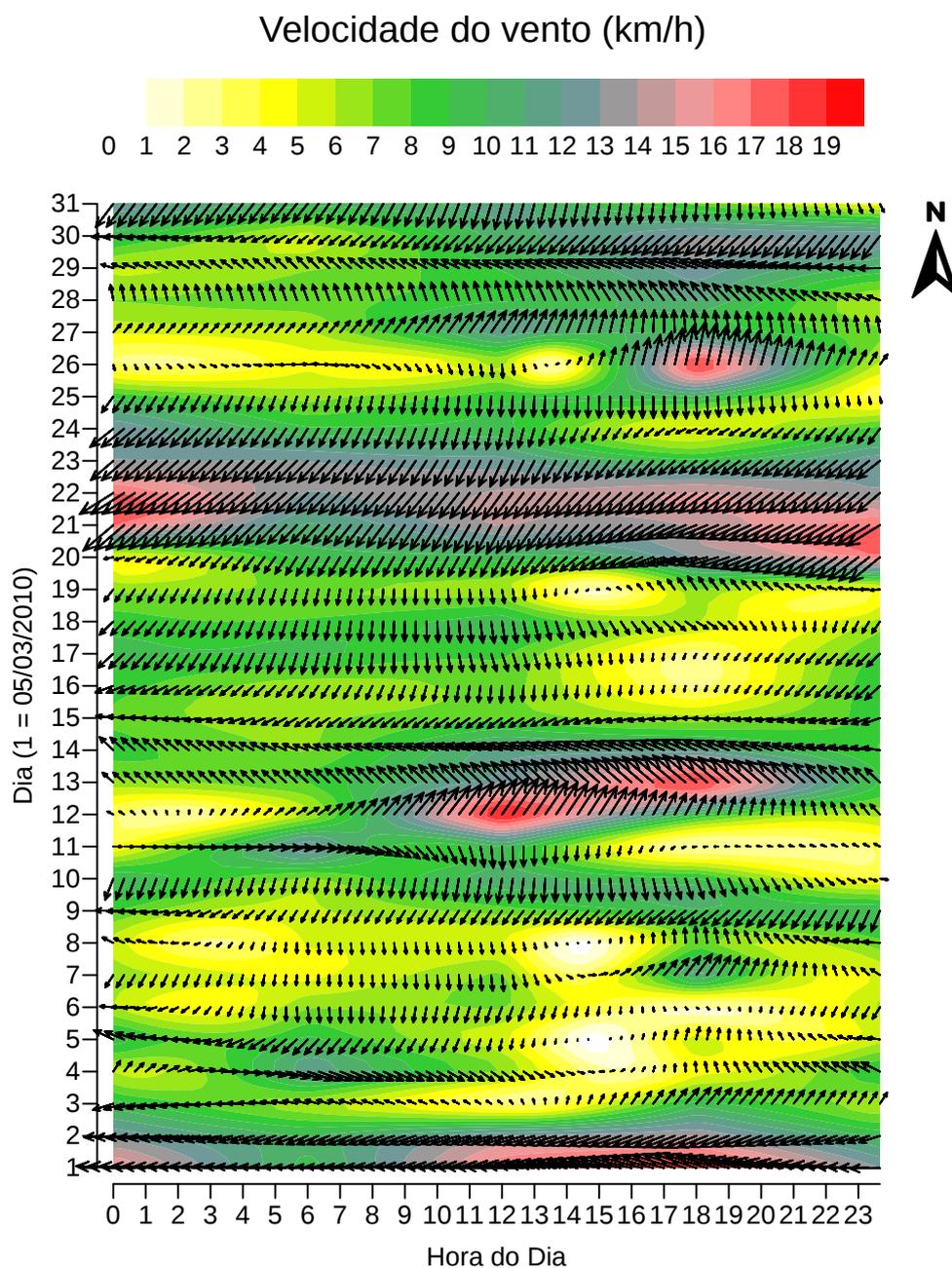
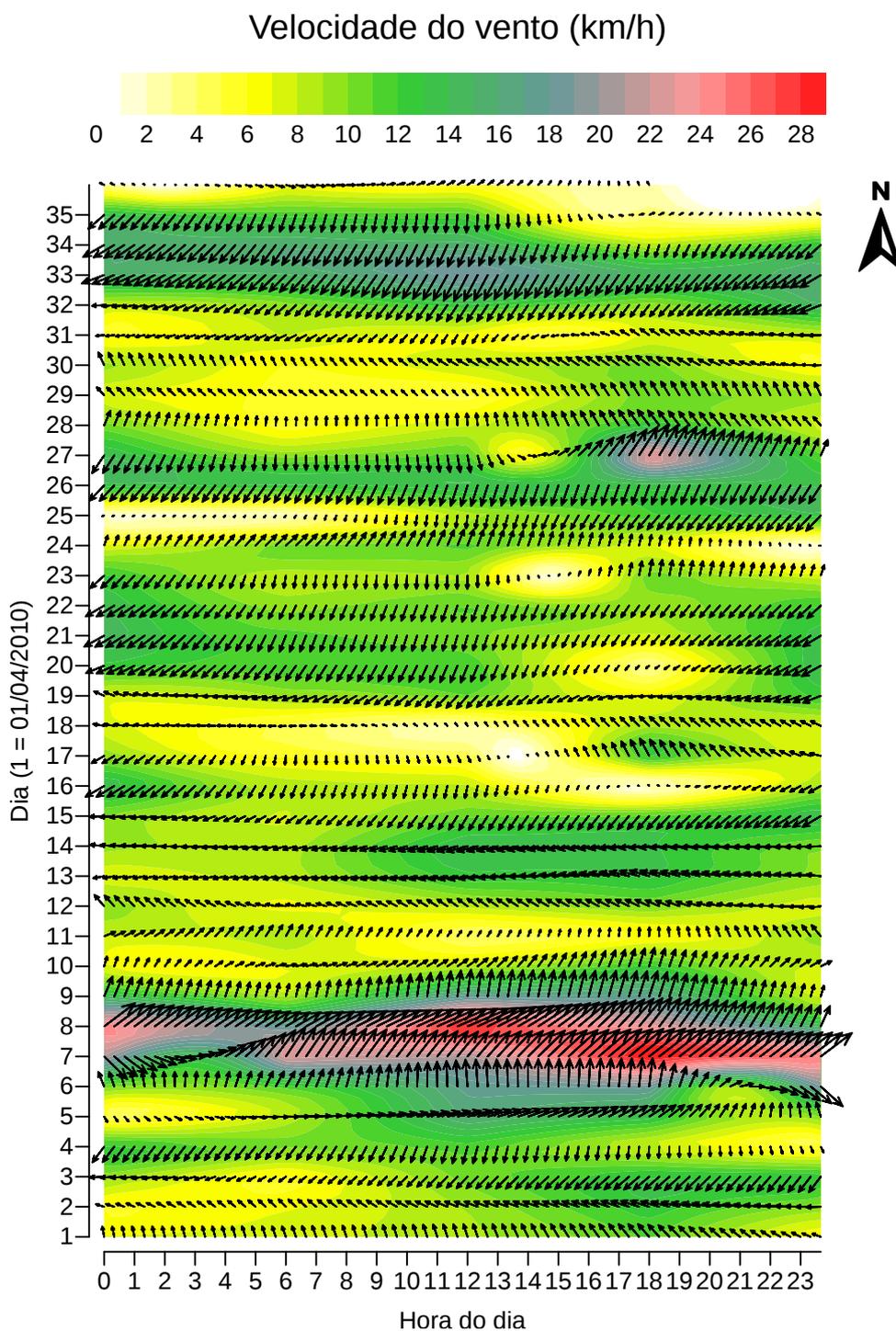
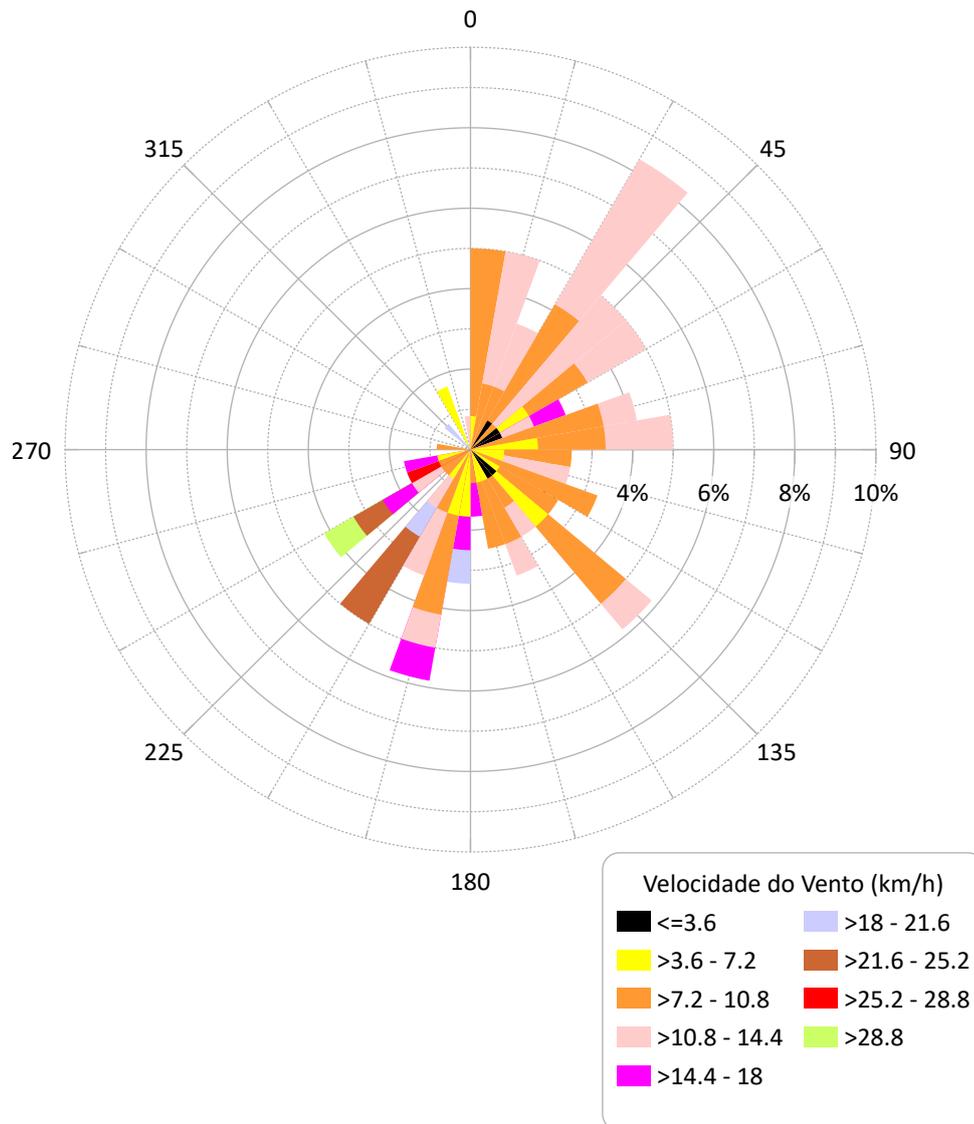


Figura 12: Dados de ventos observados entre os meses de abril e maio de 2010.



A [Figura 13](#) apresenta a rosa dos ventos, onde se observa a predominância dos ventos nas proximidades da área de estudo no quadrante NNE, seguidas dos quadrantes SE e SSO, com velocidades médias entre 10,8 a 14,4 km/h.

Figura 13: Distribuição dos ventos em Maricá para o mês de abril de 2010.



