



Felipe Otavio Melo Jácome Gurgel

**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**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental.

Orientador: Prof. Antônio Roberto Martins Barboza de Oliveira
Co-orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro
Outubro de 2016



Felipe Otavio Melo Jácome Gurgel

**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**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Antônio Roberto Martins Barboza de Oliveira

Presidente / Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Paulo César Colonna Rosman

Co-orientador
UFRJ

Prof. Rogério Neder Candella

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

Thais Cristina Campos de Abreu

PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de outubro de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Felipe Otavio Melo Jácome Gurgel

Bacharel em Ciências Navais pela Escola Naval em 2000.

Ficha Catalográfica

Gurgel, Felipe Otavio Melo Jácome

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 / Felipe Otavio Melo Jácome Gurgel ; orientador: Antônio Roberto Martins Barboza de Oliveira; Co-orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman . – 2016.

167 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental – Teses. 3. Modelo hidrodinâmico. 4. Modelo lagrangeano. 5. Derrame de óleo. 6. SisBa-HiA. 7. Planos de contingência. I. Oliveira, Antônio Roberto Martins Barboza de, Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CDD: 624

À minha família, em especial, minha esposa Fabíola, meus filhos Ian e João Felipe, minha enteada Clara e meus pais Francisco e Ivonete exemplos de força e valores humanos.

Agradecimentos

Inicialmente a Deus, por tudo que me concedeu ao longo da vida.

Ao professor Antônio Roberto pela orientação e incentivo para realização deste trabalho.

Ao professor Paulo Cesar Colonna Rosman, pela espontaneidade em ter me aceitado no Programa de Engenharia Oceânica da COPPE, além da disponibilidade e orientação precisa na elaboração desse trabalho.

Aos Almirantes Oscar Moreira da Silva Filho e Marcos Augusto de Almeida por terem acreditado em mim, possibilitando a realização deste estudo.

Ao Comandante Canabarro pela motivação emanada na realização deste trabalho e entusiasmo nos assuntos referentes às pesquisas oceanográficas.

Aos professores do Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental, que muito contribuíram na minha formação profissional.

Aos meus pais Francisco e Ivonete Gurgel pelo apoio, incentivo e amor incondicional.

A minha esposa Fabíola pelo carinho, amor e compreensão na minha ausência.

A todos do IEAPM que me ajudaram nessa empreitada, em especial aos Comandantes Bentes (*in memoriam*), Xavier, Sandro, Hugo Chaves, Marin, Dr. Rogério Candella, Tenentes Yaci, Dos Santos, Natália, Laura e Caroline Guerra.

A todos os meus colegas e amigos do curso de mestrado da PUC, pelos trabalhos em conjunto, pela discussão construtiva e pela troca de experiências.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Costeira, em especial ao Anton, Tahoan, Rodrigo, Isabela, Marise, Mônica e Cristina pelo acolhimento, apoio e ajuda incomensurável na COPPE/UFRJ.

Ainda desejo expressar meus mais sinceros agradecimentos, pela compreensão, amizade e apoio recebido de todos que, voluntária ou involuntariamente, participaram no desenvolvimento desse trabalho.

Resumo

Gurgel, Felipe Otavio Melo Jácome; Oliveira, Antônio Roberto Martins Barboza (Orientador); Rosman, Paulo Cesar Colonna (Co-orientador). **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.** Rio de Janeiro, 2016. 167p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação versa sobre a necessidade de estabelecer estratégias de prevenção e gestão dos impactos ambientais provenientes do derramamento de derivados de petróleo nas enseadas do município de Arraial do Cabo. Ressalta-se que a cidade está incrustada em uma Reserva Extrativista Marinha e com grande parte de sua população, direta ou indiretamente, ligada economicamente às atividades marinhas. Para desenvolver este trabalho, foi utilizado o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, o SisBaHiA®. Utilizando-se do referido sistema, foi confeccionado um modelo digital de terreno, em seguida gerou-se um modelo de circulação hidrodinâmica na região de estudo e, por fim, um de transporte de contaminantes que, acoplado ao anterior, identifica as potenciais zonas de contaminação e à deriva da mancha de óleo no caso de um derrame. Em sequência, foram avaliados os danos decorrentes do vazamento e propostas para ações de mitigação.

Palavras-chave

Modelo Hidrodinâmico; Modelo Lagrangeano; Derrame de Óleo; SisBaHiA; Planos de Contingência.

Extended abstract

Gurgel, Felipe Otavio Melo Jácome; Oliveira, Antônio Roberto Martins Barboza (Advisor); Rosman, Paulo Cesar Colonna (Co-advisor). **APPLICATIONS OF HYDRODYNAMICS MODELING FOR RESPONSE ACTIONS TO OIL SPILL POLLUTION INCIDENTS : CASE STUDY OF ENSEADA DOS ANJOS, ARRAIAL DO CABO-RJ.** Rio de Janeiro, 2016. 167p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In recent years, several initiatives aimed at the conservation and preservation of a balanced environment increased significantly with laws applying penal and administrative sanctions derived from conduct prejudicial to the environment.

Arraial do Cabo, RJ, Brazil, is the city chosen to be the study area of an economy focused on port activities, fishing and tourism, with paradisiacal beaches with incommensurable beauty scenic.

According to Brazilian law, port facilities must have plans for oil spill incidents in waters under national jurisdiction, which is a document containing specific information and describes response procedures regarding an incident.

The Institute of Marine Studies Admiral Paulo Moreira (IEAPM), also located in Arraial do Cabo, has become a military organization potentially polluting with their ships and vessels applied in research.

In order to establish strategies for prevention and coordination of response actions in the management of environmental impacts in IEAPM, as well as, the upgrade of the institute Individual Emergency Plan (PEI), this study seeks, through computer modelling tools, verify the possibilities of drift from oil spill in the harbour of Arraial do Cabo.

The work has as main objective to evaluate the results of a plume of contaminants formed by oil spill scenarios through an environmental modelling system to assist Executive Commander in response actions in Arraial do Cabo harbour.

Specific objectives of this study are the ones described as follows:

- to validate the hydrodynamic model to the data provided by an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) installed in the region;

- describe the pattern of hydrodynamic local circulation;
- to evaluate the results and establish prevention and management strategies of the impacts from an oil spill;
- to show the potential contamination zone, considering the currents generated by tidal with typical local winds.

The need of application of hydrodynamics models for studies, projects and assistance to the management of water resources is unquestionable, given the complexity of the environment in natural bodies of water, especially in lakes, reservoirs, estuaries and adjacent coastal watersheds.

The numerical results of such a reproduction - or hindcasting - must be compared with measurements. If a close correlation demonstrates the validity of the theory, this hydrodynamic-numerical method may finally be used to forecast the dynamic process of the sea, thus finding its practical application (RAMMING, KOWALIK, 1980).

This study presents the implementation of a hydrodynamic model and transport of contaminants to analyse the risks from an oil spill in Arraial do Cabo harbor.

Initially, the digital terrain model was produced using data from the mesh discretization, bathymetry, equivalent roughness and the land and sea boundaries (chapter 5).

The hydrodynamic model was forced by wind and tide data as boundary condition and then the calibration was performed. The model was validated through current and temperature Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) data, moored in the period of July 08 to September 09 of 1999 (chapter 6).

The Lagrangian dispersion model consists of the boundary condition, the type of oil, spill volume, the leakage scenarios based on local winds and the definition of the initial area of the stain (based on Fay models). Oil weight loss is simulated by using the computer program ADIOS2 from NOAA (chapter 7).

In the preparation of models, we used the Data-base Environmental Hydrodynamics System (SisBaHiA®), which is a professional system of computer models that are in continuous development in the Institute Luiz Coimbra of Studies and Research of Engineering from the Federal University of Rio de Janeiro (COPPE / UFRJ).

In this work, we utilized the 9aS13G12 version (64-bit). Among the existing models of the system we use the hydrodynamic model, and transport model Lagrangean advective difusive.

The SisBaHiA® has a hydrodynamic model of 3D FIST lineage (Filtered in Space and Time 3D), optimized for natural water bodies.

3D FIST lineage represents system modelling bodies of water free surface composed of a series of hydrodynamic models in which the modelling of turbulence is based on filtering techniques similar to those employed in simulation of large vortices (LES - Large Eddy Simulation).

3D FIST version solves the complete Navier-Stokes with the approach for shallow water.

In the Lagrangean model, the transport of contaminant mass is simulated through particle motion launched, that are carried by current generated by hydrodynamic model, dedicated to observe the path of the particle, as opposed to observation of the movement as a whole.

The Lagrangean model is ideal to simulate the transport of scalars that may be floating, mixed or occupying only one layer in the water column, making it more suitable for simulating the transport of oil or contaminant plume which are small in relation to the domain of the hydrodynamic model or that have strong gradients (ROSMAN, 2015).

In this work, we have obtained some conclusions that follow down.

Tests conducted with intention to validate the computational model showed good relation between the results obtained with the model and the data from the ADCP (figures 32, 33 and 34).

Significant correlation between tide and currents, both Zonal component (U) and the Meridional component (V), was very clear (figures 26 and 27).

The hydrodynamic circulation pattern in the study area has significant influence of mesoscale wind which is the generator of the external current being modulated by the tide, i.e. the currents of intense mesoscale governing direction of movement. In situations where external dynamics is weak, the dominant currents are generated by the tide (figure 37 to 47).

The current regime in ADCP anchoring site, near the Boqueirão Sul, shows the existence of two main directions, NE and SW, with a predominance to

SW flow. The NE currents are less frequent, but more intense, usually associated with the pass of cold fronts (figure 35).

The occurrence of upwelling phenomenon in the studied period induced by intense winds quadrant NE (figure 15), with temperatures ranging between 13 and 18 °C, was observed.

It has been identified that the action of NE quadrant winds cause a lowering of the Mean Sea Level (MSL) and the action of the SW quadrant winds cause the water stacking along the coast and, consequently, the lifting of MSL (figures 36, 40 and 44).

The spill simulations demonstrated by the probabilistic model showed that there is a big possibility of oil slick drifting and affecting the whole Anjos Bay; with a less possibility (maximum 20%) to pass in Ponta d'Água, Forno Bay and Porcos Island. Another portion of oil is drifting to NE (maximum 15%); with a reduced chance (5%), the slick would head to Boqueirão Sul reaching the Cabo Frio Island (figures 52 to 55).

Probabilistic model fits well to the wind patterns in the wintertime provided by weather station in IEAPM, in percentage terms. SW quadrant winds have a frequency of approximately 20% in weather station (figure 18). This similar value demonstrated in the model, shows that, due to the current in Angels Bay being less intense, the circulation is predominantly generated by the wind. It has a fundamental importance in the oil spill (Figure 55).

The main consequences of the spill in the Arraial do Cabo harbour (EAC), with respect to socio-economic activities, may result in disruption of port activities, local fishing activities, tourist rides for sightseeing and diving activities. The temporary cancellation of such activities involves serious losses to the local economy.

Regarding environmental impacts, an accident would cause undesirable effects on four compartments, namely: beaches, rocky shores, water column and benthic environment.

Keywords

Hydrodynamics Modeling; Response Actions; SisBaHiA; Arraial do Cabo.

Sumário

1	Introdução	24
1.1	Justificativa	25
1.2	Objetivos	26
1.3	Metodologia	27
1.4	Estrutura do Trabalho	27
2	Revisão Bibliográfica	29
2.1	Convenções Internacionais	29
2.2	Legislação Brasileira	31
2.3	O Óleo e sua Interação com o Mar	36
2.4	Principais Consequências dos Derrames de Óleo	38
2.4.1	Impacto do Óleo em Habitats Marinhos	38
2.4.1.1	Plâncton	38
2.4.1.2	Bentos	39
2.4.1.3	Aves Costeiras	39
2.4.1.4	Peixes e mamíferos	40
2.4.2	Impacto do Óleo em Atividades Socioeconômicas	40
2.5	Cartas de Sensibilidade ao Óleo	41
2.6	A Modelagem como Ferramenta de Auxílio na Gestão Ambiental	43
3	Região de Estudo e Características Gerais	46
3.1	A cidade de Arraial do Cabo	46
3.1.1	Histórico	47
3.1.2	Aspectos Sócioeconômicos	49
3.2	O IEAPM	50
3.3	RESEXMAR-AC	52
3.4	Caracterização Ambiental	53
3.4.1	A Ressurgência	53
3.4.2	Clima	55
3.4.3	Maré	56
3.4.4	Ventos	57
3.4.5	Ondas	63

4	Sistema de Modelagem Computacional	65
4.1	Modelo Hidrodinâmico	66
4.2	Modelo de Transporte Lagrangeano	72
5	Modelagem Digital do Terreno	75
5.1	Contornos de terra e de mar	76
5.1.1	Contorno de Terra	76
5.1.2	Contorno do Mar	76
5.2	Malha de Discretização	77
5.3	Dados Batimétricos	78
5.4	Rugosidade Equivalente de Fundo	81
5.4.1	Dados Locais	82
6	Modelo Hidrodinâmico	85
6.1	Dados de Maré	85
6.2	Dados de Vento	88
6.3	Calibração	93
6.3.1	Aplicação de Perfiladores Acústicos	93
6.3.2	Processo de Calibração	94
6.4	Cenário com Situação de Frente Fria	99
6.5	Cenário com Ausência de Dinâmicas Externas	106
6.6	Cenário com Ventos Típicos	112
7	Modelo Lagrangeno	119
7.1	Condições de Contorno para o Modelo Lagrangeano	119
7.2	Curvas de Decaimento do Óleo	120
7.3	Hipóteses de Acidentes	124
7.4	Resultados	127
7.4.1	Modelo Probabilístico	128
7.4.2	Cenário com Situação de Frente Fria	134
7.4.3	Cenário com Ausência de Dinâmicas Externas	136
7.4.4	Cenário com Ventos Típicos	140
7.5	Medidas Mitigadoras	143
7.6	Consequências do Derramamento de Óleo nas Enseadas do Arraial do Cabo	146

8	Conclusões	151
9	Trabalhos Futuros	153
10	Referências bibliográficas	154
	Anexo	164

Lista de Figuras

- Figura 1: O número médio de grandes derramamentos de petróleo (>700 toneladas) reduziu bastante de 1970 até 2010. Esta redução se deve aos esforços combinados dos governos, dos grandes armadores transportadores de óleo e da IMO que criaram regras de segurança para melhorar prevenir a poluição marinha. A quantidade total de óleo derramado tem-se reduzido consideravelmente a cada ano (adaptado,ITOPF,2012) 31
- Figura 2: Navio da Marinha do Brasil em atividade de patrulha nas proximidades de uma plataforma de petróleo. Fonte: Marinha do Brasil 34
- Figura 3: Navio da Marinha do Brasil fazendo acompanhamento e avaliação do desastre de Mariana ocorrido no último ano. Fonte: UOL Brasil 35
- Figura 4: O navio de Pesquisa Hidroceanográfico “Vital de Oliveira” apoiando a coleta e análise das amostras de água e solo marinho, no entorno da foz do Rio Doce após o desastre de Mariana. Fonte: Fred Loureiro 36
- Figura 5: O óleo quando derramado no mar, se espalha e se move sobre a superfície, sendo assim submetido a vários processos que provocam mudanças químicas e físicas, coletivamente conhecidas como “intemperismo”, acima representados (adaptado de ITOPF, 2012) 37
- Figura 6: Código de cores a ser utilizado para representação do ISL nas cartas de sensibilidade. Este índice hierarquiza os diversos tipos de contorno da costa em uma escala de 1 a 10, sendo o índice tanto maior quanto maior o grau de sensibilidade (BRASIL, 2007) 43
- Figura 7: Visão geral da região de estudo. Google Earth (2014) 46
- Figura 8: Visão mais detalhada da área de estudo, enseadas do Arraial do Cabo e a Ilha do Cabo Frio e dos Porcos. Google Earth (2014) 47
- Figura 9: A) Restos arqueológicos encontrados na Ilha do Cabo Frio. B) Artefatos e ferramentas arqueológicas encontradas no sambaqui da mesma ilha. Fonte: Arquivo do IEAPM 48
- Figura 10: A) Marco histórico da chegada de Américo Vespúcio em 1503 na antiga praia da Rama atualmente conhecida como Praia dos Anjos. Fonte: Rio de Janeiro Aqui (2016). B) Igreja Nossa Senhora dos Remédios construída em 1506. Ao longo do tempo sofreu diversas modificações. Fonte: Arraial do Cabo (2016) 49
- Figura 11: Visão aérea do IEAPM. Fonte: Google Earth (2016) 51
- Figura 12: A parte hachurada da figura representa a área de responsabilidade da RESEXMAR-AC. Fonte: ICMBIO (2015) 53

- Figura 13: Imagem satelital de TSM (MODIS-Aqua) evidenciando a ressurgência costeira de Cabo Frio. As cores azuladas representam a pluma de águas frias promovida pela ressurgência. Fonte: CODATO (2015) 54
- Figura 14: Gráfico de dados da temperatura do mar de 19/07/1999 a 02/09/1999 obtidos do sensor térmico do ADCP fundeado a 23m do estudo de Branco (2000). O sensor térmico está no equipamento nessa mesma profundidade. Pelo gráfico podemos observar períodos de ocorrência da ressurgência que tem por característica temperaturas menores que 18 °C (SVERDRUP, 1946 *apud* COMAP, 2009) 55
- Figura 15: Predominância dos Ventos para o período de 2006 a 2014. Fonte: INMET, 2016) 58
- Figura 16: Distribuição de Frequência de Classe para o mesmo período (INMET, 2016) 59
- Figura 17: Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação do verão no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016) 60
- Figura 18 Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação do outono no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016) 61
- Figura 19 Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação do inverno no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016) 62
- Figura 20: Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação da primavera no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016) 63
- Figura 21: Esquema de coordenadas para os modelos 3D e 2DH, onde NR é o Nível de Referência. No caso 2DH, \bar{u}_i representa a velocidade promediada na vertical. A profundidade instantânea $H = z_{sup} - z_{fundo} = \zeta + h$, também é chamada de altura da coluna de água. (ROSMAN, 2014) 68
- Figura 22: Localização dos principais pontos de referência usados no presente trabalho 75
- Figura 23: Domínio modelado na EAC, indicando a malha de discretização em elementos finitos quadrangulares biquadráticos com linhas internas interligando os nós dos elementos 78
- Figura 24: Carta 1503, Enseadas do Cabo Frio. Escala 1:20.000. Fonte: DHN - Marinha do Brasil 79
- Figura 25: Batimetria da região de estudo interpolada por triangulação linear a partir dos dados da carta náutica nº 1503 da DHN através do programa computacional *Surfer 12* 80
- Figura 26: Distribuição do material de fundo na Enseada dos Anjos apresentando uma região entre o centro e o flanco norte da praia com areia lamosa. Uma região com areia cascalhosa entre a parte sul do

mole do porto do Forno e a costa sul da enseada. Demais áreas predominantemente compostas de areia fina (SAVI, 2002)	83
Figura 27: Distribuição da amplitude da rugosidade equivalente do fundo considerada nas simulações do modelo. Variando entre 0.001 m (areia lamosa) e 0.120 (cascalho)	84
Figura 28: Marégrafo do Porto do Forno. Arquivo IEAPM	86
Figura 29: Relação entre as médias móveis da maré e da componente zonal (U) providas pelo ADCP	87
Figura 30: Relação das médias móveis da maré e da componente meridional (V) providas pelo ADCP	87
Figura 31: Razão entre as intensidades de vento mar/terra para um nível de 10 metros (CEM, 2008)	89
Figura 32: Direção e intensidade do vento para o mês de julho de 1999. Fonte: Marinha do Brasil - BAENSPA	90
Figura 33: Direção e intensidade do vento para o mês de agosto de 1999. Percebe-se ventos mais fortes no período da tarde e ventos com menor intensidade no período da manhã. Fonte: Marinha do Brasil - BAENSPA	91
Figura 34: Direção e intensidade do vento para o mês de setembro de 1999. Fonte: Marinha do Brasil - BAENSPA	92
Figura 35: Posição do fundeio do ADCP, latitude de 22° 59.861' S e longitude de 42° 00.664 W, profundidade 23 metros. (BRANCO, 2000). Imagem: Google Earth (2015)	93
Figura 36: Processo de calibração para cálculo do desnível da superfície livre, simulando a existência de um canal escoamento permanente e uniforme no Boqueirão Sul	95
Figura 37: Curva de maré entre os dias de 19 de julho e 02 de setembro de 1999 fornecida pela Estação da Enseada dos Anjos (Porto do Forno) do IEAPM em comparação com a elevação da superfície livre modelada. Percebe-se uma boa concordância entre os dados de campo e modelados.	96
Figura 38: Comparação U2DH Medido x Modelado	97
Figura 39: Comparação V2DH Medido x Modelado	97
Figura 40: Gráfico de Dispersão (Elipse da Corrente). A direção dominante calculada pelo modelo se ajusta bem aos dados de campo medidos onde as magnitudes das correntes possuem uma dispersão maior	99
Figura 41: Elevação da superfície livre para o instante $t = 2.350.800$ s, 15/08/99, às 05:30h. Maré de sizígia. Observa-se na parte SW do Boqueirão Sul elevação de 1.715m, reduzindo para 1.30 no centro do estreito. Volta a elevar atingindo cerca de 1.40m por todo domínio	102
Figura 42: Visão geral da circulação da área modelada através do campo de correntes. É notório maiores magnitudes nos valores das correntes nas proximidades do Boqueirão Sul. Em destaque, na cor	

vermelha, a região que será representada com maiores detalhes, para uma fácil visualização nas próximas figuras (39 e 40) em situação de frente fria 103

Figura 43: A figura 39A apresenta uma situação de preamar de sizígia. Corrente na direção NE e um pequeno vórtice entre a Praia do Farol e o Boqueirão Sul. Velocidades, obtidas com o modelo 2DH, de até 4,16 m/s no estreito e de 1,22 m/s na área de fundeio do ADCP. A figura com a direção da corrente semelhante com a 39B, em uma meia maré de vazante de sizígia, com velocidades de 3,69 e 0,99 m/s respectivamente 104

Figura 44 A e B: A figura 40A apresenta uma situação de baixamar de sizígia. A corrente permanece no sentido NE. Velocidades de até 3,02 m/s no estreito e de 1,07 m/s na área de fundeio do ADCP. A figura 40B, nas proximidades de uma meia maré de enchente de sizígia, com velocidades de 3,72 e 1,14 m/s respectivamente. Ambas figuras apresentam situações semelhantes com a figura 39 105

Figura 45: Elevação da superfície livre para o instante $t = 1.405.800$ s, 04/08/99, às 07:00h. Preamar de sizígia. Observa-se nos extremos do mapa valores menores para a elevação, em torno de 0,946 m. O local com a maior elevação é a na Enseada dos Anjos ~ 0,953 m. A parte interna das EAC apresentam valores intermediários 108

Figura 46: Visão geral do campo de correntes, para uma situação em que a maré é sua principal forçante. Apresenta magnitudes de correntes, no geral, bem inferiores ao cenário anterior (ventos de SW). A área em destaque, na cor vermelha, é da mesma região do exemplo progresso, onde as figuras 42 e 43 apresentarão a dinâmica local com mais detalhes 109

Figura 47 A e B: Na figura superior, a água entra pelo estreito, todavia, com velocidades bem inferiores ao exemplo passado. Magnitude máxima de 0,20 m/s no Boqueirão e 0,10 m/s na posição do ADCP. Também apresenta um pequeno vórtice com a corrente na direção NE. Situação de proximidades da preamar de quadratura. Na figura 43B, a corrente inverte de direção. Velocidades de 0,07 e 0,02m, respectivamente. Baixa-mar de quadratura. Amplitude de maré de 54 cm (tabela 6) 110

Figura 48 A e B: Campos de correntes bem semelhante às duas figuras anteriores. Nota-se uma desigualdade significativa entre elas, característica da maré semi-diurna com desigualdades diurnas (MIGUENS, 1996). As velocidades das correntes na posição do ADCP foram de 0,5 e 0,3 m/s, respectivamente. Amplitude de maré de 35 cm, 19 cm inferior à da figura 41 111

Figura 49: Elevação da superfície livre para o instante $t = 3.913.200$ s, 02/09/99, às 07:30h. Preamar de quadratura. Observa-se na parte SW do Boqueirão Sul elevação de 0,815m, aumentando para 0.825 nas proximidades da Enseada dos Anjos. Volta a reduzir atingindo cerca de 0,819m na parte NE do domínio 113

- Figura 50: Visão geral do campo de correntes, para uma situação em que há predominância dos ventos de NE. Apresenta magnitudes de correntes semelhantes ao cenário anterior. As figuras 46 e 47 apresentarão a dinâmica local com mais detalhes 114
- Figura 51 A e B: A figura 47A apresenta uma situação nas proximidades da preamar de quadratura. Corrente na direção SW. Velocidades, obtidas com o modelo 2DH, de até 0,26 m/s no estreito e de 0,08 m/s na área de fundeio do ADCP. Na figura 47B, a corrente permanece inalterada em uma meia maré de vazante de quadratura, com velocidades de 0,21 e 0,07 m/s respectivamente 115
- Figura 52 A e B: A situação do campo de correntes permanece a mesma por todo período, água saindo pelo Boqueirão. As velocidades, obtidas com o modelo 2DH, são de 0,04 m/s na figura superior, proximidades da baixa-mar, na área de fundeio do ADCP, e 0,08 m/s na meia maré de enchente na figura abaixo 116
- Figura 53: O gráfico apresenta em azul a quantidade evaporada, em verde, a quantidade dispersada e em cinza a quantidade remanescente do total simulado que são 50 m³ de hidrocarboneto. Principais características: °API = 35,2, gravidade específica = 0,851 kg/m³ a 22 °C, viscosidade = 40 cSt a 22 °C e ponto de fluidez = 38 °C (ADIOS2, 2016) 122
- Figura 54: A curva de decaimento do óleo, obtida pelo programa ADIOS, apresenta que o volume remanescente em questão, após de 5 dias, é pouco mais de 50% do total, isto é, em torno de 25 m³. Utilizada para a curva de decaimento do óleo inserida no SisBaHiA® (ADIOS, 2016) 123
- Figura 55: Vista aérea da Enseada dos Anjos onde podemos visualizar o Porto do Forno na parte superior da figura, continuando à esquerda temos a Marina dos Pescadores (Google Earth, 2016) 125
- Figura 56: Detalhe de duas embarcações subordinadas ao IEAPM atracadas no Duque d'Alba do Porto do Forno. O AvPqOc "Diadorim" e o AvPq "Aspirante Moura". Data: 08/06/2014 (Google Earth, 2016) 127
- Figura 57: Grande possibilidade de o óleo atingir a Enseada dos Anjos, principalmente o flanco sul da praia. Uma pequena percentagem tem o destino à Enseada do Forno 130
- Figura 58: Após 6 horas, constata-se a possibilidade, mesmo que pequena, da mancha atingir allha dos Porcos e a Ilha do Cabo Frio 131
- Figura 59: Neste instante, a mancha pode atingir a Ilha do Cabo Frio, parte atravessa a Ilha dos Porcos e deriva para NE. A Enseada dos Anjos é a que tem grande possibilidade de sofrer sérios impactos ambientais e socioeconômicos 132
- Figura 60: Após um dia, percebemos que a Enseada do Forno e a Ilha dos Porcos tem boas chances de ser impactada pelo contaminante. Pequena possibilidade de a mancha atingir o Saco do Cherne, a Ilha do Cabo Frio e sair pelo Boqueirão Sul. A Enseada dos Anjos é a que

- sofre grandes impactos ambientais com a ocorrência de um vazamento na região 133
- Figura 61: Na parte superior, instante inicial do vazamento. Na figura 57B, após 30 minutos do instante inicial do derrame, a mancha contorna o quebra-mar. Após 1 hora se dirige para a Ponta d'Água (figura 57C) 135
- Figura 62: Na parte superior, após 2 horas do instante inicial do derrame, a mancha atinge a Ponta d'Água. Na figura 58B o óleo vence a Ponta d'Água e deriva para à Ilha dos Porcos a NE. Em ambos os casos, grande parte do óleo continua concentrada entre o cais principal do porto e o mole 136
- Figura 63 A e B: Podemos observar que a partir do instante inicial a mancha apenas aumenta seu perímetro. A figura 59 B retrata a situação após 4 horas do início do derrame. O instante retrata um período de calmaria 138
- Figura 64 A e B: A mancha permanece com os mesmos fundamentos da figura anterior (60A após 8 horas) sofrendo influência apenas da maré, contudo, na figura inferior (após 12 horas), sofre uma pequena deriva para o norte devido ao vento, atingindo o quebra-mar do porto 139
- Figura 65 A e B: Modelo determinístico para vazamento de óleo (50 m³) com ventos do quadrante N-E. Na figura 61B, observa-se a forte influência do vento no deslocamento da mancha após 30 minutos 141
- Figura 66 A e B: Após cerca de uma hora, o óleo está prestes a tocar a Praia dos Anjos (62A) e na figura seguinte, após 2 horas do lançamento, já se espalha ao longo da mesma 142
- Figura 67: Treinamento simulando de vazamento de óleo com ventos de NE com a utilização de barreiras de contenção nas proximidades do Porto do Forno. Fonte: Arquivo do IEAPM 143
- Figura 68: Recolhedores de óleo: A) tipo vertedouro; B) tipo oleofílico; C) tipo mecânico; D) materiais absorventes. Sistemas de contenção – barreiras – (figuras xx e xxC). 144
- Figura 69: Propostas de ação de mitigadoras para derrames de óleo com ventos predominantes nas EAC. A barreira de contenção está em laranja. A nuvem azul indica os locais onde o contaminante toca o litoral. A) Ventos de SW. B) Ventos de NE 145
- Figura 70: Carta de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo da Bacia de Santos. De Barra de São João à Praia de Itaipuaçu-RJ. SAN 10. Fonte: MMA (2007). 147
- Figura 71: Detalhe da Carta SAN-10 (figura 63) na área de estudo. Fonte: (MMA, 2007). 148

Lista de Tabelas

Tabela 01: Constantes harmônicas para o porto do Forno pelo método do Almirante Santos Franco com 40 componentes (FEMAR, 2016)	57
Tabela 02: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. Fonte: Rosman (2015) adaptado de Abbot e Basco (1989).	81
Tabela 03: Descrição das configurações utilizadas no ADCP por Branco (2000).	94
Tabela 04: Apresentação de diversos parâmetros do período em que a circulação hidrodinâmica é gerada por frentes frias nas EAC (ventos de SW).	101
Tabela 05: Apresentação de diversos parâmetros do período em que a circulação hidrodinâmica tem como forçante a maré.	107
Tabela 06: Apresentação de diversos parâmetros do período em que a circulação hidrodinâmica é gerada pelo ASAS na EAC (ventos de NE).	112
Tabela 07: Dados de preamares do modelo em comparação com a Tábua de Maré para o Porto do Forno. Ano 1999. Fonte: DHN.	117
Tabela 08: Características definidas para a região fonte das simulações realizadas.	127

Lista de Símbolos e Siglas

ACAS – Águas Centrais do Atlântico Sul

ADCP – Perfilador Acústico Doppler de Correntes

ADIOS – Automated Data Inquiry for Oil Spills

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASAS – Anticiclone marítimo do Atlântico Sul

AvPq - Aviso de Pesquisa

AvPqOc – Aviso de Pesquisa Oceanográfico

BAENSPA – Base Aero-Naval de São Pedro da Aldeia

BM – Baixa-mar

c – Celeridade ou velocidade de propagação da onda

CEM – Coastal Engineer Manual

Ch – Coeficiente de Chézy

CLC - Civil Liability Convention

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cr – Número do Courant

CTD – Conductivity, Temperature and Depth

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

E – Leste

EAC – Enseadas de Arraial do Cabo

EPEG – Embarcação Pneumática de Emprego Geral

FEMAR – Fundação de Estudos do Mar

g – aceleração da gravidade local. Adotado valor de $9,7882 \text{ m/s}^2$ no presente trabalho.

GAA – Grupo de Acompanhamento e Avaliação

h – Cota do fundo em relação ao nível de referência

H – Profundidade média ou profundidade do nível médio do mar no local

H – Altura da coluna d'água ou profundidade instantânea ou tirante hidráulico

Hm – Altura da onda de maré ou distância vertical entre uma PM e a BM subsequente

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

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IEAPM – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

IMO – Organização Marítima Internacional

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

k – Constante de Von Karman

K – Número de onda. $K = 2\pi/L$

L – Comprimento de onda

LEG – Lanchas de Emprego Geral

m – Massa

MB – Marinha do Brasil

NMM – Nível médio do mar, valor médio em torno do qual a maré oscila.

N – Norte

NE - Nordeste

NOAA – National Oceanic Atmospheric Administration

NR – Nível de Redução

NW - Noroeste

ONU – Organização das Nações Unidas

OPRC – Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo

p – Pressão

Pd – Componente dinâmica da pressão p

PEI – Plano de Emergência Individual

PM – Preamar

RESEX-MAR-AC – Reserva Extrativista Marinha de Arraial do Cabo

S – Sul

S – Escala espacial característica de um fenômeno

SE – Sudeste

SisBaHiA – Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental

SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente

SW – Sudoeste

t – Tempo

T – Período de onda

u – Velocidade do escoamento na direção E-W

U_i – Velocidade do escoamento na direção x_i promediada verticalmente

($i = 1 \rightarrow x, i = 2 \rightarrow y$)

u – Velocidade do escoamento na direção E-W (ou na direção do eixo x)

v – Velocidade do escoamento na direção N-S (ou na direção do eixo y)

w – Velocidade do escoamento na direção vertical (ou na direção do eixo z)

W - Oeste

x – Coordenada horizontal no sentido E-W

y – Coordenada horizontal no sentido N-S

z – Coordenada vertical

δ – Variação infinitesimal de distância

ε – Amplitude da rugosidade equivalente do fundo

ζ – Elevação da superfície livre em relação à superfície de referência adotada

θ – Ângulo de latitude local

ρ – Massa específica da água

ρ_0 – Valor constante de referência da massa específica da água

τ – Tensão de atrito no fundo de um corpo d'água

Φ – Velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local

ω – Frequência angular de onda. $\omega = 2\pi/T$

1 Introdução

Nos últimos anos, várias iniciativas voltadas para a conservação e à preservação de um meio ambiente equilibrado aumentaram de forma significativa com a promulgação da Lei nº 9.605/1998 (que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas lesivas ao meio ambiente) e da Lei nº 9.966/2000 (que dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional).

De acordo com a legislação brasileira, portos organizados, instalações portuárias, entre outros, devem dispor de planos de emergência individuais (PEI) para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, documento que contém informações e descreve os procedimentos de resposta de uma instalação em relação a um incidente em sua área de operação.

O Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) também localizado no município de Arraial do Cabo, com seus navios e embarcações voltados à pesquisa científica, torna-se uma organização militar potencialmente poluidora.

O município do Arraial do Cabo possui características intrínsecas. Uma cidade voltada para a pesca e para o turismo, com praias paradisíacas com belezas cênicas incomensuráveis, além de uma instalação portuária, o Porto do Forno.

Um derrame de óleo nas Enseadas do Arraial do Cabo (EAC) traria sérios prejuízos à economia e ao ecossistema local.

Este trabalho analisa as melhores formas de estratégias para coordenação das ações de resposta na gestão dos impactos ambientais na EAC provocados por um derrame de hidrocarbonetos provenientes das embarcações do IEAPM. Para responder tais questões, utilizamos um sistema de modelagem computacional, onde verifica-se as possibilidades de deriva das manchas de óleo nas EAC, elaborando ações mitigadoras e avaliando as possíveis consequências de um acidente desta categoria.

Vale ressaltar, que um acidente desta característica é agravado pelo IEAPM estar incrustado dentro da Reserva Extrativista Marinha de Arraial do

Cabo (RESEX-MAR-AC), criada com vistas à preservação da pesca regional em 1997.

Incidentes dessa espécie, podem gerar verdadeiras catástrofes, vide o acidente da *Deepwater Horizon* no Golfo do México em 2010. Certamente, a utilização da estrutura de resposta prevista pela Guarda Costeira Americana evitou danos ainda maiores.

Cabe mencionar que cerca de 95 % do comércio exterior brasileiro é realizado por via marítima e mais de 80 % dos recursos minerais marinhos, como o petróleo e o gás natural são extraídos do mar¹, aumentando assim a possibilidade de incidentes com óleo, tanto em bacias petrolíferas como em instalações portuárias ou de apoio.

1.1 Justificativa

O IEAPM é uma Organização Militar Prestadora de Serviços com a missão de executar atividades de Ciência, Tecnologia e Inovação em oceanografia, meteorologia e engenharia oceânica que permitam o melhor conhecimento e a eficaz utilização do ambiente marinho no interesse da Marinha do Brasil (MB) e da sociedade brasileira.

Para consecução de sua atividade fim, o instituto dispõe de nove embarcações de apoio à pesquisa atracados em sua maior parte no Porto do Forno, localizado na Praia dos Anjos. São eles:

- um Aviso de Pesquisa, AvPq “Aspirante Moura”;
- um Aviso de Pesquisa Oceanográfico, AvPqOc “Diadorim”;
- uma Embarcação de Apoio “Anchova”;
- uma Embarcação de Apoio “Cherne”;
- uma Embarcação de Apoio “Dourado”;
- um Flex-Boat, Flex nº1;
- uma Lanchas de Emprego Geral, LEG-10 nº 02;
- uma Embarcação Pneumática de Emprego Geral, EPEG nº 4; e
- uma Lancha de Emprego Geral, LEG nº 05.

¹ Disponível em: <www.marinha.mar.mil.br>. Acesso em: 11 jan. 2016.

Acrescenta-se a esta conjuntura, a constante presença de meios navais realizando exercícios, testes² ou patrulhas na área que, adicionalmente às unidades supracitadas, tornam o IEAPM uma Organização Militar potencialmente poluidora.

Faz-se mister, uma constante atualização do Plano de Emergência Individual (PEI) do IEAPM para a gestão de impactos ambientais relacionados à poluição hídrica nas Enseadas de Arraial do Cabo (EAC) onde o estudo em face tem elementos significantes a acrescentar.

Como já mencionado, esta questão é acentuada pelo IEAPM estar adstrito a uma área declarada de interesse ecológico e social (RESEX-MAR-AC).

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral avaliar, através de simulações de acidentes hipotéticos, os resultados da deriva de mancha de óleo por meio de um sistema de modelagem ambiental, criando subsídios aos tomadores de decisão nas ações de resposta nas Enseadas de Arraial do Cabo (EAC).

Os objetivos específicos deste estudo são:

- implantar um modelo hidrodinâmico na região estudada e validá-lo com medições de campo;
- descrever os padrões da circulação hidrodinâmica local considerando situações de correntes geradas por maré com ventos predominantes, ventos fracos e provenientes de frente fria;
- apresentar através do modelo de transporte de óleo, as potenciais zonas de contaminação em funções dos cenários hidrodinâmicos simulados;
- analisar aspectos de impactos ambientais e socioeconômicos, provenientes de um derrame de óleo nas EAC, assim como, recomendar estratégias de prevenção e ações mitigadoras.

² Dentro do IEAPM, existe uma divisão do CASOP (Centro de Análises de Sistemas Operativos) da MB que realiza testes e monitoramentos nos navios da Esquadra Brasileira ao largo de Arraial do Cabo.

1.3 Metodologia

Este trabalho apresenta a implantação de um modelo hidrodinâmico e de transporte de mancha de óleo para analisar os riscos advindos de vazamentos nas EAC.

Para confecção dos domínios de modelagem utilizou-se das condições de contorno de mar e terra, dados de batimetria e rugosidade equivalente no fundo.

O modelo hidrodinâmico foi forçado através da maré e do vento, calibrados com dados de corrente fornecidos por um Perfilador Acústico *Doppler* de Correntes (ADCP), no período de 19 de julho a 03 de setembro de 1999. Maiores detalhes no capítulo 5.