#### 4.2.2.4 Condições iniciais

As condições iniciais de elevação e velocidade para os pontos do domínio foram adotadas da seguinte forma:

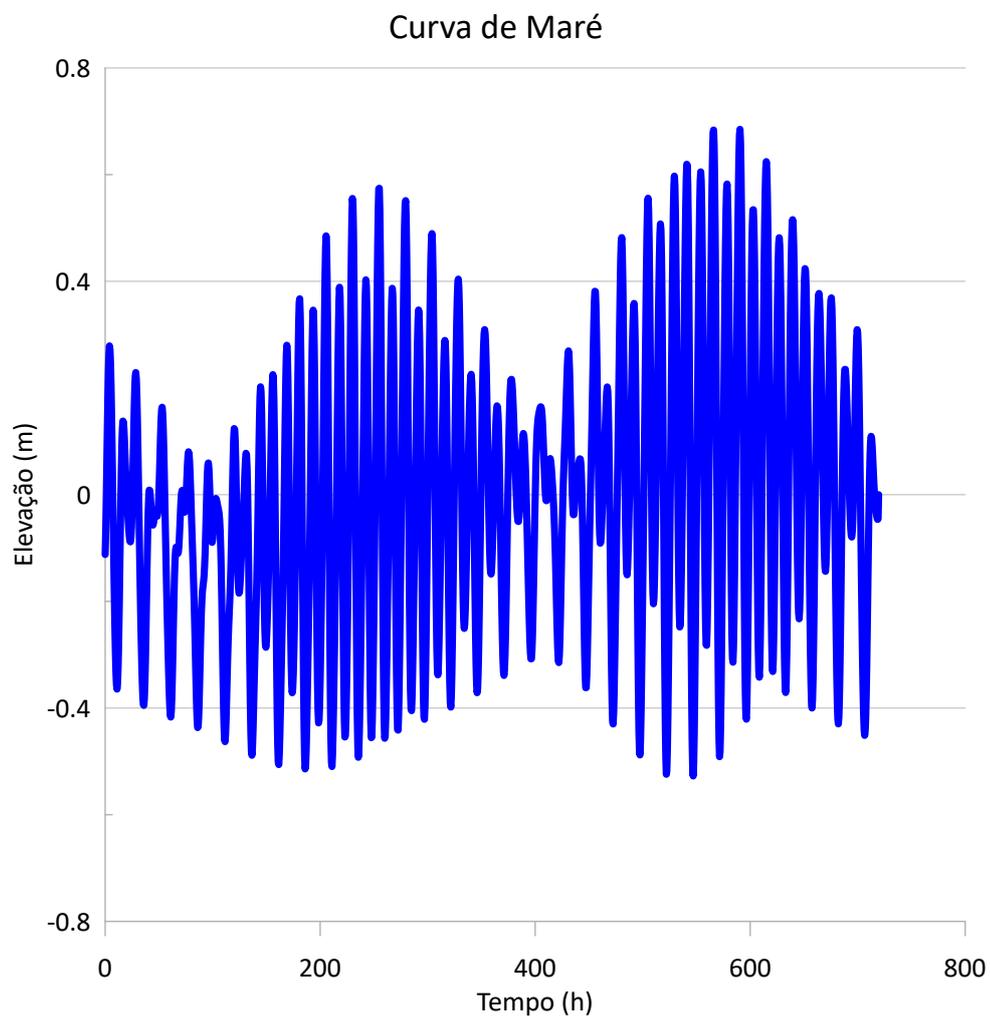
- Para pontos no mar até a metade do canal, velocidade zero e elevação calculada pelas curvas de maré;
- Para a lagoa de Guarapina e o restante do canal, velocidade zero e elevação igual ao nível médio do mar para a região.

Considerando-se a data inicial de simulação do modelo hidrodinâmico de 05/03/2010, a elevação inicial para a área de mar será de 0,68 m (MSL + elevação de maré em  $t = 0$ ;  $0,70 - 0,11 = 0,68$ ). A elevação de maré é obtida através do próprio SisBaHiA®, conforme Tabela 1 e Figura 15.

Tabela 1: Tabela de elevação de maré a partir de 05/03/2010 00:00 GMT

<b>Tempo (h)</b>	<b>Elevação (m)</b>
0	-0,112218
0,5	-0,06709
1	-0,009504
1,5	0,055548
2	0,121869
2,5	0,182844
3	0,232312
3,5	0,265368
4	0,278953
4,5	0,272115
5	0,245925
5,5	0,203089
6	0,147363
6,5	0,082917
7	0,013793
7,5	-0,056452
8	-0,12485
8,5	-0,18892
9	-0,24643
9,5	-0,29515
10	-0,332711
10,5	-0,35666
11	-0,364729
11,5	-0,355274
12	-0,327788

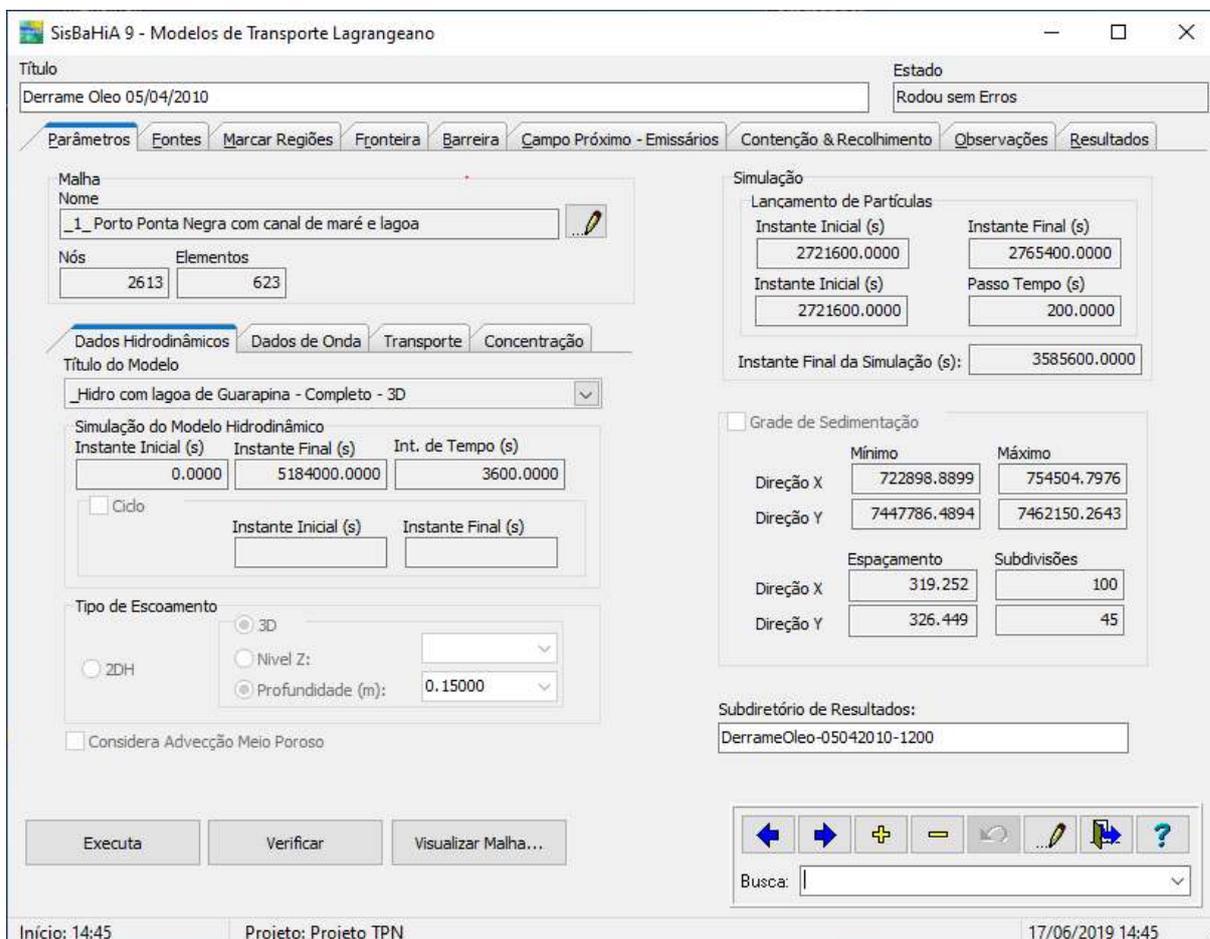
Figura 14: Curva de maré com data inicial em 05/03/2010 00:00 GMT.



### 4.2.3 Modelo Lagrangeano

Neste modelo há várias abas para configuração do mesmo.

Figura 15: Tela do SisBaHiA® com as opções de configuração do Modelo Lagrangeano.



#### 4.2.3.1 Parâmetros

Na aba *Parâmetros* do módulo *Modelos de Transporte Lagrangeano*, configuram-se várias pastas (abas) e quadros.

#### 4.2.3.2 Malha

Aqui define-se qual a malha será usada na simulação. Trata-se da mesma malha usada no *Modelo Hidrodinâmico* (Item 4.2.1.1.4).

##### 4.2.3.2.1 Dados hidrodinâmicos

Nesta pasta insere-se o nome do modelo hidrodinâmico bem como os instantes inicial e final da simulação hidrodinâmica, a serem considerados na execução do modelo de

transporte. Caso seja necessário, pode-se usar um tempo de simulação da hidrodinâmica menor que o tempo de simulação do transporte, bastando, para isso, que se repita o modelo hidrodinâmico em ciclos.

#### 4.2.3.2 Simulação

Neste quadro são definidos os parâmetros da simulação de transporte: Instante inicial do lançamento de partículas, instante final do lançamento, passo de tempo e instante final da simulação. A cada passo de tempo são lançadas partículas em número definido na pasta *Fontes*, conforme descrito a seguir.

#### 4.2.3.3 Fontes

O modelo Lagrangeano analisa o transporte de óleo considerando o volume derramado dividido em um determinado número de partículas lançadas a intervalos de tempo definidos. Estas partículas são lançadas em posições aleatórias dentro de um volume denominado *Fonte*.

##### 4.2.3.3.1 Definição das fontes

Para definição das fontes, usamos os seguintes parâmetros:

- Número: Um número inteiro que identifica a fonte;
- Forma da Região Fonte: Se a fonte tem a forma elíptica ou retangular;
- Posição do Centro da Região Fonte: Posição X, Posição Y e Profundidade;
- Dimensões da Região Fonte: Comprimento, Largura, Ângulo com X (Entre o Comprimento e o Eixo X) e Espessura (Espessura da Coluna de Água Local ou Espessura Definida);
- Lançamento de partículas: Começo (s), Fim (s), Vazão Efluente, Concentração Efluente, Partículas/DT.

A espessura da região fonte foi estabelecida conforme proposto por [Rosman \(2000b\)](#), numericamente igual à densidade do óleo.

A área da região fonte foi calculada da seguinte forma:

- Para fonte única com tempo de derrame muito maior que passo de tempo: Foi calculado o volume de óleo derramado por passo de tempo e usada a planilha disponibilizada por [Rosman \(2018b\)](#) para cálculo da área atingida pelo espalhamento deste volume;

- Para múltiplas fontes, no caso do modelo de transporte Lagrangeano probabilístico: Foi considerado um derrame instantâneo de todo o volume, para cada fonte em separado, e a área da região fonte obtida pela planilha disponibilizada em [Rosman \(2018b\)](#).

#### 4.2.3.3.2 Decaimento

Além da configuração das fontes, deve-se descrever a forma de decaimento do volume de óleo (perda de massa por evaporação e/ou dispersão), que pode ser configurada de 3 formas:

- Sem decaimento;
- Com decaimento de primeira ordem;
- Com curva de decaimento.

Neste trabalho foi adotada a terceira forma.

O ADIOS2 nos permite obter a curva de evaporação e dispersão do óleo, conforme [Figura 16](#).

De posse desta curva, usa-se o *Grapher* para digitalizar os pontos da curva de dispersão e obter-se uma tabela com o tempo de vida (x) e a quantidade de óleo perdida (y).