Na elaboração dos modelos, adotou-se o SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental³, onde será detalhado no capítulo 4.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação desenvolve-se através de nove capítulos, os quais serão descritos a seguir.

No capítulo 1 é introduzido o assunto e se abordam as motivações, objetivos, a metodologia e a estrutura utilizada no presente trabalho.

No capítulo 2 realiza-se a revisão bibliográfica das legislações nacionais e convenções internacionais, apresenta as características do óleo e suas interações com o mar.

Traz as principais consequências de um vazamento de óleo no mar, aborda o uso das cartas de sensibilidade ao óleo como ferramenta essencial de auxílio no planejamento de medidas mitigatórias. É discutida uma introdução a respeito do uso de modelagens no gerenciamento de recursos hídricos e como instrumento de compreensão da interação dos fenômenos oceanográficos e atmosféricos nos corpos d'água.

O capítulo 3 faz considerações a respeito da região estudada onde é descrita sua localização geográfica e se faz um breve histórico do município do Arraial do Cabo. Por fim, é feita uma caracterização ambiental do local.

³ Veja www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

No capítulo 4 é apresentado o sistema de modelagem computacional que será adotado no presente trabalho, descrevendo o modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte de poluentes que serão utilizados nas simulações.

No capítulo 5 é confeccionada o modelo digital do terreno apresentando os dados básicos de entrada e as condições de contorno que foram implementados no modelo.

O capítulo 6 expõe a implantação do modelo hidrodinâmico, as condições de contorno, o processo de calibração e são apresentados os resultados das simulações.

No capítulo 7 são estabelecidas as condições de contorno do modelo de transporte lagrangeano, definida a curva do decaimento do óleo através do programa computacional ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*), a área inicial da mancha baseada nos modelos de Fay e são apresentados os resultados com base nos modelos probabilísticos e determinísticos, sugeridas propostas de ações de mitigação e a análise dos aspectos ambientais e socioeconômicos, provenientes de um derrame de óleo nas EAC.

O capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho com fulcro nos resultados demonstrados nos capítulos anteriores (6 e 7).

No capítulo 9 são citadas algumas possibilidades de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo abordaremos as convenções internacionais que versam sobre derramamento de óleo, por conseguinte, a legislação aplicada no Brasil sobre o tema. Posteriormente, uma análise sobre as características do óleo e sua interação com o mar, as consequências e os impactos do óleo nos *habitats* marinhos e socioeconômicos, por fim, uma introdução na modelagem hidrodinâmica e ambiental.

2.1 Convenções Internacionais

Acidentes com navios envolvendo vazamentos de óleo remontam ao início das atividades de exploração, produção, transporte, refino e a distribuição de petróleo e seus derivados. Porém, apenas a partir da década de 50, que os acidentes, causadores de grandes desastres ecológicos, geraram uma série de reações da Comunidade Internacional.

Em 1954, a Convenção para a Prevenção da Poluição do Mar por Óleo – OILPOL/54 (*Oil Pollution Convention*) foi a primeira convenção internacional a impor limites de descarga de misturas oleosas por navios petroleiros (PEDROSA, 2012).

A Organização Marítima Internacional – *International Maritime Organization* (IMO) – também promoveu Convenções Internacionais a respeito do assunto. As regulamentadas pelo governo brasileiro são:

- Convenção sobre a Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo (*Civil Liability Convention* - CLC 69);
- Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios – MARPOL 73/78; e
- Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo – OPRC 90.

Em 1969, após o acidente do navio *Torrey Canyon* em 1967, foi criada a Convenção sobre a Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo, a CLC 69, que estabeleceu valores limites para a cobertura de danos a

terceiros, por meio de um seguro compulsório aos armadores de petroleiros dos países signatários. Sofreu complementações através do protocolo de 1976 e 1992⁴.

O Brasil promulgou e regulamentou esta Convenção respectivamente pelo Decreto Federal nº 79.437/71 e Decreto Federal nº 83.540/79.

A Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL)⁵, criada em 1973, estabeleceu regras para a completa eliminação da poluição intencional do meio ambiente por óleo e outras substâncias danosas oriundas de navios, bem como a minimização da descarga acidental daquelas substâncias no ar e no meio ambiente marinho.

Alterações foram realizadas com o Protocolo de 1978, passando a ser conhecida como MARPOL 73/78. Possui um total de 6 anexos, sendo o Anexo I versando sobre as “Regras para a prevenção da poluição por hidrocarbonetos”. Promulgada pelo Decreto nº 2.508/98.

A Convenção Internacional Sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo foi concluída em 1990, visa à promoção da cooperação internacional, o aperfeiçoamento da capacidade nacional, regional e global de preparo e resposta à poluição por óleo e à poluição por substâncias potencialmente perigosas e nocivas. Promulgada pelo Decreto nº 2.870/98.

Observamos que os esforços combinados dos governos, dos grandes armadores transportadores de óleo e da IMO que criaram regras de segurança para melhorar prevenir a poluição marinha, reduziram, progressivamente, o número médio de grandes vazamentos de petróleo. A quantidade total de óleo derramado tem-se reduzido consideravelmente a cada ano (figura 1).

⁴ Mais informações: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF,2012).

⁵ Disponível em: <www.imo.org>. Acesso em: 23 mar. 2016.

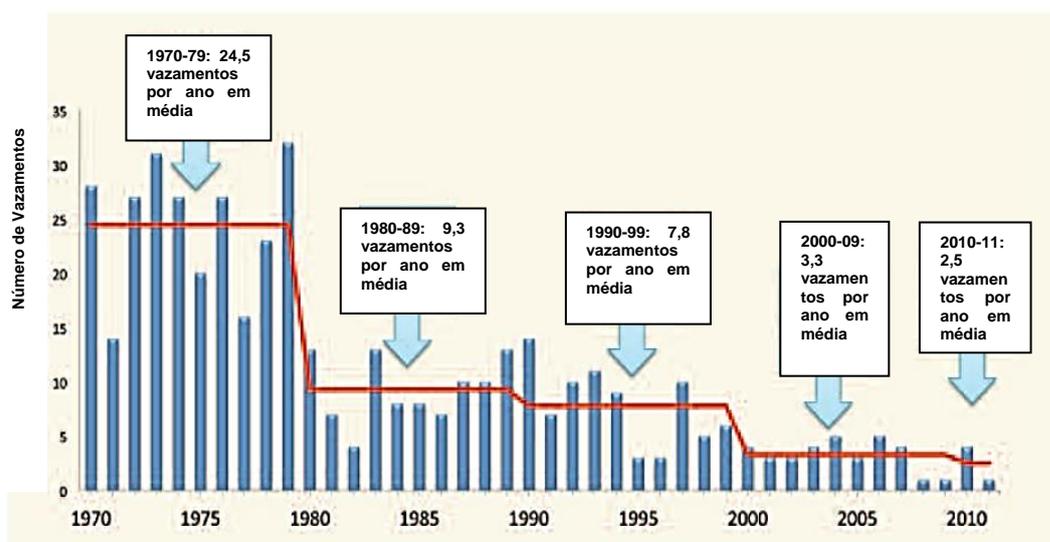


Figura 1: O número médio de grandes derramamentos de petróleo (>700 toneladas) reduziu bastante de 1970 até 2010. Esta redução se deve aos esforços combinados dos governos, dos grandes armadores transportadores de óleo e da IMO que criaram regras de segurança para melhorar prevenir a poluição marinha. A quantidade total de óleo derramado tem-se reduzido consideravelmente a cada ano (adaptado, ITOPI, 2012).

2.2 Legislação Brasileira

No Brasil os registros normativos das preocupações ambientais remontam à época de Sua Majestade, o Imperador Dom Pedro II, que aprovou em 1846 o Decreto nº 447, onde pode ser observado os primórdios da atenção à poluição do meio marinho com a varredura e o despejo de lastro dos navios em mar territorial brasileiro, que trazemos à colação, em sua versão original, especificamente o artigo 52 do documento supracitado:

“Art. 52. He prohibido embarcar, ou desembarcar lastro durante a noite, e igualmente lançal-o ao mar no lugar do ancoradouro, e da mesma fórma a varredura do porão em occasião de limpeza; o contraventor no primeiro caso será sujeito a huma multa de cinquenta mil réis, e no segundo, além da multa de cem mil réis a hum conto de réis, será preso de hum até trinta dias, conforme a gravidade do caso.”

A legislação ambiental foi gradativamente aprimorada, podendo ser verificado, já na época do carvão, que passou a ser utilizado como combustível para navios, a aplicação de multas pela Marinha do Brasil, na Baía de Guanabara e em outros locais de intensa navegação, destinado aos que varressem para o mar

eventuais detritos e sobras do mineral que alimentava a frota náutica (BRASIL, 2007). Segue o artigo que versa sobre o assunto, datado de 1899, quando foi publicado o Decreto nº 3.334 que, em sua redação original enuncia:

“O Presidente da Republica dos Estados Unidos do Brazil, usando da autorização que lhe foi concedida pelo art. 15 (letra c) da lei n. 560, de 31 de dezembro de 1898, resolve approvar o regulamento, que a este acompanha, para as Capitania dos Portos.

...

Art. 176. E' prohibido lançar ao mar ou rio, de bordo dos navios ou de quaesquer embarcações, lixo, cinzas, varreduras do porão, etc., para o que as capitania, de accordo com a repartição sanitaria ou com a camara municipal, designarão em ilhas situadas a sotavento dos ventos reinantes nos portos local adequado para vasadouro.

Os infractores pagarão a multa de 50\$ a 100\$000.”

Mesmo com a substituição do carvão pelo óleo de caldeira como combustível, a Marinha manteve a prerrogativa de multar navios que poluísem o meio ambiente marinho, com base na Lei nº 5.357 de 1967, que estabelecia penalidades para embarcações e terminais marítimos ou fluviais que lançassem detritos ou óleo em águas brasileiras. Era conhecida como a “Lei do Óleo”.

O grande marco na legislação ambiental brasileira somente foi alcançado com a promulgação da Lei 6.938/1981, a chamada Política Nacional de Meio Ambiente que constituiu e integralizou o Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama). Esta lei rompe com a tradicional autoridade unilateral dos governos, em favor de uma gestão compartilhada, participativa e mais transparente para com a sociedade civil (LEMOS, 2012).

A relevante Política Nacional do Meio Ambiente estabelecida pela lei supracitada busca a “preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando a assegurar, no país, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana”.

Hodiernamente, a nossa Magna Carta dedica um capítulo específico em defesa do meio ambiente, fenômeno normativo que ampliou a salvaguarda das nossas riquezas naturais, de sorte que a Constituição Brasileira estabeleceu que “condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados”.

Registre-se que pela primeira vez foi reconhecida na Lei Maior a possibilidade de responsabilização penal para pessoas jurídicas que cometessem crimes ambientais, significando um divisor de águas sem precedentes no campo legislativo para defesa do patrimônio natural.

A “Lei dos Crimes Ambientais” estabelece sanções penais e administrativas, prevendo multas de cinquenta milhões de reais para os poluidores, que ainda é um valor pequeno para grandes empresas petrolíferas.

Esta lei classifica como “crime” as ações lesivas ao nosso ecossistema e introduz a inovação de considerar que a responsabilidade das pessoas jurídicas não exclui a das pessoas físicas, autoras, coautoras ou partícipes do mesmo fato.

Em 2000, a Lei nº 9.966, revoga e substituiu a Lei nº 5.357/1967 (antiga Lei do Óleo), atribuindo à Autoridade Marítima (Comandante da Marinha) a responsabilidade pela prevenção e fiscalização da poluição ambiental causada por navios, plataformas e suas instalações de apoio (figuras 2, 3 e 4).

Prevê, em seu art. 7º, que os portos organizados e instalações portuárias “deverão dispor de planos de emergência individuais para o combate à poluição por óleo e substâncias nocivas e perigosas”.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através de sua Resolução nº 398/2008, estabelece o "conteúdo mínimo" do Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo em águas jurisdicionais brasileiras, caracterizando-se como documento de referência em âmbito nacional.

Considerando que outras instalações, além daquelas previstas na Lei nº 9.966/2000, oferecem risco de acidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, a Resolução supracitada estendeu às sondas terrestres, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, a necessidade das mesmas de disporem também de um PEI, mesmo que seja simplificado.



Figura 2: Navio da Marinha do Brasil em atividade de patrulha nas proximidades de uma plataforma de petróleo. Fonte: Marinha do Brasil6.

Vale ressaltar, que o documento normativo mencionado, manteve o PEI como um instrumento autossuficiente para atender qualquer derramamento de óleo da instalação, levando em conta o emprego de recursos próprios, porém não limitando o emprego de recursos de terceiros.

Em 2013, foi instituído, através do Decreto nº 8.127, o Plano Nacional de Contingência (PNC). Nele são fixadas responsabilidades e estabelecida a estrutura organizacional com o objetivo de permitir a atuação coordenada de órgãos da administração pública e entidades públicas e privadas visando ampliar a capacidade de resposta em incidentes de poluição por óleo ou substâncias perigosas que possam afetar as águas sob jurisdição nacional, minimizar danos ambientais e evitar prejuízos para a saúde pública.



Figura 3: Navio da Marinha do Brasil fazendo acompanhamento e avaliação do desastre de Mariana ocorrido no último ano. Fonte: UOL Brasil⁶.

A Marinha do Brasil (MB) integra a estrutura organizacional do PNC no Comitê-Executivo, no Comitê de Suporte e no Grupo de Acompanhamento e Avaliação (GAA). No GAA, a MB, junto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), tem como uma de suas competências, acompanhar e avaliar incidentes de poluição por óleo.

O PNC estabelece que no caso de incidente de poluição por óleo ocorrido em águas marítimas, bem como em águas interiores compreendidos entre a costa e a linha de base reta, a partir da qual se mede o mar territorial, a designação do Coordenador Operacional recai, preferencialmente, para a MB.

É notória a importância da MB no contexto de incidentes de poluição por óleo ou que afetem a saúde pública ocorrido em águas marítimas e interiores. Seja na preparação, na prevenção, na informação, no acompanhamento, na avaliação, no combate ou no controle da situação, a MB participaria ativamente de um derramamento de óleo no mar.

⁶ Disponível em: < <http://noticias.uol.com.br/meio-ambiente/album/2015/11/19/impacto-da-lama-no-rio-doce.htm#fotoNav=33>>. Acesso em: 11 abr. 2016.



Figura 4: O navio de Pesquisa Hidroceanográfico “Vital de Oliveira” apoiando a coleta e análise das amostras de água e solo marinho, no entorno da foz do Rio Doce após o desastre de Mariana. Fonte: Fred Loureiro⁷.

Por outro lado, ao mesmo tempo em que a MB exerce essas atribuições, suas próprias unidades apresentam um potencial de poluição das águas, o que tem provocado sensíveis mudanças de postura e de procedimentos nas Organizações Militares da MB.

2.3 O Óleo e sua Interação com o Mar

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” e estão representados na figura 5, (BRASIL, 2007).

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).

⁷ Disponível em: <<https://www.facebook.com/marinhaoficial/photos/pcb.922594844478154/922593741144931/?type=3&theater>>. Acesso em: 11 abr. 2

Com o passar do tempo, o óleo no ambiente mudará suas características iniciais, ficando menos tóxico, mais denso e viscoso e mais persistente (SZEWCZYK, 2006).

A rapidez e a importância relativa de cada processo dependem de diversos fatores, tais como: quantidade e tipo de óleo, condições meteorológicas reinantes e condições do mar, se o óleo permanece no mar, ou se foi direcionado para a costa (BRASIL, 2007).

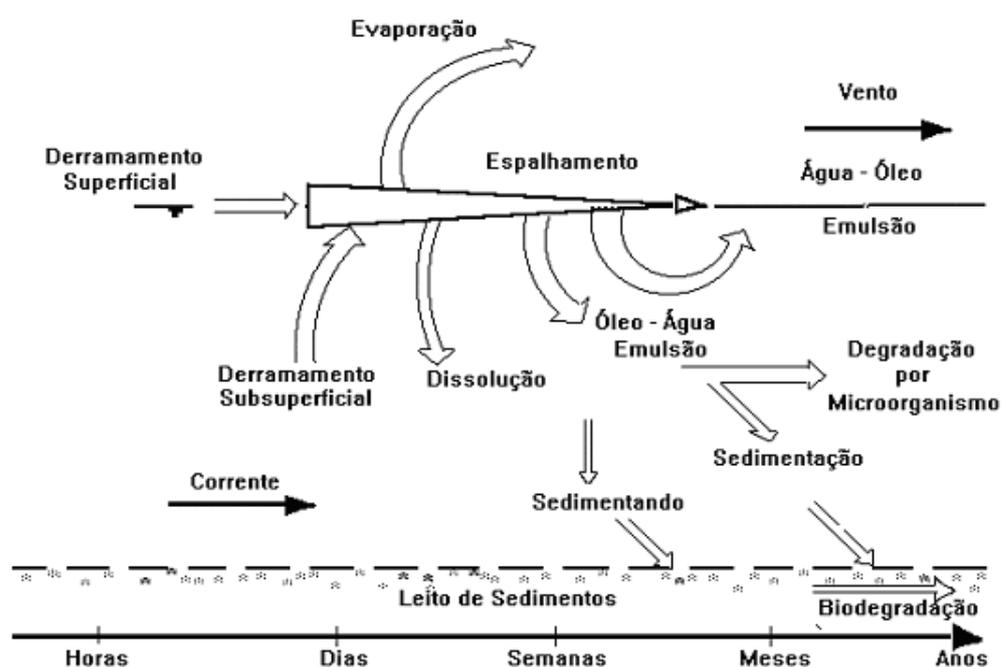


Figura 5: O óleo quando derramado no mar, se espalha e se move sobre a superfície, sendo assim submetido a vários processos que provocam mudanças químicas e físicas, coletivamente conhecidas como “intemperismo”, acima representados (adaptado de ITOPI, 2012).

Ao longo do tempo, o meio ambiente marinho irá absorver todo o óleo derramado, através da biodegradação.

O entendimento da dinâmica temporal desses fenômenos é importante, não somente para compreensão dos impactos causados pelo óleo, mas, igualmente, para a definição de estratégias de respostas adequadas ao estágio de intemperização do óleo (SIQUEIRA, 2015). Maiores detalhes sobre os instantes iniciais de um vazamento de óleo serão apresentados no capítulo 7.

2.4 Principais Consequências dos Derrames de Óleo

A poluição marinha é caracterizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) como a introdução pelo homem no meio marinho, compreendendo os estuários, direta ou indiretamente, de substâncias ou energia que possam provocar efeitos nocivos para os recursos biológicos assim como para a saúde humana, dificuldades às atividades marítimas, incluindo a pesca, perda da qualidade da água do mar do ponto de vista da sua utilização, e redução das possibilidades no domínio do turismo⁸.

No caso da poluição marinha por óleo observa-se severos impactos ao meio ambiente e às comunidades atingidas que são retratados abaixo.

2.4.1 Impacto do Óleo em Habitats Marinhos

A seguir, são comentados os principais impactos potenciais dos derramamentos de óleo sobre a biodiversidade marinha.

2.4.1.1 Plâncton

Plâncton é o termo aplicado para pequenas plantas e animais flutuantes, transportados passivamente pelas correntes marítimas e de marés, nas camadas superiores do mar. O plâncton forma a base da cadeia alimentar no mar e inclui os estágios jovens de peixes, mariscos e muitos animais que vivem no leito do mar.

Para algumas culturas de algas, baixas concentrações de hidrocarbonetos de óleo no mar aceleram o processo de fotossíntese, presumivelmente, devido aos seus efeitos nutritivos, mas, acima dessa concentração, há uma redução progressiva do processo de fotossíntese (CLARK, 1986; ITOPF, 2012).

Os fitoplâncton e os zooplâncton sofrem retardamentos na divisão celular. A redução de luz transmitida à coluna d'água reduz a atividade primária (MONTEIRO, 2003).

⁸ Disponível em: < <http://www.zonacosteira.bio.ufba.br/litoral.html>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

A curto prazo pode ocorrer severa diminuição da população local que, por serem a base da cadeia alimentar, implica danos às espécies que dele se alimentam direta ou indiretamente (ALPINA BRIGGS, 2012).

2.4.1.2 Bentos

São plantas e animais que vivem agregados ao fundo do mar (bentos) também formam uma importante parte da cadeia alimentar e, em águas próximas à costa, muitos desses animais (exemplo: mariscos) e algumas algas são explorados comercialmente (*idem*).

Óleos crus recentes e produtos leves refinados, com uma alta proporção de componentes tóxicos, podem causar dano local nos bancos de algas e em vários outros animais, como mexilhão, ouriço do mar e vermes (BRASIL, 2009).

A incorporação do óleo aos sedimentos pode levar um tempo de residência, de vários anos, com a possibilidade de efeitos sub-letais e de estragar espécies comerciais (MONTEIRO, 2003).

O óleo submetido ao mau tempo pode acumular partículas de sedimentos e afundar, especialmente depois de estacionar em praias, havendo a possibilidade de causar danos às espécies bênticas (CLARK, 1986; BRASIL, 2009).

2.4.1.3 Aves costeiras

Os pássaros são afetados pela perda da impermeabilidade de uma pequena área da plumagem que, quando em contato com o hidrocarboneto, pode prejudicar o isolamento térmico e a flutuabilidade (MONTEIRO, 2003).

As aves marinhas que mergulham para se alimentar podem ser afetadas ingerindo óleo durante o mergulho em voo que pode ser letal. Contudo, a causa mais comum de morte é pelo abafamento/afogamento, inanição e perda da temperatura corporal, ocasionadas pelos danos à plumagem pelo óleo (BRASIL, 2009).

Ademais, devemos considerar os efeitos indiretos gerando graves alterações no funcionamento do estômago, intestinos, fígado e rins, resultantes da

ingestão de óleo que pode se dar pelo consumo de presas contaminadas (MONTEIRO, 2003; ALPINA BRIGGS, 2012).

2.4.1.4 Peixes e mamíferos

Grandes animais nadadores, tais como lulas, peixes, tartarugas, baleias e golfinhos são altamente móveis, e, raramente, são afetados em águas oceânicas, mesmo em maiores derramamentos (BRASIL, 2009).

Em águas costeiras, alguns mamíferos marinhos como focas e répteis, tais como tartarugas, podem ser particularmente vulneráveis aos efeitos adversos da poluição por óleo, devido a sua necessidade de vir à superfície para respirar e sair da água para procriar (*idem*).

Os peixes podem ainda bioacumular o poluente pela ingestão de alimento contaminado, tornando a concentração de óleo em seus tecidos maior do que aquele presente na água do mar. Esta questão é de grande importância socioeconômica e sanitária, tendo em vista a utilização do pescado na dieta humana (CETESB, 2007).

À beira mar, os efeitos são mais evidentes, pois ocorre visível mortandade de flora e fauna e deterioração de praias e costões rochosos, com eliminação de moradas, locais de reprodução e do alimento às espécies mais costeiras (MONTEIRO, 2003).

2.4.2 Impacto do Óleo em Atividades Socioeconômicas

Os principais impactos socioeconômicos são decorrentes da paralisação das atividades econômicas associadas ao mar, como a pesca, o turismo e indústrias que dependem da qualidade da água do mar; dos riscos intrínsecos à saúde pública, como as mortes causadas por explosões e incêndios, a intoxicação causada pela ingestão de alimentos contaminados, problemas dermatológicos e irritações nos olhos, causados pelo contato direto com o óleo (BRASIL, 2009; MONTEIRO, 2013).

Abaixo citamos, apenas para exemplificar, algumas indenizações para reparar os danos causados ao meio ambiente, às atividades econômicas e ao

patrimônio público e privado pelos prejuízos decorrentes de descargas de óleo/contaminantes no mar:

- Petrobrás - R\$ 50 milhões para pescadores por vazamento na Baía de Guanabara (2000)⁹;
- *British Petroleum* (BP) - US\$ 32,2 bilhões (gastos totais provisionados) por vazamento de óleo no Golfo do México (Poço de Macondo) em 2010¹⁰;
- *Halliburton* (empreiteira contratada pela petrolífera BP para cimentar o Poço de Mocondo) - US\$ 1,1 bilhão por vazamento de óleo no Golfo do México em 2010¹¹;
- *Chevron* - R\$ 50 milhões por vazamento de óleo no Campo de Frade, Bacia de Campos (2011)¹²; e
- Celesc (Companhia de Eletricidade de Santa Catarina) – R\$ 20 milhões por vazamento de óleo de transformadores na Baía Sul, Florianópolis (2012)¹³.

2.5 Cartas de Sensibilidade ao Óleo

As Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (Cartas SAO) constituem ferramentas essenciais e fonte primária de informações para o planejamento de contingência e para a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo, permitindo identificar os ambientes com prioridade de proteção e as eventuais áreas de sacrifício, possibilitando o correto direcionamento dos recursos disponíveis e a mobilização adequada das equipes de contenção e limpeza (BRASIL, 2007).

⁹ Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/petroleo-e-energia/petrobras-tera-de-indenizar-pescadores-em-50-milhoes-por-vazamento-na-baia-de-guanabara-12561414#ixzz48fGRi2Pp>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

¹⁰ Disponível em: < <https://infopetro.wordpress.com/2010/08/23/a-bp-e-as-alternativas-do-desastre-a-esperanca/> >. Acesso em: 23 fev. 2016.

¹¹ Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/halliburton-vai-pagar-us-11-bilhao-por-vazamento-de-oleo-no-golfo-do-mexico-13814938>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

¹² Disponível em: < <http://www.clean.com.br/site/ibama-multa-chevron-por-vazamento-de-petroleo/>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

¹³ Disponível em: < <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2014/07/celesc-e-condenada-pagar-indenizacao-por-vazamento-de-oleo.html>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

As cartas de sensibilidade, especialmente as Cartas SAO operacionais (ou de detalhe) e as cartas táticas de escala intermediária, classificam a linha de costa utilizando um índice de sensibilidade do litoral (ISL). Este índice hierarquiza os diversos tipos de contorno da costa em uma escala de 1 a 10, sendo o índice tanto maior quanto maior o grau de sensibilidade.

O sistema de classificação de sensibilidade é baseado no conhecimento das características geomorfológicas das áreas do litoral, considerando os seguintes fatores: grau de exposição à energia de ondas e marés; declividade do litoral e tipo do substrato.

Para a classificação da sensibilidade da costa é fundamental o entendimento das inter-relações entre os processos físicos, tipos de substrato e biota associada, que produzem ambientes geomorfológica e ecologicamente específicos, assim como padrões previsíveis de comportamento do óleo, padrões de transporte de sedimentos e impactos biológicos.

O ISL é um modo conveniente de resumir a informação, mas mostra apenas parte do quadro ambiental, necessitando complementação com informações sobre os recursos biológicos e os aspectos socioeconômicos da área conforme descritos na figura 6.

ESQUEMA DE CORES PARA CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE SENSIBILIDADE DO LITORAL (ISL)

COR	ÍNDICE	CÓDIGO			TIPOS DE COSTA
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	<ul style="list-style-type: none"> Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos Falésias em rochas sedimentares, expostas Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas
	ISL 2	174	153	191	<ul style="list-style-type: none"> Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)
	ISL 3	0	151	212	<ul style="list-style-type: none"> Praias dissipativas de areia média a fina, expostas Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach") Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos Campos de dunas expostas
	ISL 4	146	209	241	<ul style="list-style-type: none"> Praias de areia grossa Praias intermediárias de areia fina a média, expostas Praias de areia fina a média, abrigadas
	ISL 5	152	206	201	<ul style="list-style-type: none"> Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação Recifes areníticos em franja
	ISL 6	0	149	32	<ul style="list-style-type: none"> Praias de cascalho (seixos e calhaus) Costa de detritos calcários Depósito de tálus Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) expostos Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)
	ISL 7	214	186	0	<ul style="list-style-type: none"> Planície de maré arenosa exposta Terraço de baixa-mar
	ISL 8	225	232	0	<ul style="list-style-type: none"> Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados
	ISL 9	248	163	0	<ul style="list-style-type: none"> Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas Terraço de baixa-mar lamoso abrigado Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
	ISL 10	214	0	24	<ul style="list-style-type: none"> Deltas e barras de rio vegetadas Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; apicum Marismas Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)

Figura 6: Código de cores a ser utilizado para representação do ISL nas cartas de sensibilidade. Este índice hierarquiza os diversos tipos de contorno da costa em uma escala de 1 a 10, sendo o índice tanto maior quanto maior o grau de sensibilidade (BRASIL, 2007).

2.6

A Modelagem como Ferramenta de Auxílio na Gestão Ambiental

O conhecimento do comportamento do oceano, mares, estuários e rios sempre foi de grande importância para a população que reside nas zonas costeiras e ribeirinhas, e para a autodeterminação dos povos.

Com o desenvolvimento da teoria da hidrodinâmica, essas necessidades foram superadas, através do desenvolvimento de métodos numéricos que podem

ser utilizados para reproduzir dados observados ou medidos (RAMMING, KOWALIK, 1980).

Os resultados destes métodos numéricos devem ser comparados com medições de campo. Observando uma correlação, entre estes, demonstra-se a validade dos mesmos, podendo, finalmente, ser utilizado para prever o processo dinâmico do mar, encontrando, assim, a sua aplicação prática (*idem*).

O estudo de processos costeiros de uma forma completa incluiria um levantamento de dados de campo de boa qualidade e de modelos analíticos capazes de descrever a dinâmica envolvida nos processos (TORRES JÚNIOR, 1995).

A obtenção destes dados envolve custos elevados e as soluções analíticas, na maioria dos casos, não é possível quando se inclui a batimetria e a costa de uma maneira realista. A alternativa é a modelagem numérica, onde se podem incluir aproximações razoáveis para a costa e o fundo (*idem*).

No que tange a área ambiental, pode-se dizer que, a modelagem computacional com capacidade previsiva passa a ser um instrumento relevante para os tomadores de decisão na cena de ação de acidentes ambientais (ROSSO, 1997).

Em ambientes aquáticos, modelos que possam descrever apropriadamente a circulação hidrodinâmica, a advecção e difusão de poluentes, ou de uma dada grandeza escalar são ferramentas poderosas no tocante a sua contribuição na avaliação de impactos decorrentes de vazamentos de óleo ou outros contaminantes (*idem*).

Segundo ROSMAN (2015), os sistemas computacionais são ferramentas integradoras, sem as quais, dificilmente, se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais.

Ainda o autor ressalta que os modelos são ferramentas indispensáveis à gestão e ao gerenciamento de recursos hídricos, pois permitem:

- **Análises de diagnóstico:**
 - otimização de custos de monitoramento e medição integrando informações espacialmente dispersas, geralmente obtidas em estações pontuais de medição;

- estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições: somente através de modelos tem-se, efetivamente, um modo consistente de interpolar e extrapolar medições, viabilizando um conhecimento amplo da região de interesse, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais;
- compreensão de processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais.
- **Análises de prognóstico:**
 - prever situações simulando cenários para estudos e projetos;
 - indispensável para Licenciamento Ambiental com possibilidade de se mapear áreas de risco, previsão do deslocamento de contaminantes entre outros;
 - fundamental para a elaboração do PEI, conseqüentemente, melhoria na definição de estratégias de ação em caso de acidentes com derrames de óleo;
 - fundamental na elaboração de Planos de Mitigação;
 - capacidade de modelagem em tempo real para planejamento de ações emergenciais.

3 Região de Estudo e Características Gerais

Neste capítulo serão apresentadas características gerais da cidade de Arraial do Cabo, uma breve introdução a respeito do IEAPM e da RESEXMAR-AC e, posteriormente, é feita uma caracterização ambiental.

3.1 A cidade de Arraial do Cabo

O município de Arraial do Cabo (figuras 8 e 9) localizado no litoral leste do Estado do Rio de Janeiro, na denominada Região dos Lagos, é um importante polo turístico e pesqueiro do Estado do Rio de Janeiro. Entre a cidade de Arraial do Cabo e a Ilha do Cabo Frio, estão situadas as EAC, área de estudo, compreendidas entre as latitudes $22^{\circ} 57,7' S$ e $23^{\circ} 00,19' S$ e longitudes $41^{\circ} 58,7' W$ e $42^{\circ} 01,2' W$.

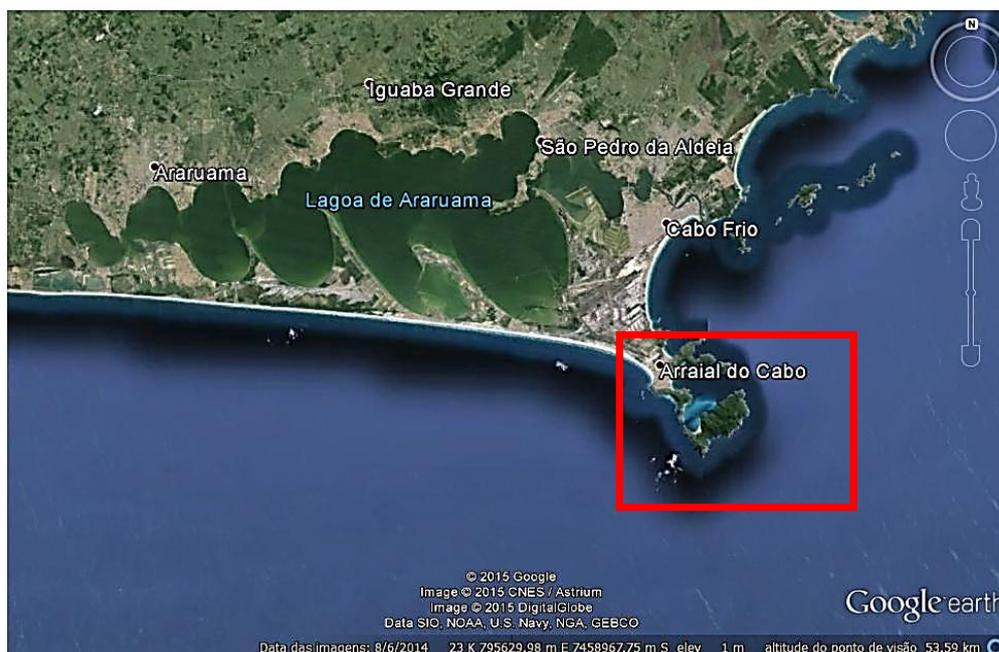


Figura 7: Visão geral da região de estudo. Google Earth (2014).

Arraial do Cabo limita-se a norte com os municípios de Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia e Cabo Frio, a leste e a sul, com o Oceano Atlântico e a oeste, com o município de Araruama.

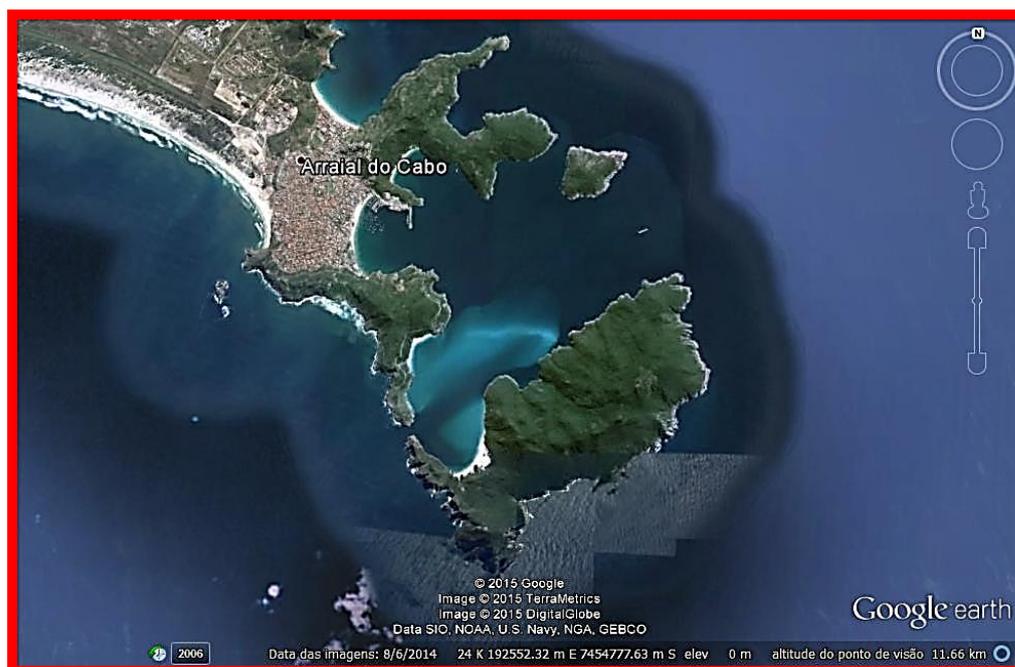


Figura 8: Visão mais detalhada da área de estudo, enseadas do Arraial do Cabo e a Ilha do Cabo Frio e dos Porcos. Google Earth (2014).

3.1.1 Histórico

Seus primeiros habitantes chegaram há cerca de cinco mil anos. Segundo estudos arqueológicos, havia cerca de 50 aldeias tupinambás na região, estimando-se uma população que poderia variar de 25 a 75 mil habitantes antes da conquista europeia¹⁴.

O município de Arraial do Cabo apresenta um interessante conjunto arqueológico (figura 10). Notável por sua concentração no espaço e pela diversidade dos locais escolhidos para os assentamentos, sendo identificados 26 sítios pré-cerâmicos e dois sítios cerâmicos (TENÓRIO *et al.* 2010).

Em 1503 Américo Vespúcio desembarcou com sua expedição em Arraial do Cabo onde foram construídos uma casa de barro e pedra no Bairro da Rama, hoje conhecido como Praia dos Anjos. Foram deixados vinte e quatro homens para ocupar a área instalando a primeira feitoria do Brasil com o objetivo de guarnecer o litoral (COMAP, 2009).

¹⁴ Disponível em: <<http://www.arraial.rj.gov.br/prefeitura/?local=historia>>. Acesso em 23 jan. 2016.

O período de colonização em Arraial do Cabo deixou obras, monumentos e peças históricas como a Igreja Nossa Senhora dos Remédios, construída em 1506 (figura 11A) na praia dos Anjos e o Marco Histórico de Américo Vespúcio (figura 11B), no Largo do Descobrimento (FABIANO, 2011).

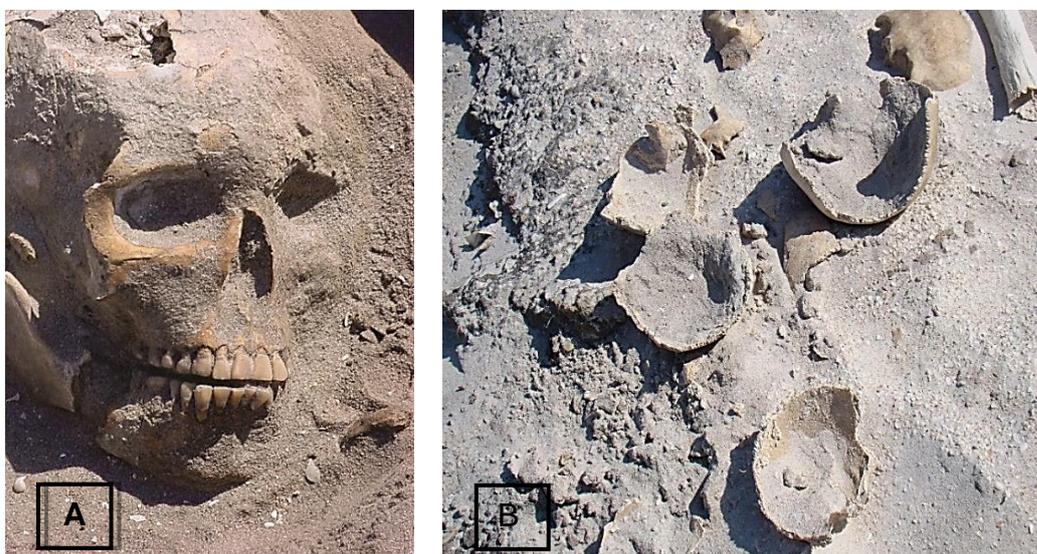


Figura 9: A) Restos arqueológicos encontrados na Ilha do Cabo Frio. B) Artefatos e ferramentas arqueológicas encontradas no sambaqui da mesma ilha. Fonte: Arquivo do IEAPM.

Arraial do Cabo permaneceu, por todo esse período, isolada por um pequeno estreito de terra, poucas e precárias estradas, com uma economia baseada na pesca e no artesanato.

Em 1943, a instalação da Companhia Nacional de Álcalis trouxe um impulso ao desenvolvimento local.

As facilidades de escoamento da produção, por via rodoviária, ferroviária pela Estrada de Ferro Maricá, ou marítima, para os centros consumidores, a existência de água do mar muito fria, para refrigeração da planta industrial, e a possibilidade de captação de água doce colaboraram para sua instalação em Arraial do Cabo, atraindo diversos imigrantes (COMAP, 2009).

A Álcalis tem sua origem mais remota nas discussões, iniciadas em 1918, para resolver a dependência externa de soda cáustica e barrilha, como consequência da Primeira Guerra Mundial, quando o Brasil se ressentiu da carência dessas substâncias empregadas pelos beligerantes na fabricação de explosivos e refino de petróleo (*idem*).

As atividades industriais da Álcalis, em 2003, representaram cerca de 42% do Produto Interno Bruto (PIB) municipal (TCE, 2005).



Figura 10: A) Marco histórico da chegada de Américo Vespúcio em 1503 na antiga praia da Rama atualmente conhecida como Praia dos Anjos. Fonte: Rio de Janeiro Aqui (2016)¹⁵. B) Igreja Nossa Senhora dos Remédios construída em 1506. Ao longo do tempo sofreu diversas modificações. Fonte: Arraial do Cabo (2016)¹⁶.

Em 2006, a Álcalis encerrou suas atividades. Atualmente a cidade sobrevive em função das atividades portuárias, turísticas, pesca, mergulho e hotelaria.

Em 1985, o ex-distrito de Arraial do Cabo foi desmembrado de Cabo Frio pela Lei Estadual nº 839.

3.1.2 Aspectos Sócioeconômicos

De uma região de pequenas comunidades voltadas para a atividade pesqueira, Arraial do Cabo foi impulsionada por atividades diversas apresentando um grande aumento populacional. A área urbana de Arraial do Cabo ocupa cerca de 38 % do território municipal¹⁷.

¹⁵ Disponível em: <<http://www.riodejaneiroaqui.com/figuras1/arraial-do-cabo-marco-1503.jpg>>. Acesso em: 12 de jan. 2016.

¹⁶ Disponível em: <http://arraialdocabo.no.comunidades.net/imagens/ogaaanbo880oszory9swxqy2kzuzzil5d86_igesko3mt_rftil665jnct9ldyj1oknadtbkvvruekk3zax00ja4am1t1ulju8gjh wyc3deu8jlan87qvv5am.jpg> Acesso em: 12 mai. 2016.

¹⁷ Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=330025&idtema=16&search=||s%EDntese-das-informa%>>. Acesso em: 12 de jan. 2016.

Em função de seus atrativos naturais, existência de diversas praias, mar límpido e tranquilo, vem, desde a década de 80, passando por um processo de grandes transformações no seu perfil de ocupação e uso do solo (CUNHA, 2004).

Em decorrência das diferentes atividades econômicas desenvolvidas, convive com vocações que em um primeiro momento, podem se apresentar como conflitantes, caracterizando-se como uma cidade:

- portuária: devido a presença do Porto do Forno;
- turística: pelas atividades de turismo ecológico, submarino e de entretenimentos náuticos;
- de veraneio: pelo fluxo populacional no período de férias escolares;
- pesqueira: pela frota existente e pelo desembarque do pescado;
- pesquisa do ambiente marinho, pela presença do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e do Centro de Apoio e Sistemas Operativos (CASOP), ambas organizações da Marinha do Brasil (COMAP, 2009).

A população total do município de Arraial do Cabo é de 27.715 habitantes e uma densidade demográfica classificada como alta, de 172,91 hab/ km², renda *per capita* média de R\$ 517,70 (IGBE, 2016).

No município de Arraial do Cabo, dos 9.528 domicílios permanentes recenseados, apenas 62,8 % dispunham de condições adequadas no que se refere ao esgotamento sanitário, indicando uma cobertura baixa desse serviço. A fossa séptica era utilizada em 26,5 % domicílios, 9,6 %, fossa rudimentar e 0,2 % dispunham os dejetos em valas (*idem*).

Grande parte dos domicílios, em torno de 74 %, tem água potável abastecida pela concessionária local. As águas subterrâneas são responsáveis por cerca de 26 % do abastecimento de água dos demais domicílios (*idem*).

De acordo com o Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil de 2003, a cidade apresenta um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) de 0,733 sendo classificada de médio desenvolvimento.

3.2 O IEAPM

O Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (figura 12) teve origem no Projeto Cabo Frio, idealizado pelo Almirante Paulo de Castro Moreira

da Silva em 1971, então Diretor do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), cuja vida foi dedicada ao estudo do oceano.



Figura 11: Visão aérea do IEAPM. Fonte: Google Earth (2016).

O Projeto Cabo Frio tinha o objetivo de criar uma instituição de modo a apoiar e executar estudos do mar e seus recursos oceanográficos, físico-químicos e biológicos, estimulando a produção natural e promovendo a produção em cativeiro de peixes, crustáceos e moluscos, com o máximo de aproveitamento do fenômeno da ressurgência.

O idealizador do projeto visava ao desenvolvimento de uma mentalidade marítima calcada no futuro da sociedade brasileira, com a criação de uma “Universidade do Mar” que ofertaria experimentação científica aos jovens estudantes.

Em 1984 foi criado o Instituto Nacional de Estudos do Mar (INEM), que aproveitando os trabalhos do Projeto Cabo Frio, tinha a finalidade de assegurar e racionalizar a realização dos estudos necessários ao conhecimento e à utilização dos oceanos e águas interiores, incluindo a sua superfície, massa d’água em qualquer estado, o fundo e camadas subjacentes, observadas as metas decorrentes da Política Nacional para os Recursos do Mar¹⁸.

¹⁸ Decreto 89.588, de 26 de abril de 1984.

O INEM recebeu o nome de Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira em 1985, em homenagem ao falecimento do idealizador do Projeto Cabo Frio.

O IEAPM também se modificou ao longo do tempo, tendo passado a órgão de pesquisa voltado para as aplicações militares da oceanografia e, posteriormente, para contribuir com a ampliação do conhecimento e a eficaz utilização do meio ambiente marinho, no interesse da MB e do desenvolvimento socioeconômico do País.

3.3 RESEXMAR-AC

As Reservas Extrativistas (RESEX) fazem parte do Sistema Nacional de Unidades de Conservação e são regulamentadas pelo Decreto nº 98.897/1990. Nela são permitidas, de forma planejada e regulamentada, a exploração e o aproveitamento direto dos recursos naturais renováveis, por população extrativista.

Em Arraial do Cabo, temos uma reserva extrativista marinha (RESEX-MAR-AC), que, entre as distintas atividades produtivas dos extrativistas, encontram-se o aproveitamento dos recursos pesqueiros nas modalidades de pesca artesanal, mergulho profissional, pesca subaquática amadora, pesca esportiva, esportes náuticos, ecoturismo, aquicultura, beneficiamento do pescado, comercialização e fiscalização (figura 12).

Os depoimentos das entidades locais – apresentados por COMAP (2009) – demonstram uma grande preocupação pela possibilidade de ocorrência de vazamento de óleo e seus consequentes reflexos sobre as atividades de pesca e de turismo, que se constituem em duas das principais vocações locais, o que confirma a necessidade de uma atenção especial do IEAPM com as constantes manobras dos navios da MB e de suas embarcações de pesquisas.



Figura 12: A parte hachurada da figura representa a área de responsabilidade da RESEXMAR-AC. Fonte: ICMBIO¹⁹ (2015).

3.4 Caracterização Ambiental

3.4.1 A Ressurgência

Um dos processos mais importantes associados à circulação das águas, e uma grande característica local, é o fenômeno da ressurgência.

Segundo Torres Júnior (1995), este fenômeno significa o movimento ascendente de águas das camadas inferiores, Água Central do Atlântico Sul (ACAS), capaz de carrear nutrientes para a zona eufótica e fertilizando a base da cadeia trófica marinha. Estende-se sobre a plataforma continental, desde a Ilha do Cabo Frio até a Baía de Guanabara, sendo um processo costeiro e episódico (figura 13).

As considerações iniciais sobre a ressurgência foram realizadas por Allard em 1955 através dos dados da temperatura da água do mar, visando a análise do rendimento térmico dos trocadores de calor para a Companhia Nacional de Álcalis (*idem*).

¹⁹ Disponível em: <www.icmbio.gov.br>. Acesso em: 28 ago. 2015.

A partir deste momento, a plástica e *sui generis* região foi difundida e estudada por diversos pesquisadores que, ao longo do tempo, contribuíram com várias pesquisas e trabalhos a fim de compreender tal processo.

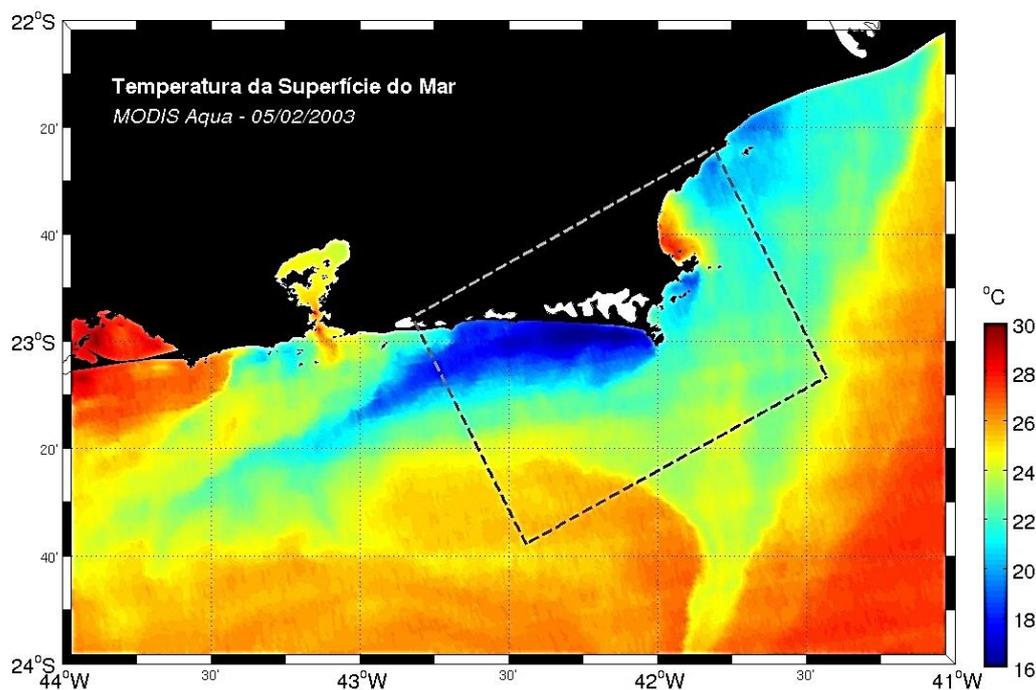


Figura 13: Imagem satelital de TSM (MODIS-Aqua) evidenciando a ressurgência costeira de Cabo Frio. As cores azuladas representam a pluma de águas frias promovida pela ressurgência. Fonte: CODATO (2015).

Este ciclo ocorre, normalmente, no verão, de setembro a abril (VALENTIN, 1980, 1984 *apud* GONZALEZ RODRIGUEZ et al, 1992), apresentando variações interanuais (ELIAS, 2009), quando prevalecem os ventos E-NE, causando a ressurgência de águas frias. Esta água possui baixas temperaturas, 6 °C e 18 °C (figura 14), salinidade entre 34,6 psu e 36 psu²⁰.

O ciclo da ressurgência é interrompido por ventos S-SW, resultado da passagem de frentes frias, gerando um reduzido período de subsidência, e a concentração de águas quentes tropicais e águas costeiras, com menos frequência, a corrente do Brasil (GONZALEZ RODRIGUEZ *et al*, 1992).

Em Arraial do Cabo, este fenômeno é resultante da combinação entre os intensos e constantes ventos nordeste, em conjunto com a aceleração de *Coriolis*, proximidade do elevado desnível costeiro, alteração no alinhamento geral da

²⁰ Comunicação Interna de Rogério Neder Candella (2016).

costa, passando de NE-SW para E-W entre o Rio de Janeiro e o município em estudo (MUEHE, 1979 *apud* TORRES JÚNIOR, 1995).

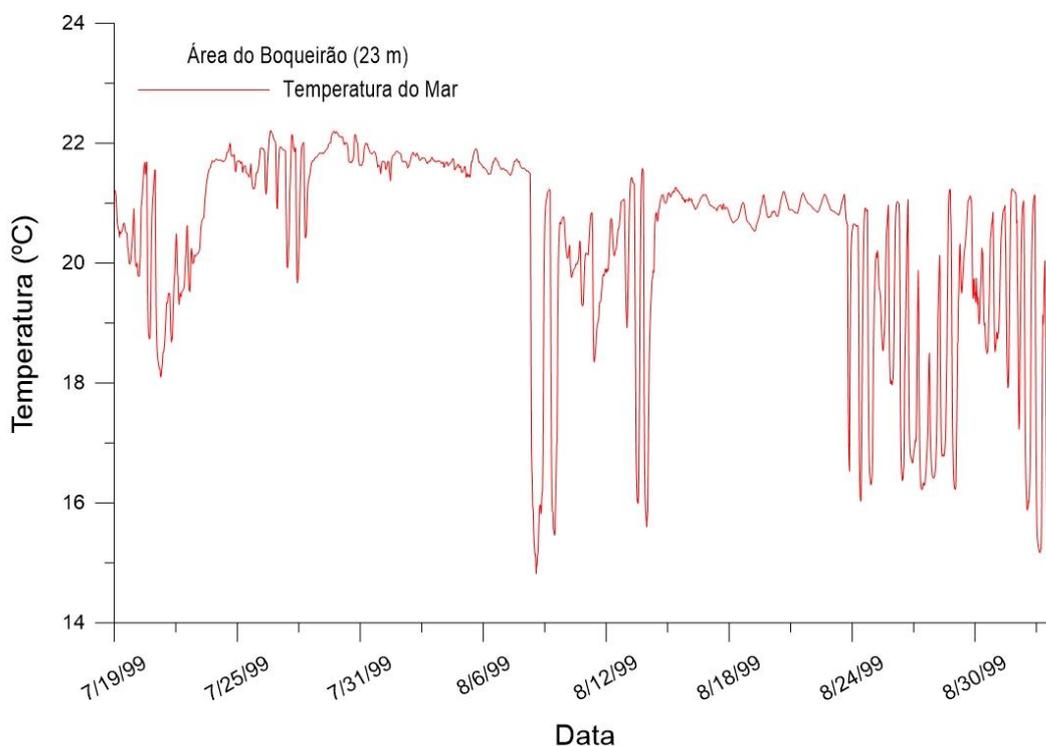


Figura 14: Gráfico de dados da temperatura do mar de 19/07/1999 a 02/09/1999 obtidos do sensor térmico do ADCP fundeado a 23m do estudo de Branco (2000). O sensor térmico está no equipamento nessa mesma profundidade. Pelo gráfico podemos observar períodos de ocorrência da ressurgência que tem por característica temperaturas menores que 18 °C (SVERDRUP, 1946 *apud* COMAP, 2009).

No presente estudo, observou-se que ventos do quadrante NE, de baixa magnitude, não geram o fenômeno. Segundo Paiva (1993), mesmo com ventos característicos, o fenômeno pode não ocorrer caso não haja disponibilidade da ACAS próximo ao litoral.

3.4.2 Clima

O Estado do Rio de Janeiro está situado numa região de influência predominante do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), (TORRES JÚNIOR, 1995; ODA, 1997; SAVI, 2002). As características climáticas da região são peculiares por apresentar condições de clima semiárido quente numa pequena extensão (BARBIERI, 1984).

A temperatura média em Arraial do Cabo é de 25°C, no verão pode chegar a 38° e no inverno a cerca de 12°C (COMAP,2009).

A variação anual da pressão atmosférica média possui os maiores valores no período de inverno (1020 hPa) e no período de verão apresentam os menores valores em torno de 1011 hPa (*idem*).

A média mensal da umidade relativa é quase uniforme, pouco acima de 80%, com uma ligeira diminuição durante o inverno (*idem*).

A precipitação média mensal mostra o mínimo nos meses do inverno, em torno de 40 mm, e o máximo nos meses do verão chegando a 100 mm (*idem*).

3.4.3 Maré

As marés são caracterizadas por oscilações rítmicas do nível do mar num intervalo de tempo de várias horas, um pouco mais de 12 ou 24 horas, constituindo assim uma das mais longas ondas oceânicas (VALENTINI, ROSMAN, 2007).

A maré é gerada pelas forças de atração gravitacional da Lua e do Sol, associadas à aceleração centrípeta, agindo diretamente sobre as grandes massas de água das bacias oceânicas (MIRANDA *et al*, 2002). A ação da Força de Coriolis em uma enseada como a de Arraial do Cabo pode ser desprezada.

O marégrafo serve para medir as variações do nível do mar filtrando as oscilações devido às ondas ou outras oscilações de alta frequência, utilizando um tubulão (filtro mecânico) com um orifício que deixa passar as oscilações lentas (baixa frequência, como a maré) e impede a penetração de oscilações de alta frequência como as ondas (VALENTINI, ROSMAN, 2007).

As constantes harmônicas para o porto do Forno estão descritas na Tabela 1. As características são de maré semi-diurna com desigualdades, com as amplitudes, variando entre 1,40 m na sízígia e 0,40 m na quadratura (SAVI, 2002).

Além da maré astronômica, forçantes meteorológicas, especialmente, o vento e a pressão atmosférica, podem alterar o nível do mar na enseada, na chamada maré meteorológica.

Tabela 01: Constantes harmônicas para o porto do Forno pelo método do Almirante Santos Franco com 40 componentes (FEMAR, 2016).

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

Nome da Estação :		ARRAIAL DO CABO - RJ			
Localização :		Enseada dos Anjos - Porto do Forno.			
Organ. Responsável :		DHN / INPH / IEAPM			
Latitude :	22° 58,3' S	Longitude :	42° 00,9' W		
Período Analisado :	02/02/82 a 04/03/82	Nº de Componentes :	40		
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré de Desigualdades Diurnas.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	II H 57 min	Nível Médio (Zo):	66 cm acima do NR.		
Média das Preamares Superiores (MHHW) :	125 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHW) :	106 cm acima do NR.		
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :	22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :	11 cm acima do NR.		
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	0,7	241
Ssa	-	-	N ₂	4,2	092
Mm	5,7	308	NU ₂	0,8	090
Mf	-	-	M ₂	32,6	078
MTM	9,6	271	L ₂	2,2	092
Msf	0,9	355	T ₂	1,0	088
Q ₁	2,7	075	S ₂	17,2	088
O ₁	1,0	087	K ₂	4,7	089
M ₁	1,4	046	MO ₃	0,2	303
P ₁	1,7	143	M ₃	0,1	218
K ₁	5,4	147	MK ₃	0,4	220
J ₁	1,0	123	MN ₄	0,4	009
OO ₁	0,8	046	M ₄	1,9	025
MNS ₂	1,1	128	SN ₄	0,4	037
2N ₂	0,6	106	MS ₄	1,0	115
Referências de Nível:		RN IBGE - No quinto degrau da escada da Igreja em frente ao Porto. RN2 DHN colocado no primeiro pilar do enrocamento do Porto. RN 04 na soleira da porta do Entrepasto de Pesca.			
Obs: Outros Períodos : 13/07/61 a 14/09/61 ; 01/12/71 a 11/07/71 ; 01/03/76 a 01/04/76; 01/09/82 a 30/12/82 ; 15/05/90 a 09/09/90; 01/08/91 a 31/08/91 Existem ainda outras observações no IEAPM Consta das Tábuas das Marés.					

Código BND0: 50156

3.4.4 Ventos

Os dados de vento, para a caracterização dos padrões reinantes na região, foram fornecidos pela Divisão Oceano-Atmosférica do IEAPM, provenientes da

estação meteorológica de superfície automática do INMET, localizada no Instituto (A606 - Código OMM: 86892), no período compreendido entre 2006 a 2014.

Para que não exista equívocos, os dados de entrada do modelo hidrodinâmico são da Estação Meteorológica da Base Aérea de São Pedro d'Aldeia em virtude dos dados do ADCP, usados na calibração do modelo, serem do ano de 1999, momento em que ainda não existia a estação do INMET no IEAPM.

As questões relativas aos dados da Estação Meteorológica da Base Aérea de São Pedro d'Aldeia são discutidas no capítulo 6.

Analisando-os, verifica-se que há uma predominância na direção dos ventos no quadrante NE (figura 15), que compõem cerca de 68% do período supracitado.

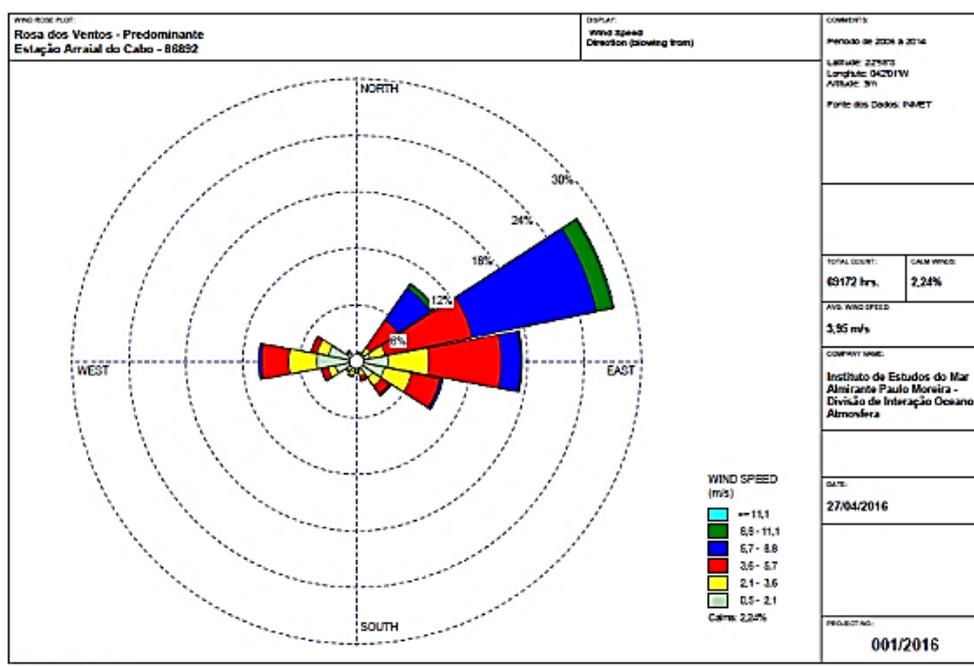


Figura 15: Predominância dos Ventos para o período de 2006 a 2014. Fonte: INMET, (2016).

Já os do quadrante SW possuem em torno de 18 %. As velocidades predominantes compreendem o intervalo de 3,6 a 5,7 m/s, com frequência de ocorrência em 30 % durante o período de funcionamento da estação (figura 16). Alguns eventos possuem intensidade de 5,7 a 8,8 m/s (20 %) e alguns, mais raros, acima de 8,8 m/s.

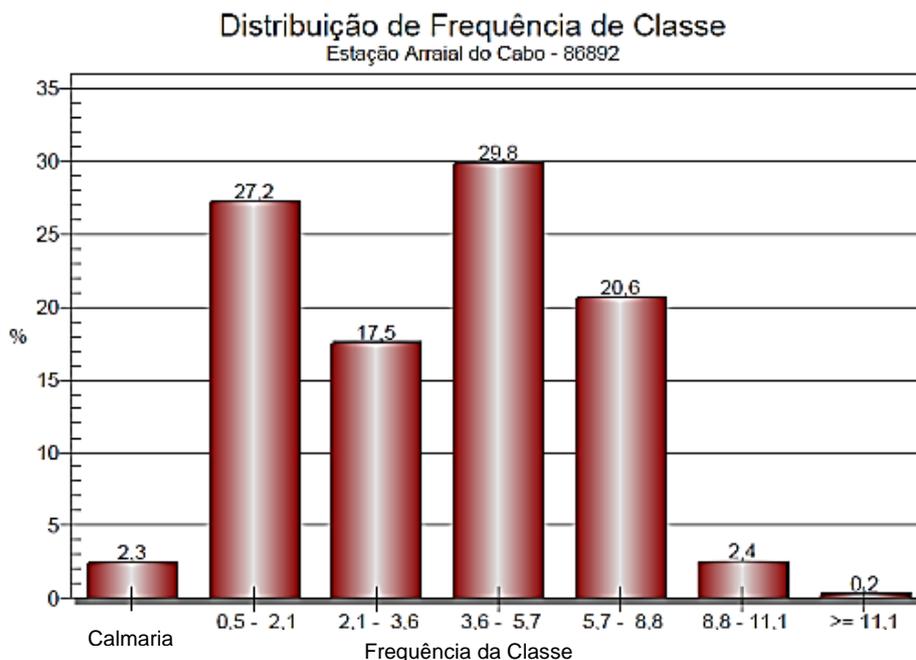


Figura 16: Distribuição de Frequência de Classe para o mesmo período (INMET, 2016).

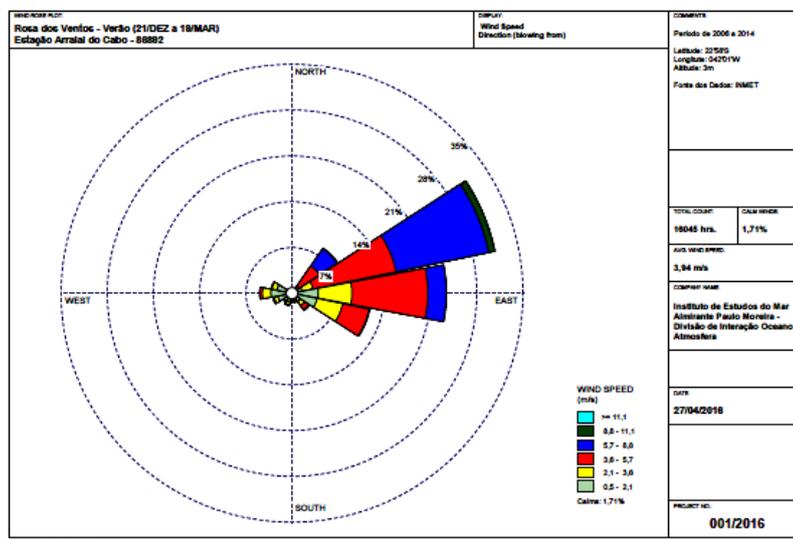
Dividindo o período nas quatro estações, conforme verificado na figuras 17, 18, 19 e 20, observa-se o padrão sazonal. Nota-se que a primavera é o período com a maior incidência de ventos no quadrante N-E, com mais de 80%. O quadrante S-W representa apenas cerca de 12 %.

O outono é o período onde ocorre a maior predominância de ventos do quadrante S-W, cerca de 30 %, geralmente associados à passagem de sistemas frontais na região, que aumentam nesta época do ano. Conseqüentemente, os ventos do quadrante N-E rondam algo em torno de 56 %.

As estações do inverno e do verão se colocam em uma posição intermediária, porém o inverno, com propriedades do outono, e o período do verão, com características mais marcantes da primavera.

Tal comportamento se deve, basicamente, ao domínio da circulação local pelo Anticiclone Subtropical marítimo do Atlântico Sul (ASAS), e é afetado pela passagem de frentes frias (PAIVA, 1993; TORRES JÚNIOR, 1995; ODA, 1997; SAVI, 2002).

Os gráficos abaixo foram gerados através do *software WRPLOT View* versão 7.0²¹ e representam as Rosas do Vento e a distribuição de frequência de classe global e para as estações do verão, outono, inverno e primavera.



Distribuição de Frequência de Classe - Verão
Estação Arraial do Cabo - 86892

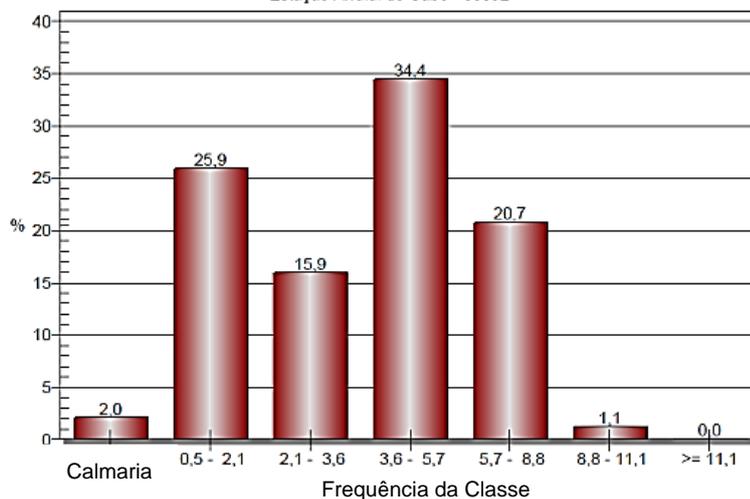
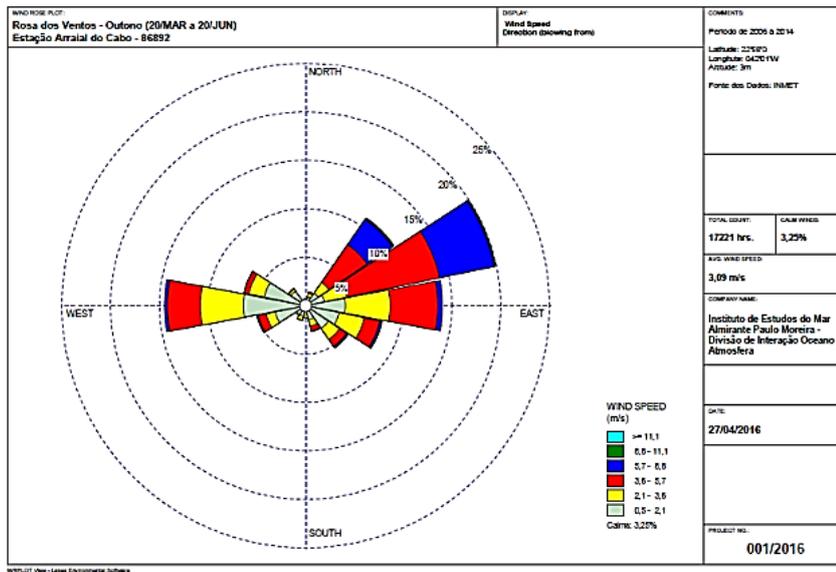


Figura 17: Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação do verão no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016).

²¹ Mais informações < <http://wrplot-view.software.informer.com/7.0/>>



Distribuição de Frequência de Classe - Outono
Estação Arraial do Cabo - 86892

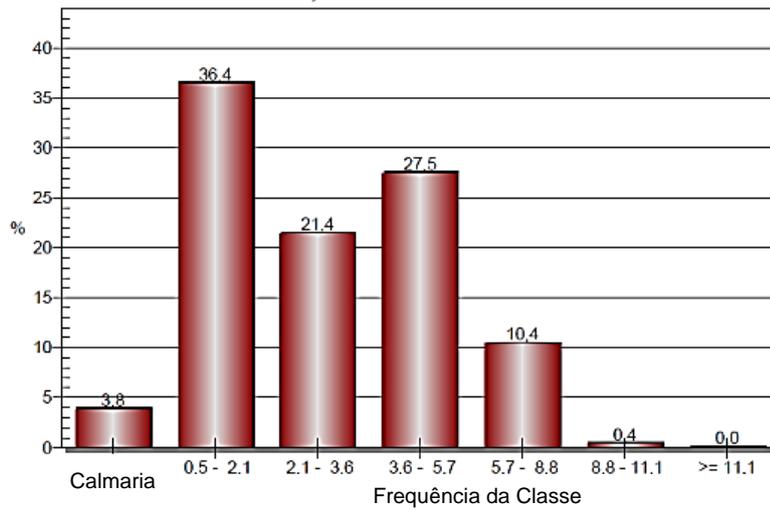
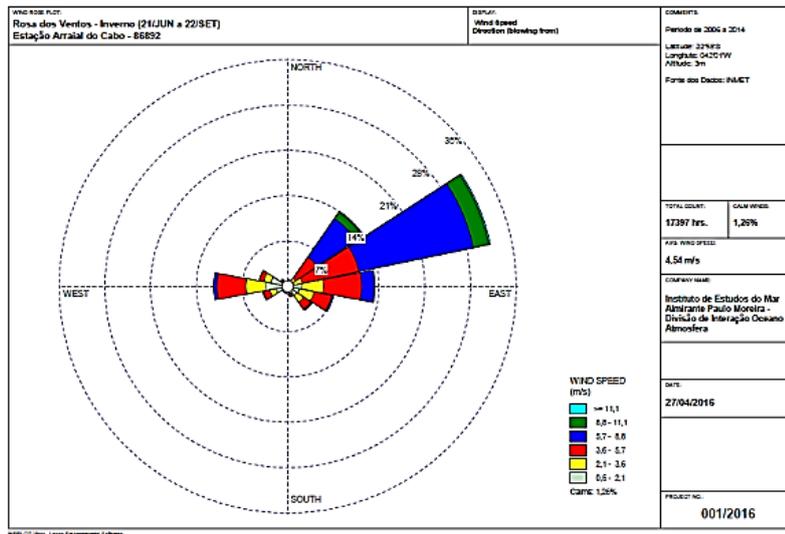


Figura 18 Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação do outono no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016).



Distribuição de Frequência de Classe - Inverno
Estação Arraial do Cabo - 86892

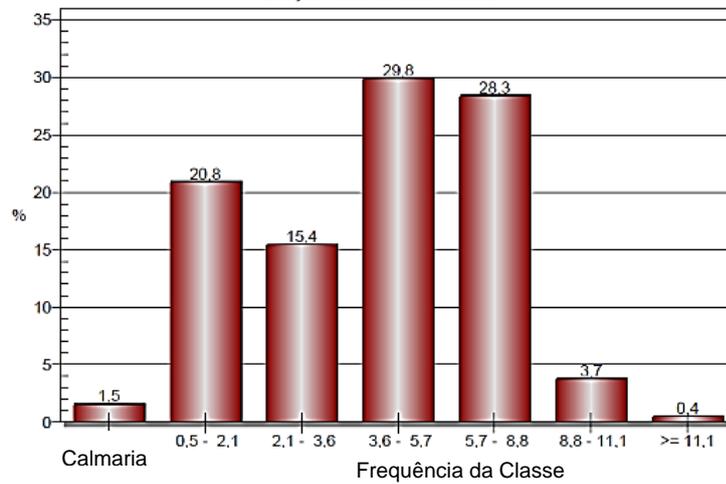


Figura 19 Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação do inverno no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016).

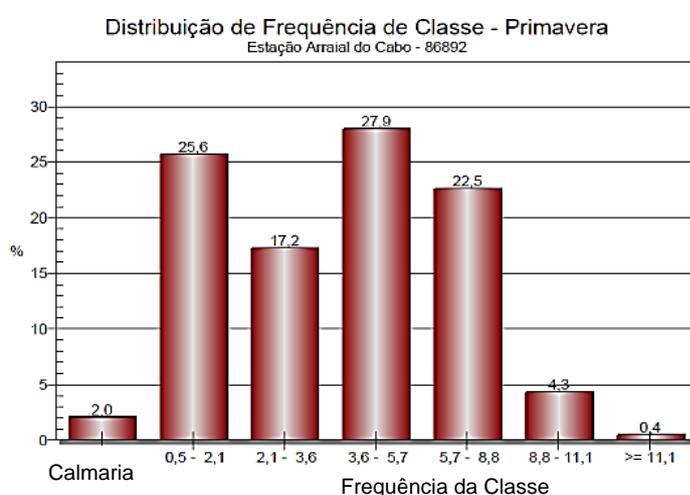
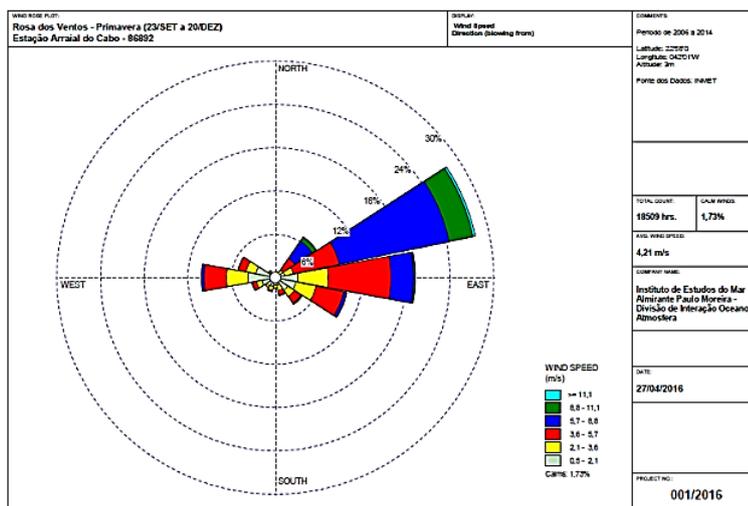


Figura 20: Predominância dos Ventos e Distribuição de Frequência de Classe para a estação da primavera no período de 2006 a 2014 (INMET, 2016).

3.4.5 Ondas

Devido à sua localização, a região é exposta a ondas originárias dos quadrantes norte e sul. As ondas do quadrante norte são formadas por ventos relacionados ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), com pista em torno de 500 km, tipo vaga ou *wind-sea*, com direção NE, período de pico de 8 s e altura significativa máxima de até 3,5 m, fora da enseada, sendo a média, no entanto, inferior a 2,0 m (CANDELLA, 1997).

As do quadrante sul estão associadas a tempestades originadas por frentes frias, podendo apresentar direções de origem entre sudoeste e sudeste em função do desenvolvimento de centros de baixa pressão associados a passagem de

sistemas frontais. Tais ondas podem ter geração local ou ocorrer na forma de ondulação (*swell*) (BRANCO, 2000). Dificilmente afetam as EAC.

De acordo com Candella (2000), as ondas do quadrante norte sofrem uma rápida diminuição da altura ao entrar na EAC devido ao processo de refração e difração.

De acordo com Fisch (1997), as ondulações de nordeste demonstram uma forte concentração de energia nos lados norte e leste da Ilha dos Porcos e na ponta leste da Ilha de Cabo Frio, que funcionam como obstáculos naturais à propagação das ondas.

Outra concentração de energia significativa é encontrada entre a parte noroeste da Ilha de Cabo Frio e o continente, região que possui abrupta variação de profundidades, agindo, também, como um obstáculo à propagação das ondas em direção ao Boqueirão Sul.

Idem, na praia dos Anjos é observada uma concentração de energia no flanco sul da praia, enquanto que o flanco norte é caracterizado pela ausência de ondas devido a presença do quebra-mar do Porto do Forno. A Enseada do Forno não apresentou qualquer concentração de energia.

4 Sistema de Modelagem Computacional

Utilizamos nesse estudo o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental²² ou simplesmente, SisBaHiA®, que é um sistema profissional de modelos computacionais que está em contínuo desenvolvimento no Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desde 1987, com ampliações de escopo e aperfeiçoamentos feitos através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos de água naturais.