A curva de decaimento, que indica a cada tempo qual o percentual do volume de óleo remanescente (não evaporado), pode ser calculada pela seguinte fórmula:

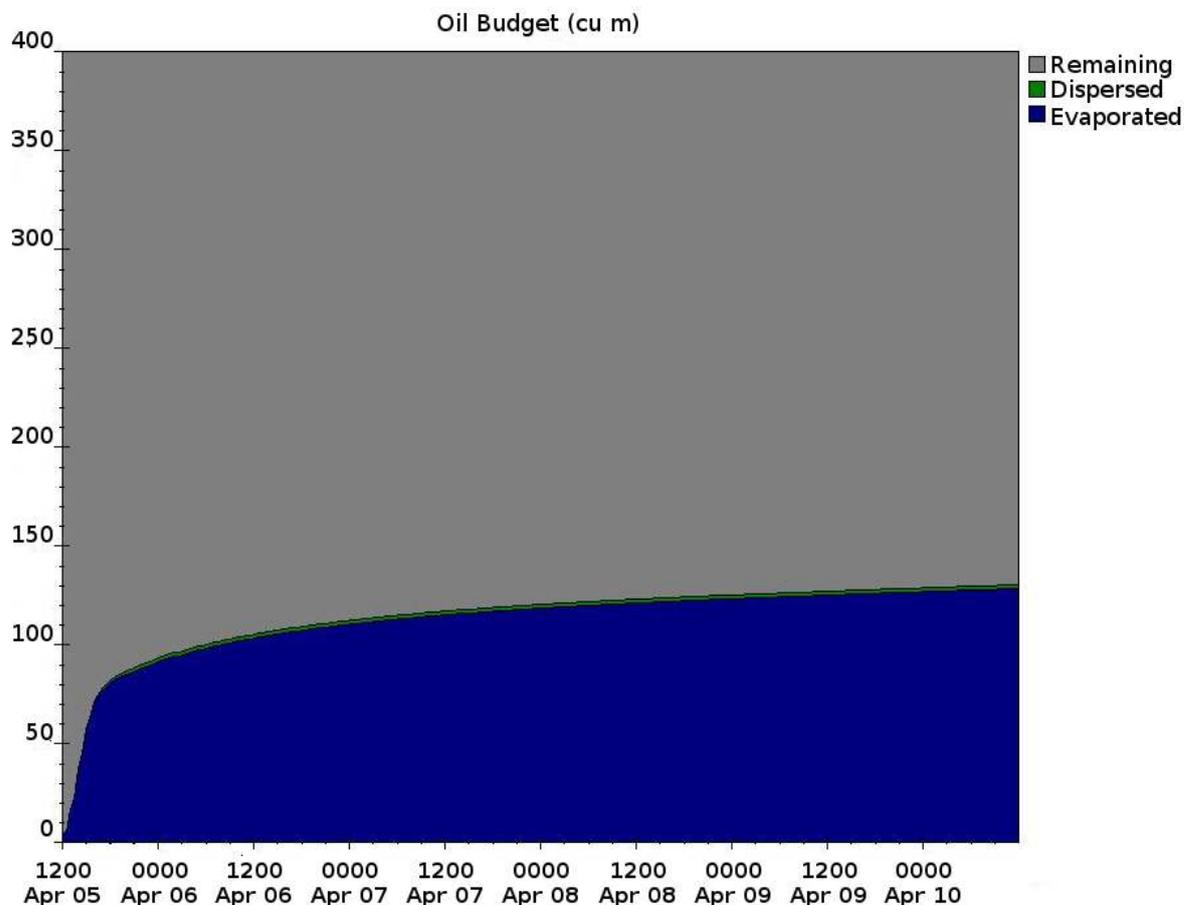
$$Volume_{remanescente} = \frac{Volume_{derramado} - Volume_{perdido}}{Volume_{derramado}}$$

Sendo o  $Volume_{derramado}$  um dado da simulação e o  $Volume_{perdido}$  obtido pelo gráfico gerado pelo ADIOS2.

#### 4.2.3.4 Absorção de óleo nas fronteiras

Para a fronteira de terra foi definido o coeficiente de absorção de 0,1 para os pontos de areia (praia), ou seja, 10% do material que toca a areia é absorvido e não retorna para a água. Para os pontos de rocha do litoral ou pontos do porto o coeficiente adotado foi de 0,01: apenas 1% do óleo é absorvido.

Figura 16: Curva de evaporação/dispersão do óleo obtida com o ADIOS2



#### 4.2.4 Cálculo de trajetórias aéreas

Foram escolhidos 5 pontos ao longo da praia de Jaconé para cálculo das trajetórias, vizinhos a áreas habitadas nos municípios de Maricá e Saquarema.

Para o cálculo foi usado o modelo HYSPLIT, disponível no site <<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>>. São necessárias algumas informações que devem ser entradas na página do site para o cálculo: coordenadas de origem, altura, data e hora de início, qual modelo usado para determinação das variáveis atmosféricas, duração do cálculo etc.

De posse das trajetórias é possível uma análise de quais áreas seriam alcançadas pelos elementos originados na evaporação do óleo após um derrame no mar, podendo afetar a saúde da população.

# 5 EXPERIMENTO NUMÉRICO COM O SisBaHiA® PARA OS MESES DE MARÇO E ABRIL/2010

## 5.1 Cenário para o experimento numérico

No ano de 2010 o litoral do estado do Rio de Janeiro foi fortemente atingido por uma ressaca que chegou a afetar as praias de Maricá, mas não causou danos significativos. Tal ocorrência, estudada por [Bulhões \*et al.\* \(2014\)](#), atingiu mais violentamente o litoral acima de Cabo Frio.

Desta forma, foram selecionados dois períodos para a simulação do derrame: Um iniciando em 05 de abril de 2010, onde tivemos os efeitos de um forte sistema frontal, e outro iniciando em 05 de março do mesmo ano, um período sem eventos meteorológicos significativos.

O Modelo Hidrodinâmico foi configurado para simular 60 dias a partir do dia 05 de março de 2010, possibilitando a execução de simulações de transporte no mês de março, bem como no mês de abril de 2010.

A primeira simulação com o modelo de transporte Lagrangeano foi configurada considerando-se um derrame de  $200 \text{ m}^3$  de óleo, com o início do derrame às 12:00 h (GMT) do dia 05/03/2010 e término às 00:00 h do dia 06/03/2010, com um período total de simulação de 10 dias.

A segunda simulação foi configurada com os mesmos parâmetros, apenas alterando-se as datas do início e fim do derrame para 05/04/2010 e 06/04/2010, respectivamente.

Uma terceira simulação foi realizada considerando-se 100 derrames de  $200 \text{ m}^3$  durante o mês de abril, com duração de 20 minutos cada. Foram sorteados os tempos iniciais de cada derrame com intervalo de tempo mínimo de 3 horas entre cada um. Dessa forma o SisBaHiA® pôde gerar um mapa com a probabilidade de passagem de óleo com um tempo de vida menor que um limite.

## 6 RESULTADOS

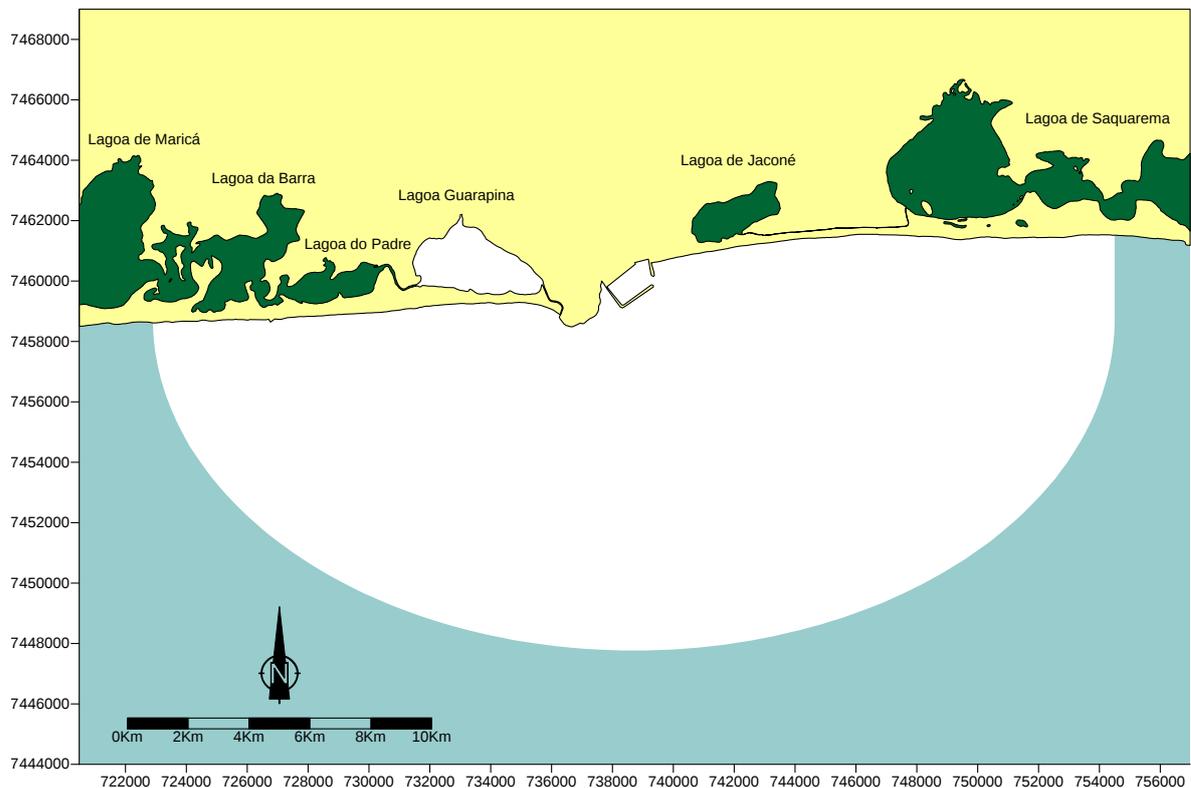
Seguem as figuras com os resultados obtidos em cada módulo do SisBaHiA®.

### 6.1 Malhas e domínios de modelagem

#### 6.1.1 Mapa base

A [Figura 17](#) mostra o mapa base construído a partir das definições em [4.2.1.1.3](#) para usar na simulação. O domínio de simulação é representado pela área não colorida.

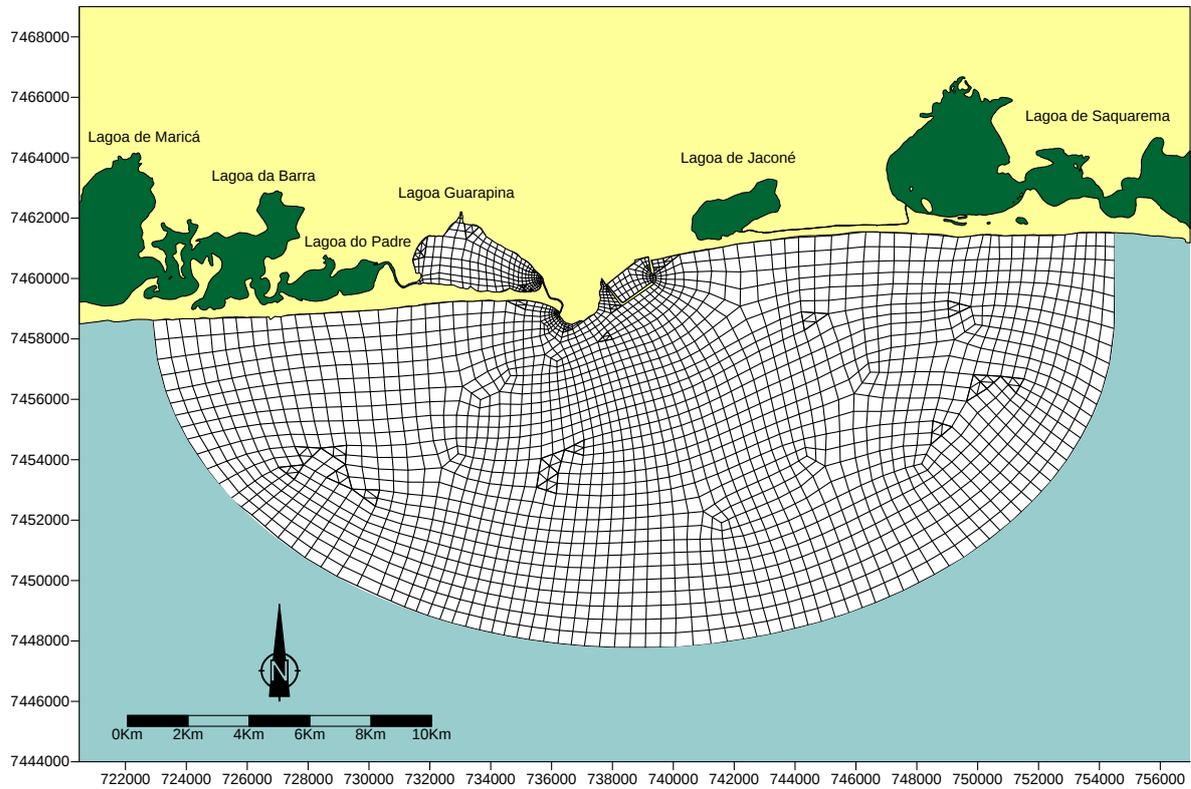
Figura 17: Mapa base criado para os experimentos.



#### 6.1.2 Malha de elementos finitos

A [Figura 18](#) mostra a malha construída a partir do item [4.2.1.1.4](#).

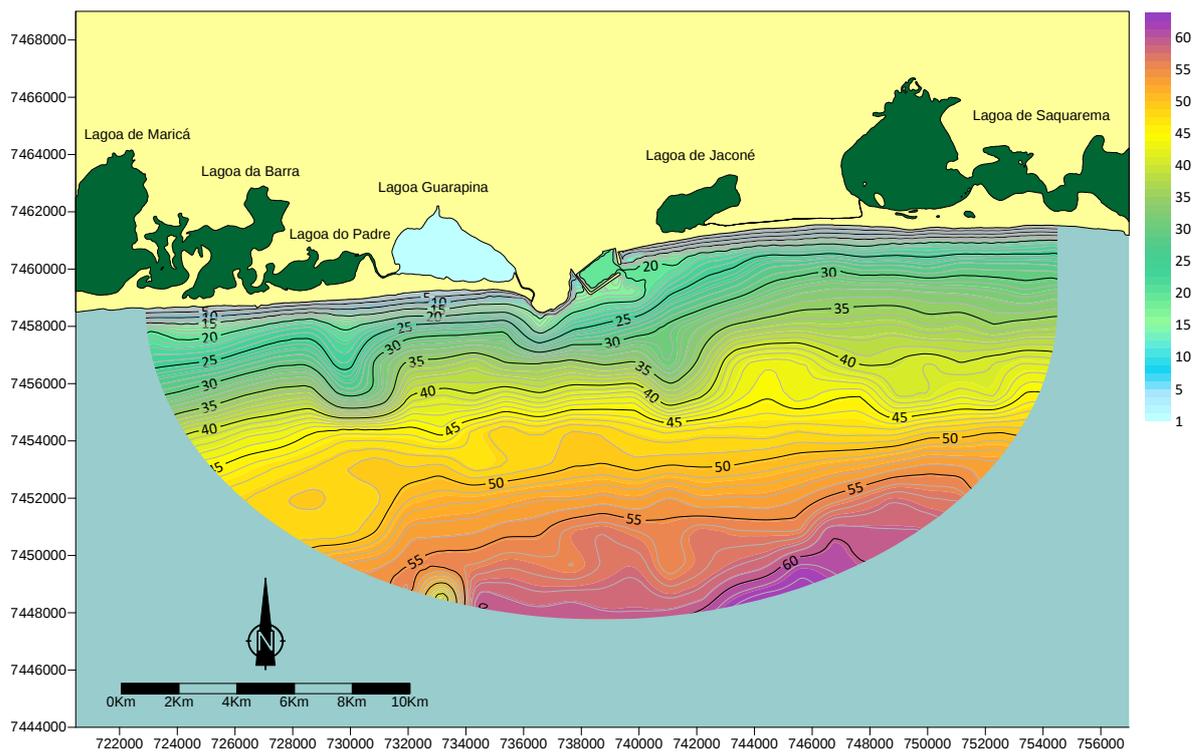
Figura 18: Malha de elementos finitos usada nas simulações.



### 6.1.3 Batimetria

A Figura 19 mostra batimetria do domínio construída a partir do item 4.2.1.1.6.

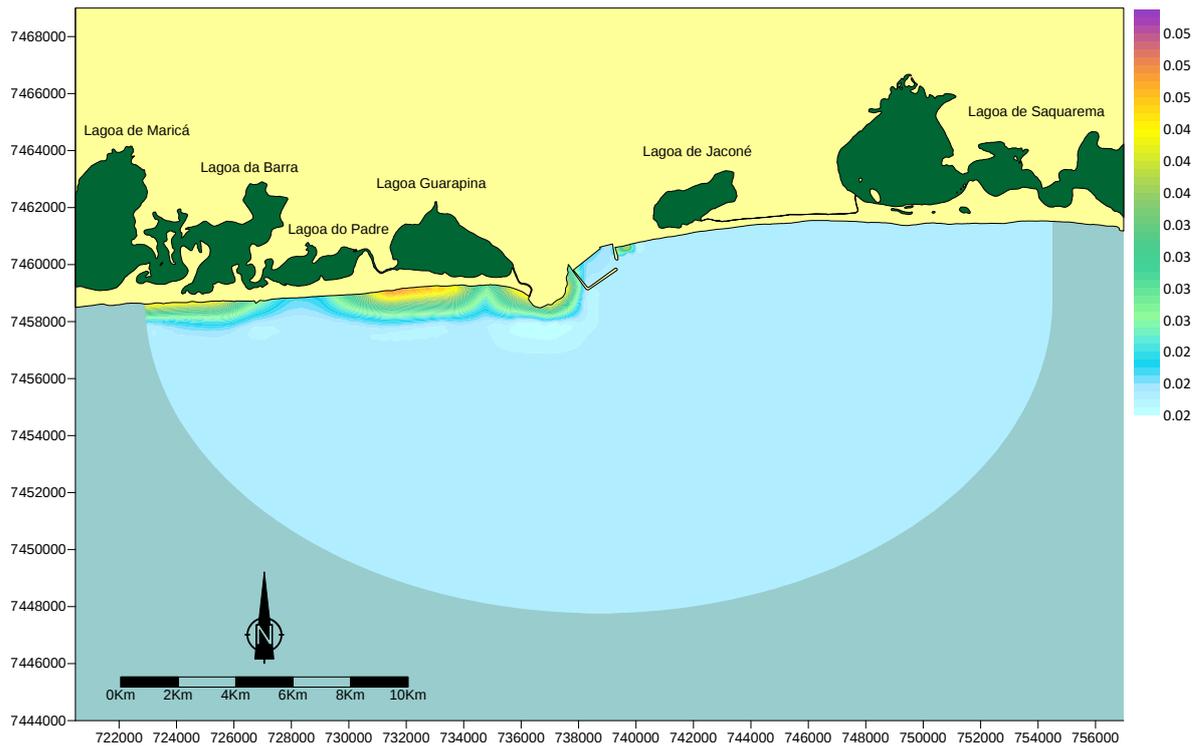
Figura 19: Curvas batimétricas na área de interesse.



### 6.1.4 Amplitude efetiva da Rugosidade do fundo

A Figura 20 mostra a rugosidade do fundo. Como a rugosidade foi escolhida de acordo com a profundidade e a costa apresenta um forte declive nos primeiros 15 m, podemos notar que praticamente não há diferença na rugosidade em todo o domínio. Seria necessário um *zoom* para verificarmos graficamente a rugosidade na área junto à costa.

Figura 20: Rugosidade.



Devido à forte declividade próximo à costa, quase não é possível observar as alterações na rugosidade do fundo.

## 6.2 Modelo hidrodinâmico

A Figura 21 mostra as correntes deslocando-se de Leste para Oeste numa condição de tempo normal para a área. A Figura 22 mostra as correntes deslocando-se de Oeste para Leste sob a influência de um sistema frontal com ventos de sudoeste (Figura 12).

Figura 21: Campo de velocidade das correntes para o dia 03/04/2010 00:00 GMT.

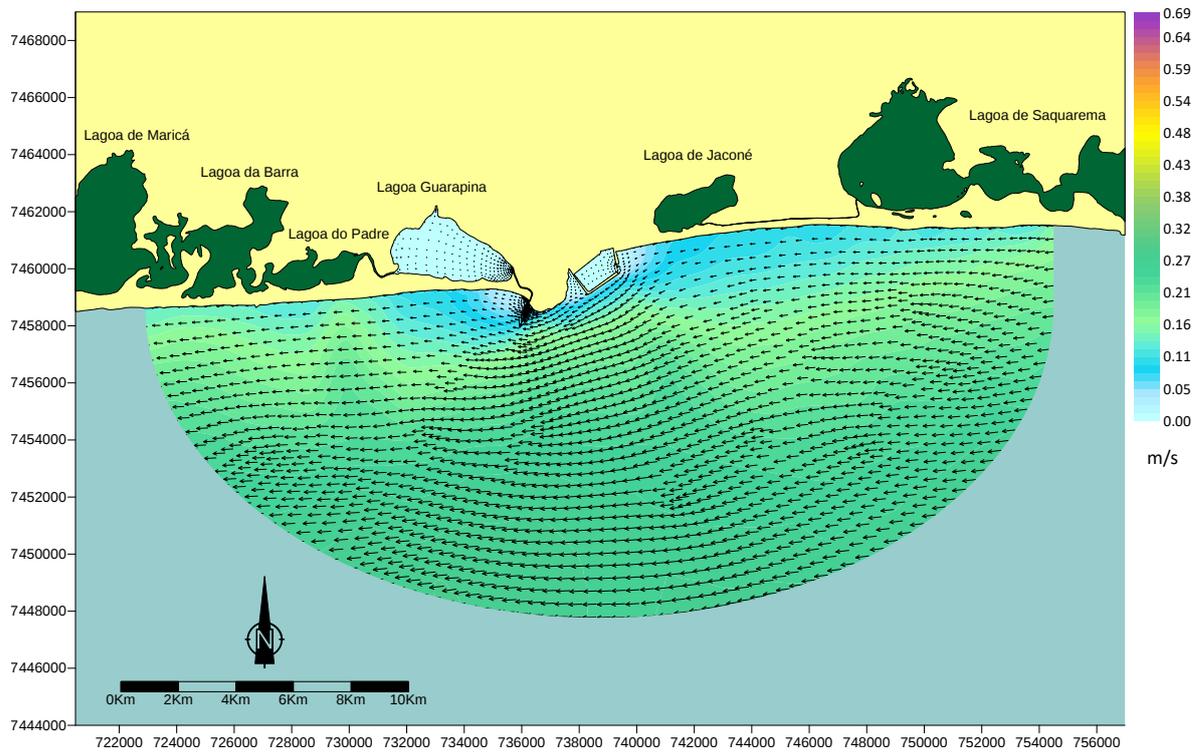
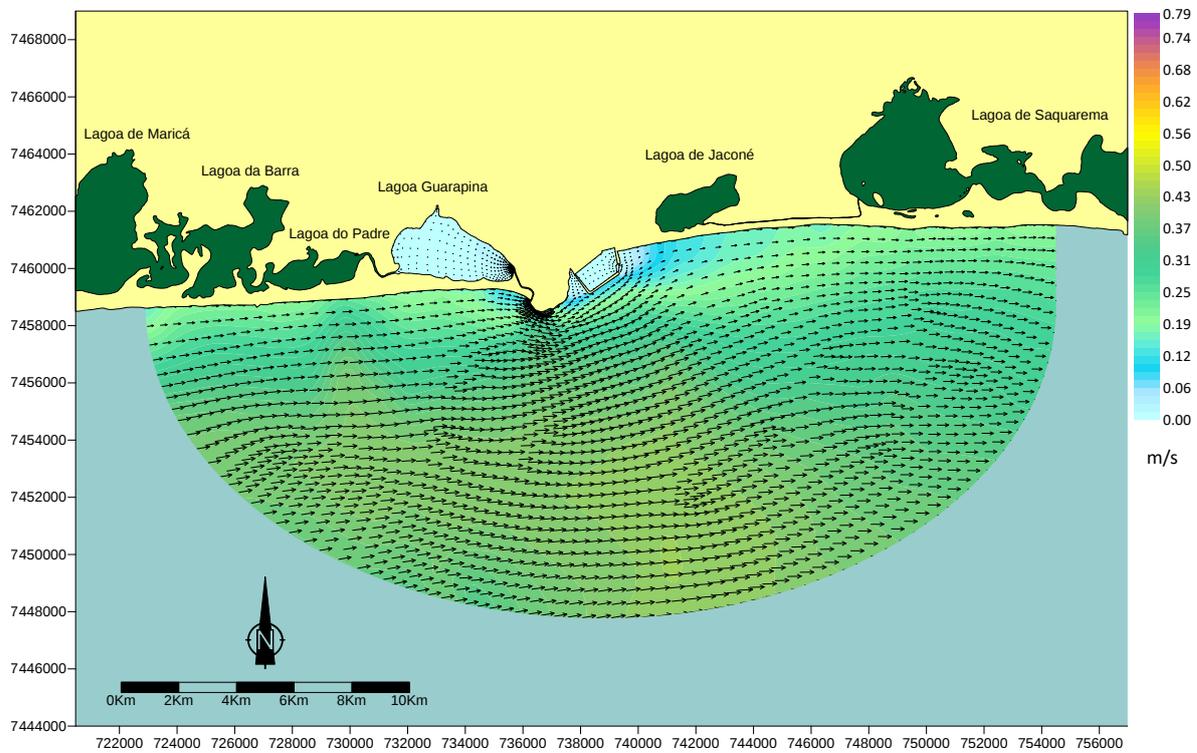


Figura 22: Campo de velocidade das correntes para o dia 08/04/2010 00:00 GMT.