Possui os seguintes módulos:

1. Modelo Hidrodinâmico;
2. Modelo de Transporte Euleriano;
3. Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização;
4. Modelo de Transporte de Sedimentos e Evolução Morfológica do Fundo;
5. Modelo de Transporte Lagrangeano – Determinístico;
6. Modelo de Transporte Lagrangeano – Probabilístico;
7. Modelo de Transporte Lagrangeano de Campo Próximo para emissários e Fontes Pontuais;
8. Modelos de Geração de Ondas;
9. Modelo de Propagação de Ondas;
10. Módulo de Análise e Previsão de Marés.

Antes de adentrar nos modelos propriamente ditos, é importante ressaltar as principais razões que motivaram o autor pelo uso do SisBaHiA®. Dentre estes, podemos destacar, uma interface de trabalho extremamente amigável, necessidade computacional reduzida que pode ser instalado em computadores pessoais de uso comum, possui código aberto que pode ser cedido por meio de uma solicitação formal, de domínio público, cedido gratuitamente para usos profissionais e

²² Maiores informações Referência Técnica do SisBaHiA®. Disponível em: <<http://www.SisBaHiA@coppe.ufrj.br>>. Acesso em: 04 abr. 2015.

acadêmicos, desde que não envolvam uso comercial, além de ser um sistema de concepção nacional, possuindo pessoal altamente qualificado para apoiar eventuais dúvidas surgidas além de poder desenvolver novas capacidades no uso do sistema.

Nesse estudo, utilizamos a versão 9aS13G12 (64-bit) e versaremos o Modelo Hidrodinâmico e de Transporte Lagrangeano – Probabilístico e Determinístico, os quais serão descritos a seguir.

4.1 Modelo Hidrodinâmico

O SisBaHiA® possui um modelo hidrodinâmico de linhagem FIST 3D (*Filtered in Space and Time 3D - Tridimensional*), otimizado para corpos de águas naturais. A linhagem FIST 3D representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*)²³. A versão FIST 3D resolve as equações completas de *Navier-Stokes* com aproximação de águas rasas.

O sistema de discretização espacial é otimizado para corpos de águas naturais, pois, permite ótima representação de contornos recortados, batimetrias complexas como de costume em sistema estuarinos e costeiros.

A discretização espacial é feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode, igualmente, ser feita via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos.

A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação *sigma*, de sorte que a discretização completa do domínio resulta em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível *Z* da transformação *sigma*.

²³ Para mais informações sobre o assunto, consultar o capítulo 3 do Volume 1 (1989) e o capítulo 3 do Volume 3 (1997) da série Métodos Numéricos em Recursos Hídricos da Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

O esquema de discretização temporal é via um esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem²⁴.

O modelo hidrodinâmico é uma forma simplificada dos complexos corpos d'água naturais que se pretende estudar. Assim sendo, o modelo utiliza aproximações que buscam minimizar tais problemas, focando apenas os principais fenômenos de interesse.

São consideradas no modelo hidrodinâmico do SisBaHiA®, as seguintes aproximações: hidrostática (onde se despreza a pressão dinâmica), de *Boussinesq* e a condição de fluido incompressível²⁵.

O modelo é composto por dois módulos:

1. Um módulo 2DH, que calcula correntes promediadas na vertical e a elevação da superfície livre. Por razões de eficiência numérica, o modelo FIST3D sempre inclui esse módulo.
2. Um módulo 3D que calcula o campo de velocidades tridimensionais.

Em modelagens hidrodinâmicas 3D, os dois módulos funcionam acoplados e são interdependentes. O módulo 2DH poderá ser executado como um módulo independente. Se for usado o campo de escoamento 3D, existirão duas opções disponíveis, e ambas serão acopladas ao módulo 2DH:

- Modelo 3D completo, totalmente numérico
- Modelo 3D analítico-numérico

No presente estudo, foi utilizado o modelo analítico-numérico para perfis de velocidade no campo de escoamento horizontal que permite uma solução que é função das velocidades 2DH promediadas na vertical, elevação da superfície livre, rugosidade equivalente de fundo, e da velocidade do vento atuando na superfície livre da água.

A formulação matemática do modelo hidrodinâmico é baseado nas seguintes equações, considerada equações de águas rasas:

- equações de *Navier-Stokes* que representam o princípio da conservação da quantidade de movimento;
- equação da continuidade;

²⁴ Para mais informações sobre o assunto, consultar Referência Técnica do SisBaHiA® (2014)

²⁵ *Idem*

- equação de estado;
- equação de transporte para cada constituinte da equação de estado.

Abaixo (figura 22), apresentamos o sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D e 2DH), onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, \hat{u}_i , representa a velocidade promediada na vertical e u_i representa a velocidade na direção x_i . Fazendo uso da notação indicial, temos que, $i = 1$ representa a componente na direção x , $i = 2$ representa a componente na direção y e $i = 3$ representa a componente na direção z . Temos também, ζ , que é a elevação da superfície livre, H , a altura da coluna d'água ou profundidade instantânea e h , a cota do fundo.

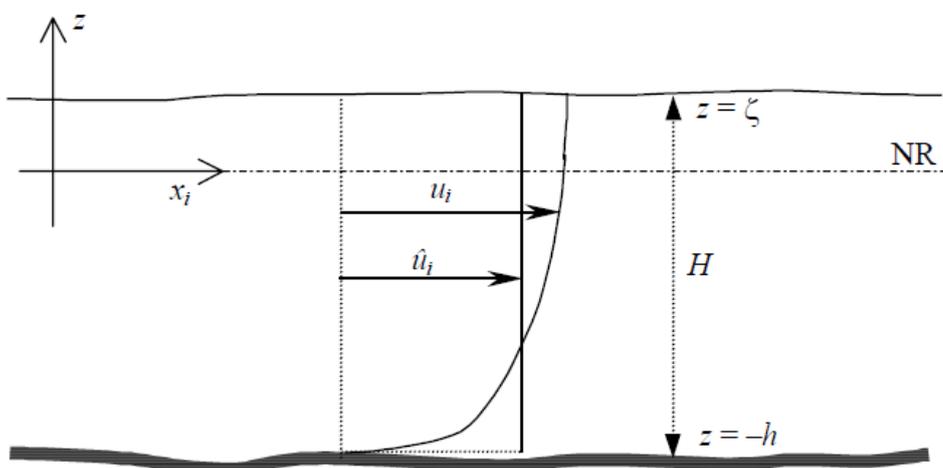


Figura 21: Esquema de coordenadas para os modelos 3D e 2DH, onde NR é o Nível de Referência. No caso 2DH, \hat{u}_i , representa a velocidade promediada na vertical. A profundidade instantânea $H = z \text{ sup.} - z \text{ fundo} = \zeta + h$, também é chamada de altura da coluna de água. (ROSMAN, 2014).

Para o cálculo das quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica 3D (u , v , w , e ζ) são necessárias quatro equações:

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} & \quad (1) \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \text{sen}\theta v \end{aligned}$$

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (2)$$

Onde:

- u , v e w são componentes da velocidade do escoamento nas direções x , y e z , respectivamente;
- ζ é elevação da superfície livre;
- g é a aceleração da gravidade;
- ρ é a densidade do fluido no local;
- ρ_0 é a densidade constante de referência;
- Φ é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local; e
- θ é o ângulo de latitude (em radianos).

$\frac{\partial u}{\partial t}$ e $\frac{\partial v}{\partial t}$ → representam a aceleração local do escoamento, isto é, em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esses termos são iguais a zero.

$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$ → representa a aceleração advectiva do escoamento, ou seja, em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos advectivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x e y , por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ e $-g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$ → representam a variação da pressão hidrostática na direção x e y gradiente de pressão, devido à declividade da superfície livre na direção x e y . Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para lugares onde o nível de água é mais baixo.

$-\frac{1}{\rho_0} g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \rightarrow$ representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade (ρ/ρ_0). Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamento de lugares onde a água é mais densa para lugares onde a água é menos densa, gerando efeitos de empuxo que tendem a deixar no fundo a água mais densa.

$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$ e $\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \rightarrow$ representam a resultante das tensões turbulentas dinâmicas no escoamento, isto é, em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos difusivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x e y , por unidade de massa. Entre outras coisas, é através desses termos que o escoamento sente o atrito do fundo e a ação do vento sobre a superfície livre, gerando os perfis de velocidade.

$+2\Phi \text{sen}\theta v$ e $-2\Phi \text{sen}\theta u \rightarrow$ representam a aceleração de *Coriolis* decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, assim como em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a área do presente estudo.

Abaixo segue a aproximação de incompressibilidade do fluido através da equação da continuidade (do volume) – faz com que uma massa fluida escoe de forma incompressível, independente da forma, mas, permanecendo com o mesmo volume durante seu movimento.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

A equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical: possui o mesmo significado da equação acima, porém, sua forma possui a variação da coluna de água ($\zeta + h$) ao longo do tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna de água nas direções x e y respectivamente. Nela supõe-se uma batimetria constante durante todo o período simulado e a imposição da condição de escoamento incompressível.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (4)$$

É através do termo resultante das tensões turbulentas dinâmicas das equações de quantidade de movimento, supracitadas, que o modelo calcula o atrito no fundo e o atrito do vento sobre a superfície livre.

A tensão do atrito do fundo é calculada através do termo resultante das tensões turbulentas dinâmicas e é dada pela expressão abaixo:

$$\tau_i^F = \rho_0 \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u^*| \cdot \hat{u}_i \quad [i=1,2] \quad (5)$$

Onde:

τ é a tensão de atrito no fundo na direção x_i , sendo $i = 1$ ou 2 (N/m²);

ρ_0 é a massa específica da água;

\hat{u}_i é a velocidade promediada na vertical do escoamento na direção x_i (m/s);

u^* é a velocidade de atrito característica, função do perfil de velocidades (m/s).

O Coeficiente de Chézy (Ch) é assim definido:

$$C_h = 18 \cdot \log\left(\frac{\epsilon H}{\epsilon}\right) \quad (6)$$

Onde:

H = Altura da coluna d'água (m); e

ϵ = Amplitude da rugosidade equivalente do fundo (m).

Importante ressaltar, que este cálculo da tensão de atrito no fundo é para o módulo 2DH acoplado ao módulo 3D, utilizado neste trabalho. O valor de ϵ é verificado com mais detalhes na seção 5.6.

No modelo hidrodinâmico 3D, a tensão do atrito na superfície livre devido ao vento é dada por:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} \cdot C_D \cdot W_{10}^2 \cdot \cos \phi_i \quad [i=1,2] \quad (7)$$

onde:

τ_i^S é a tensão de atrito na superfície livre devido ao vento na direção x_i , sendo i

igual a 1 ou 2 (N/m²);

ρ é a densidade do ar (kg/m³);

C_D é o coeficiente de arraste do vento, onde: $C_D = (0,80 + 0,065 \cdot W_{10}) \cdot 10^{-3}$;

W_{10} é a magnitude da velocidade do vento local medida na cota de 10 m acima da superfície livre (m/s); e

ϕ_i é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção x_i (rad).

4.2 Modelo de Transporte Lagrangeano

Segundo Rosman (2015), o transporte Lagrangeano é ideal para simular o transporte de escalares que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna de água, tornando-o mais adequado para simular o transporte de manchas ou plumas de contaminantes que sejam pequenas em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico ou que apresentem fortes gradientes.

No modelo Lagrangeano, o transporte de uma massa de contaminante é simulada pelo movimento de partículas lançadas que são advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. Dedicar-se a observar a trajetória da partícula, em oposição à observação do movimento como um todo.

No instante de lançamento, cada partícula é posicionada aleatoriamente dentro da área fonte. A relação entre o número de partículas lançadas e a vazão do contaminante na unidade de tempo (concentração X vazão da fonte) permite calcular a massa M de cada partícula lançada. Dada uma vazão Q_s na fonte e uma concentração C_s de um contaminante, determina-se a massa equivalente de contaminante em cada partícula lançada pela seguinte expressão²⁶:

$$M = \frac{Q_s C_s \Delta t}{N_p}$$

onde $\frac{N_p}{\Delta t}$ é o número de partículas lançadas por intervalo de tempo.

O transporte advectivo da nuvem das partículas já lançadas, em cada instante, é definido através da trajetória de cada partícula, calculando-se sua

²⁶ Disponível em: < http://www.lemma.ufpr.br/wiki/images/b/be/Modelo_lagrangeano.pdf>. Acesso em: 20 de dez. 2015.

posição a cada tempo $(n + 1)\Delta t, P^{n+1}$. Para tal utiliza-se expansão em série de Taylor a partir da posição anterior P^n , no instante $n\Delta t$, como indicado²⁷:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2P^n}{dt^2} + T.A.O$$

onde T.A.O são termos de alta ordem desprezados.

As derivadas temporais da posição, P , são obtidas a partir do campo de velocidades calculado pelo modelo hidrodinâmico da seguinte forma:

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \quad (10)$$

onde:

$$\frac{d^2P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (11)$$

As velocidades, $\vec{V}(u, v, w)$, para o transporte advectivo das partículas, seguem as velocidades das correntes do corpo receptor, que variam temporal, e espacialmente, de acordo com as forçantes locais. No caso das EAC, somente a maré e o vento. Vale ressaltar, que o contaminante é considerado passivo, sendo que sua presença não interfere com a hidrodinâmica do ambiente receptor.

No caso de simulações de manchas de óleo, o transporte lagrangeano pode receber qualquer curva de perda de massa. No presente estudo, utilizaremos as curvas de decaimento do programa ADIOS2²⁸ (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*) em sua segunda versão, desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Maiores detalhes na seção 5.9.

²⁷ *Idem.*

²⁸ O programa ADIOS2 foi desenvolvido pela Hazardous Materials Response Division (HAZMAT) do Office of Response & Restoration (OR&R) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) do Governo dos Estados Unidos da América. O ADIOS2 é disponibilizado gratuitamente na Internet.

Conforme citado anteriormente, o SisBaHiA® possui 3 módulos de transporte lagrangeano, porém, no presente estudo, serão utilizados o Probabilístico e o Determinístico.

O modelo Probabilístico quando acoplado ao modelo hidrodinâmico, permite obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de N eventos ou de resultados ao longo de um período de tempo. Pode apresentar resultados diversos, como: probabilidade de toque no litoral; probabilidade de passagem de manchas ou plumas de contaminantes; probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite; e probabilidade de passagem com tempo de vida inferior a um limite dado²⁹.

O modelo Determinístico quando acoplado ao modelo hidrodinâmico, permite a simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH, usado para simulações de derrames de óleo, instantâneos ou por período definido³⁰.

No SisBaHiA®, tal modelo também é da linhagem FIST, pois, faz uso da modelagem de turbulência via simulação de grandes vórtices para a difusão e dispersão de partículas.

²⁹ Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>>. Acesso em: 20 de ago. de 2015.

³⁰ *Idem*.

5 Modelagem Digital do Terreno

Este capítulo é dividido em quatro partes onde são apresentados os dados utilizados para confecção do modelo digital do terreno da área a ser estudada.

Antes de adentrar na confecção da modelagem digital do terreno, cabe apresentar ao leitor os principais pontos de referência (figura xx) utilizados no presente

trabalho.

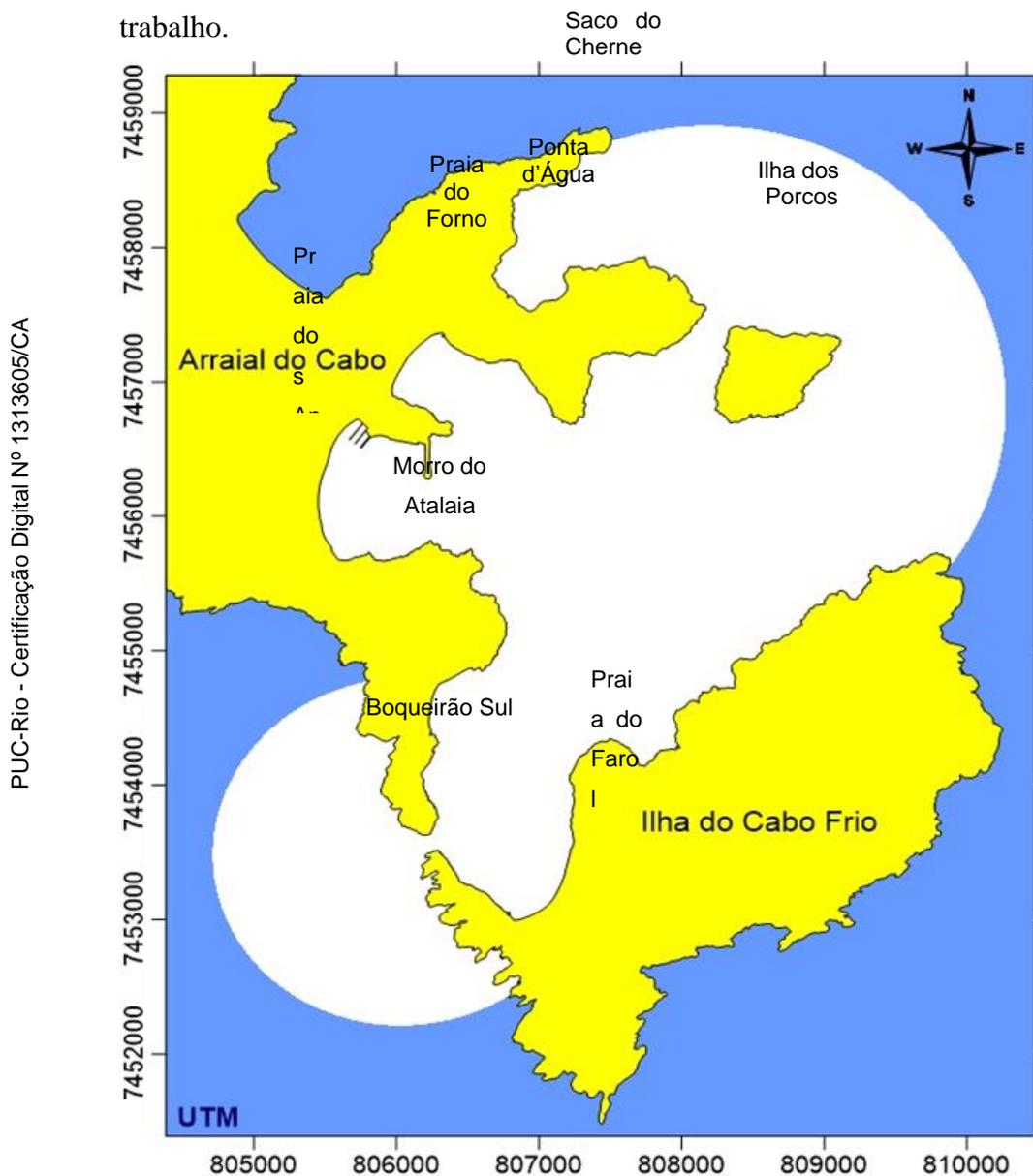


Figura 22: Localização dos principais pontos de referência usados no presente trabalho.

5.1 Contornos de terra e de mar

Para realização da modelagem digital é imprescindível a delimitação dos contornos da região de estudo. Dois tipos de contorno foram realizados: contornos de terra que representam as margens do domínio de modelagem e o contorno de mar, ou fronteira aberta, que representa um limite que demarca seu domínio em água.

5.1.1 Contorno de Terra

O domínio da modelagem do presente estudo abrange o contorno das Enseadas de Arraial do Cabo, incluindo, as ilhas dos Porcos e Cabo Frio, as praias dos Anjos, do Forno, do Farol, as Prainhas do Atalaia e o Saco do Cherne compreendidas entre as latitudes 22° 57,7' S e 23° 00,19'S e longitudes 41° 58,7'W e 42° 01,2'W.

Os contornos de terra representam as margens do domínio de modelagem, assim como as ilhas. Estes foram obtidos por meio da digitalização através de imagens de satélite do *Google Earth*³¹, acessadas durante o mês de março de 2015. Os contornos foram representados em coordenadas UTM (WGS84 – Zone 23S) e então desenhados através do programa computacional *Surfer 12*³².

5.1.2 Contorno do Mar

O contorno do mar representa o encontro da massa d'água a ser modelada com a massa d'água exterior. Foi definida de forma que toda a região de interesse estivesse inserida no domínio e suficientemente afastada do contorno de mar.

Em baías e estuários são comuns haver imprecisão quanto às condições de contorno a serem prescritas. Com a região de interesse devidamente afastada, propicia-se que o próprio escoamento do modelo possa se reajustar às condições topo-hidrográficas anulando essas incertezas.

³¹ Disponível em: <<http://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 11 de mar. de 2015.

³² Maiores detalhes sobre o programa Surfer 12 podem ser obtidos no endereço eletrônico <<http://www.goldensoftware.com>>.

A digitalização da fronteira aberta também foi realizada através do *Google Earth* e desenhados através do *software Surfer 12*.

5.2 Malha de Discretização

A malha de discretização é de fundamental importância para que o modelo hidrodinâmico apresente resultados satisfatórios, captando o fenômeno de interesse. Durante sua confecção, buscou-se inserir os elementos seguindo as margens do contorno do domínio e equilibrar sua densidade conforme o grau de detalhamento necessário.

A malha de discretização (figura 23), no domínio da área de estudo, foi confeccionada através da ferramenta de geração de malhas, o *software Argus ONE Student Version 4.2.0q*³³. A partir desse momento, a malha, somente com nós nos vértices, foi importada para o SisBaHiA®, onde os nós no meio dos vértices e no meio do elemento foram gerados.

Procurou-se desenhar a malha de forma homogênea, porém com uma discretização mais refinada na área do Boqueirão Sul, local para calibração do modelo. O domínio de modelagem foi discretizado através de uma malha que se subdividiu em 1.295 elementos finitos biquadráticos, contabilizando 5.570 nós no plano horizontal, sendo que 678 perfazem parte do contorno de terra, 106 do contorno aberto, 4 fazem parte do contorno terra/aberto e 4790 são nós internos.

A área da malha possui 17.232.925,245 m², seu volume de água tem 439.279.052,492 m³ e profundidade média de 25,491 metros.

³³ Maiores detalhes sobre o *software Argus One* podem ser obtidos no endereço eletrônico www.argusone.com.

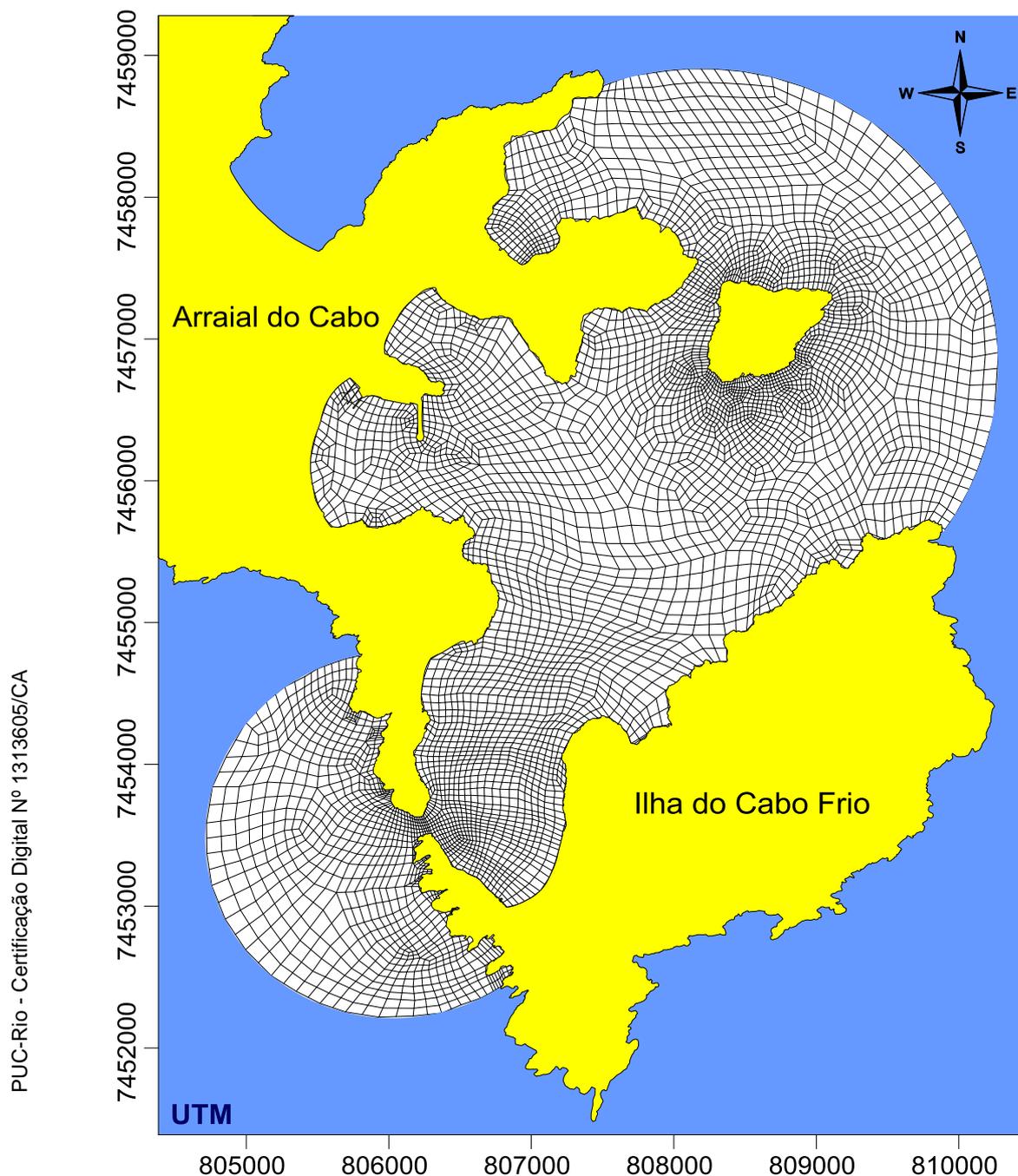


Figura 23: Domínio modelado na EAC, indicando a malha de discretização em elementos finitos quadrangulares biquadráticos com linhas internas interligando os nós dos elementos.

5.3 Dados Batimétricos

As informações referentes à batimetria da região foram retiradas da Carta Náutica nº 1503 confeccionada pela DHN: Enseadas do Cabo Frio. Escala 1:20.000 (figura 24).

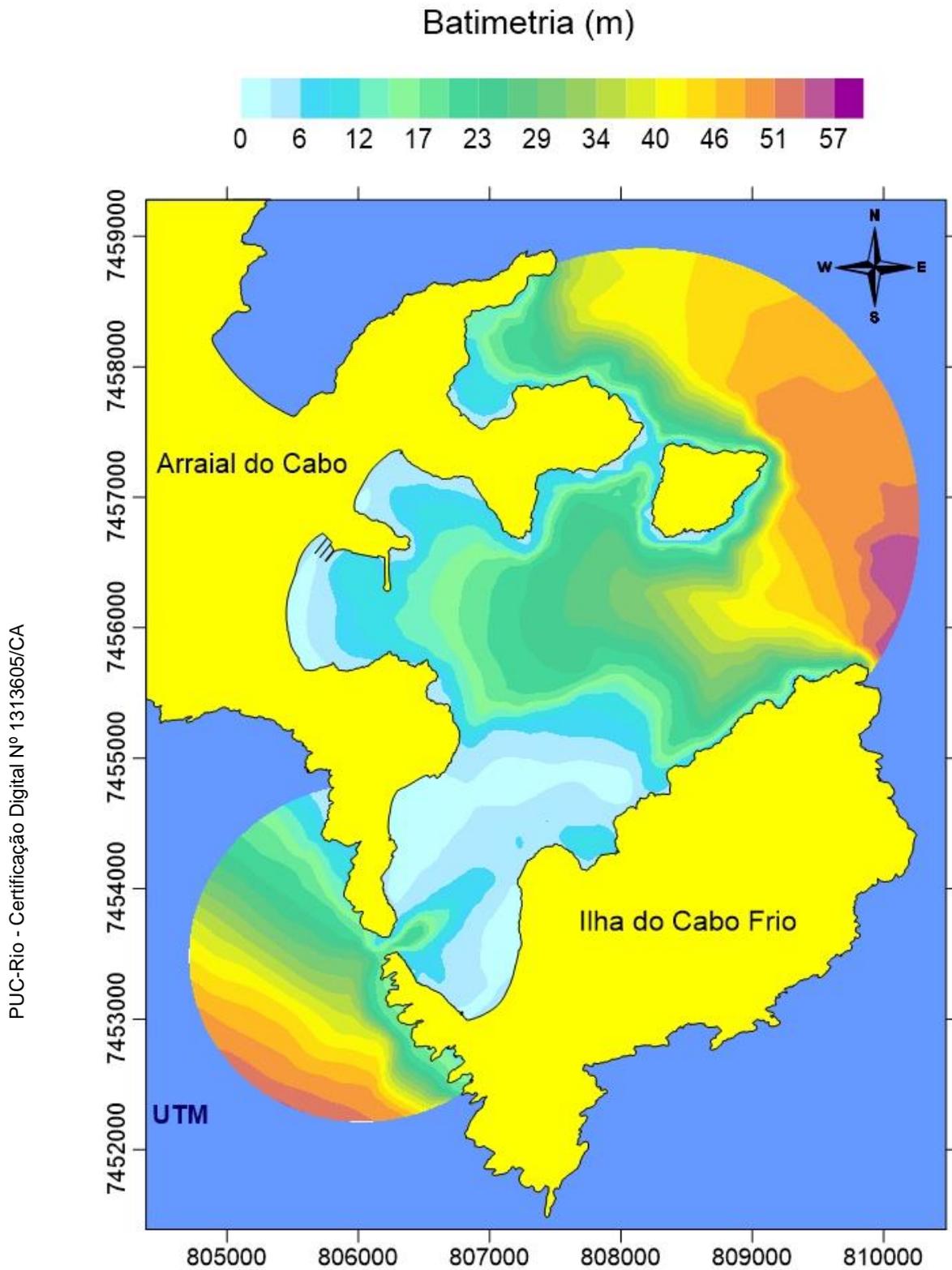


Figura 25: Batimetria da região de estudo interpolada por triangulação linear a partir dos dados da carta náutica nº 1503 da DHN através do programa computacional *Surfer 12*.

5.4 Rugosidade Equivalente de Fundo

O modelo hidrodinâmico admite especificação pontual do tipo do material de fundo. Usa interpolação biquadrática para os valores da rugosidade equivalente do fundo, que retrata o tipo de material existente na posição, por exemplo, pedra, areia, lama, vegetação, proporcionando ótima acurácia na representação física do leito, além disso, permite que o atrito no fundo, seja variável no tempo e no espaço.

A tensão de atrito no fundo é influenciada diretamente pelo tipo de material que compõe o leito do corpo d' água. Com base na natureza do fundo, em cada local do domínio de modelagem, devemos aplicar a sua amplitude de rugosidade equivalente coerente com a realidade local.

Na tabela 2 de Rosman (2014) adaptado de Abbot e Basco (1989), seguem os valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D.

Tabela 02: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. Fonte: Rosman (2015) adaptado de Abbot e Basco (1989).

Leito de sedimentos com rugas e similares	
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)	$0.1500\text{m} < \varepsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
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 ($d_{50} < 3\text{ cm}$)	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias ($d_{50} < 8\text{ cm}$)	$0.0150\text{m} < \varepsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras ($d_{50} < 20\text{ cm}$)	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas ($d_{50} < 50\text{ cm}$)	$0.1000\text{m} < \varepsilon < 0.2500\text{m}$
Fundo de Concreto:	
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	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$

5.4.1 Dados Locais

No trabalho de Mega *et al.* (2015) realizado na área de testes do IEAPM, localizado na frente da Praia do Farol, os resultados indicaram a presença de sedimento composto, predominantemente, por areia fina quartzosa.

Foi verificado que esses resultados correspondem à ausência do aporte de partículas transportadas por rios, que são geralmente, mais finos. A baixa hidrodinâmica local não permite a abrasão das partículas, contribuindo com a redução da granulometria, principalmente se constituídas por mineral mais resistente como o quartzo (*idem*).

No trabalho realizado por Savi (2002), tendo como área de estudo, a praia dos Anjos, o cais dos Pescadores e o Porto do Forno (figura 26) foi constatada a ausência de lamas (silte e argila) na praia, devido a já citada ausência de rios desembocando na enseada.

Quanto à granulometria, observa-se, na zona rasa, a predominância de areias finas com a exceção feita a duas áreas, uma de sedimentos grossos (areia com cascalho), no limite entre o flanco sul e o centro da praia, e outra, entre o flanco norte e o centro da praia, apresentando uma situação inversa, um depósito de areia lamosa.

A zona intermediária apresenta as mesmas características da parte rasa. Na zona mais profunda desse estudo, existe a predominância de areia média.

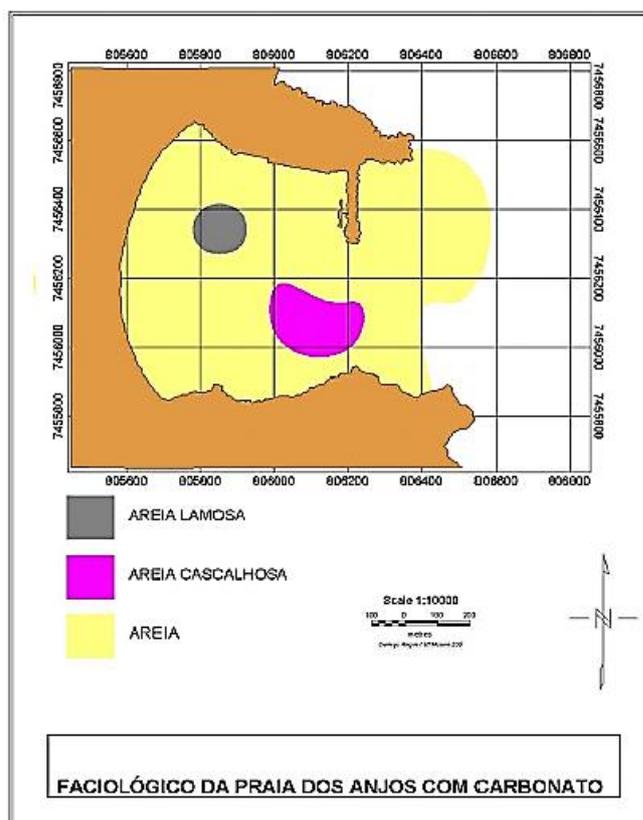


Figura 26: Distribuição do material de fundo na Enseada dos Anjos apresentando uma região entre o centro e o flanco norte da praia com areia lamosa. Uma região com areia cascalhosa entre a parte sul do mole do porto do Forno e a costa sul da enseada. Demais áreas predominantemente compostas de areia fina (SAVI, 2002).

Demais dados de sedimentos foram retirados da Carta Náutica 1503 da DHN (figura 24).

Observou-se a presença de cascalhos e areia cascalhosa no Saco do Cherne, ao norte da Ilha dos Porcos. Lama e areia lamosa estão localizadas nas proximidades do limite da fronteira aberta, no quadrante NE, afastado, aproximadamente, de 900 metros da costa. O quadrante SW é composto basicamente de areia sem um detalhamento específico, sendo considerado pelo autor como areia média.

Assim como realizado nos dados batimétricos (item 5.3), os pontos digitalizados foram interpolados com o auxílio do programa computacional *Surfer12* através do método triangulação linear, aplicando uma pequena suavização à rugosidade equivalente de fundo da região, de forma a não alterar as características originais da área em estudo.

A figura 27 apresenta um mapa com a distribuição da amplitude da rugosidade equivalente do fundo considerada para as simulações realizadas com o modelo.

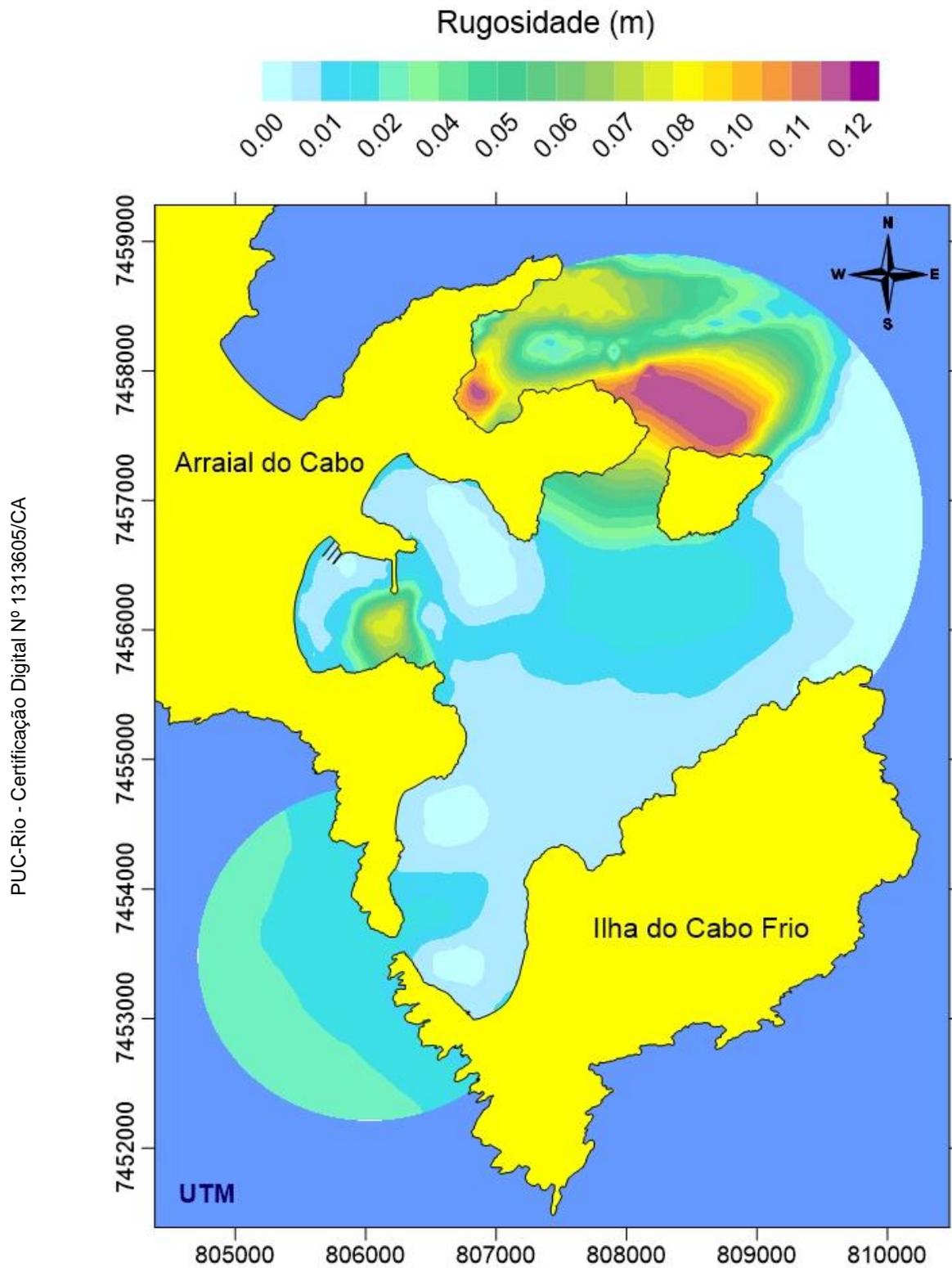


Figura 27: Distribuição da amplitude da rugosidade equivalente do fundo considerada nas simulações do modelo. Variando entre 0.001 m (areia lamosa) e 0.120 (cascalho).

6 Modelo Hidrodinâmico

Durante o desenvolvimento deste capítulo são apresentados as forçantes barotrópicas utilizadas para a circulação do modelo, o processo de calibração do mesmo com dados advindos do ADCP e, por fim, criou-se três cenários hidrodinâmicos.