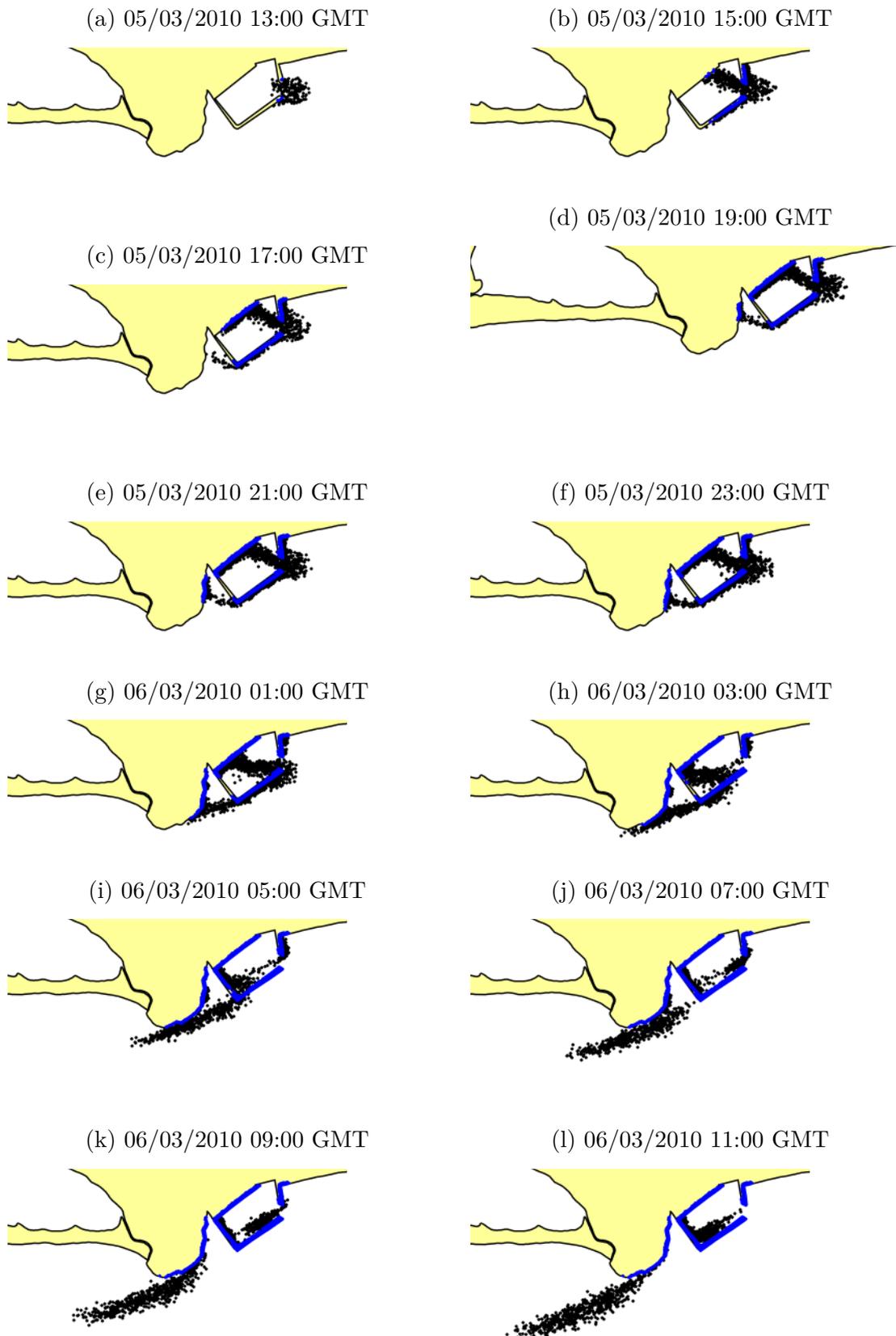
### 6.3 Modelo de transporte Lagrangeano

A seguir são apresentados os resultados das simulações conforme o item 5.1.

### 6.3.1 Derrame de óleo iniciado em 05/03/2010

As figuras de 23a a 23l mostram o deslocamento da pluma em um período de 24 horas após o início do derrame, com intervalos de 2h. Os pontos pretos representam o volume de óleo em suspensão. As áreas marcadas de azul indicam onde o óleo tocou a fronteira de terra (costa ou estruturas) e parte dele foi absorvido, de acordo com a razão de absorção configurada no modelo. Na Figura 23a observa-se a mancha de óleo deslocando-se para oeste e alcançando a entrada do porto. Na Figura 23b observa-se a mancha deslocando-se mais para o interior do porto e tocando a linha de costa. Na Figura 23c observa-se o aumento da área de toque da mancha na linha de costa dentro do porto. Observa-se também, externamente, que a mancha se aproxima de Ponta Negra. Na Figura 23d observa-se que a mancha continua deslocando-se para oeste, dentro e fora do porto, alcançando Ponta Negra. Na Figura 23e observa-se a mesma situação da Figura 23d com um pequeno aumento da área de toque em Ponta Negra. Na Figura 23f observa-se um aumento da área de toque em Ponta Negra. Na Figura 23g observa-se a continuidade do deslocamento para oeste e um aumento mais significativo da área de toque. Na Figura 23h observa-se o deslocamento similar à Figura 23g. Na Figura 23i o deslocamento da mancha já ultrapassou Ponta Negra. A partir deste ponto, uma mudança nas condições de tempo com a entrada de um forte vento sudoeste, pode empurrar a pluma em direção ao canal de ligação da Lagoa de Guarapina com o mar fazendo com que o óleo atinja o sistema lagunar. Nas figuras 23j e 23k a mancha continua o seu deslocamento para oeste e parte do óleo continuou retido dentro do porto. Na Figura 23l observa-se que a mancha já ultrapassou, quase que completamente, Ponta Negra.

Figura 23: Evolução da mancha de óleo após o derrame iniciado em 05/03/2010 12:00 GMT

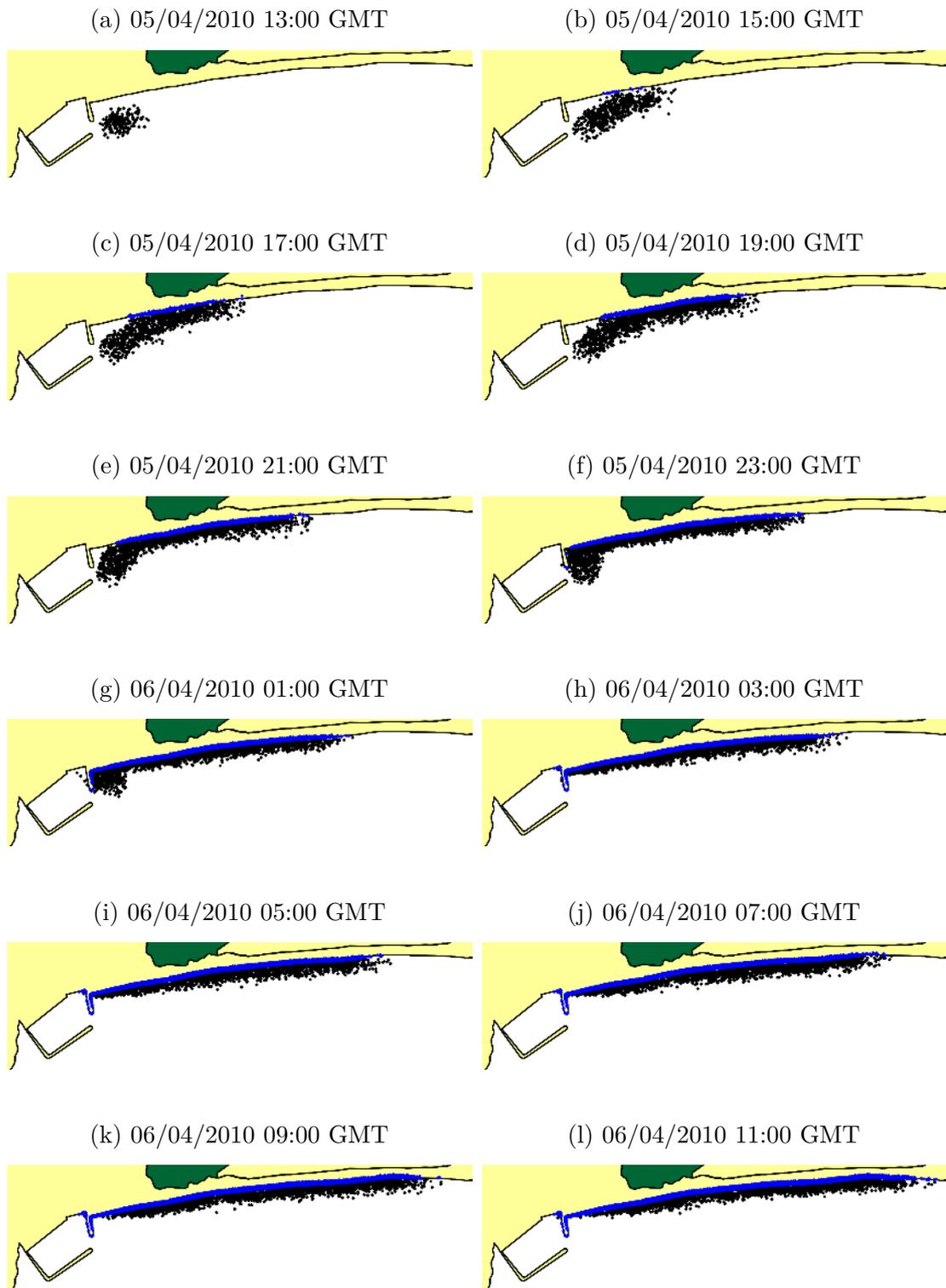


O pontos pretos representam o óleo em suspensão. As áreas marcadas em azul indicam os pontos onde o óleo tocou a costa ou estruturas e pode ter sido absorvido. A quantidade de óleo absorvido em cada toque pode ser configurada no modelo.

### 6.3.2 Derrame de óleo iniciado em 05/04/2010

As figuras de 24a a 24l mostram o resultado da simulação para o derrame iniciado em 05 de abril com uma situação típica de vento forte na área. Na Figura 24a observa-se a posição da mancha uma hora após o início do derrame. Na Figura 24b observa-se o deslocamento da mancha de óleo para leste com uma parcela do óleo tocando a costa. Na Figura 24c a mancha continua deslocando-se para leste com um volume maior tocando a linha de costa. Nas figuras de 24d a 24l observa-se que a mancha continua deslocando-se para leste com um volume cada vez maior de óleo tocando a linha de costa.

Figura 24: Evolução da mancha de óleo após o derrame iniciado em 05/04/2010 12:00 GMT



O pontos pretos representam o óleo em suspensão. As áreas marcadas em azul indicam os pontos onde o óleo tocou a costa ou estruturas e pode ter sido absorvido. A quantidade de óleo absorvido em cada toque pode ser configurada no modelo.

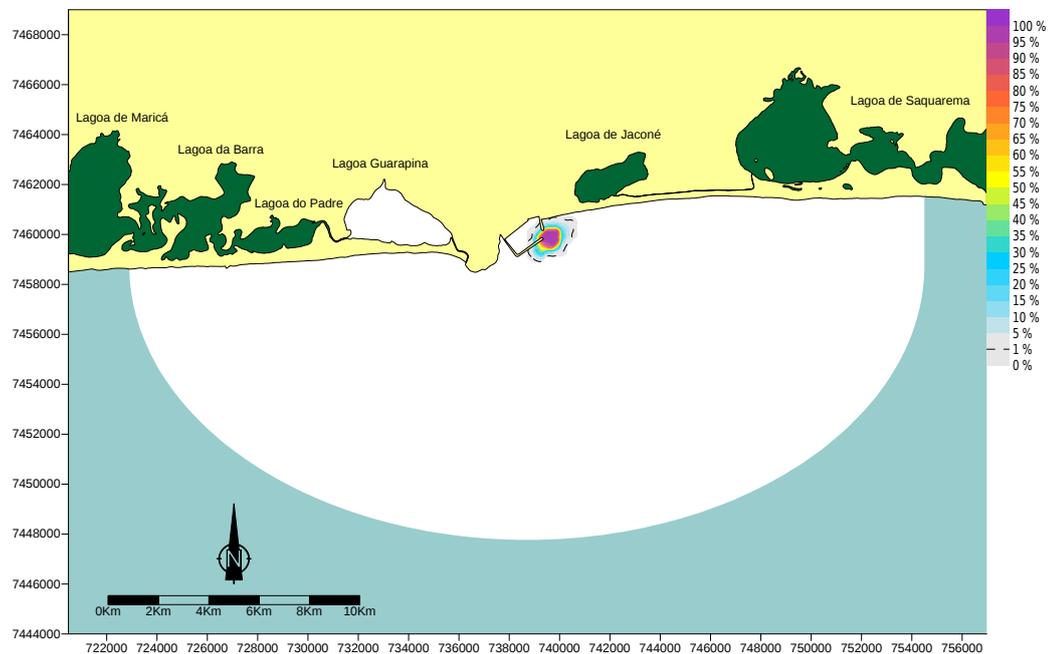
### 6.3.3 Modelo de transporte Lagrangeano probabilístico para o mês de abril de 2010

As figuras de 25 a 29 mostram a probabilidade de passagem de óleo para vários períodos após o início do derrame, ou seja, a probabilidade de um determinado ponto ser atingido pelo óleo decorrido um tempo de vida do óleo na água. Tais figuras foram obtidas tomando como base as condições hidrodinâmicas/atmosféricas estabelecidas para o mês de abril de 2010.