Foram simulados quarenta e cinco dias, do dia dezenove de julho a dois de setembro do ano de 1999. Este período, compreende, mais do que um ciclo lunar completo que dura aproximadamente 29,5 dias.

Os dados de velocidade médias na coluna d'água (modelo 2DH), obtidos em cada nó da malha computacional foram gravados em intervalos de 30 minutos durante todo o período simulado e, a partir destes, foi possível descrever o padrão de circulação das EAC.

6.1 Dados de Maré

Os dados de maré foram fornecidos pela Divisão de Dinâmica Costeira e Estuarina do IEAPM para o período do estudo, meses de julho, agosto e setembro de 1999, retiradas da Estação Maregráfica da Enseada dos Anjos, localizada no Porto do Forno, latitude 22° 58,3' S e longitude 42°00,9' W (FEMAR, 2016).

No ano de 1999, o IEAPM possuía uma estação analógica com nível de redução de 1,21 metros. Hoje, o Instituto já possui uma estação digital (figura 28).

Nos próximos gráficos são apresentadas as séries de variações temporais do nível da maré filtrada fornecidos pela estação maregráfica do IEAPM, e os valores das correntes medidas pelo ADCP, tanto na Componente Zonal (U) e a Componente Meridional (V), com intuito de buscar alguma correlação.

Os resultados do ADCP foram transformados em componentes vetoriais da corrente. A Componente Zonal (U) e a Componente Meridional (V) foram obtidas através das seguintes equações:

$$U=M.\text{sen}(\phi);$$

$$V=M.\text{cos}(\phi);$$

Onde:

M = Magnitude da corrente (m/s);

ϕ = Azimute.



Figura 28: Marégrafo do Porto do Forno. Arquivo IEAPM.

Para os cálculos do azimute foi adicionada a declinação magnética ($21^{\circ} 39'$ W), obtida através da carta náutica nº 1503 (figura 24). A partir destes valores, foram retiradas as influências de períodos inferiores a 25 horas (principais componentes de maré), só restando fenômenos de duração superior a um dia.

Abaixo, podemos observar, uma significativa influência entre o nível médio do mar e as médias móveis das correntes medidas, tanto na Componente Zonal (U) e a Componente Meridional (V) (figuras 29 e 30).

Os dados observados demonstram uma correlação significativa da maré com as intensidades de correntes medidas pelo ADCP. Observa-se a alternância do sentido do fluxo, conforme o período de maré. Este dado serviu como base para estipular as condições iniciais da fronteira aberta no modelo.

Na prescrição das condições de contorno do modelo hidrodinâmico, optou-se pelos dados fornecidos pelo marégrafo do IEAPM para os meses de julho, agosto e setembro de 1999, decorrente da relação entre a maré e os valores fornecidos pelo ADCP.

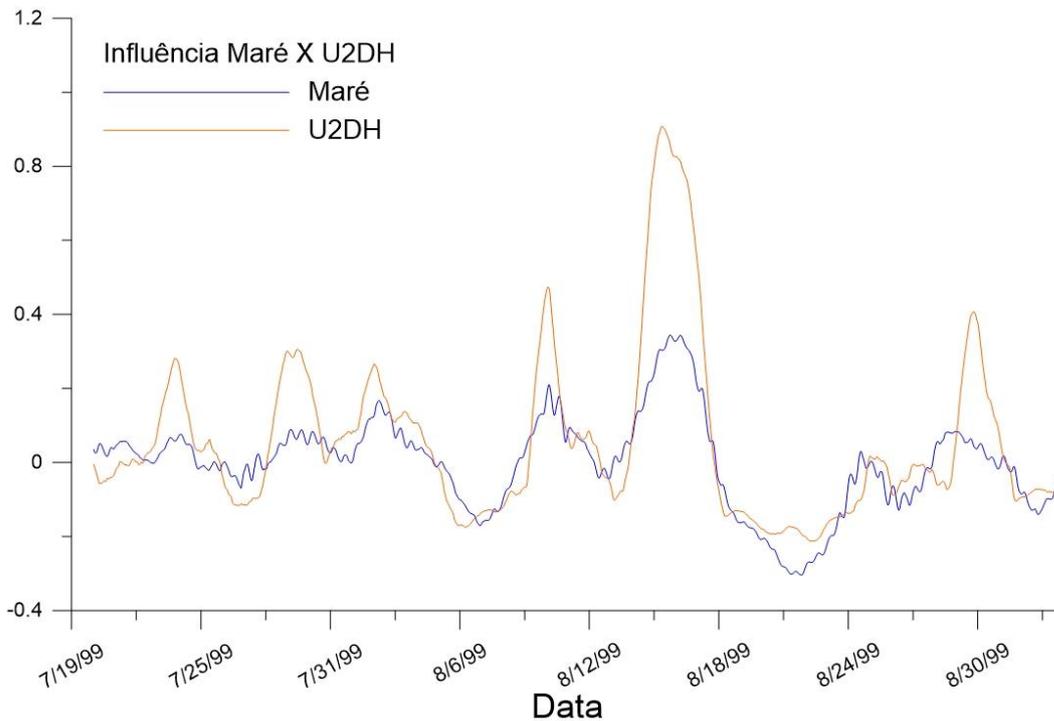


Figura 29: Relação entre as médias móveis da maré e da componente zonal (U) providas pelo ADCP.

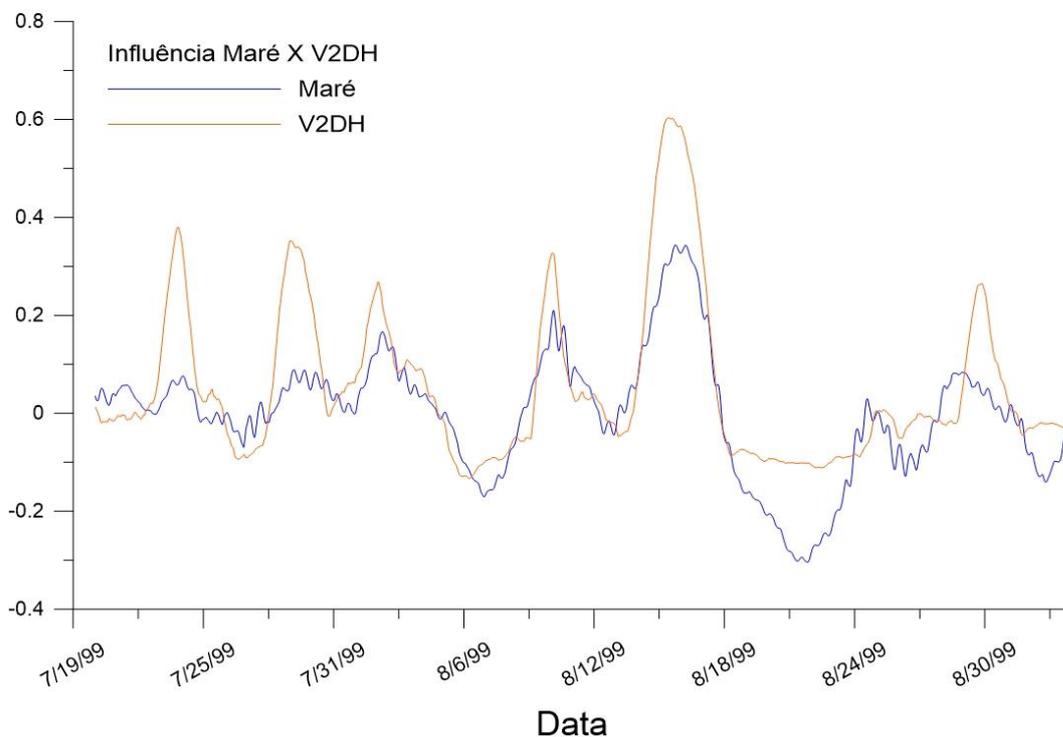


Figura 30: Relação das médias móveis da maré e da componente meridional (V) providas pelo ADCP.

Para Pecly (2008), a aplicação de uma série temporal representando o nível d'água como condição de contorno em modelos hidrodinâmicos requer:

- a não existência de lacunas;

- dados livres de ruídos, para evitar oscilações numéricas devido à geometria da malha;
- dados representando de forma adequada o padrão de marés astronômicas e os efeitos da maré meteorológica.

6.2 Dados de Vento

Como citado no item 4.4.4, a estação meteorológica de superfície automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Arraial do Cabo começou a operar apenas em 2006 e as medições realizadas pelo ADCP do estudo são de 1999, destarte, os dados, para inserção no modelo foram fornecidos pela Estação Meteorológica da Base Aérea de São Pedro d'Aldeia, localizada na Latitude 22° 00' 49'' S e Longitude 042° 05' W.

Os dados foram fornecidos para os seguintes horários 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h no fuso OSCAR, havendo necessidade de interpolação dos mesmos. O método de interpolação utilizada foi a quadrática. As intensidades foram inseridas em (m/s) e as direções em azimute.

A Base Aérea de São Pedro da Aldeia possui observações a uma altura de 19 metros em relação ao nível do mar, não coincidindo com o nível de 10 metros de referência que é adotado pelo SisBaHiA®. Para o ajustamento do nível foi usado a regra prevista no *Coastal Engineering Manual* (CEM, 2008), onde z é a medida em metros.

$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7}$$

Outro ajuste que foi realizado, refere-se à relação de diferença entre a intensidade dos ventos sobre o mar e sobre a terra. Isto se deve a diferença de rugosidade, entre estas superfícies, que é uma função da intensidade do vento, fazendo com que a relação entre as intensidades de vento sobre o mar e sobre a terra sejam não-lineares, conforme podemos verificar na figura 31 (*idem*).

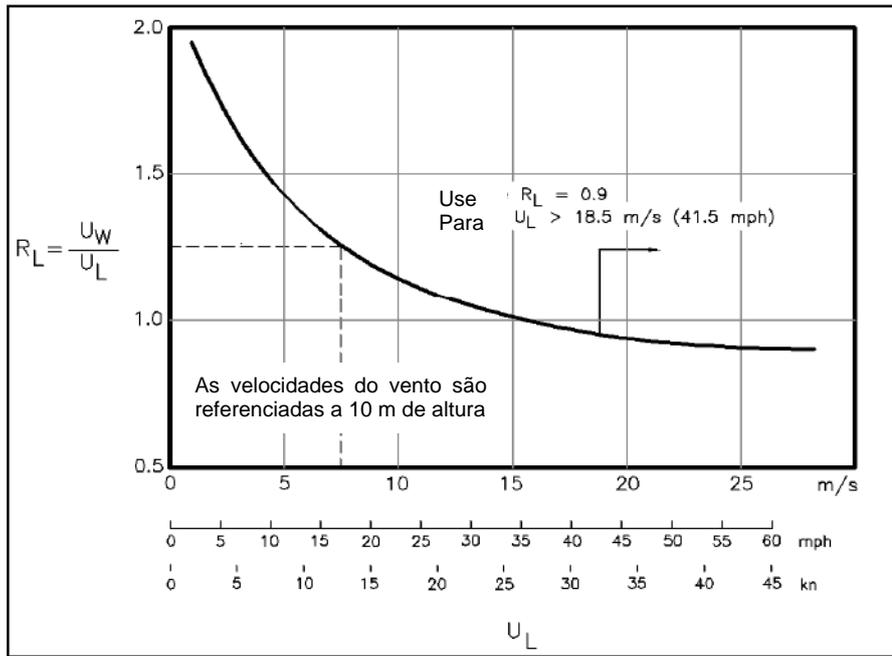
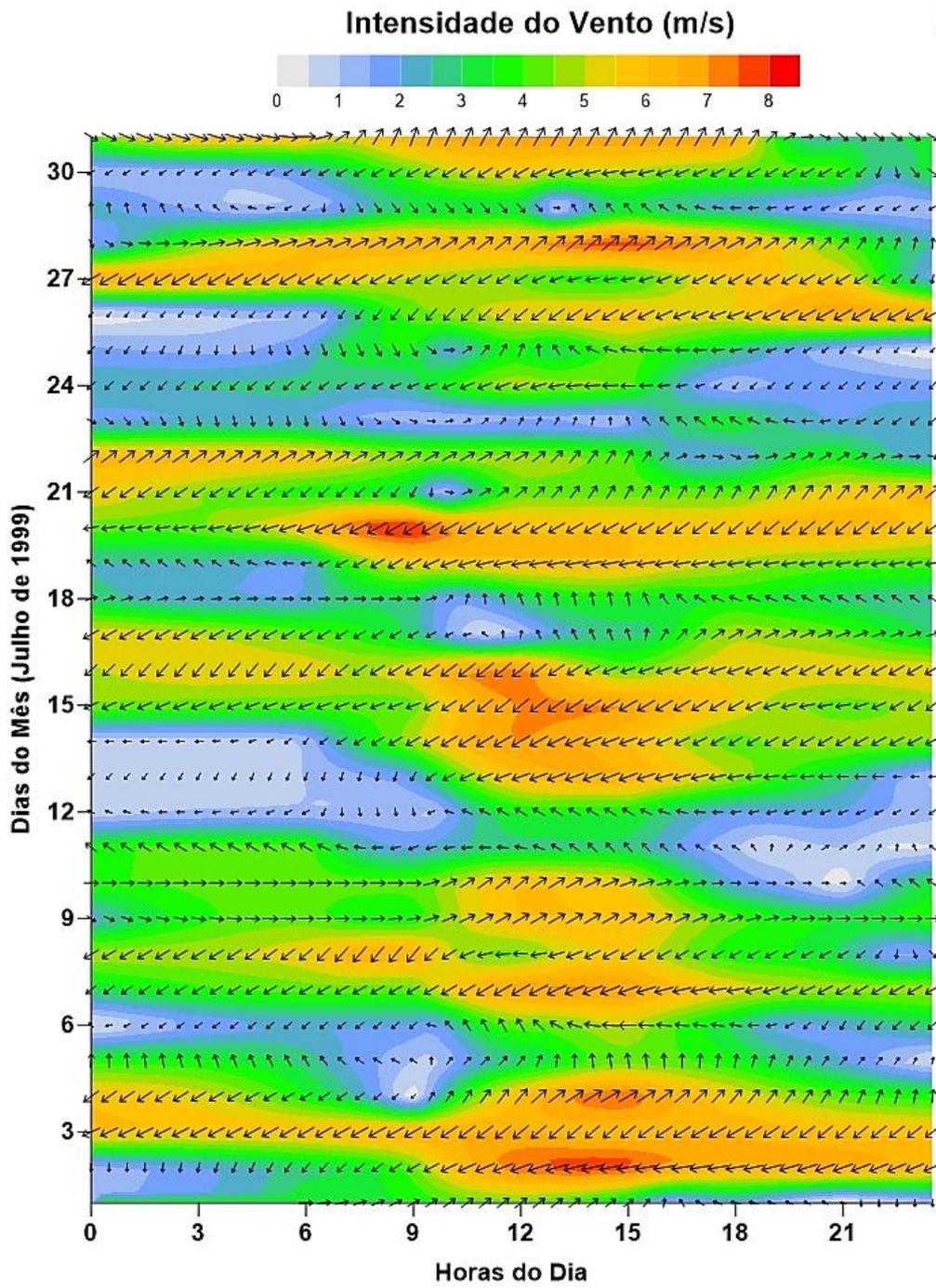


Figura 31: Razão entre as intensidades de vento mar/terra para um nível de 10 metros (CEM, 2008)

Para que o modelo hidrodinâmico calcule a tensão de atrito do vento na superfície livre é necessária a prescrição de valores de velocidades e direções do vento para cada nó da malha computacional em um mesmo instante de tempo. Para a inserção dos dados no modelo considerou-se campos de ventos variável no tempo (30 em 30 minutos) e homogêneo no espaço. As condições de vento para o período estudado estão apresentadas nas figuras 32, 33 e 34.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313605/CA

Figura 32: Direção e intensidade do vento para o mês de julho de 1999. Fonte: Marinha do Brasil - BAENSPA.

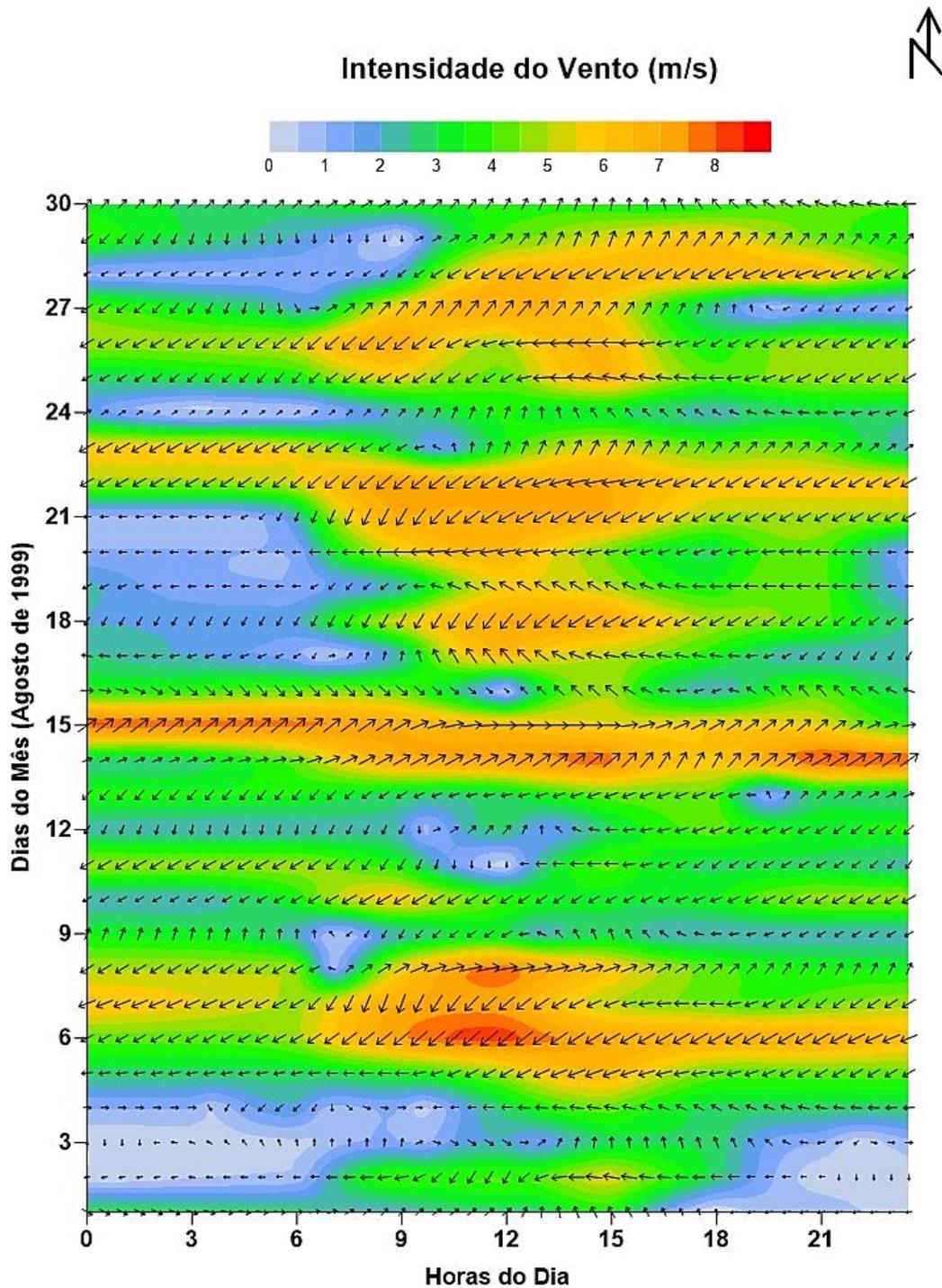


Figura 33: Direção e intensidade do vento para o mês de agosto de 1999. Percebe-se ventos mais fortes no período da tarde e ventos com menor intensidade no período da manhã. Fonte: Marinha do Brasil - BAENSPA.

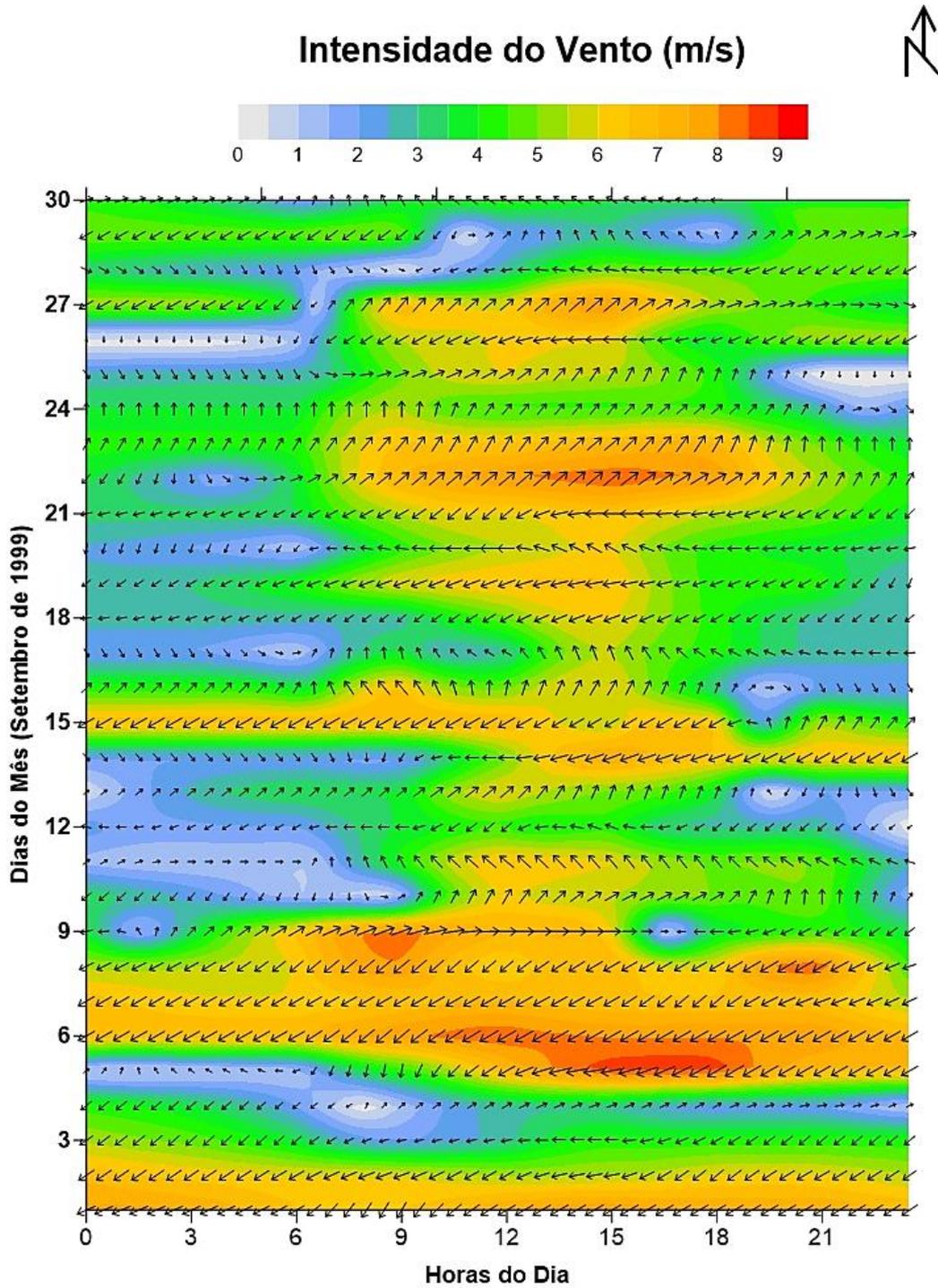


Figura 34: Direção e intensidade do vento para o mês de setembro de 1999. Fonte: Marinha do Brasil - BAENSPA.

6.3 Calibração

Durante a calibração foram usados os dados do ADCP que serão apresentados abaixo e mais adiante o desenvolvimento do processo de calibração aplicado ao modelo.

6.3.1 Aplicação de Perfiladores Acústicos

Neste item é descrito o fundeio de um ADCP realizado no estudo de Branco (2000). Foi utilizado um Perfilador Acústico Doppler de Corrente (ADCP), da marca RD *Instruments Workhorse Sentinel* modelo WH 300 KHz equipado com sensor de temperatura, na posição de latitude de 22° 59.861' S e longitude de 42° 00.664 W, a uma profundidade de 23 metros no Boqueirão Sul, entre a Ilha do Cabo Frio e a parte mais a leste do Morro do Atalaia (figura 35).

Os ADCP são sonares ativos que utilizam a energia acústica e o efeito *doppler*³⁴. Seu uso, em águas costeiras, consiste na medida de perfis de velocidades e correntes (PECLY, 2008).



Figura 35: Posição do fundeio do ADCP, latitude de 22° 59.861' S e longitude de 42° 00.664 W, profundidade 23 metros. (BRANCO, 2000).

Imagem: Google Earth (2015).

³⁴ O movimento das partículas na água causa variações na frequência do eco. O ADCP mede essas variações, o efeito Doppler, como uma função da profundidade para obter a velocidade da corrente em posições diferentes na coluna d'água (GUIMARÃES *et al.*, 2016).

O instrumento foi configurado conforme a tabela 3, onde foram coletados por meio do equipamento, dados em dezoito níveis, ao longo da coluna d'água, para os valores da magnitude da corrente e da direção, e um nível para os valores de temperatura no fundo (BRANCO, 2000).

Tabela 03: Descrição das configurações utilizadas no ADCP por Branco (2000).

Número de células de profundidade (Bins)	18 (14 válidos)
Tamanho da célula	100 cm
Nº de pulsos para médias (<i>pings per ensemble</i>)	15
Intervalo de amostragem	5 min
Declinação magnética	21°39' W
Distância ao primeiro Bin	301 cm

6.3.2

Processo de Calibração

O modelo hidrodinâmico foi concebido para permitir adequada simulação de trocas entre duas massas de água passando pelo estreito do Boqueirão. Deste modo, além de incluir a massa de água no recinto da EAC, o domínio de modelagem estende-se para o sul, cobrindo parte da zona costeira externa ao sul do estreito.

A primeira massa de água está entre a fronteira aberta do quadrante NE e o estreito do Boqueirão Sul, englobando toda EAC. A segunda, entre a fronteira aberta do quadrante SW e o mesmo estreito. Com essas duas porções de água sendo separadas pelo estreito, foi calculado um desnível entre elas de forma a gerar o efeito de circulação dentro da enseada.

Para o cálculo do desnível, foi simulada a existência de um canal no estreito do Boqueirão Sul (figura 32), através da equação de *Chézy* para escoamento permanente e uniforme em canais com superfície livre, o resultado foi calibrado conforme os dados do ADCP.

Cálculo do desnível:

$$\partial\zeta = \frac{U^2 \partial x}{C_h^2 H}$$

Onde:

$\partial\zeta$ = desnível da superfície livre;

C_h = coeficiente de Chézy;

Foram adotados os seguintes valores:

ε = amplitude da rugosidade equivalente do fundo, no caso adotado o valor de 0.0291m (predominância de areias médias);

∂x = comprimento do canal (100 metros);

$|U|$ = velocidade variável no tempo;

H = profundidade média da seção transversal (20 metros).

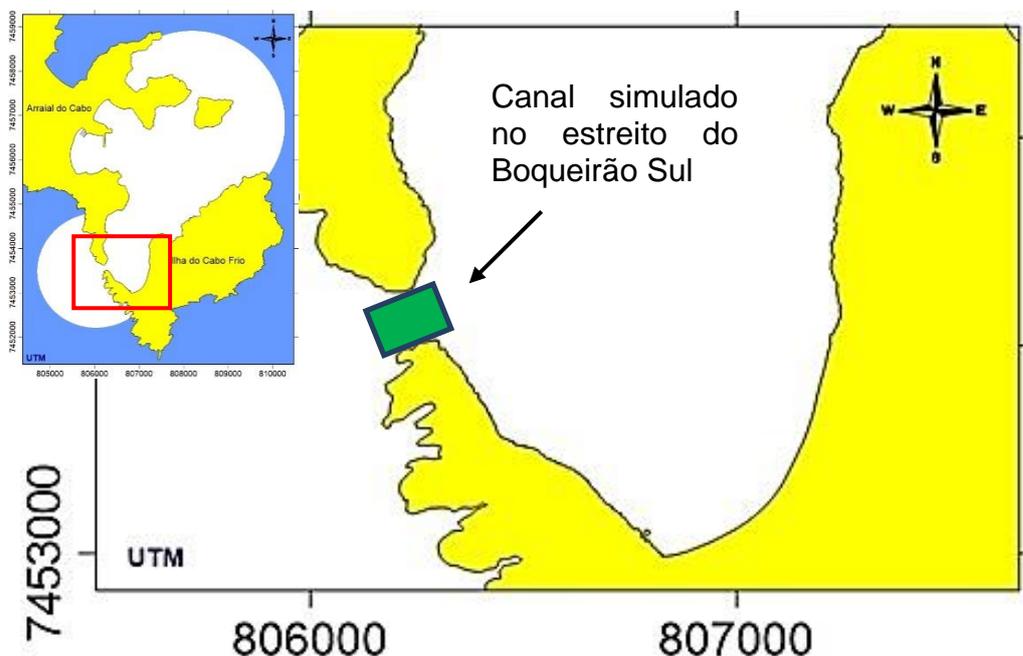


Figura 36: Processo de calibração para cálculo do desnível da superfície livre, simulando a existência de um canal escoamento permanente e uniforme no Boqueirão Sul.

A partir do desnível calculado, os valores da elevação foram estipulados para cada nó da fronteira, sendo a do quadrante NE criada a partir dos dados provenientes da estação maregráfica do IEAPM. Neste momento, foi calculada a média da elevação da superfície livre do período, posteriormente subtraída pelo nível médio do mar local que, de acordo com a Carta 1503 (figura 25) da DHN, é de 0,67 metros. O valor encontrado foi diminuído da altura de maré ao longo do período modelado, com intervalos de 30 minutos.

Na fronteira do quadrante SW, os dados foram elaborados em consequência dos resultados obtidos da fronteira do quadrante NE menos o desnível calculado para cada intervalo de tempo. Com os valores da elevação para cada nó das fronteiras definidas, foi elaborada uma planilha que foi importada para o SisBaHiA®.

Os valores de elevação que foram definidos para o primeiro nó da fronteira aberta serão utilizados para os demais nós da mesma, onde deve ser considerado que, cada fronteira tem valores de elevação diferentes, a partir do desnível calculado acima.

Para o modelo 3D, as condições de contorno no fundo são de velocidade nula e na superfície livre é a tensão do vento prescrita (ROSMAN, 2015).

Na figura 33, são apresentadas as comparações entre séries temporais de elevação da superfície livre medidas no marégrafo do IEAPM e as elevações obtidas pelo modelo.

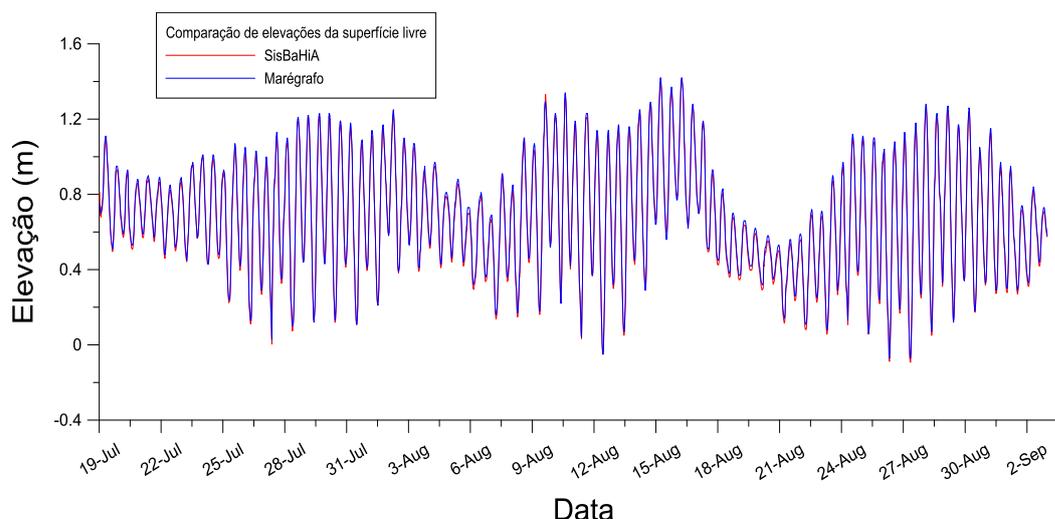


Figura 37: Curva de maré entre os dias de 19 de julho e 02 de setembro de 1999 fornecida pela Estação da Enseada dos Anjos (Porto do Forno) do IEAPM em comparação com a elevação da superfície livre modelada. Percebe-se uma boa concordância entre os dados de campo e modelados.

Após a calibração do modelo, calculamos as coerências entre valores medidos e valores computados de níveis de água. O método de quantificação foi realizado através do erro médio quadrático entre valores medidos e valores computados, conforme a equação abaixo, onde:

IC = índice de coerência;

Vm = valores medidos; e

V_c = valores computados.

$$C = 100\% \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |V_m - V_c|}{\sum_{i=1}^N |V_m|} \right)$$

Após o período de aquecimento (24h), a coerência encontrada foi de 97%.

Nas figuras 34 e 35, são realizadas comparações entre os perfis de intensidade da corrente obtidos pelo ADCP e os resultados obtidos pelo modelo na componente zonal e meridional, respectivamente.

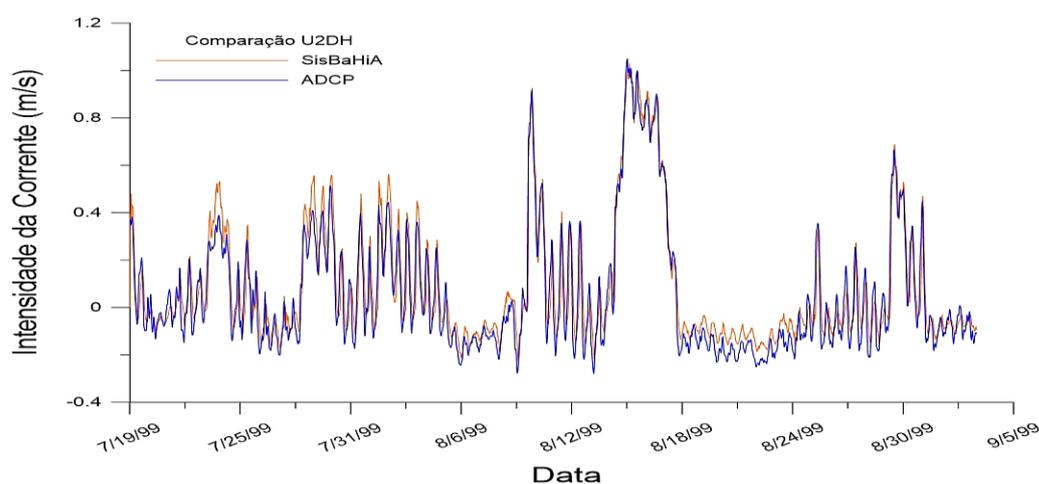


Figura 38: Comparação U2DH Medido x Modelado.

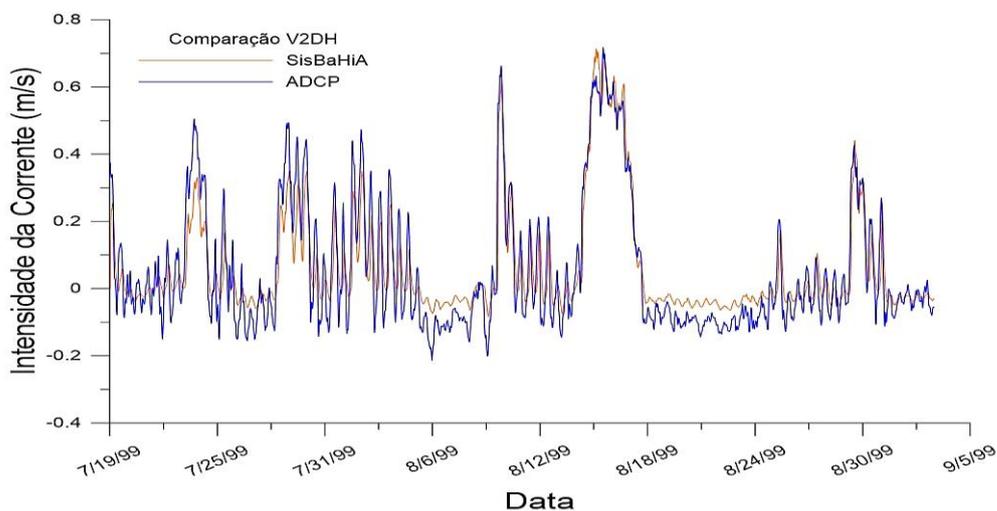


Figura 39: Comparação V2DH Medido x Modelado.

Nos dois gráficos, percebe-se uma boa correlação entre os dados de campo e os dados calculados. As correntes apresentam concordância satisfatória com subestimativa da intensidade do modelo nas correntes de baixa magnitude em ambas as componentes.

A região onde o ADCP ficou fundeado possui um litoral muito recortado, forte gradiente de batimetria tornando-se uma área difícil de ser capturada com a acurácia necessária pelo modelo. Obviamente, ocorrem algumas diferenças entre as batimetrias existentes e as geradas pelo modelo, que, muitas das vezes, são difíceis de serem captadas com a realismo necessário.

Segundo Barroso Júnior (2009), a topografia do fundo é mais suave no modelo do que na natureza, criando pequenas irregularidades locais na topografia de fundo que podem causar desvios na direção das correntes, os quais não serão capturados pelo modelo.

O uso de malha e batimetria mais refinada para a área próxima ao Boqueirão Sul, nas proximidades do ADCP, poderia melhor exprimir o complexo relevo do fundo e, provavelmente, reduziria as discrepâncias observadas.

É importante ressaltar que os resultados do modelo dependem diretamente da modelagem digital do terreno, da qualidade das medições de campo, dos dados básicos de entrada e das condições de contorno.

Na análise do diagrama de dispersão (figura 36), observamos que a corrente é predominantemente orientada na direção NE-SW, com predominância do fluxo para SW. As correntes para NE são menos frequentes, porém mais intensas, normalmente associadas a passagem de frente frias.

O modelo apresenta uma satisfatória concordância com os dados de campo, estes mais dispersos.

Assim como foi calculada a coerência apresentada entre valores reais e valores computados dos níveis d'água, o mesmo foi feito com os valores da magnitude das correntes pelo modelo, sendo obtido 80,15 % após o período de aquecimento (24h).

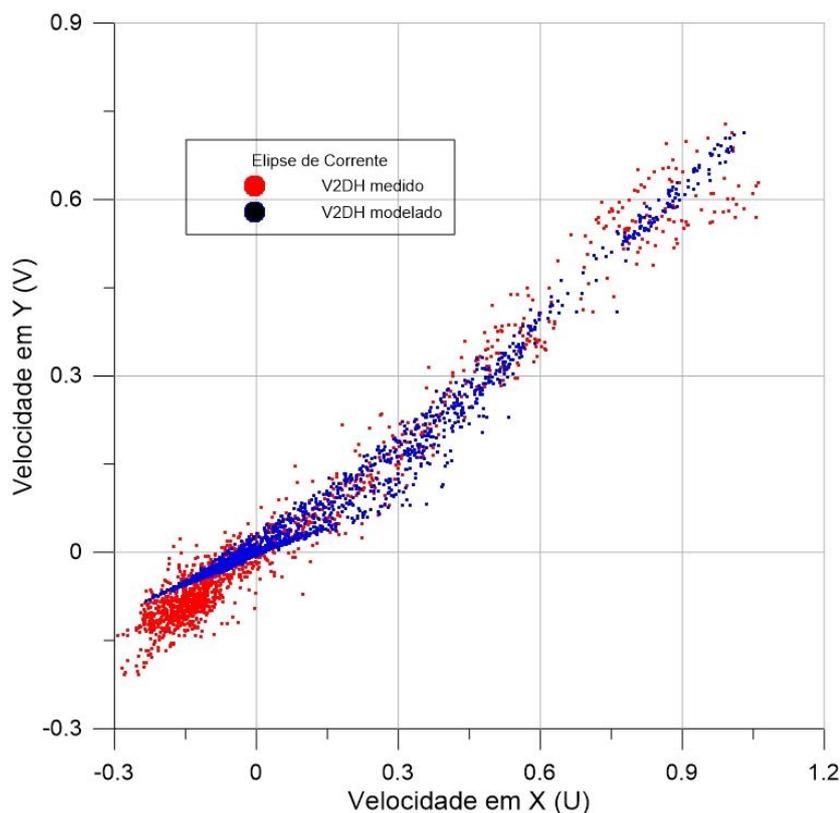


Figura 40: Gráfico de Dispersão (Elipse da Corrente). A direção dominante calculada pelo modelo se ajusta bem aos dados de campo medidos onde as magnitudes das correntes possuem uma dispersão maior.

Abaixo, são simulados três cenários característicos da região, sendo dois com forçantes externas induzindo a circulação (uma, com ventos de SW, e a outra, com ventos de NE) e uma situação em que a circulação é dominada pela maré.

6.4 Cenário com Situação de Frente Fria

O cenário 1 iniciou às 05:30 do dia 15 de agosto de 1999. É um evento de preamar com maré de sizígia onde observamos que o padrão de circulação hidrodinâmico não obedece a maré e tem uma forçante externa que indica o sentido das correntes.

A água entra pelo Boqueirão Sul por todo ciclo (figuras 39 e 40). Este fato demonstra a possível presença de algum sistema frontal que inverte o vento local (NE) para SW, S e SE.

É notório na região próxima ao Boqueirão Sul, velocidades com magnitudes superiores às demais regiões do domínio. Tal fato é ocasionado pelo estreitamento existente entre a Ilha do Cabo Frio e o Morro do Atalaia, pois o

fluxo do volume de água de uma área aberta é direcionada para um canal estreito forçando-o de acordo com sua morfologia.

Verifica-se uma significativa redução das velocidades quando as mesmas encontram a região conhecida como “baixios”³⁵, encontrada entre a parte noroeste da Ilha de Cabo Frio e o continente. As velocidades de mais de 3 m/s no Boqueirão Sul são reduzidas para 0,37 m/s.

As demais áreas da EAC possuem velocidades abaixo de 0,19 m/s, com exceção da porção ao SW da Ilha dos Porcos que tem um hidrodinamismo um pouco mais acentuado, atingindo velocidades entre 0,19 e 0,37 m/s.

O modelo demonstra em sua decomposição vetorial da corrente que o fluxo mais intenso é no sentido zonal (componente u). A direção da corrente é para NE corroborando o gráfico de dispersões (figura 36) que apresenta intensidades maiores nesse rumo, porém com uma menor frequência, que, conforme relatado anteriormente, é relacionado com a passagem de frentes frias. As vazões d'água, nas componentes u e v , acompanham vetorialmente as correntes.

Neste período a preamar atingiu elevação de 1,40 metros e a baixa-mar foi de 0,60 metros, assim obtemos uma amplitude de maré de 0,80 metros.

Outro fato que convém salientar, é a elevação do NMM (figura 37 e tabela 4) com ventos provenientes do quadrante SW, causam um empilhamento de água junto à costa.

Durante todo período, pode-se observar também a existência de um pequeno vórtice na frente da praia do Farol até a altura do Boqueirão Sul.

Nos próximos mapas veremos detalhadamente estes fenômenos. A figura 38, apresenta de uma forma geral todo o hidrodinamismo no domínio do modelo. A região destacada indica a região que será analisada nos quatro períodos apontados na tabela acima, em sua ordem cronológica.

A tabela abaixo apresenta diversos parâmetros ambientais do período.

³⁵ Região onde acontece uma redução abrupta da profundidade.

Tabela 04: Apresentação de diversos parâmetros do período em que a circulação hidrodinâmica é gerada por frentes frias nas EAC (ventos de SW).

Data-Hora	Magn. Corr. (m/s)	Dir. Corr.	Vento Azimute	Vento. Intens. (m/s)	Elevação (m)	Temp (°C)
15AGO 05:30	1,22	35,2°	230°	7,97	1,40	21,2
15AGO 09:00	0,99	35°	240°	7,04	1,13	21,3
15AGO 12:00	1,07	33,5°	270°	6,55	0,60	21,2
15AGO 15:30	1,14	35°	262°	5,52	1,00	21,1

Características da elevação da superfície livre na região de estudo para uma situação de frente fria

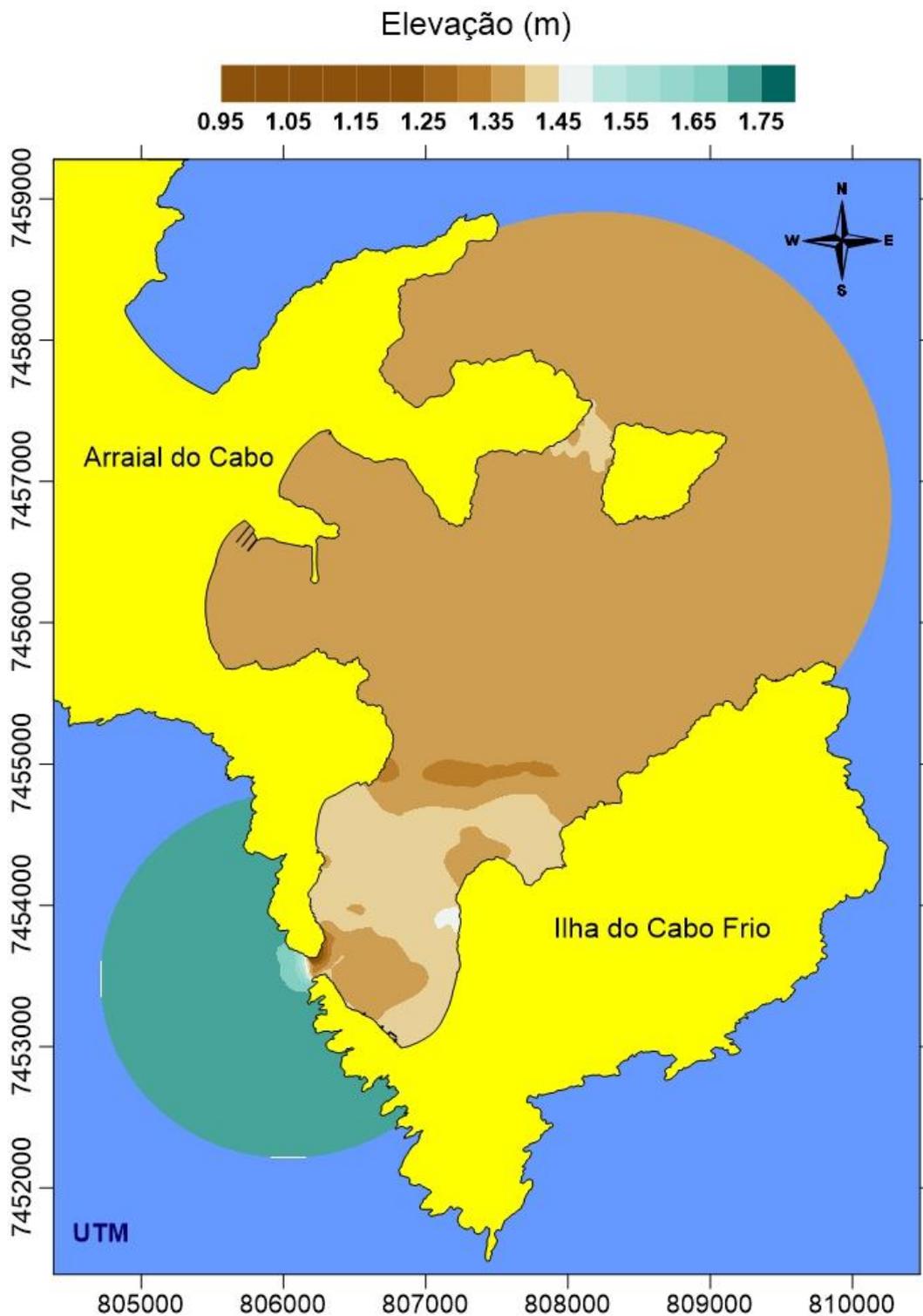


Figura 41: Elevação da superfície livre para o instante $t = 2.350.800$ s, 15/08/99, às 05:30h. Maré de sizígia. Observa-se na parte SW do Boqueirão Sul elevação de 1.715m, reduzindo para 1.30 no centro do estreito. Volta a elevar atingindo cerca de 1.40m por todo domínio.

Circulação gerada por frentes frias

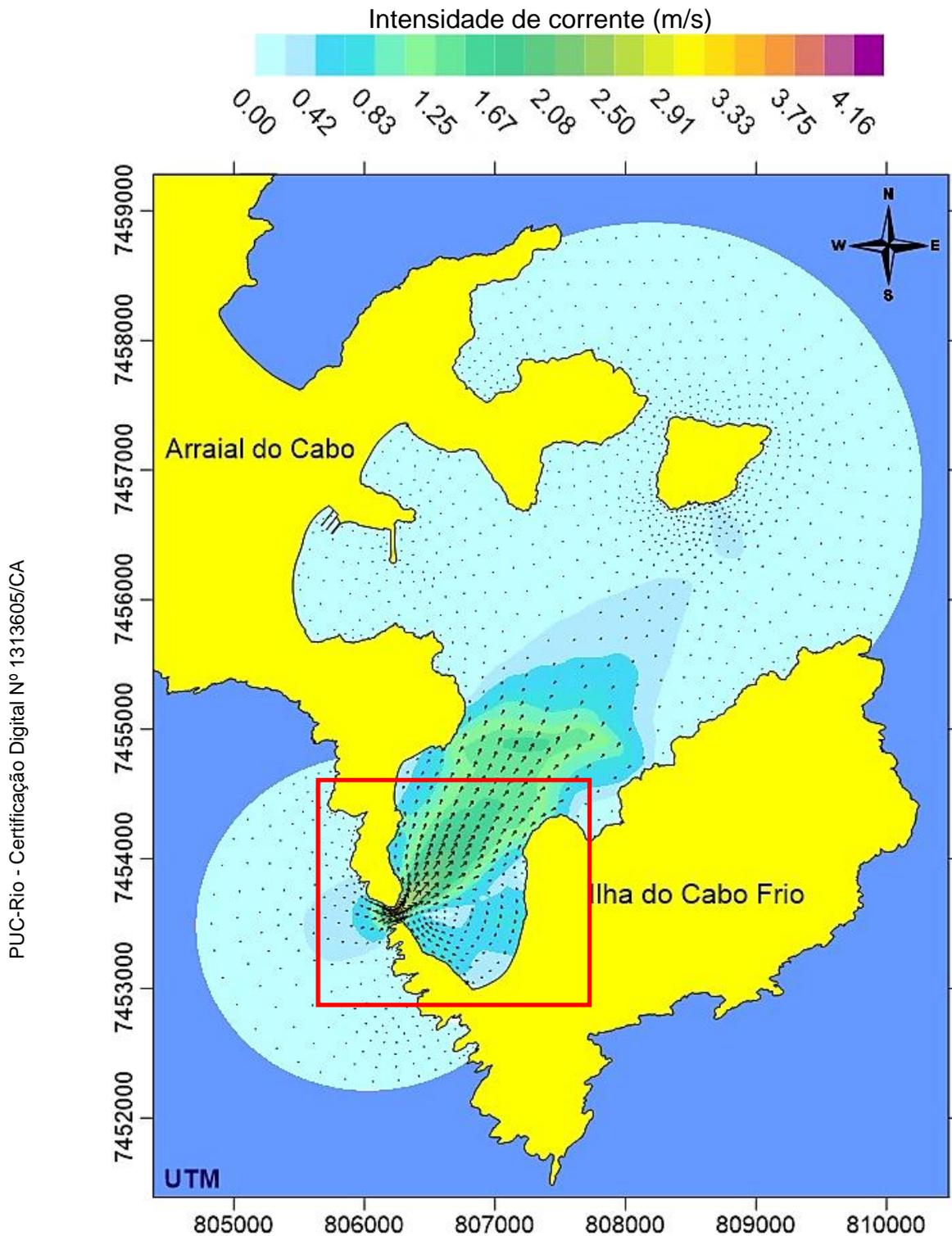


Figura 42: Visão geral da circulação da área modelada através do campo de correntes. É notório maiores magnitudes nos valores das correntes nas proximidades do Boqueirão Sul. Em destaque, na cor vermelha, a região que será representada com maiores detalhes, para uma fácil visualização nas próximas figuras (39 e 40) em situação de frente fria.

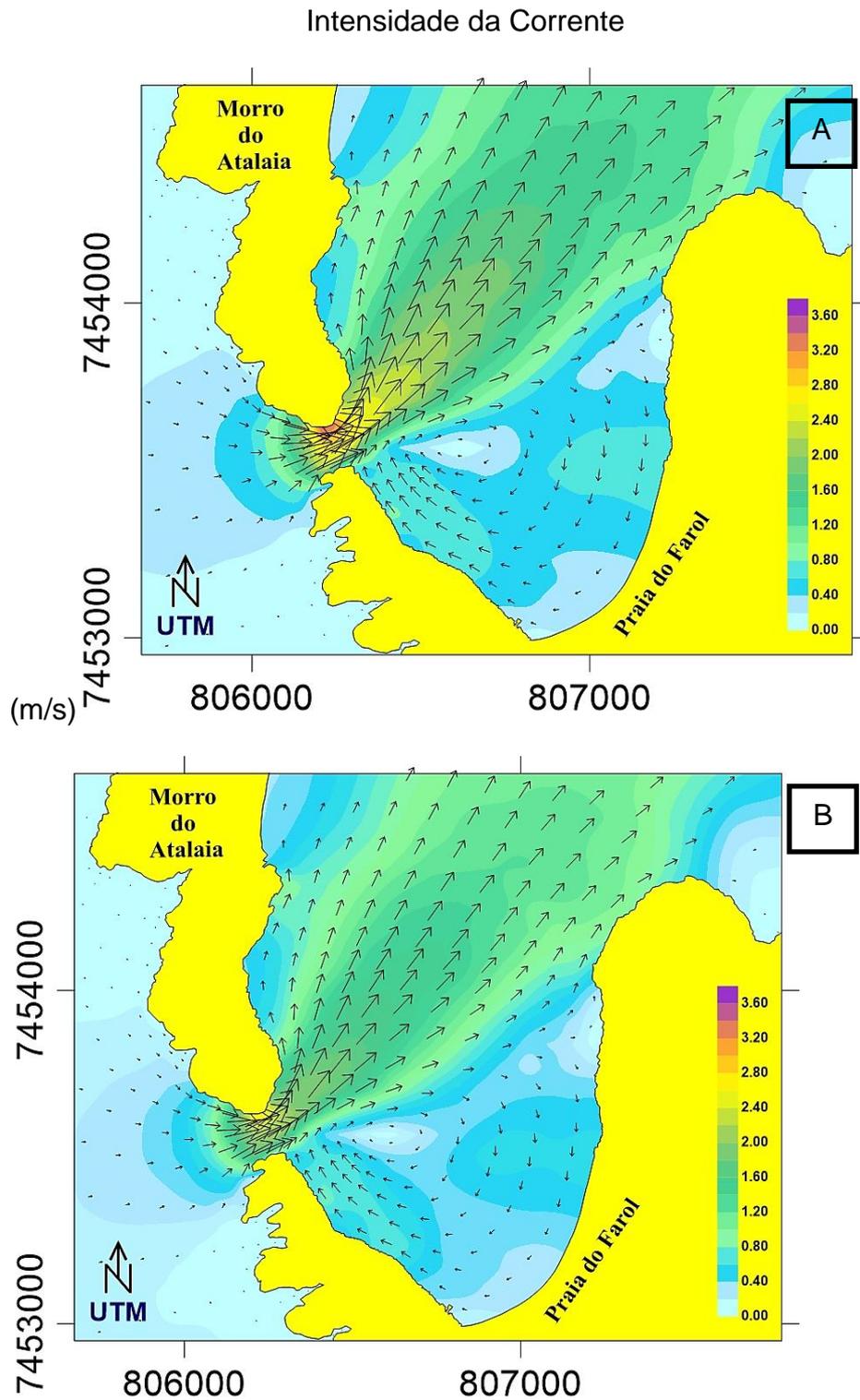


Figura 43: A figura 39A apresenta uma situação de preamar de sizígia. Corrente na direção NE e um pequeno vórtice entre a Praia do Farol e o Boqueirão Sul. Velocidades, obtidas com o modelo 2DH, de até 4,16 m/s no estreito e de 1,22 m/s na área de fundeio do ADCP. A figura com a direção da corrente semelhante com a 39B, em uma meia maré de vazante de sizígia, com velocidades de 3,69 e 0,99 m/s respectivamente.

Intensidade da Corrente

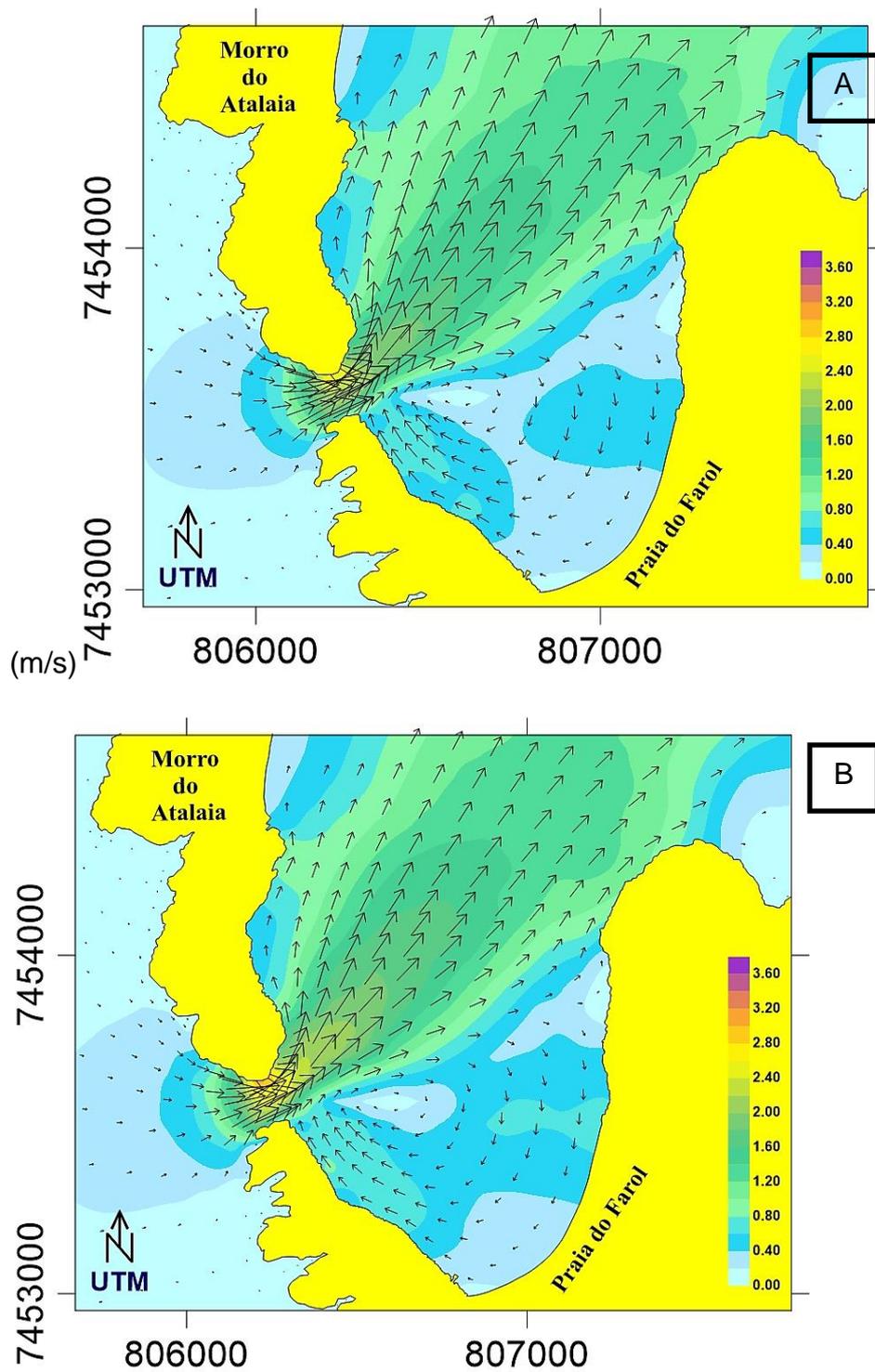


Figura 44 A e B: A figura 40A apresenta uma situação de baixamar de sizígia. A corrente permanece no sentido NE. Velocidades de até 3,02 m/s no estreito e de 1,07 m/s na área de fundeio do ADCP. A figura 40B, nas proximidades de uma meia maré de enchente de sizígia, com velocidades de 3,72 e 1,14 m/s respectivamente. Ambas figuras apresentam situações semelhantes com a figura 39.

6.5 Cenário com Ausência de Dinâmicas Externas

O cenário 2 iniciou-se às 07:00 do dia 4 de agosto de 1999 (instante $t = 1.405.800$ s). É um evento escolhido por fornecer, de forma clara, as direções do fluxo das correntes se alternando como em uma maré semidiurna, característica da região. Neste período a preamar atingiu elevação de 0,95 metros e a baixa-mar foi de 0,41 metros, assim obtemos uma amplitude de maré de 0,54 metros (figura 41).

O instante inicial está nas proximidades da preamar, maré de quadratura, (figura 43A) com correntes na direção NE. Na baixa-mar (43B) a situação se inverte e a corrente assume o rumo para SW.

Na preamar seguinte (figura 44A), alterna-se novamente, passando a ocorrer o domínio da corrente na direção NE. Encerrando o ciclo de maré, a baixa-mar (figura 44B) assume, novamente, a direção para SW.

Neste caso, as direções do fluxo das correntes são alternadas de acordo com os conceitos teóricos de uma maré semidiurna com desigualdades diurnas (MIGUENS, 1996) o que muitas das vezes, não é comum na região.

As intensidades das correntes no período são maiores quando a direção é NE (máximas com 0,25 e 0,10 m/s, figuras 43A e 44A). As magnitudes para o sentido NE foram, respectivamente, de 0,07 e 0,09 m/s (figuras 43B e 44B).

Verifica-se neste cenário, que a maré passa a ser geradora do campo de correntes, na ausência de uma dinâmica externa e que o período das preamares e baixa-mares, nem sempre coincidem com os instantes em que a corrente de maré inverte o seu sentido.

Assim como na situação anterior, as velocidades junto ao Boqueirão Sul possuem magnitudes superiores às demais regiões do domínio.

Nos próximos mapas, observaremos a dinâmica para este cenário. A figura 41 demonstra o comportamento da elevação da superfície livre para um instante de preamar de quadratura, enquanto que a figura 42, apresenta uma visão geral e as demais (figuras 43 e 44) detalham todo o processo. Neste caso, como descrito acima, foi analisado um ciclo de maré completo, com os quatro períodos característicos, duas preamares e duas baixa-mares, conforme apontado na tabela abaixo.

Tabela 05: Apresentação de diversos parâmetros do período em que a circulação hidrodinâmica tem como forçante a maré.

Data-Hora	Magn. Corr. (m/s)	Dir. Corr.	Vento Azimute	Vento. Intens. (m/s)	Elevação (m)	Temp (°C)
04AGO 07:00	0,10	034°	357°	0,74	0,95	21,6
04AGO 13:30	0,02	191°	096°	3,92	0,41	21,7
04AGO 20:00	0,05	042°	106°	2,78	0,79	21,6
05AGO 02:30	0,03	200°	080°	2,78	0,44	21,6

Características da elevação da superfície livre na região de estudo para
uma situação de circulação gerada pela maré

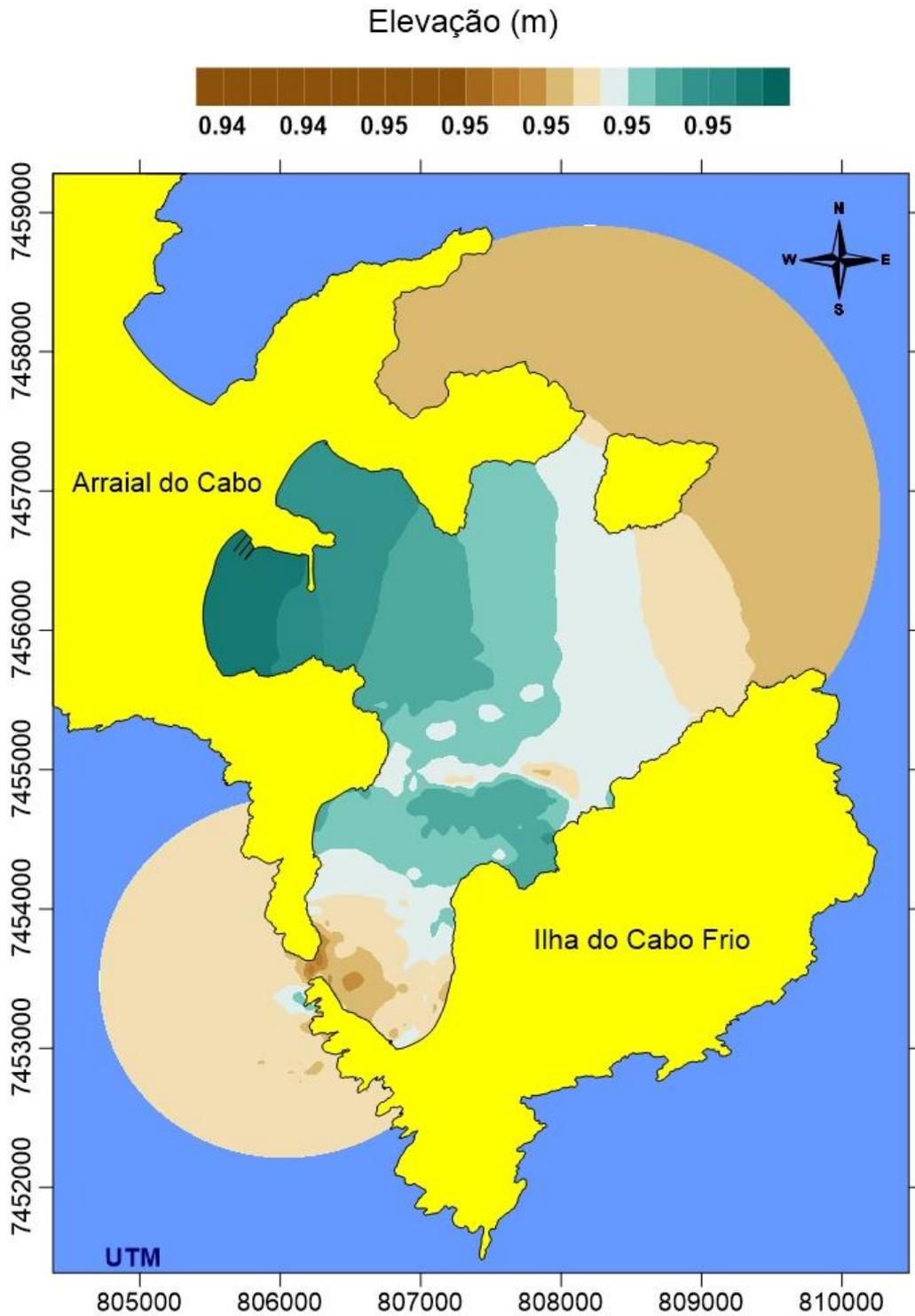


Figura 45: Elevação da superfície livre para o instante $t = 1.405.800$ s, 04/08/99, às 07:00h. Preamar de sizígia. Observa-se nos extremos do mapa valores menores para a elevação, em torno de 0,946 m. O local com a maior elevação é a na Enseada dos Anjos $\sim 0,953$ m. A parte interna das EAC apresentam valores intermediários.

Circulação gerada pela maré

Intensidade da Corrente (m/s)

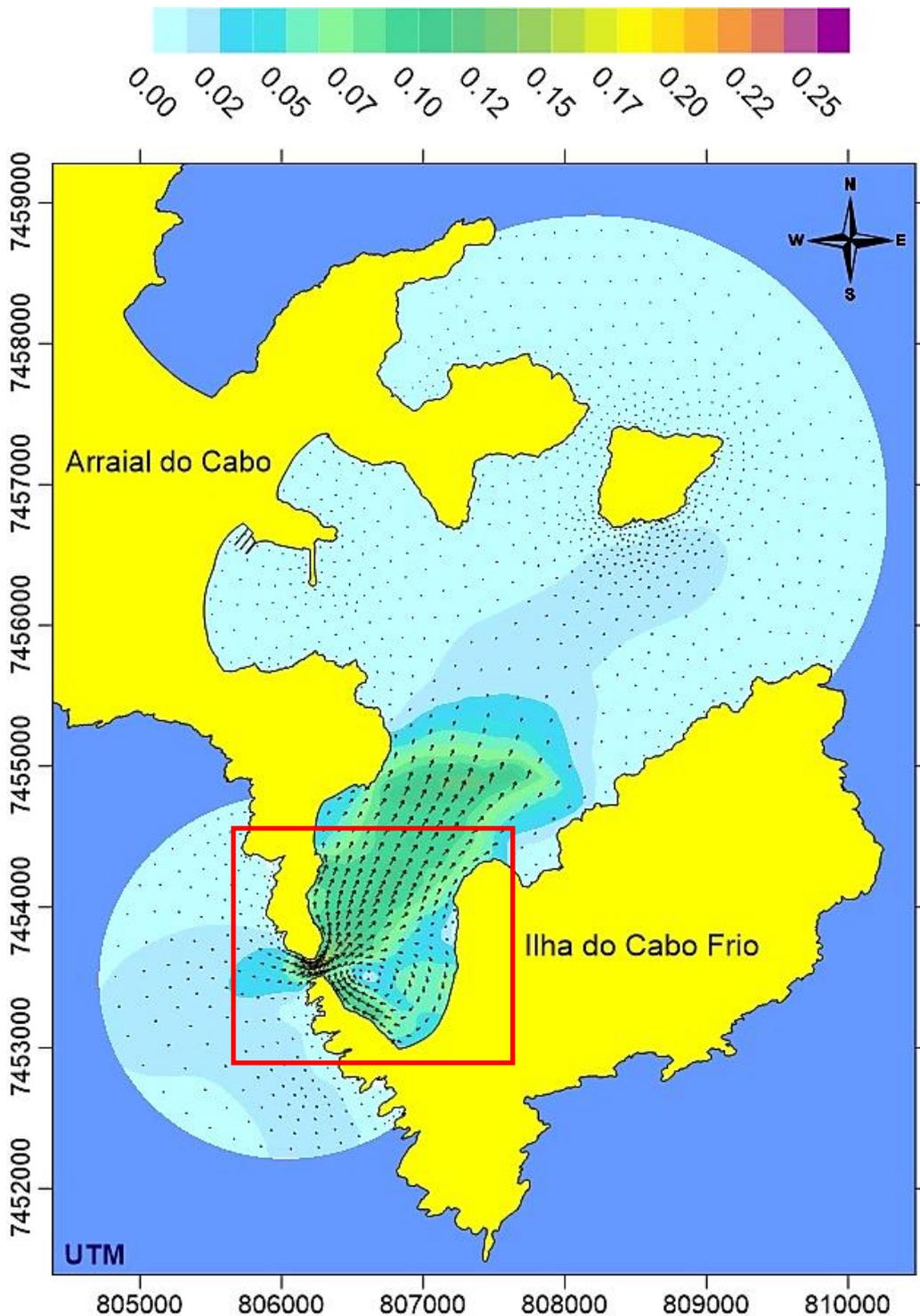


Figura 46: Visão geral do campo de correntes, para uma situação em que a maré é sua principal forçante. Apresenta magnitudes de correntes, no geral, bem inferiores ao cenário anterior (ventos de SW). A área em destaque, na cor vermelha, é da mesma região do exemplo pregresso, onde as figuras 42 e 43 apresentarão a dinâmica local com mais detalhes.

Intensidade da Corrente (m/s)

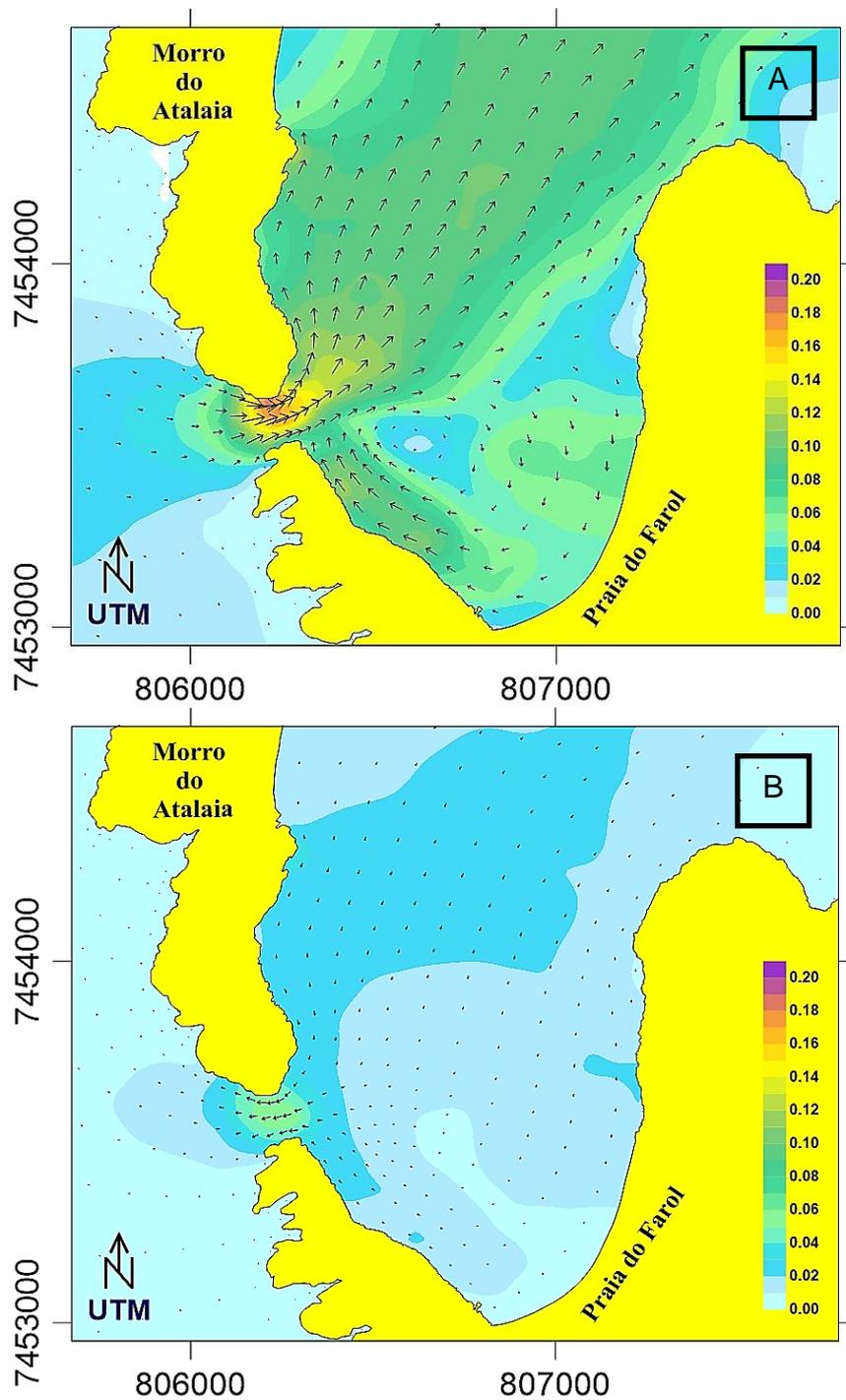


Figura 47 A e B: Na figura superior, a água entra pelo estreito, todavia, com velocidades bem inferiores ao exemplo passado. Magnitude máxima de 0,20 m/s no Boqueirão e 0,10 m/s na posição do ADCP. Também apresenta um pequeno vórtice com a corrente na direção NE. Situação de proximidades da preamar de quadratura. Na figura 43B, a corrente inverte de direção. Velocidades de 0,07 e 0,02m, respectivamente. Baixa-mar de quadratura. Amplitude de maré de 54 cm (tabela 6).

Intensidade da Corrente (m/s)

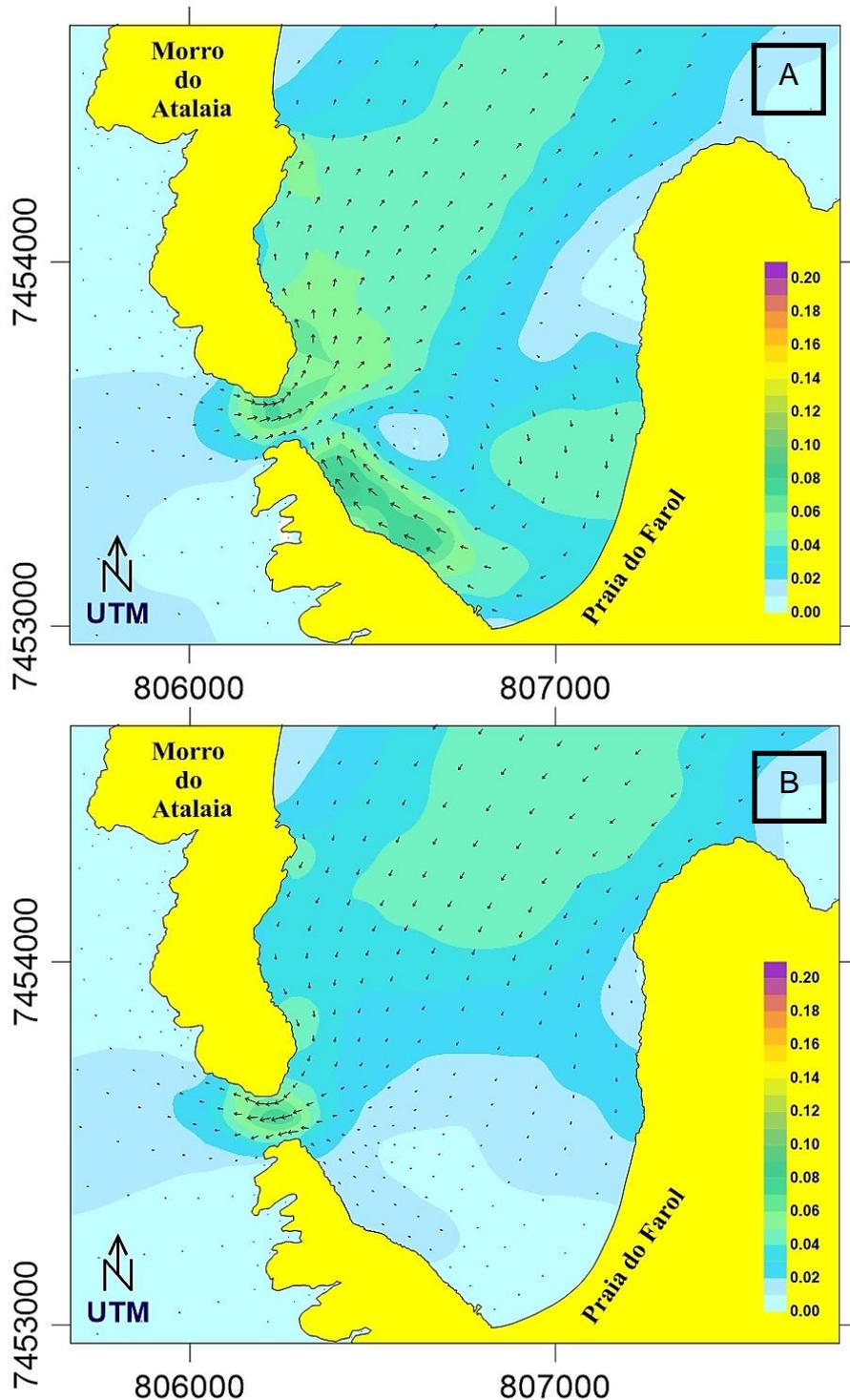


Figura 48 A e B: Campos de correntes bem semelhantes às duas figuras anteriores. Nota-se uma desigualdade significativa entre elas, característica da maré semi-diurna com desigualdades diurnas (MIGUENS, 1996). As velocidades das correntes na posição do ADCP foram de 0,5 e 0,3 m/s, respectivamente. Amplitude de maré de 35 cm, 19 cm inferior à da figura 41.