É importante enfatizar que trata-se de um modelo probabilístico, onde são analisados vários eventos ao longo do tempo e embora a probabilidade de toque na praia seja relativamente baixa, cerca de 5%, no resultado do cenário mostrado em 6.3.2 o óleo alcançou a areia em cerca de 2 horas após o início do derrame.

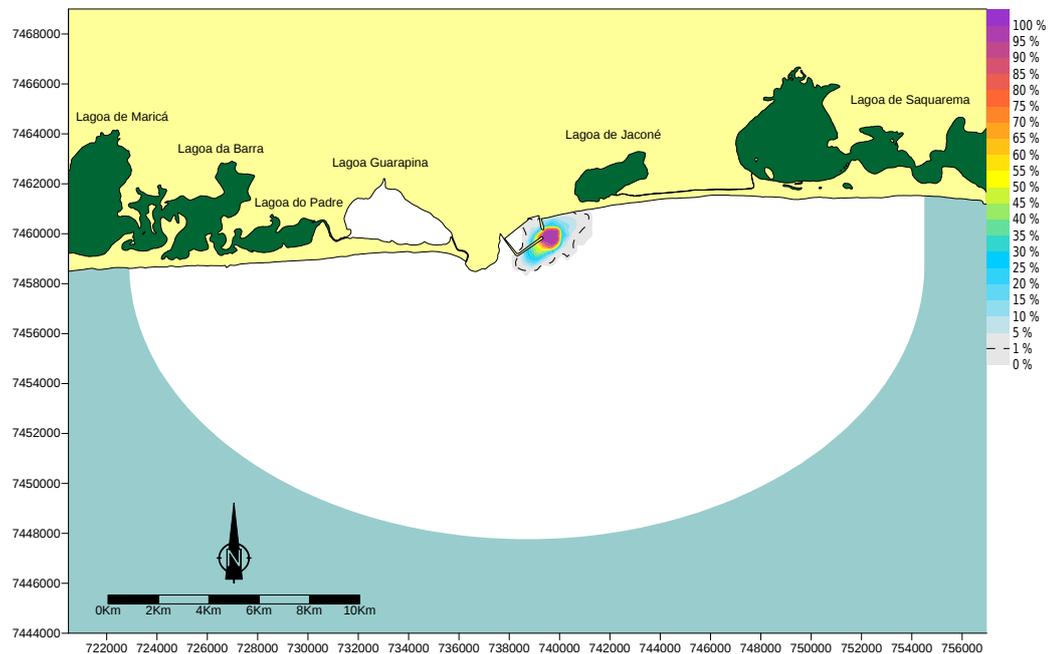
A Figura 25 mostra a probabilidade do óleo alcançar um determinado ponto em menos de 1 hora após o início do derrame. A isolinha tracejada marca a probabilidade de 1%. Ou seja, fora da linha tracejada, a probabilidade de passagem de óleo é menor que 1%.

Figura 25: Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 1 hora após o início do derrame - abr/2010



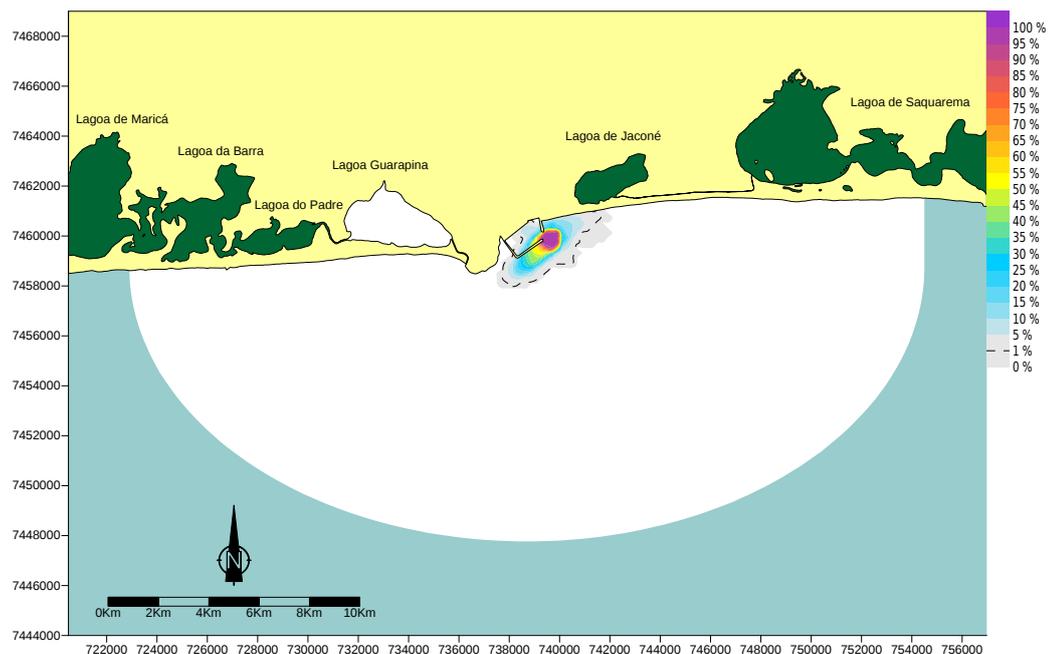
A Figura 26 apresenta o mesmo resultado, considerando o tempo de 2 horas. Observa-se que a mancha de óleo aproxima-se da praia e tende a se deslocar para leste.

Figura 26: Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 2 horas após o início do derrame - abr/2010



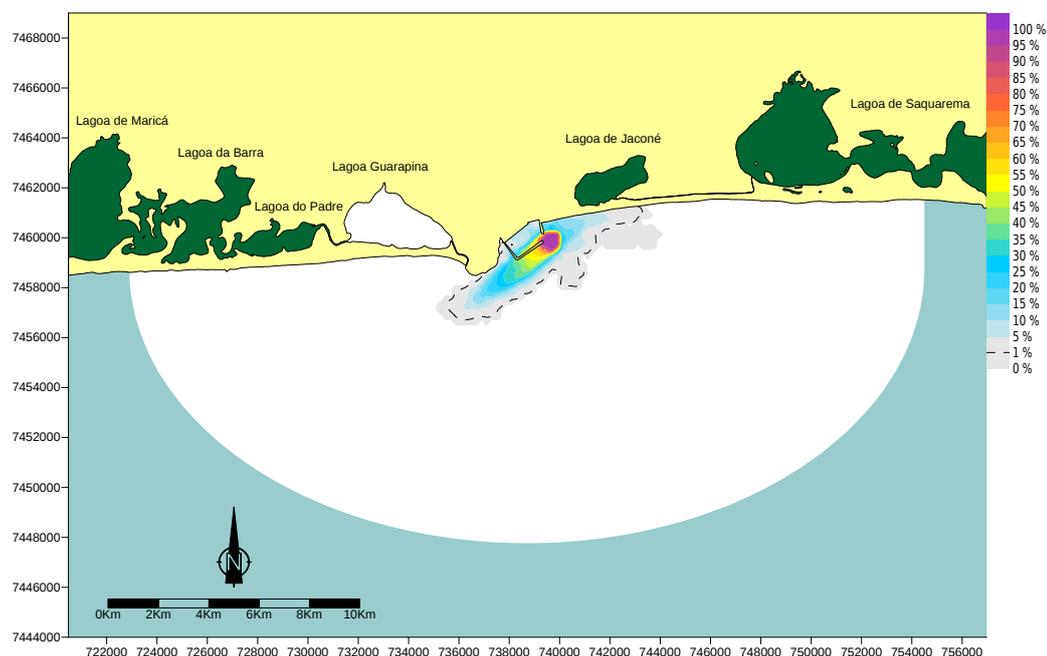
Para o tempo de 3 horas, a [Figura 27](#) mostra a mancha se espalhando, atingindo uma extensão maior da praia e mantendo a tendência de um maior deslocamento para leste.

Figura 27: Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 3 horas após o início do derrame - abr/2010



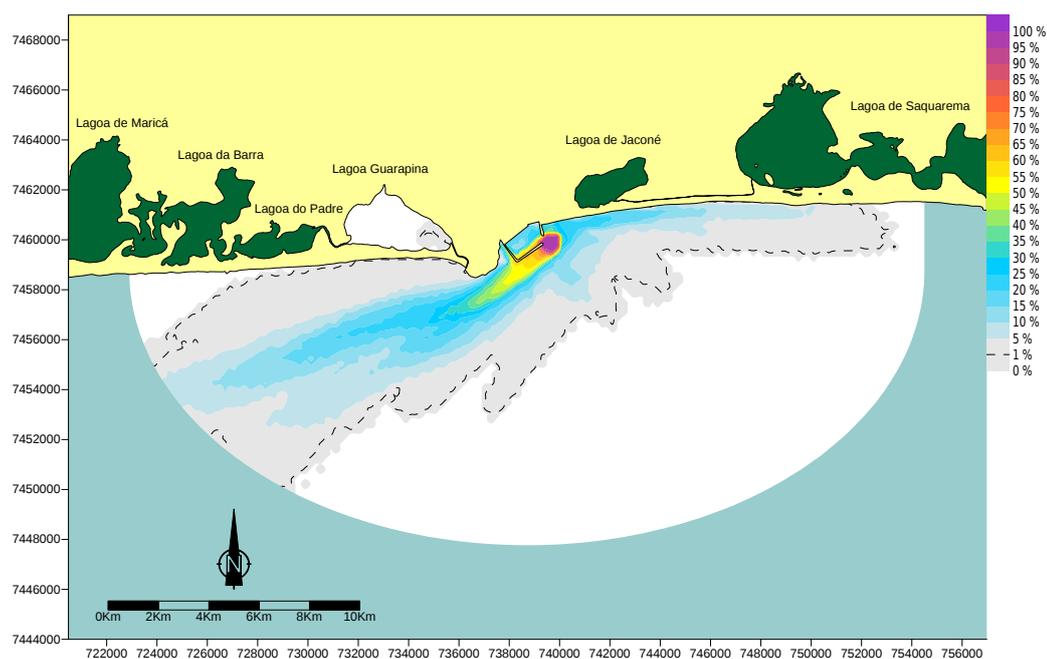
A [Figura 28](#) foi preparada considerando um tempo de vida de 6 horas. A mancha tende a se espalhar para leste, junto à praia, e pode atingir Ponta Negra.

Figura 28: Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 6 horas após o início do derrame - abr/2010



Após quase 24 horas, é praticamente impossível a contenção e o recolhimento do óleo, conforme pode ser visto na [Figura 29](#). Como sugerido anteriormente, esta figura confirma a possibilidade de que o óleo possa chegar à lagoa de Guarapina através do canal de ligação desta com o mar.

Figura 29: Probabilidade de passagem da mancha de óleo em menos de 24 horas após o início do derrame - abr/2010



## 7 RISCOS À SAÚDE DA POPULAÇÃO

Além dos prejuízos econômicos e ambientais decorrentes do derrame do óleo, que indiretamente podem vir a afetar a população, existe a possibilidade de que componentes do óleo alcancem a atmosfera pela evaporação do mesmo e cheguem até os habitantes causando danos. De acordo com Araújo (2008), os gases derivados do petróleo são conhecidos por causar danos à saúde.

“Dentre todas as substâncias presentes no petróleo e seus derivados, a fração benzeno, tolueno e xileno (BTX) é bastante volátil e toxicologicamente mais perigosa ao homem, com riscos conhecidos de carcinogênese” (ARAÚJO, 2008).

Desta forma, é necessária uma avaliação de quais áreas seriam atingidas pelos poluentes.

A partir da condição do óleo, mostrada na Figura 30, foram escolhidos 5 pontos na praia de Jaconé como pontos iniciais das trajetórias, conforme Figura 31.