6.6 Cenário com Ventos Típicos

Tabela 06: Apresentação de diversos parâmetros do período em que a circulação hidrodinâmica é gerada pelo ASAS na EAC (ventos de NE).

Data-Hora	Magn. Corr. (m/s)	Dir. Corr.	Vento Azimute	Vento. Intens. (m/s)	Elevação (m)	Temp (°C)
02SET 07:30	0,08	202°	067°	6,09	0,82	19,1
02SET 11:00	0,07	201°	061°	5,60	0,62	18,4
02SET 15:00	0,04	201°	080°	5,48	0,42	14,9
02SET 17:30	0,08	201°	052°	5,94	0,64	16,1

Seguem adiante, os mapas conforme apresentados no cenário 1, uma figura da elevação, uma visão geral e quatro figuras detalhadas, representando os períodos da preamar, meia maré de vazante, baixa-mar e meia maré de enchente.

Características da elevação da superfície livre na região de estudo para
uma situação gerada por ventos de NE

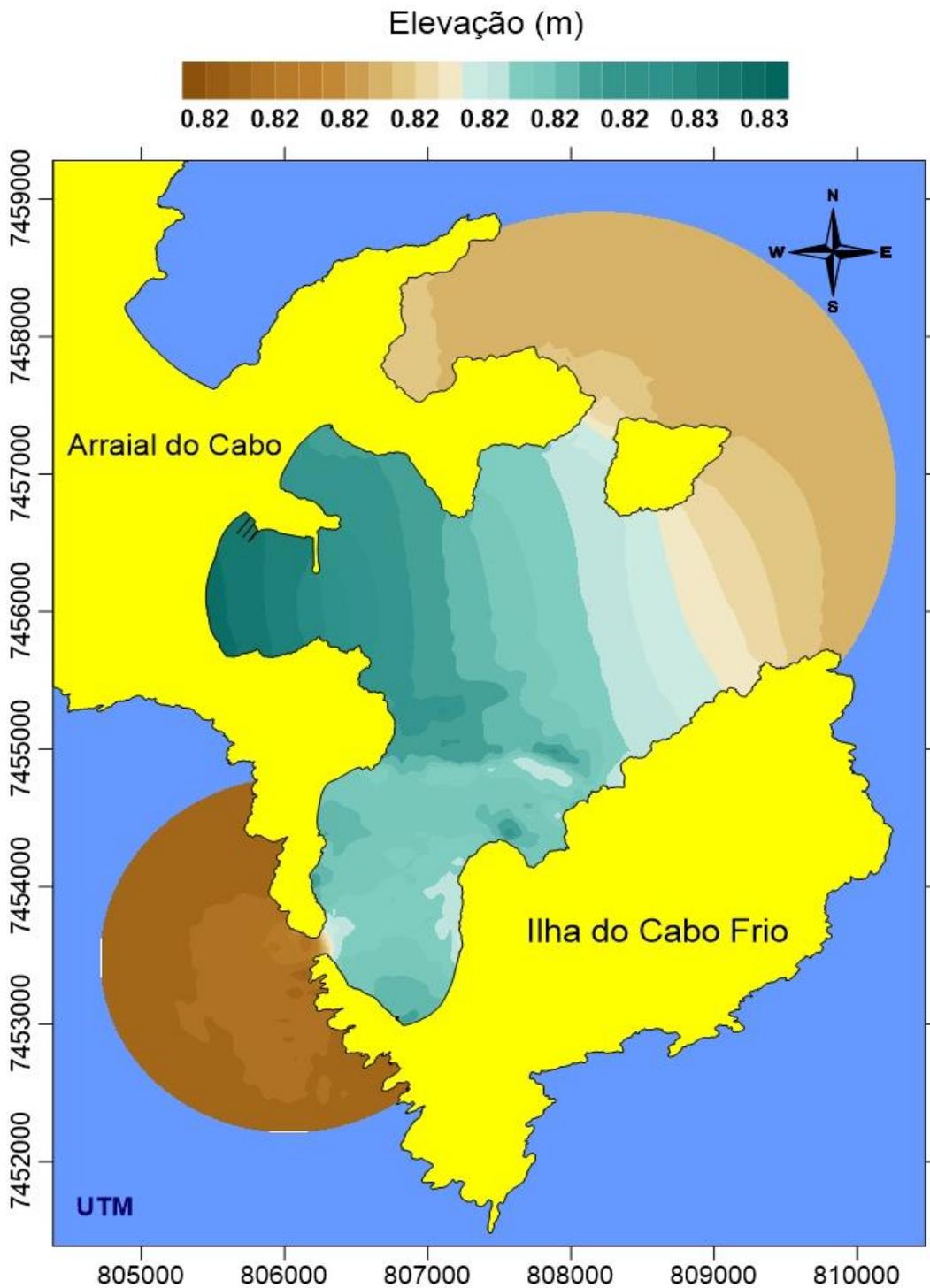


Figura 49: Elevação da superfície livre para o instante $t = 3.913.200$ s, 02/09/99, às 07:30h. Preamar de quadratura. Observa-se na parte SW do Boqueirão Sul elevação de 0,815m, aumentando para 0.825 nas proximidades da Enseada dos Anjos. Volta a reduzir atingindo cerca de 0,819m na parte NE do domínio.

Circulação gerada pelo ASAS – Intensidade da Corrente (m/s)

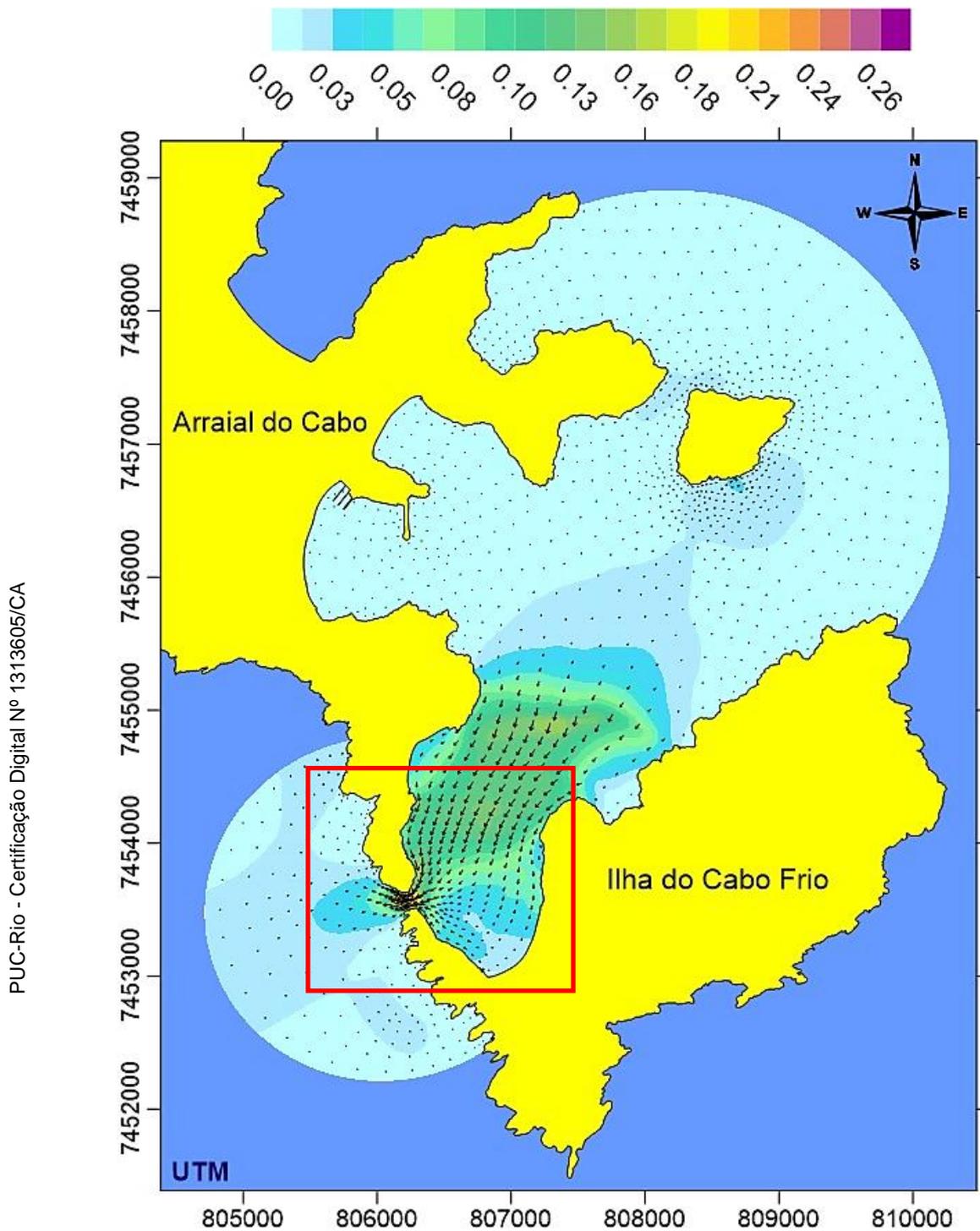


Figura 50: Visão geral do campo de correntes, para uma situação em que há predominância dos ventos de NE. Apresenta magnitudes de correntes semelhantes ao cenário anterior. As figuras 46 e 47 apresentarão a dinâmica local com mais detalhes.

Intensidade da Corrente (m/s)

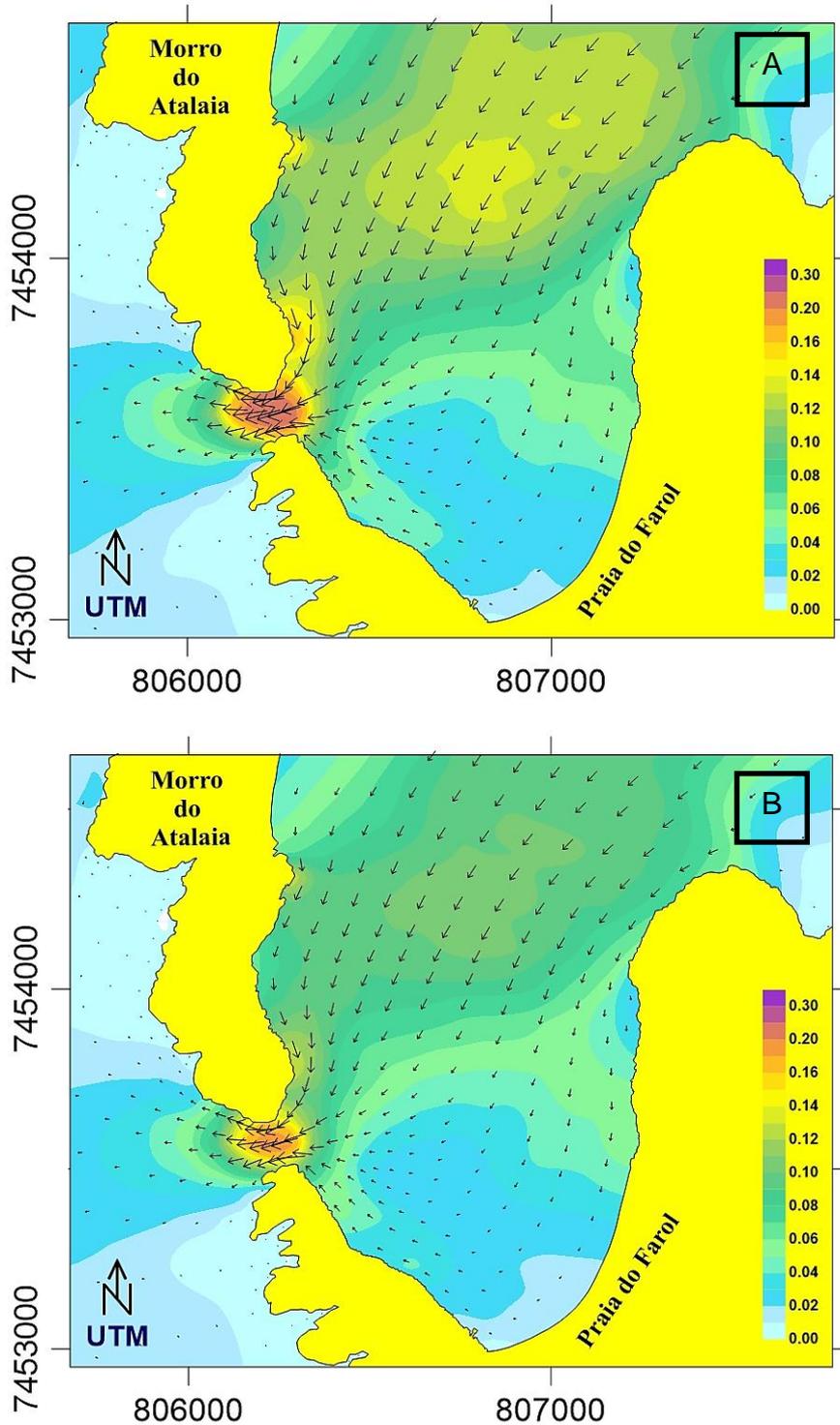
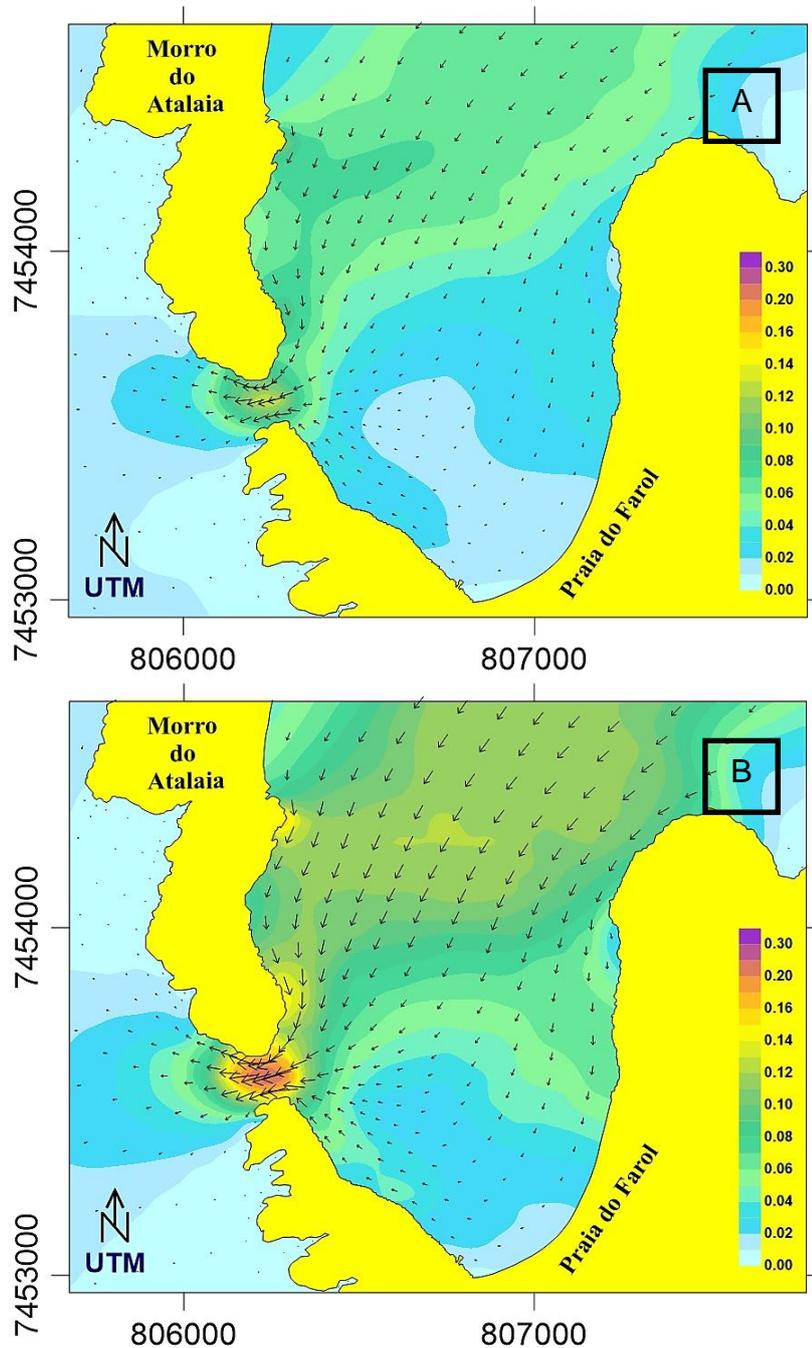


Figura 51 A e B: A figura 47A apresenta uma situação nas proximidades da preamar de quadratura. Corrente na direção SW. Velocidades, obtidas com o modelo 2DH, de até 0,26 m/s no estreito e de 0,08 m/s na área de fundeio do ADCP. Na figura 47B, a corrente permanece inalterada em uma meia maré de vazante de quadratura, com velocidades de 0,21 e 0,07 m/s respectivamente.

Intensidade da Corrente (m/s)



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313605/CA

Figura 52 A e B: A situação do campo de correntes permanece a mesma por todo período, água saindo pelo Boqueirão. As velocidades, obtidas com o modelo 2DH, são de 0,04 m/s na figura superior, proximidades da baixa-mar, na área de fundeio do ADCP, e 0,08 m/s na meia maré de enchente na figura abaixo.

Os resultados encontrados na análise hidrodinâmica local, demonstrada nos três cenários acima, apresentam boa coerência com os dados de campo e confirmam a predominância do fluxo de SW com intensidades menores que as correntes de NE, de duração curta e mais intensas, normalmente associadas a

passagem de frente frias, conforme apresentado em trabalhos anteriores como Paiva (1993), Torres Júnior (1995) e Branco (2000).

Identificou-se que a ação dos ventos de SW causam o levantamento do nível médio do mar próxima à costa (cenário 1) e os ventos do quadrante NE implicam no rebaixamento do NMM (cenário 3). Segue abaixo tabela de comparação entre as preamares e baixamars dos cenários simulados, confrontando-os com os dados da Tábua de Maré (DHN, 1999).

Tabela 07: Dados de preamares do modelo em comparação com a Tábua de Maré para o Porto do Forno. Ano 1999. Fonte: DHN.

Comparação entre as elevações da superfície livre previstas e simuladas (Estação: Marégrafo)				
Cenário	Data-Hora (SisBaHiA)	Elevação modelada (m)	Data-Hora Tábua de Maré (DHN)	Elevação prevista (m)
Ventos Fracos PMQ	04/ago 07:30	0.94	04/ago 07:24	1.00
Ventos Fracos BMQ	04/ago 14:30	0.43	04/ago 14:26	0.50
Ventos de SW PMS	15/ago 04:30	1.33	15/ago 04:19	1.10
Ventos de SW BMS	15/ago 11:30	0.63	15/ago 11:24	0.10
Ventos de NE PMQ	02/set 07:00	0.80	02/set 06:49	1.00
Ventos de NE BMQ	02/set 14:00	0.42	02/set 13:54	0.50

Foi observado a ocorrência do fenômeno da ressurgência no período estudado com temperaturas variando entre 14 e 18 °C resultante da combinação dos intensos e constantes ventos de NE do cenário 3 conforme o gráfico apresentado na figura 15.

7 Modelo Lagrangeno

Este capítulo aborda o modelo lagrangeano, suas condições de contorno, a curva de decaimento de óleo, os cenários de simulação e os resultados que possam contribuir para o estabelecimento de estratégias de prevenção e gestão dos impactos ambientais, na atualização do PEI do IEAPM e para o futuro Plano de Área³⁶ da região.

7.1 Condições de Contorno para o Modelo Lagrangeano

O modelo de transporte Lagrangeano possui dois tipos de condições de contorno.

O primeiro é quando a partícula que atravessa o segmento da fronteira aberta, sai do domínio modelado e se perde. Por esse motivo, as fontes de contaminantes não podem ficar próximas aos limites das fronteiras abertas, pois, caso contrário, os resultados poderão apresentar resultados distorcidos no problema modelado.

O segundo é quando a partícula atinge o litoral e retorna ao meio. A partícula pode, ou não, sofrer perda de massa. No presente trabalho, a partícula retorna ao meio, mas tem uma parcela de sua massa absorvida no trecho da fronteira atingido. A fração absorvida é dada pelo coeficiente de absorção ao longo das fronteiras de terra com valores entre zero e um.

O modelador poderá especificar um valor diferente para cada nó de fronteira de terra, dependendo do tipo de costa. No presente estudo foram usados os seguintes coeficientes de absorção (CA), em consonância com os índices de sensibilidade do litoral (ISL)³⁷ aplicadas na Carta de Sensibilidade Ambiental ao

³⁶ Plano de área: documento ou conjunto de documentos que contenham as informações, medidas e ações referentes a uma área de concentração de portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos ou plataformas e suas respectivas instalações de apoio, que visem integrar os diversos Planos de Emergência Individuais da área para o combate de incidentes de poluição por óleo, bem como facilitar e ampliar a capacidade de resposta deste Plano e orientar as ações necessárias na ocorrência de incidentes de poluição por óleo de origem desconhecida. Resolução nº 398 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (2008).

³⁷ Maiores detalhes sobre o ISL serão vistos no item 7.6.

Derramamento de Óleo da Bacia de Santos (Barra de São João à Praia de Itaipuaçu-RJ):

- ISL 1 (substratos impermeáveis): $CA = 0.001$;
- ISL 3 (substratos semipermeáveis com baixa penetração): $CA = 0.05$;
- ISL 4 (substratos de média permeabilidade com moderada penetração): $CA = 0.15$;
- ISL 6 (substratos de elevada permeabilidade com alta penetração): $CA = 0.3$.

Os valores acima são empíricos e objetivam, apenas, diferenciar trechos de litoral com graus de permeabilidades distintos. Havendo a necessidade de se realizar simulações de prognóstico com maior acurácia quantitativa, é prudente uma análise minuciosa dos valores que serão aplicados aos diferentes trechos de litoral (ROSMAN, 2014).

7.2 Curvas de Decaimento do Óleo

Como os processos de interação do óleo com o mar e o ar não são perfeitamente entendidos, uma avaliação de confiança envolve modelos empíricos, baseados no tipo do hidrocarboneto.

Nos derramamentos, frequentemente, é feita uma distinção entre óleos não-persistentes, que tendem a desaparecer rapidamente da superfície do mar, e os persistentes que, em contraste, dissipam-se mais lentamente e, usualmente, exigem ações de resposta com o emprego de técnicas de contenção, recolhimento e limpeza.

Portanto, os tipos mais comuns de óleo e seus derivados são classificados, normalmente, como:

- persistentes: petróleo cru, óleo combustível, diesel pesado e óleos lubrificantes; e
- não persistentes: diesel leve, gasolina e querosene.

As principais propriedades que afetam seu comportamento quando derramado no mar são:

a) gravidade específica (sua densidade em relação à água pura) - que determina se o contaminante irá flutuar ou não, além de dar uma indicação geral das propriedades do mesmo; por exemplo, elementos com baixa gravidade específica (alto °API) tendem a ser ricos em componentes voláteis e altamente fluidos. Frequentemente são expressos em ° API, onde:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{Gravidade Específica}} - 131,5$$

- b) características da destilação ou sua volatibilidade - que é a faixa de temperatura em que uma substância passa do estado líquido para o gasoso;
- c) viscosidade – que é a resistência do poluente a fluir. A viscosidade diminui com o aumento da temperatura, portanto, a extensão da mancha que está recebendo radiação solar e a temperatura da água do mar são importantes considerações, para se determinar sua viscosidade no ambiente;
- d) ponto de fluidez – que é a menor temperatura em que um hidrocarboneto é capaz de escorrer ao ser derramado.

A escolha do óleo foi baseada nas características do combustível usado pela Marinha do Brasil. Foi utilizado o programa ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*) em sua segunda versão, desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) no qual podem ser recuperadas as características de até 1.000 diferentes tipos de óleo.

É importante salientar que esse modelo, e seus gráficos, servem como um manual profícuo, para entender as estimativas de perda de massa que são geradas por um vazamento.

As curvas do ADIOS2 (figuras 48 e 49) são bem aceitas internacionalmente e representam um bom modelo de decaimento da massa de óleo, levando conta as complexidades dos mesmos de uma forma geral.

O óleo escolhido pode perder cerca de 40% do volume na evaporação, além de uma pequena redução, menos que 10%, pela dispersão natural (figura 48).

A seguir, é apresentado o gráfico da simulação da perda de massa do óleo, a curva de decaimento (figura 49), que é aplicada ao SisBaHiA®.

O programa ADIOS2 leva em consideração o tipo do óleo, a temperatura da água, temperatura do ar, velocidade do vento e velocidade média das correntes.

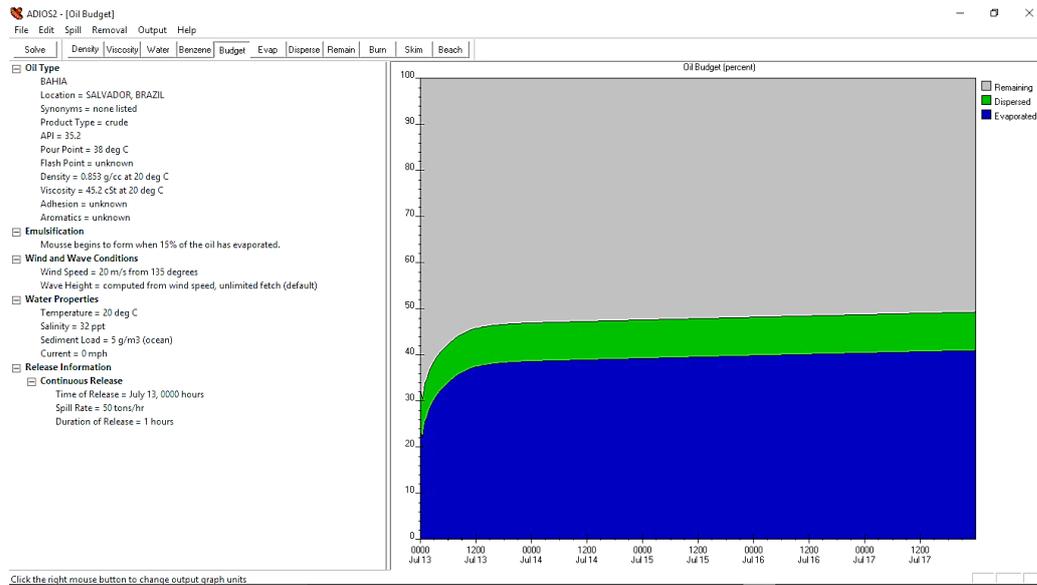


Figura 53: O gráfico apresenta em azul a quantidade evaporada, em verde, a quantidade dispersada e em cinza a quantidade remanescente do total simulado que são 50 m³ de hidrocarboneto. Principais características: °API = 35,2, gravidade específica = 0,851 kg/m³ a 22 °C, viscosidade = 40 cSt a 22 °C e ponto de fluidez = 38 °C (ADIOS2, 2016).

A área inicial da mancha foi definida através do espalhamento mecânico baseado nos modelos propostos pela Teoria de *Fay* usada no *software* ADIOS2. Assume-se que a mancha é circular e que a espessura do óleo na mancha é homogênea.

Este tipo de espalhamento é decorrente do gradiente de pressão que atua na direção horizontal da mancha em virtude da diferença de densidade entre os dois fluidos. São subdivididos através de três fases: o espalhamento inercial, o viscoso e por tensão superficial.

Quando o volume do óleo tenta sair do repouso, a força gravitacional é contrabalançada pela força de inércia que se opõe ao movimento e é definido como espalhamento inercial.

Durante o espalhamento inercial, o óleo reduz sua espessura com o passar do tempo. A água passa a ocupar o espaço do óleo que se espalhou, e, por sua vez, o óleo substitui a água nas extremidades da mancha. Este espalhamento onde a força gravitacional é contrabalançada pelas forças viscosas é definido como espalhamento viscoso.

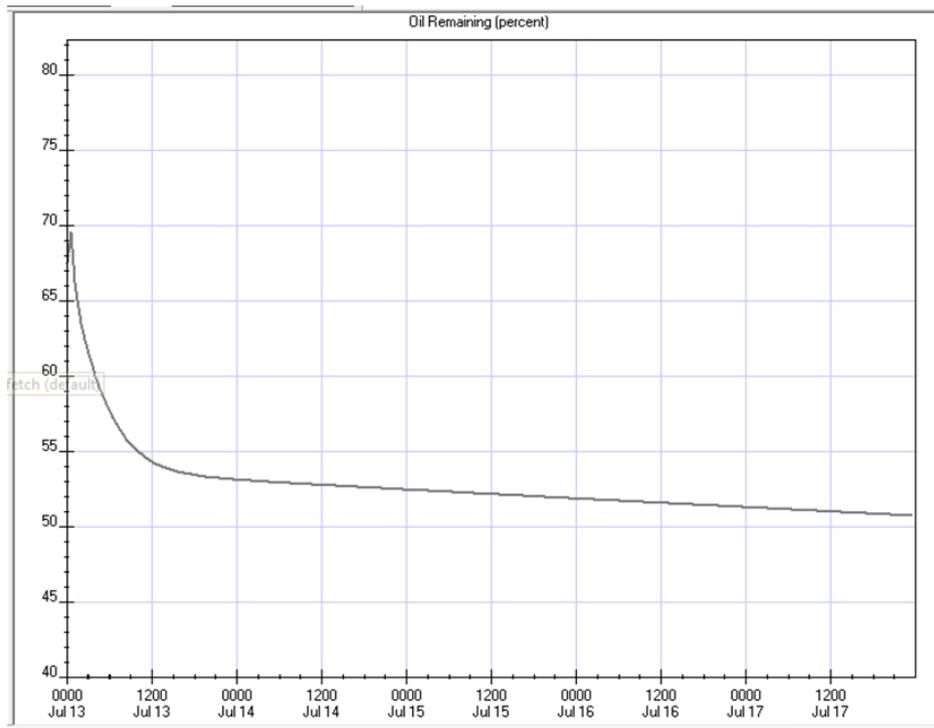


Figura 54: A curva de decaimento do óleo, obtida pelo programa ADIOS, apresenta que o volume remanescente em questão, após de 5 dias, é pouco mais de 50% do total, isto é, em torno de 25 m³. Utilizada para a curva de decaimento do óleo inserida no SisBaHiA® (ADIOS, 2016).

Quando a mancha tem sua espessura reduzida, a força gravitacional perde sua relevância e o balanço entre as tensões superficiais nas extremidades das interfaces óleo-ar, água-óleo torna-se fator dominante no espalhamento. O espalhamento no qual a resultante da tensão superficial nas interfaces é contrabalançada pelas forças viscosas é chamado de espalhamento por tensão superficial.

Uma vez que o espalhamento inercial é muito curto, é usual que a área circular formada pelo óleo, seja assumida como a área inicial da mancha, a ser inserida no modelo.

Esta área é baseada no coeficiente de difusão, utilizado para cálculo do espalhamento com base em modelos trajetórias de partículas lagrangeanas, onde encontramos o raio da mancha através da seguinte fórmula:

$$D = 1,14(\Delta g \nabla t^2)^{1/3}$$

Onde:

D = coeficiente de difusão (raio da mancha);

$\Delta = (\rho_w - \rho_o)/\rho_w$, densidade relativa entre o óleo e a água

ρ_w = densidade da água (1021,3 kg/m³)

ρ_o = densidade do óleo (851 kg/m³)

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

∇ = volume do óleo derramado (50 m³)

t = tempo de vazamento (30 minutos)

Para o cálculo da área apresento as seguintes considerações:

- definido o volume total do vazamento (∇) em 50 m³, temos a vazão do contaminante na fonte para o tempo de derramamento total (t) em 30 minutos ou 1.800 segundos, (Q_{1800}):

$$Q_{1800} = \frac{\nabla}{t} = \frac{50}{1800} = 0,0278 \text{ m}^3/\text{s}$$

- assumindo que o intervalo de tempo de lançamento das partículas (Δt) será de 150 segundos, obtemos, desta forma, o volume do primeiro lançamento (∇_i):

$$\nabla_i = Q_{1800} \cdot \Delta t = 0,0278 \cdot 150 = 4,17 \text{ m}^3$$

- de acordo com Fay, a mancha para de crescer quando a espessura está entre 0,1mm a 0,01mm (ROSMAN, 2014).

Com os dados de entrada e a fórmula supramencionada obtemos que o raio da mancha inicial encontrado é de 117,4 metros quando a espessura do óleo é de 0,095 milímetros após 400 segundos.

7.3 Hipóteses de Acidentes

Para o CONAMA nº 398/2008, a capacidade de resposta, no caso de um vazamento de óleo na instalação, deverá ser assegurada por meio de recursos próprios ou de terceiros provenientes de acordos, previamente firmados,

obedecidos os critérios de descargas pequenas (8 m^3) e médias (até 200 m^3) e de pior caso.

Para os portos organizados, por exemplo o Porto do Forno (figura xx), demais instalações portuárias e outros terminais, a Capacidade Efetiva Diária de Recolhimento de Óleo (CEDRO) deverá ser dimensionada para descarga pequena. No caso de derramamento de óleo até 8 m^3 , a instalação deverá apresentar as ações previstas para garantir a continuidade de resposta ao atendimento da emergência.



Figura 55: Vista aérea da Enseada dos Anjos onde podemos visualizar o Porto do Forno na parte superior da figura, continuando à esquerda temos a Marina dos Pescadores (Google Earth, 2016).

Foram definidas duas situações conforme previsto no CONAMA nº 398, porém só será simulada uma, a descarga de pior caso que no caso do IEAPM é uma descarga classificada como média (50 m^3).

I – Derrame durante o abastecimento (descargas pequenas até 8 m^3).

Exemplificando, podemos citar que, durante a operação de abastecimento de combustível em uma embarcação do IEAPM atracada no cais do porto do Forno, o rompimento de um mangote (ou de uma das conexões ou furos na tubulação), que conectava o caminhão-tanque ao navio ocasionaria um pequeno vazamento.

Estas operações são sempre acompanhadas pelo operador do caminhão-tanque e membros da tripulação, permitindo a identificação de um incidente em menos de 1 minuto. O desligamento da bomba do caminhão não demanda a prática de procedimento operacional prévio, sendo realizado de forma imediata.

Quando da realização dessas operações, as embarcações devem estar cercadas com barreiras de contenção, reduzindo ainda mais o dano ambiental. Vale destacar que, na maioria das vezes, os derrames decorrentes destes incidentes são inferiores a 1 m³ (esse cenário não será modelado pelo pouco impacto ambiental).

II – Derrame devido a encalhe/colisão (descargas médias até 200 m³)

São várias as possibilidades de acidentes com embarcações em um porto. Podemos citar: derramamento devido a uma colisão com outro navio, explosão ou incêndio com embarcação atracada ao cais, ou, durante a manobra de atracação da embarcação, o erro na manobra, a falha de máquinas, ou, ao ser impulsionado por ventos e correntes, provoca sua colisão no cais, ou encalhe nas pedras do mole.

Suponhamos que a colisão/encalhe gere um rombo no casco, atingindo os tanques de combustíveis, e o posterior vazamento de seu conteúdo para o meio marinho no total de 50 m³ (situação de pior caso).

O local do derrame (fonte) simulado está próximo ao sítio onde as embarcações do IEAPM atracam, uma estrutura chamada Duques d'Alba no Porto do Forno (figura 51).

Detalhes da região fonte escolhida e características do vazamento simulado estão resumidas na tabela abaixo.

Tabela 08: Características definidas para a região fonte das simulações realizadas.

Coordenadas da fonte (UTM)	X =	Y =
	806111.68	7456261.5
Vazão efluente (m ³ /s)	0.0278	
Concentração do efluente (kg/m ³)	851	
Volume total do óleo derramado (m ³)	50	
Nº de partículas lançadas a cada intervalo de tempo	150	
Tempo do derramamento (min)	30	
Raio inicial da mancha (m)	117,4	

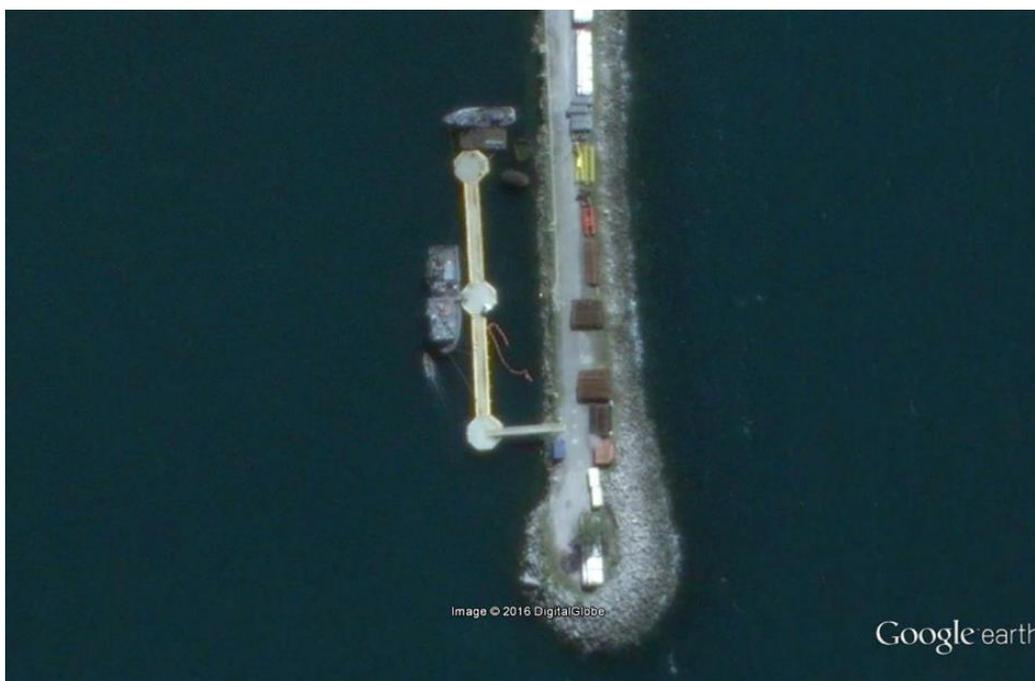


Figura 56: Detalhe de duas embarcações subordinadas ao IEAPM atracadas no Duque d'Alba do Porto do Forno. O AvPqOc "Diadorim" e o AvPq "Aspirante Moura". Data: 08/06/2014 (Google Earth, 2016).

7.4 Resultados

Foi rodado o modelo lagrangeano acoplado ao modelo hidrodinâmico 3D com profundidade de 10 cm a partir da superfície livre. O óleo na condição de um contaminante flutuante desloca-se com a intensidade das correntes de superfície

sensíveis aos efeitos do vento. Contaminantes dissolvidos na coluna d'água são transportados pela velocidade média na vertical sem grande influência dos ventos.