Figura 30: Mancha de óleo às 12:00 GMT do dia 06/04/2010

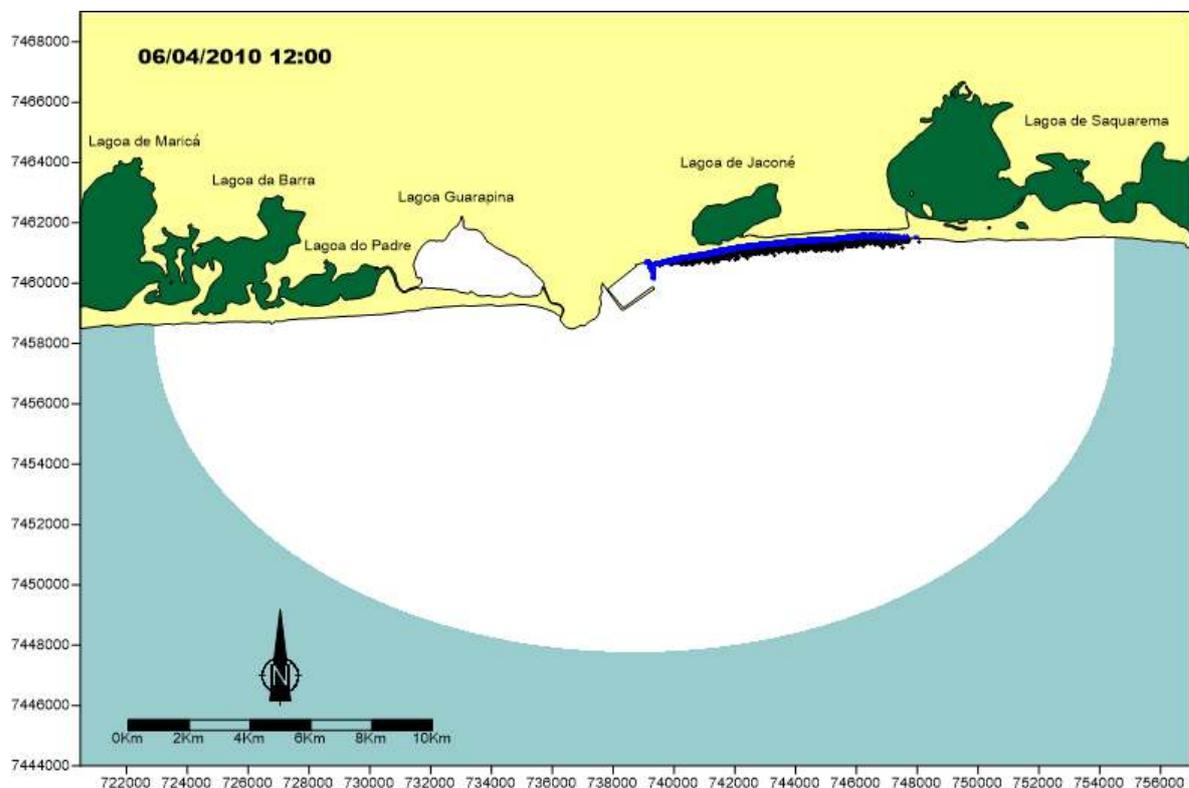
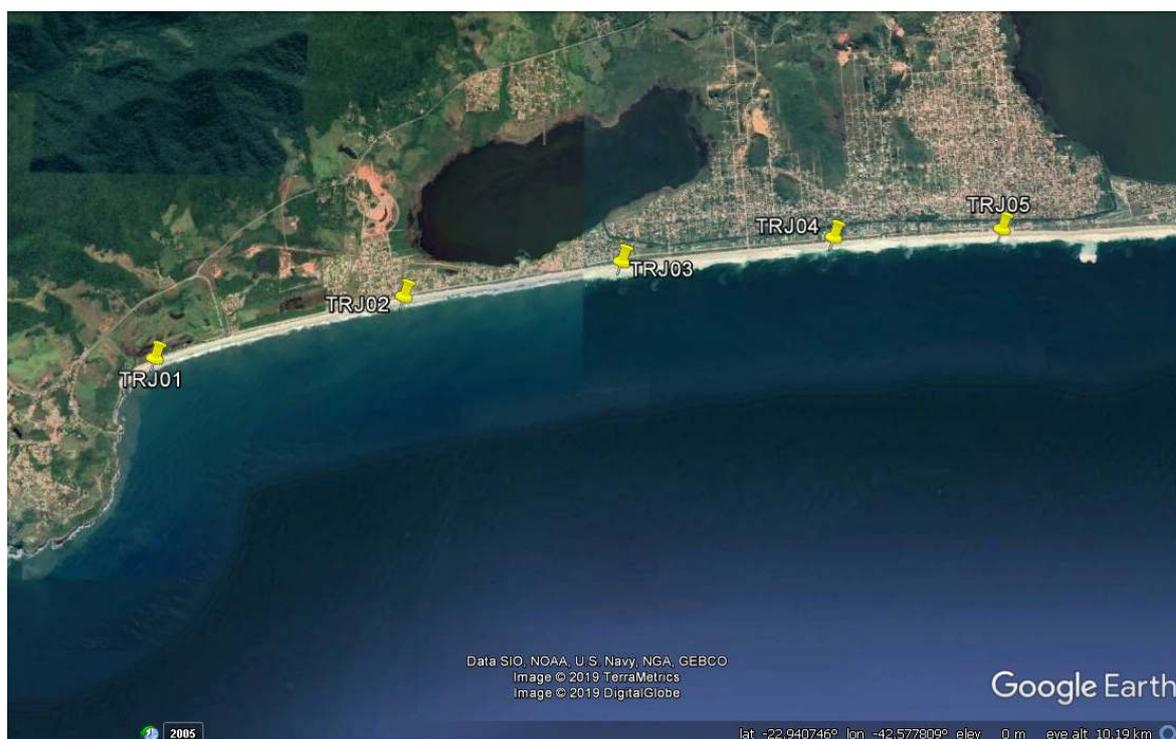
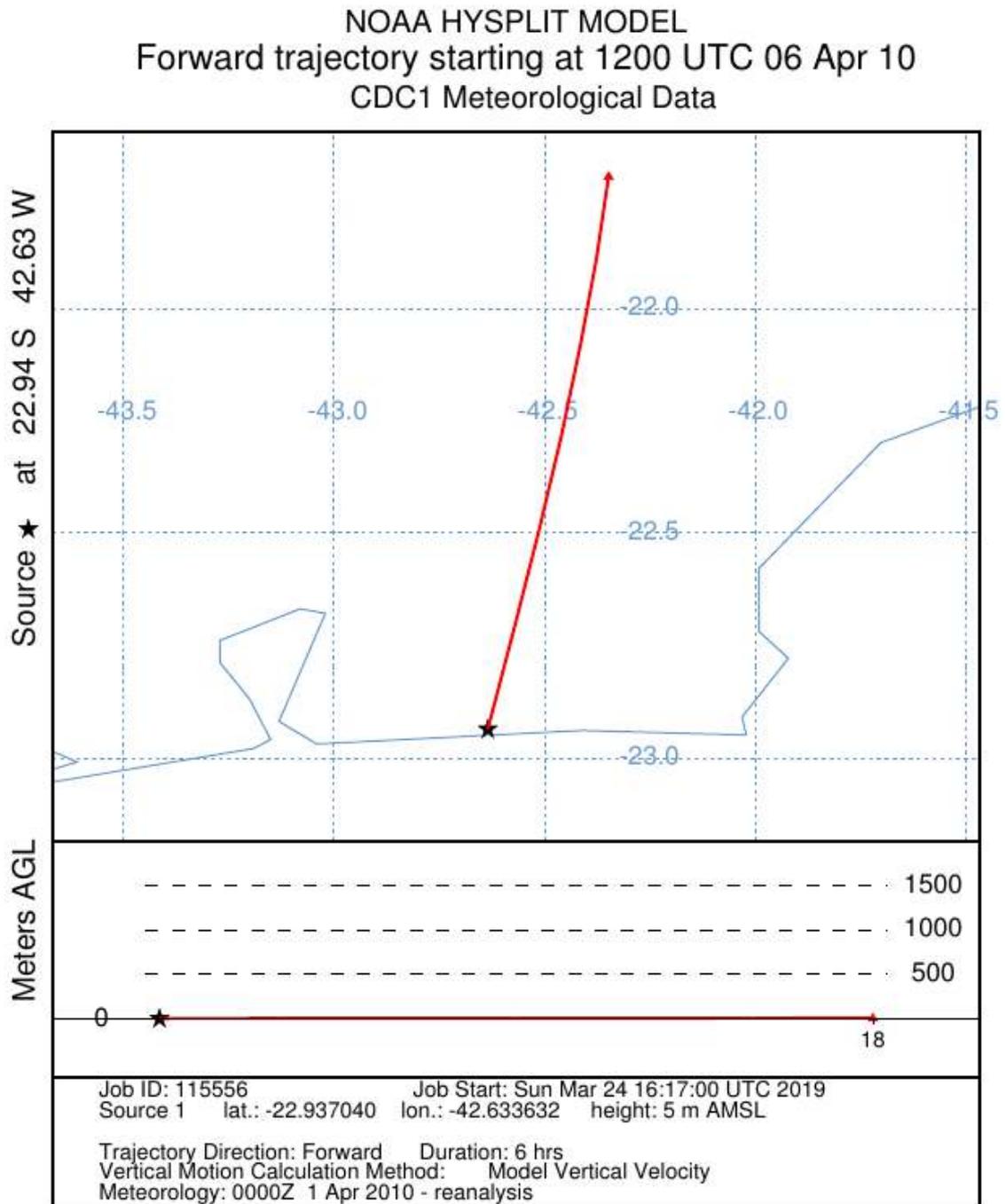


Figura 31: Pontos iniciais das trajetórias



A trajetória dos componentes evaporados no ponto TRJ03, calculada com o HYSPLIT, é mostrada na [Figura 32](#), calculada a partir das 12:00 GMT do dia 06/04/2010, com uma duração de 6h.

Figura 32: Trajetória com o HYSPLIT a partir do ponto TRJ03



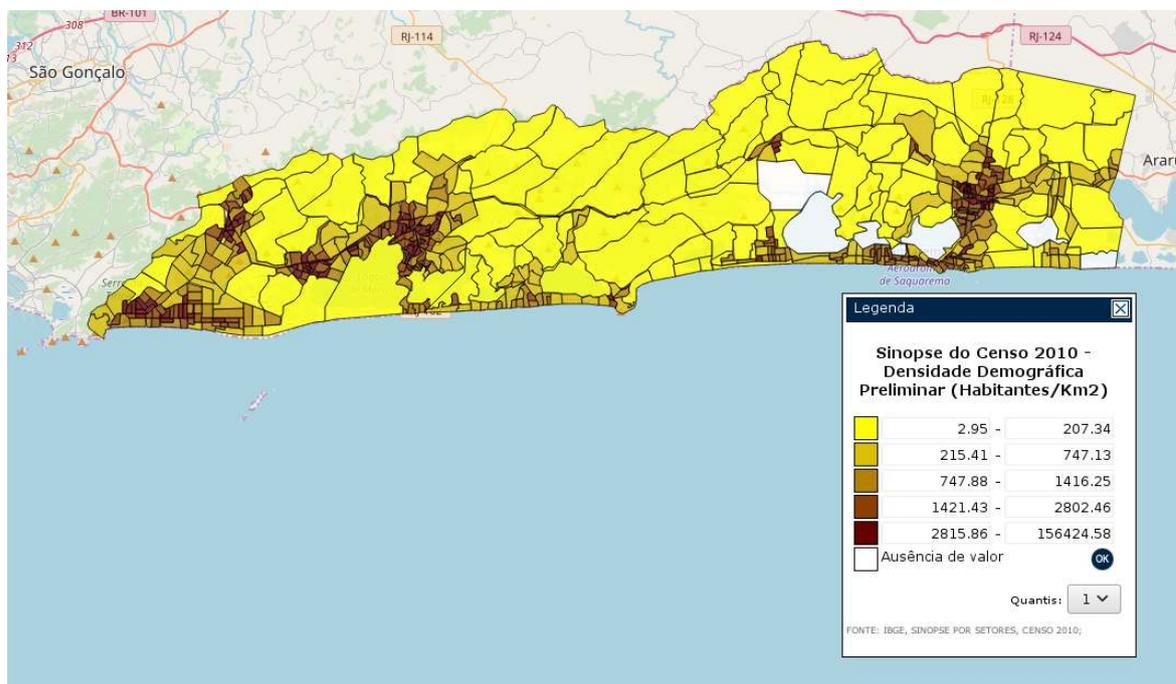
Após o cálculo de todas as trajetórias, foi montada a [Figura 33](#). Nela podemos observar a trajetória dos gases e as áreas habitadas próximas que serão atingidas.

Figura 33: Saída do Google Earth com as trajetórias geradas pelo HYSPLIT



Usando os dados do Censo 2010 do IBGE, Sinopse por Setores, disponível em <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>, temos a ideia do total da população atingida. O resultado da pesquisa ao site do IBGE é mostrado na Figura 34, onde podemos verificar que a área litorânea é a mais densamente povoada.

Figura 34: IBGE - Censo 2010 - Sinopse por Setores - Maricá e Saquarema



Fonte: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>>.

## 8 CONCLUSÃO

Com a possibilidade da instalação do TPN, a praia de Jaconé e o município de Maricá se tornaram motivo de preocupação das autoridades ambientais com a possibilidade de um acidente com derramamento de óleo no porto.

A fim de compreendermos a hidrodinâmica no litoral de Maricá e a dinâmica do transporte de óleo no mar, lançamos mão de ferramentas computacionais que simularam o deslocamento da mancha de óleo e produziram dados estatísticos para embasar ações de remediação do desastre, ou seja, contenção e recolhimento do óleo.

Os modelos Adios2 e SisBaHiA foram ferramentas fundamentais para a simulação de transporte de óleo, bem como, Surfer, Grapher, Qgis, NOAA Chart Reprojector etc. Outras ferramentas que merecem destaque também foram as que disponibilizaram as variáveis e/ou informações necessárias à execução do SisBaHiA®: Da reanálise ERA-Interim extraímos os dados de vento, o HYCOM forneceu-nos dados de corrente marinha, e as cartas náuticas publicadas em formato raster, pela DHN, foram usadas como base para o modelo digital de terreno etc.

O SisBaHiA®, através do seu modelo de transporte Lagrangeano, permitiu-nos visualizar a posição da mancha de óleo e seu deslocamento no tempo. Os experimentos mostraram que o óleo derramado atingirá a costa ou o sistema lagunar, através do canal de ligação da lagoa de Guarapina com o mar, caso não sejam tomadas medidas emergenciais para contenção do óleo. Dependendo das condições meteorológicas, o óleo alcançará a praia de Jaconé em poucas horas. Em condições normais de tempo, o óleo ultrapassará Ponta Negra. Neste ponto, caso entre um vento de sudoeste forte, a mancha será empurrada em direção ao canal e atingirá as lagoas, o que causará um desastre ambiental e econômico para os que dependem da lagoa para o seu sustento.

O filme gerado a partir dos instantâneos da mancha de óleo nos permite visualizar o movimento da mancha e quais seriam as áreas atingidas em caso de falhas na contenção do óleo. A partir da simulação de vários derrames em instantes diferentes, o SisBaHiA® permite a obtenção de probabilidade de passagem de mancha de óleo com um determinado tempo de vida. Esta informação é fundamental para o planejamento prévio de ações emergenciais. Uma possível sequência a este estudo seria a construção de um sistema que estivesse sempre preparado para ser executado, quase que em tempo real, para atender às questões das autoridades sobre que áreas seriam atingidas após um derrame, levando-se em consideração as condições de tempo local.

É importantíssimo que as ações de contenção e coleta do óleo derramado aconteçam no menor espaço de tempo possível, evitando o espalhamento do produto. Quanto maior

---

a superfície da mancha de óleo, maior a área de evaporação e maior a quantidade de produtos que alcançam o ar, podendo ser levados pelo vento até as populações. O contato das pessoas com tais vapores pode causar desde irritações nos olhos, pele e aparelho respiratório, até câncer, em caso de um contato mais prolongado.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO, V. E.; SOUZA, C. F.; CASTRO, A. F.; VITAL, H. Sistema de informações geográficas para o monitoramento de derrames de Óleo no litoral norte do estado do rio grande do norte. **Terceiro Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, 2005. Citado na página 2.

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na américa do sul. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Fortaleza: SBMET, 2004. v. 13. Citado na página 8.

ANP. **A Produção do Pré - Sal foi Recorde em Janeiro**. 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/noticias/anp-e-p/3608-producao-do-pre-sal-foi-recorde-em-janeiro>> (Acessado em: junho/2017). Citado na página 24.

ARAÚJO, A. E. O. d. **Avaliação da genotoxicidade dos gases derivados do petróleo em trabalhadores expostos ocupacionalmente em ambiente fechado**. Dissertação (Mestrado em Patologia Molecular) — Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Citado na página 53.

BÍCEGO, M. C.; SEYFFERT, B.; MARTINS, C.; FILLMANN, G. Poluição por petróleo. **Poluição Marinha**. Interciência Ltda., Rio de Janeiro, 2008. Citado na página 1.

BRASIL. **Comando da Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. Norma Técnica Ambiental para Elaboração de Laudo Técnico Ambiental**. 2007. Citado na página 8.

BULHÕES, E.; FERNANDEZ, G.; OLIVEIRA FILHO, S.; PEREIRA, T.; ROCHA, T. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o cabo frio e o cabo búzios, rio de janeiro, brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 2, 2014. Citado na página 41.

CAMARGO, R. de; HARARI, J.; BISCARO, T. S.; BIAZETO, B. Avaliação das Previsões de Maré Meteorológicas Realizadas com o Princeton Ocean Model no Laboratório MASTER/IAG/USP. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2002. Citado na página 7.

CAVALCANTI, I. F. A. Casos de intensa precipitação nas regiões sul e sudeste do brasil no período de inverno de 1979 a 1983. INPE, São José dos Campos, p. 47, 1985. Citado na página 8.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Climatology of south american cold fronts. In: **International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography**. Wellington, NZ: American Meteorological Society, 2003. v. 7. Citado na página 8.

CEPED/UFSC. **2000 – Derramamento de Óleo na Baía de Guanabara**. 2015. Disponível em: <<http://www.ceped.ufsc.br/2000-derramamento-de-oleo-na-baia-de-guanabara/>> (Acessado em: 09/11/2018). Citado na página 1.

- COPPE. **Manual do Usuário do SisBaHiA®**. 2017. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisBAHIA/A1Index.htm>> (Acessado em: 09/11/2018). Citado na página 27.
- DHN. **Cartas Raster**. 2017. Disponível em: <[http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\\_disponiveis.html](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html)> (Acessado em: junho/2017). Citado na página 21.
- DHN. **Catálogo de Cartas e Publicações**. 2019. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1974/catalogo-completo.pdf>> (Acessado em: janeiro/2019). Citado na página 25.
- DTA Engenharia. **Relatório de Impacto Ambiental – Terminais de Ponta Negra (RIMA – TPN)**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdi1/~edisp/inea0025126.pdf>> (Acessado em: 21/04/2017). Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- FEMAR - Fundação de Estudos do Mar. **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras - Copacabana - RJ**. 2017. Disponível em: <<https://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/rj/204.gif>> (Acessado em: junho/2017). Citado na página 22.
- FEMAR - Fundação de Estudos do Mar. **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras - Ponta Negra - RJ**. 2017. Disponível em: <<https://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/rj/184.gif>> (Acessado em: junho/2017). Citado na página 23.
- FERNANDES, R. M.; CAMPUZANO, F. J. M.; JULIANO, M.; BRAUNSCHWEIG, F.; NEVES, R. J. **Gestão de Emergências em Zonas Costeiras. VIII Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa**, 2013. Acessado em: 05/12/2017. Disponível em: <[http://www.aprh.pt/ZonasCosteiras2015/pdf/2B2\\_Artigo\\_118.pdf](http://www.aprh.pt/ZonasCosteiras2015/pdf/2B2_Artigo_118.pdf)>. Citado na página 1.
- GOMES, F.; LAURIA, D. **MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO SEDIMENTO DO SACO DE PIRAQUARA DE FORA, ANGRA DOS REIS – RJ**. Rio de Janeiro, 2015. 64 p. Citado na página 15.
- GURGEL, F. O. M. J. **Aplicações de Modelagem Hidrodinâmica para Ações de Resposta a Incidentes de Poluição por Derrame de Óleo: Estudo de Caso da Enseada dos Anjos em Arraial do Cabo-RJ**. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- HISTORY.COM EDITORS. **Exxon Valdez Oil Spill**. 2018. Disponível em: <<https://www.history.com/topics/1980s/exxon-valdez-oil-spill>> (Acessado em: 09/11/2018). Citado na página 1.
- JUSTI SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Foz do Iguaçu: INPE, 2002. Citado na página 8.
- KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140–1153, 1979. Citado na página 8.

- KOUSKY, V. E.; FERREIRA, J. Frontal influences on northeast Brazil: Their spatial distributions, origins and effects. **Monthly Weather Review**, v. 109, p. 1999–2008, 1981. Citado na página 8.
- LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. **Climanálise Especial - Edição comemorativa de 10 anos**, v. 10, 1996. Citado na página 8.
- LINS DE BARROS, F. M.; ZEIDAN, F.; LIMA, R. d. F. Adaptações e Percepções da População a Eventos de Ressaca do Mar no Litoral de Maricá, Rio de Janeiro, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, sciELOpt, v. 16, p. 147–161, Jun 2016. ISSN 1646-8872. Disponível em: <[http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1646-88722016000200003&nrm=iso](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1646-88722016000200003&nrm=iso)>. Citado na página 3.
- LOUGHLIN, T. **Marine Mammals and the Exxon Valdez**. Elsevier Science, 2013. ISBN 9781483288819. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0EzgBAAAQBAJ>>. Citado na página 1.
- MELO FILHO, E. **Maré Meteorológica na Costa Brasileira**. 328 p. Tese (Professor Titular) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2017. Citado na página 7.
- MORAES, M. V. A. Morfologia e sedimentologia da plataforma continental interna do município de acaraú-ceará-brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 1, n. 1, p. 01–21, 2015. Citado na página 11.
- MUEHE, D.; VALENTINI, E. **O litoral do Estado do Rio de Janeiro: Uma Caracterização Físico-Ambiental**. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar Rio de Janeiro, 1998. Citado na página 3.
- NOAA. **ADIOS – Office of Response and Restoration**. 2009. Disponível em: <<https://response.restoration.noaa.gov/adios>> (Acessado em: 21/04/2017). Citado 2 vezes nas páginas 9 e 16.
- NOAA. **NOAA Chart Reprojector**. 2017. Disponível em: <<http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast/tools/chartreprojector>> (Acessado em: junho/2017). Citado na página 25.
- O Saquá. **Jornal de Saquarema**. 2013. Disponível em: <<http://www.osaquacom.br/2013/12/19/obras-no-porto-de-marica-podem-comecar-em-2014/>> (Acessado em: 21/04/2017). Citado na página 5.
- OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul ea convecção da Amazônia**. Tese (Doutorado) — INPE, 1986. Citado na página 8.
- OLIVEIRA, J. L. F. de. **Análise espacial e modelagem atmosférica: contribuições ao gerenciamento da qualidade do ar da bacia aérea III da região metropolitana do Rio de Janeiro**. 144 p. Tese (Doutorado) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. Citado na página 10.
- OLIVEIRA, M. M. F. de. **Redes neurais artificiais na predição da maré meteorológica em Paranaguá-PR**. 2004. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. Citado na página 6.

PEREIRA, R. C.; SOARES-GOMES, A. *Biologia marinha*. Rio de Janeiro: **Interciência**, v. 1, 2002. Citado na página 1.

PIATT, J. F.; LENSINK, C. J.; BUTLER, W.; KENDZIOREK, M.; NYSEWANDER, D. R. Immediate impact of the 'exxon valdez' oil spill on marine birds. **The Auk**, American Ornithological Society, v. 107, n. 2, p. 387–397, 1990. ISSN 00048038, 19384254. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/4087623>>. Citado na página 1.

ROSMAN, P. C. C. **Documento de Referência Técnica do SisBaHiA®**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V9b\\_.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9b_.pdf)> (Acessado em: Abril/2017). Citado 3 vezes nas páginas 2, 13 e 17.

ROSMAN, P. C. C. **Um Critério para Uniformizar os Limites de Apresentação de Resultados de Modelos de Derrame de Óleo**. Rio de Janeiro: PENO - Programa de Engenharia Costeira e Oceanográfica, 2000. Citado na página 38.

ROSMAN, P. C. C. **Documento de Referência Técnica do SisBaHiA®**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V9d\\_.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9d_.pdf)> (Acessado em: Dezembro/2018). Citado 2 vezes nas páginas 14 e 30.

ROSMAN, P. C. C. **Material disponibilizado na disciplina Modelagem Ambiental Aplicada I**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

SANTOS, J. P. M. J.; PINHO, J. L. S. Estudo das correntes oceânicas na região envolvente da ilha terceira no arquipélago dos açores. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil (DEC), 2005. Citado na página 11.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; DIAS, P. L. S. South america. In: **Meteorology of the southern hemisphere**. Boston, MA: Springer, 1998. p. 119–139. Citado na página 8.

SELUCHI, M.; SERAFINI, Y.; TREUT, H. L. The impact of the andes on transient atmospheric systems: A comparison between observations and gcm results. **Monthly weather review**, v. 126, n. 4, p. 895–912, 1998. Citado na página 8.

SIQUEIRA, L. F. G. **Sobre a Eficiência de Operações de Recolhimento de Derramamentos de Óleo com e sem Técnica de Decantação**. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Citado na página 9.

STEIN, A.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J.; COHEN, M.; NGAN, F. Noaa's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. 2059–2077, 2015. Citado na página 16.

TAYLOR, A. **The Exxon Valdez Oil Spill: 25 Years Ago Today**. 2014. Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/photo/2014/03/the-exxon-valdez-oil-spill-25-years-ago-today/100703/>> (Acessado em: 20/04/2017). Citado na página 1.