Os resultados foram obtidos na forma probabilística e determinística. Na primeira forma, são simulados 100 derrames, onde a duração de cada evento é similar, podendo ocorrer uma gama de cenários de forçantes hidrodinâmicos e meteorológicos, tais como: início em diferentes instantes de maré, na sizígia ou quadratura, durante o dia, ou à noite e com a atuação de ventos de diferentes intensidades e direções.

A forma determinística será utilizada em 3 cenários, semelhantes à caracterização hidrodinâmica, em situações extremas e bem características da região de estudo que são os ventos típicos, do quadrante SW, e uma situação de ventos fracos.

Outro tipo de resultado gerado pelo modelo é a análise quanto ao tempo de toque no litoral onde é calculado o tempo que o óleo, após o instante inicial do vazamento, toca o litoral, a massa total de óleo (em kg), e o volume total de óleo (m^3), que é absorvido pelo litoral para cada lançamento simulado. A tabela gerada pelo modelo consta do anexo.

7.4.1 Modelo Probabilístico

Para os resultados do modelo probabilístico foi adotado mapas representando a probabilidade de passagem da mancha através de isolinhas de concentração, onde o modelo calculará internamente quantas vezes a mancha passa pelos pontos do domínio modelado, registrando-os nos seguintes períodos, 3, 6, 12 e 24 horas após o derrame do contaminante.

Na visualização do mapa de isolinhas de concentração, a perda de massa do óleo, por evaporação e dispersão segue a mesma formulação do ADIOS2 apresentada no item 7.2.

De acordo com a figura 53, para o tempo de 3h, nota-se que a região da Enseada dos Anjos é a mais afetada. A probabilidade de passagem é grande, próxima ao local da fonte, assumindo, como destino, o flanco direito da Praia dos Anjos e com possibilidade de atingir o cais dos pescadores. Pequena probabilidade de atingir a Enseada do Forno. Essa tendência é corroborada pela

predominância dos ventos da região provenientes do quadrante NE, sendo notada em toda análise probabilística.

Pela figura 54, para o tempo de 6h, observa-se uma situação muito semelhante ao tempo de 3h, todavia, existe uma remota possibilidade da entrada da mancha de óleo na Enseada do Forno. A mesma atinge a Ponta d'Água, a Ilha do Cabo Frio e vence a Ilha dos Porcos.

Na figura 55 (12 horas após o derrame), a mancha já se entende por quase toda EAC. Possibilidade de passagem da mancha (no máximo de 10%) na Enseada do Forno, e de no máximo 5% na Ilha do Cabo Frio e Ilha dos Porcos e, posteriormente, derivando para NE.

Na figura 56, além das características supracitadas, vale mencionar a pequena possibilidade de a mancha sair pelo Boqueirão Sul e aumenta a probabilidade da mancha atingir a Ponta d'Água na Enseada do Forno e a Ilha dos Porcos para cerca de 20 %.

As análises pretéritas demonstram grande tendência de a Praia dos Anjos ser seriamente afetada por um vazamento de óleo no Porto do Forno. Do centro ao flanco direito da praia, nota-se probabilidades sempre acima dos 35%, chegando a cerca de 80% no flanco direito da praia.

Nos próximos resultados – modelo determinístico – verificaremos o deslocamento da mancha em três cenários diferentes, uma situação crítica com ventos de SW, outra sem influência de vento e uma outra situação crítica com ventos de NE através de mapas de isolinhas de concentração.

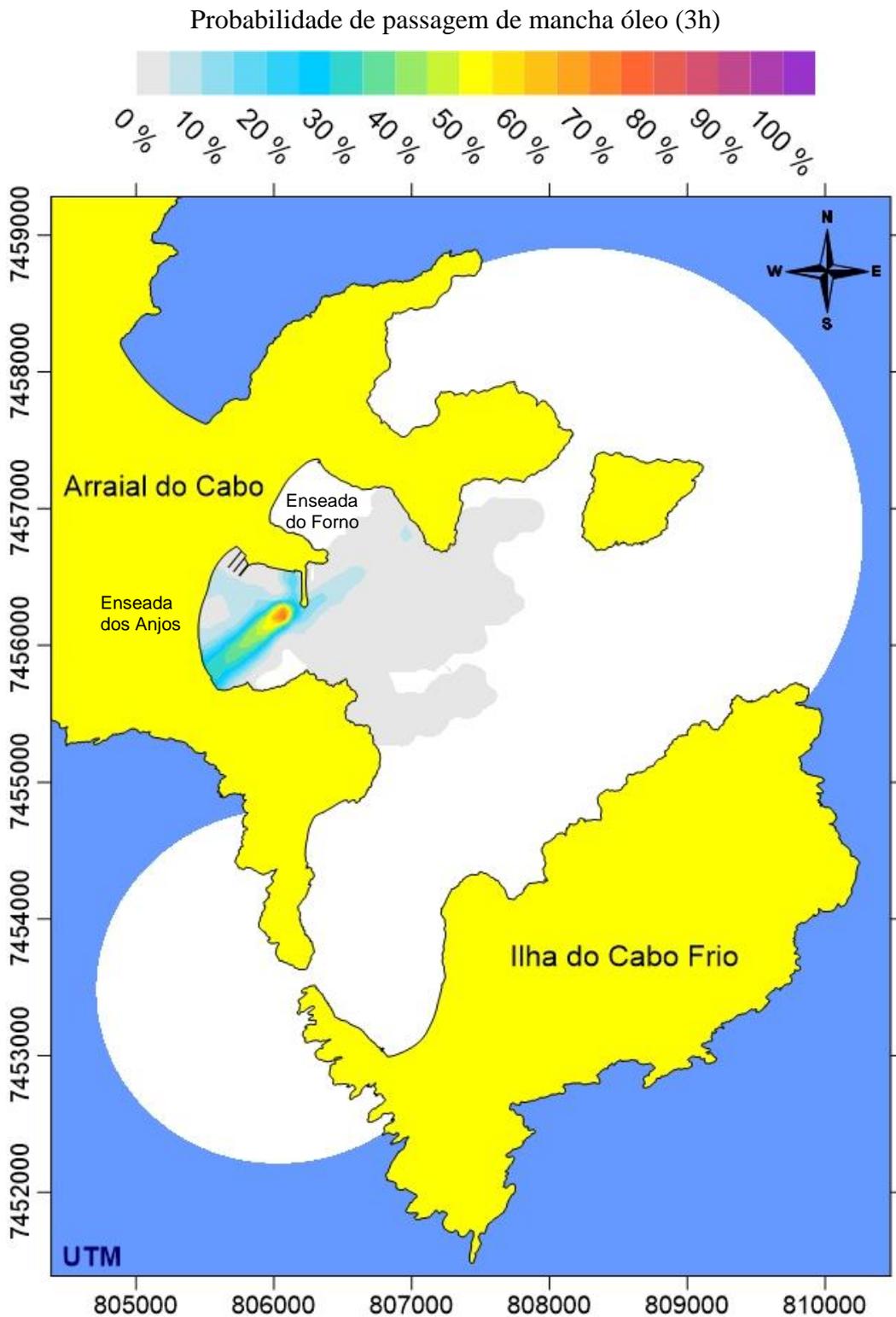


Figura 57: Grande possibilidade de o óleo atingir a Enseada dos Anjos, principalmente o flanco sul da praia. Uma pequena percentagem tem o destino à Enseada do Forno.

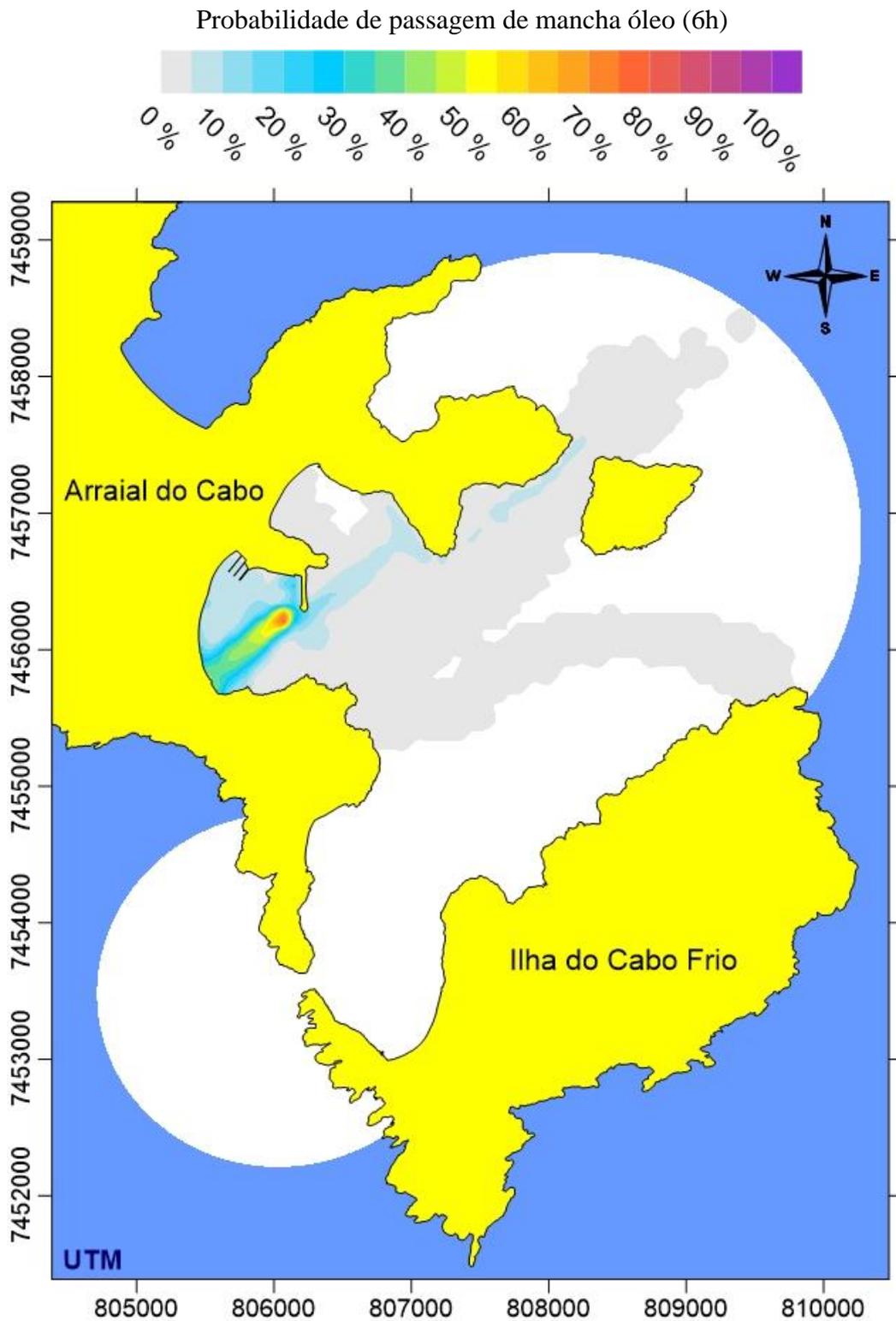


Figura 58: Após 6 horas, constata-se a possibilidade, mesmo que pequena, da mancha atingir a Ilha dos Porcos e a Ilha do Cabo Frio.

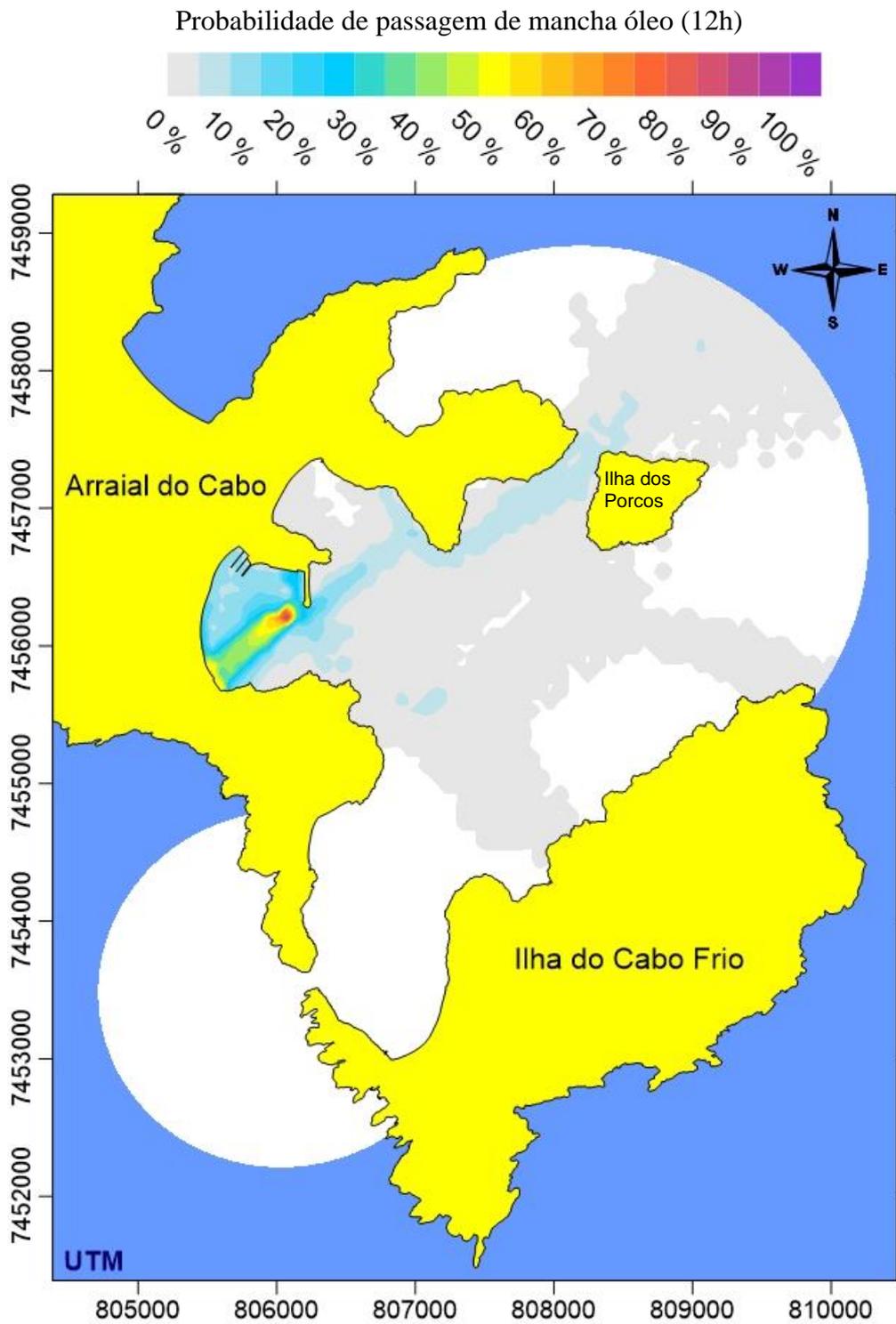


Figura 59: Neste instante, a mancha pode atingir a Ilha do Cabo Frio, parte atravessa a Ilha dos Porcos e deriva para NE. A Enseada dos Anjos é a que tem grande possibilidade de sofrer sérios impactos ambientais e socioeconômicos.

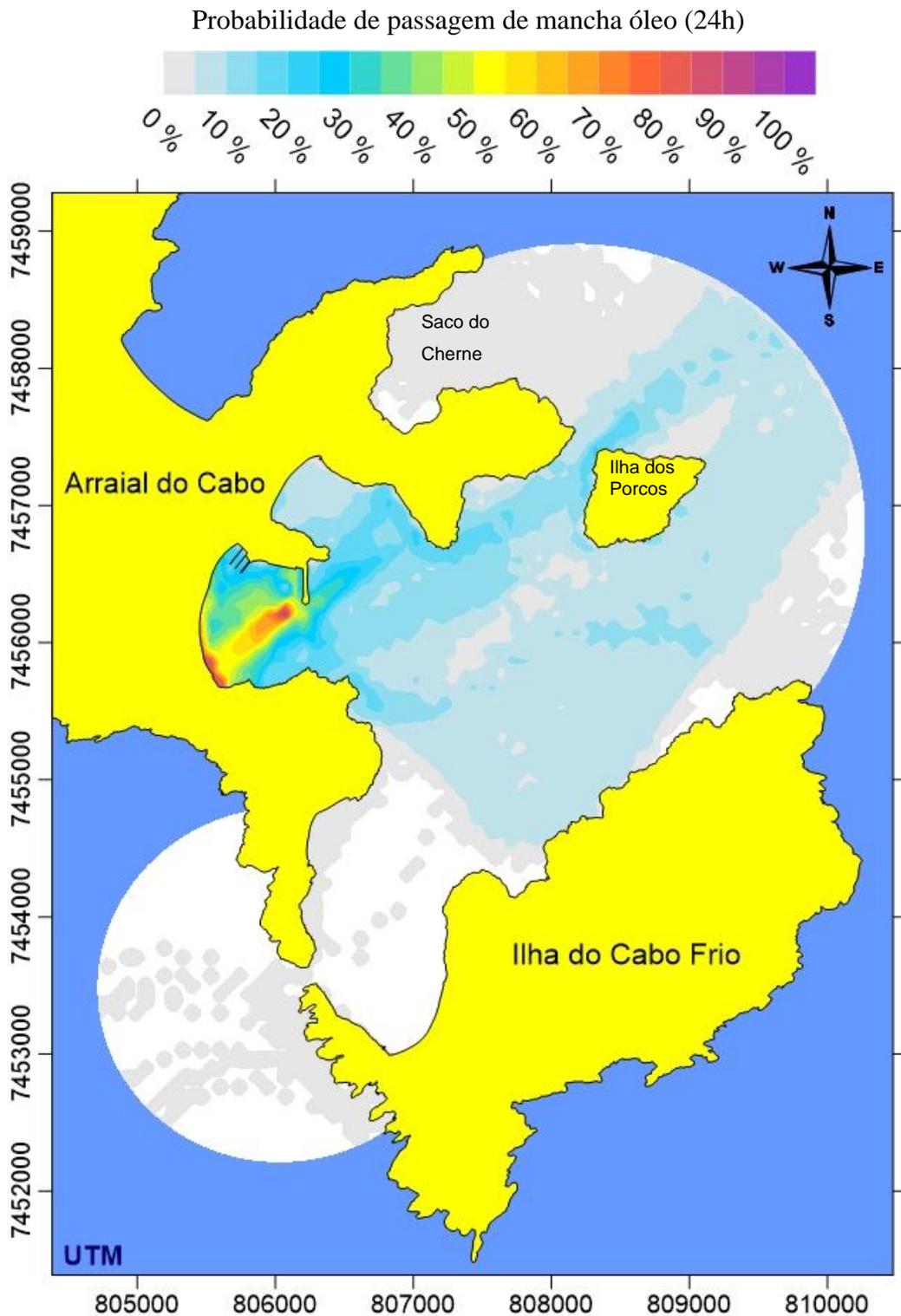


Figura 60: Após um dia, percebemos que a Enseada do Forno e a Ilha dos Porcos tem boas chances de ser impactada pelo contaminante. Pequena possibilidade de a mancha atingir o Saco do Cherne, a Ilha do Cabo Frio e sair pelo Boqueirão Sul. A Enseada dos Anjos é a que sofre grandes impactos ambientais com a ocorrência de um vazamento na região.

7.4.2 Cenário com Situação de Frente Fria

Dia 17 de agosto às 07:30h, nesta situação os ventos estavam com intensidade em torno de 7 m/s chegando a 8 m/s e direção variando entre 230° e 270°. Maré de sizígia enchendo, velocidade de corrente 0,007 m/s.

Foram elaborados mapas (figuras 57 e 58) para o instante inicial da descarga ($t = 0$), após 30 minutos ($t = 0,5$), uma hora ($t = 1$), duas horas ($t = 2$) e quatro horas ($t = 4$).

Os ventos do quadrante SW, concentram grande parte do contaminante dentro da área do porto num instante inicial ($t = 0$). A outra parte se direciona para a extremidade do enrocamento, contornando-o ($t = 0,5$), seguindo em direção à Ponta d'Água ($t = 1$).

No instante ($t = 2$) o óleo atinge a Ponta d'Água. Posteriormente, parte deste óleo atingiria a Ilha dos Porcos derivando para NE ($t = 4$).

Pode-se fazer uma correlação entre os ventos predominantes de inverno (figura 18), o mapa do modelo probabilístico de 24h (figura 56) e os mapas de isolinhas do modelo determinístico (figuras 57 e 58).

No período do inverno, com dados da estação meteorológica localizada no IEAPM, verifica-se que há uma predominância na direção dos ventos no quadrante NE, que compõem cerca de 68% do período supracitado. Já os do quadrante SW possuem uma frequência de cerca de 18%.

Os mapas de isolinhas de concentração (figuras 53 a 56), do modelo determinístico para o cenário de ventos de SW, demonstram a deriva do óleo para a Ponta d'Água na Enseada do Forno.

Os mapas do modelo probabilístico apresentam resultados em torno de 20% da mancha de óleo atingir a Ponta d'Água na Enseada do Forno.

Conclui-se que as probabilidades dos ventos do quadrante SW (18%) para o período do inverno e da deriva da mancha de óleo para esta direção nos resultados do SisBaHiA®, possuem frequência semelhantes. Valores similares são observados com ventos de NE.

Tais fatos comprovam a influência dos ventos no transporte de contaminantes na superfície livre nas EAC.

Ventos do quadrante S-W - Espessura da mancha de óleo (mm)

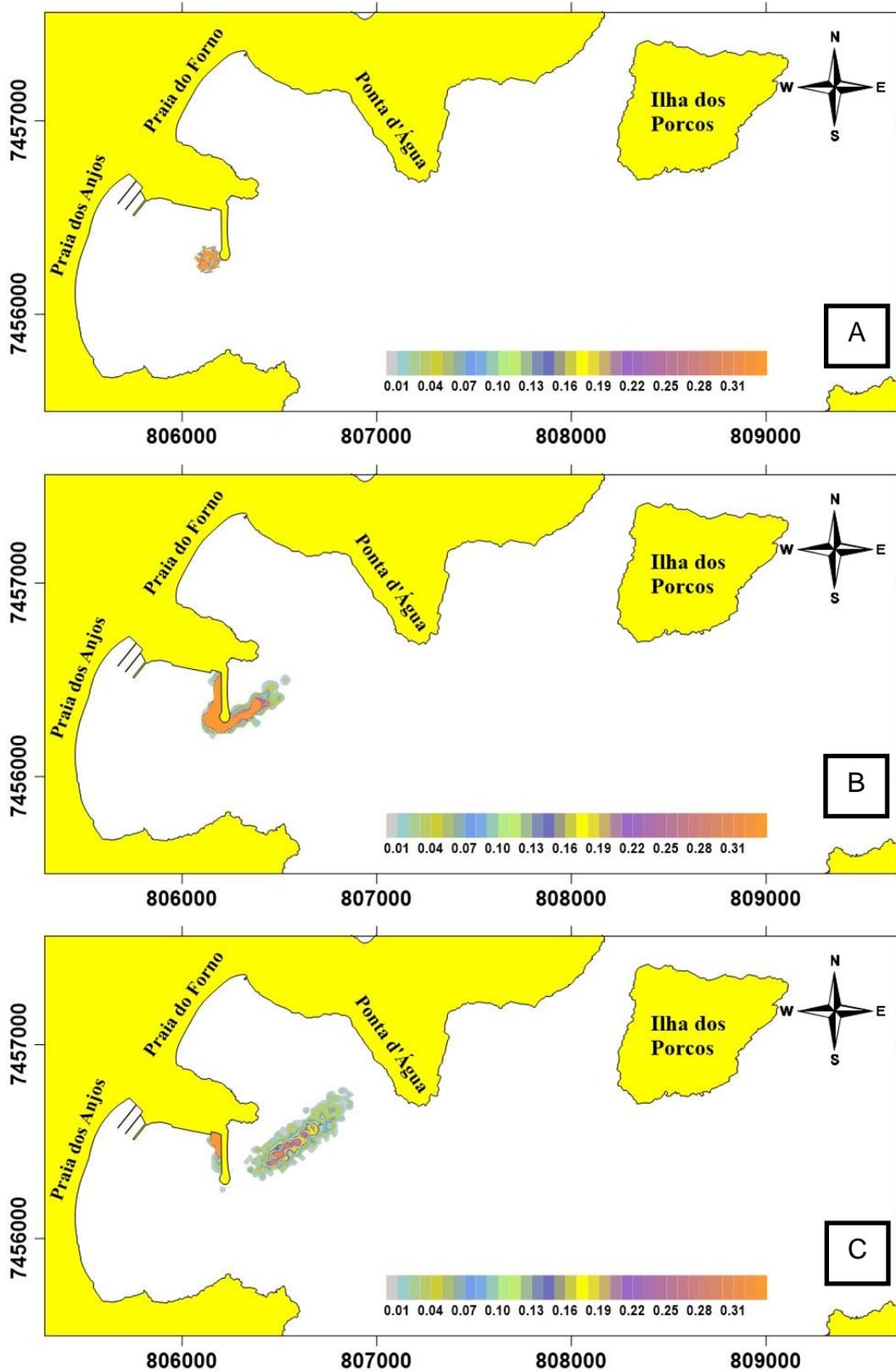


Figura 61: Na parte superior, instante inicial do vazamento. Na figura 57B, após 30 minutos do instante inicial do derrame, a mancha contorna o quebra-mar. Após 1 hora se dirige para a Ponta d'Água (figura 57C).

Ventos do quadrante S-W – Espessura da mancha de óleo (mm)

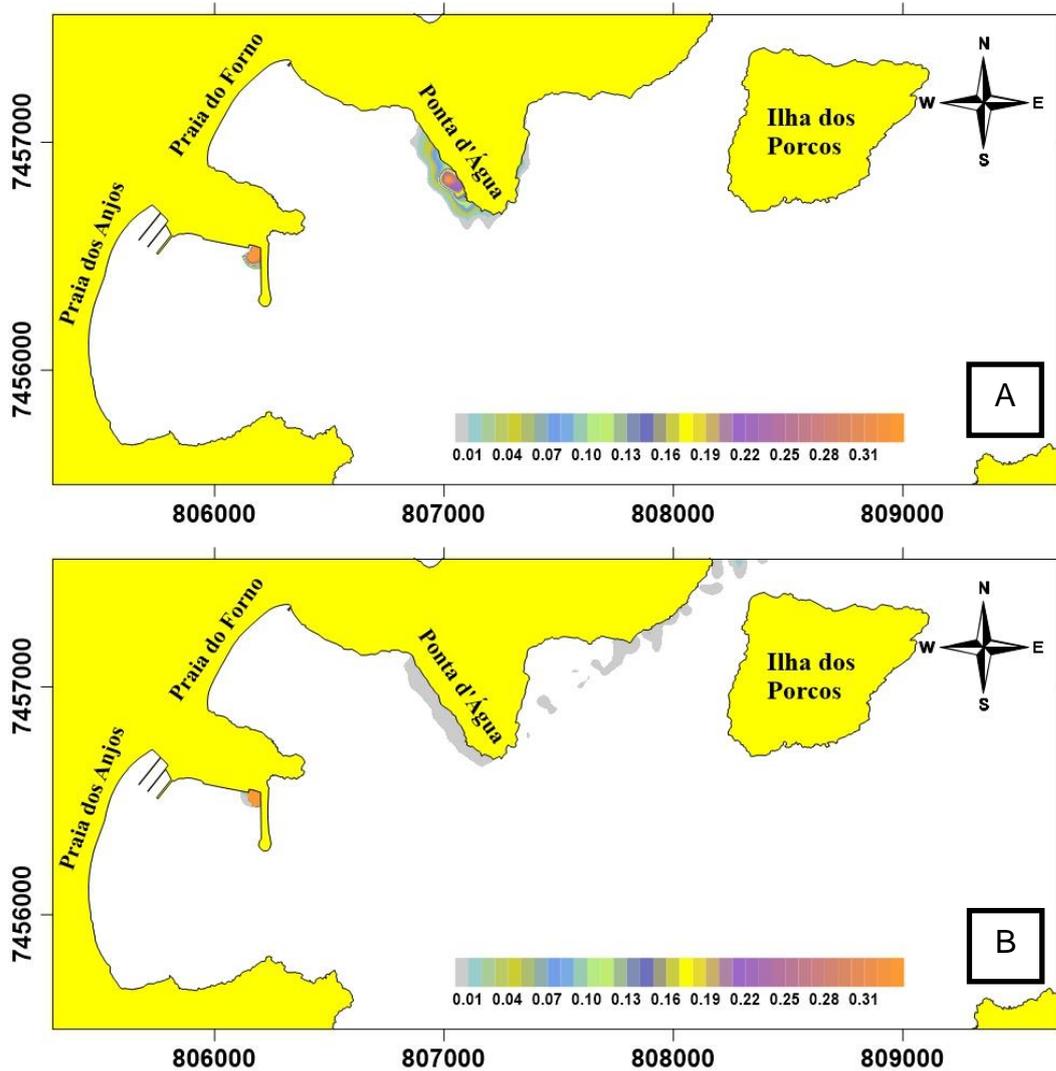


Figura 62: Na parte superior, após 2 horas do instante inicial do derrame, a mancha atinge a Ponta d'Água. Na figura 58B o óleo vence a Ponta d'Água e deriva para à Ilha dos Porcos a NE. Em ambos os casos, grande parte do óleo continua concentrada entre o cais principal do porto e o mole.

7.4.3 Cenário com Ausência de Dinâmicas Externas

Nesta situação, os ventos possuíam intensidade máxima de 1 m/s, rondando entre 000° e 180° . Maré de quadratura, vazando, velocidade decorrente 0,006 m/s (02/08/1999 às 20:00h).

Foram elaborados mapas (figura 59 e 60) para o instante inicial da descarga ($t = 0$), após quatro ($t = 4$), oito ($t = 8$) e doze ($t = 12$) horas do vazamento.

Com ventos de pouca intensidade, nota-se uma pequena dispersão do óleo sobre a superfície da água ao longo das 12 horas de simulação. A mancha se move de acordo com a maré.

No instante ($t = 4$) ela chega a ultrapassar o mole. No instante seguinte ($t = 8$), move-se no sentido oposto em virtude de a maré estar enchendo. Desde o instante inicial até 8 horas após o vazamento, a mancha apenas aumenta seu perímetro e sua espessura diminui com o tempo.

Somente após 12 horas que a mancha toca o mole do Porto do Forno em virtude da atuação do vento, mesmo com pouca intensidade (1 m/s na direção 180°), nos momentos finais da simulação.

A Enseada dos Anjos, local do suposto vazamento, possui um pequeno hidrodinamismo, e neste período, variou entre 0,0007 a 0,009 m/s, afetando pouco o deslocamento do contaminante. Ventos Fracos - Espessura da mancha de óleo (mm)

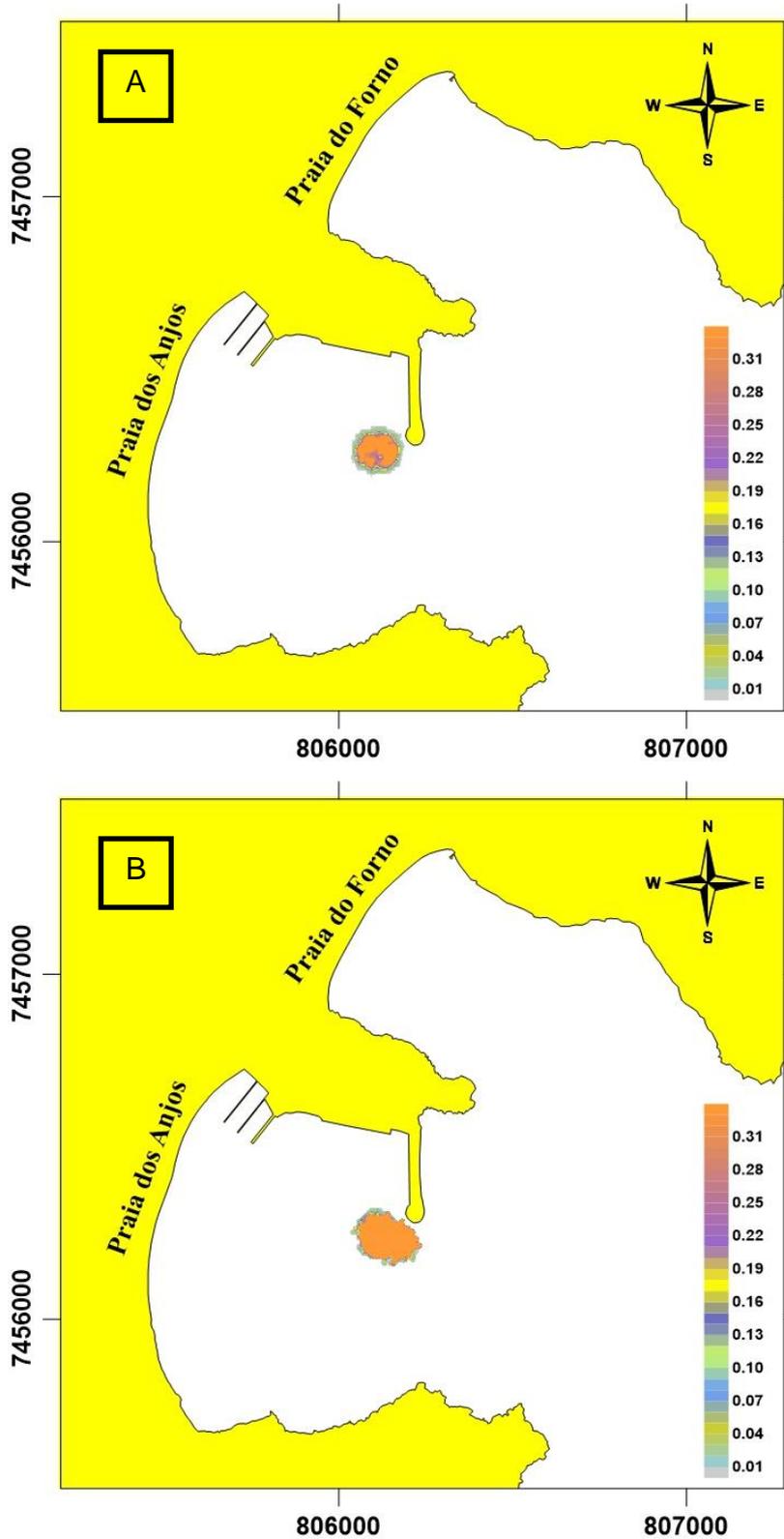


Figura 63 A e B: Podemos observar que a partir do instante inicial a mancha apenas aumenta seu perímetro. A figura 59 B retrata a situação após 4 horas do início do derrame. O instante retrata um período de calmaria.

Ventos Fracos - Espessura da mancha de óleo (mm)

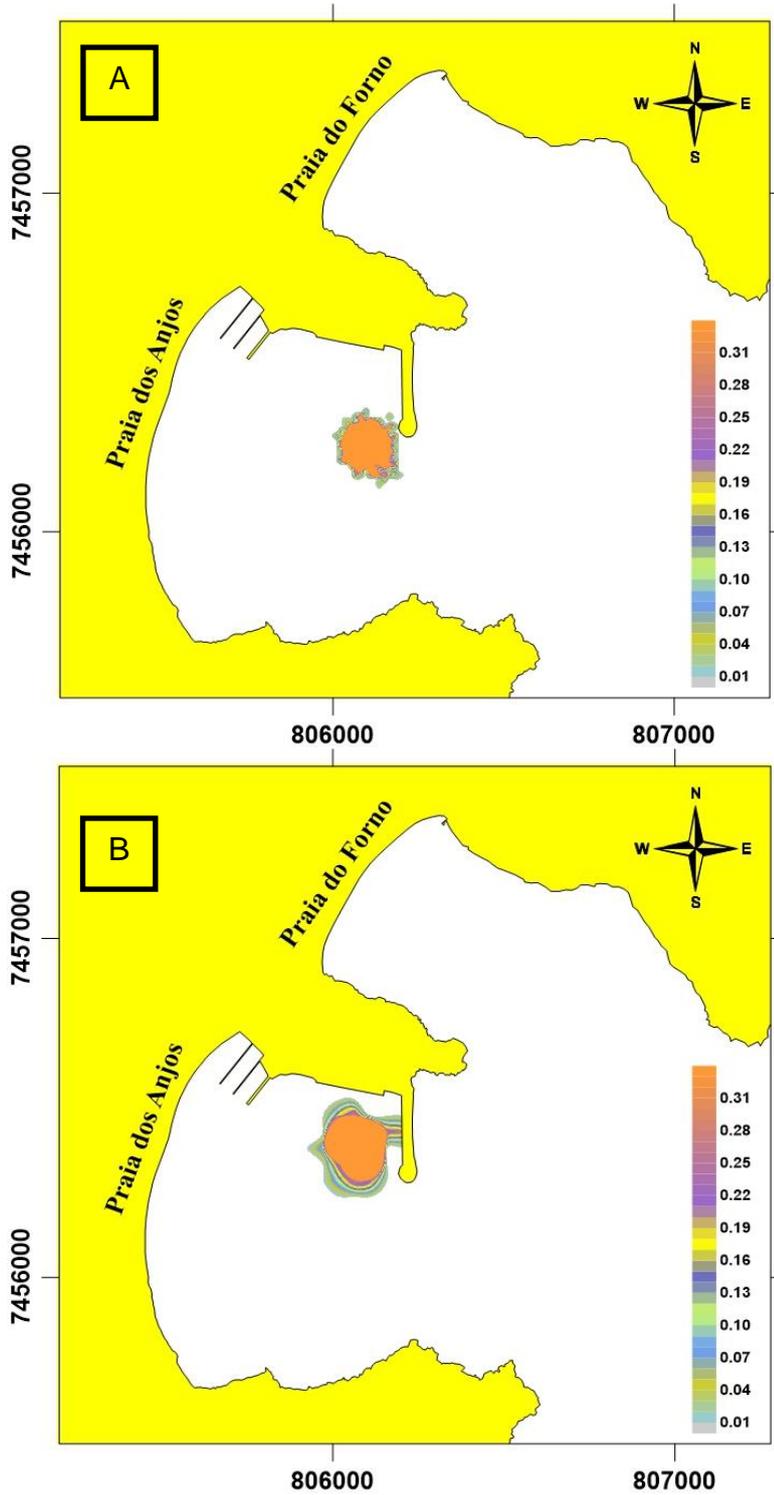


Figura 64 A e B: A mancha permanece com os mesmos fundamentos da figura anterior (60A após 8 horas) sofrendo influência apenas da maré, contudo, na figura inferior (após 12 horas), sofre uma pequena deriva para o norte devido ao vento, atingindo o quebra-mar do porto.

7.4.4 Cenário com Ventos Típicos

Nesta situação, os ventos estavam com intensidade de 6,1 m/s e direção de 67,4°. Maré de quadratura, preamar e corrente com magnitude de 0,002 m/s (02/09/1999 às 07:30).

Foram elaborados mapas (figura 61 e 62) para o instante inicial da descarga, após 30 minutos ($t = 0,5$), uma hora ($t = 1$) e duas horas ($t = 2$) do vazamento.

Percebe-se, claramente, que os ventos provenientes do quadrante N-E, ventos predominantes de tempo bom, tendem a derivar as manchas de óleo para a Praia dos Anjos. O contaminante atinge o flanco sul da praia, na altura do IEAPM, cerca de 90 minutos após o instante inicial do derrame simulado.

Este cenário, segundo os mapas de possibilidade de passagem de manchas de óleo (figuras 53 a 56), é a área com maior possibilidade de ser atingida com os ventos predominantes na região.

Ventos do quadrante N-E – Espessura da mancha de óleo (mm)

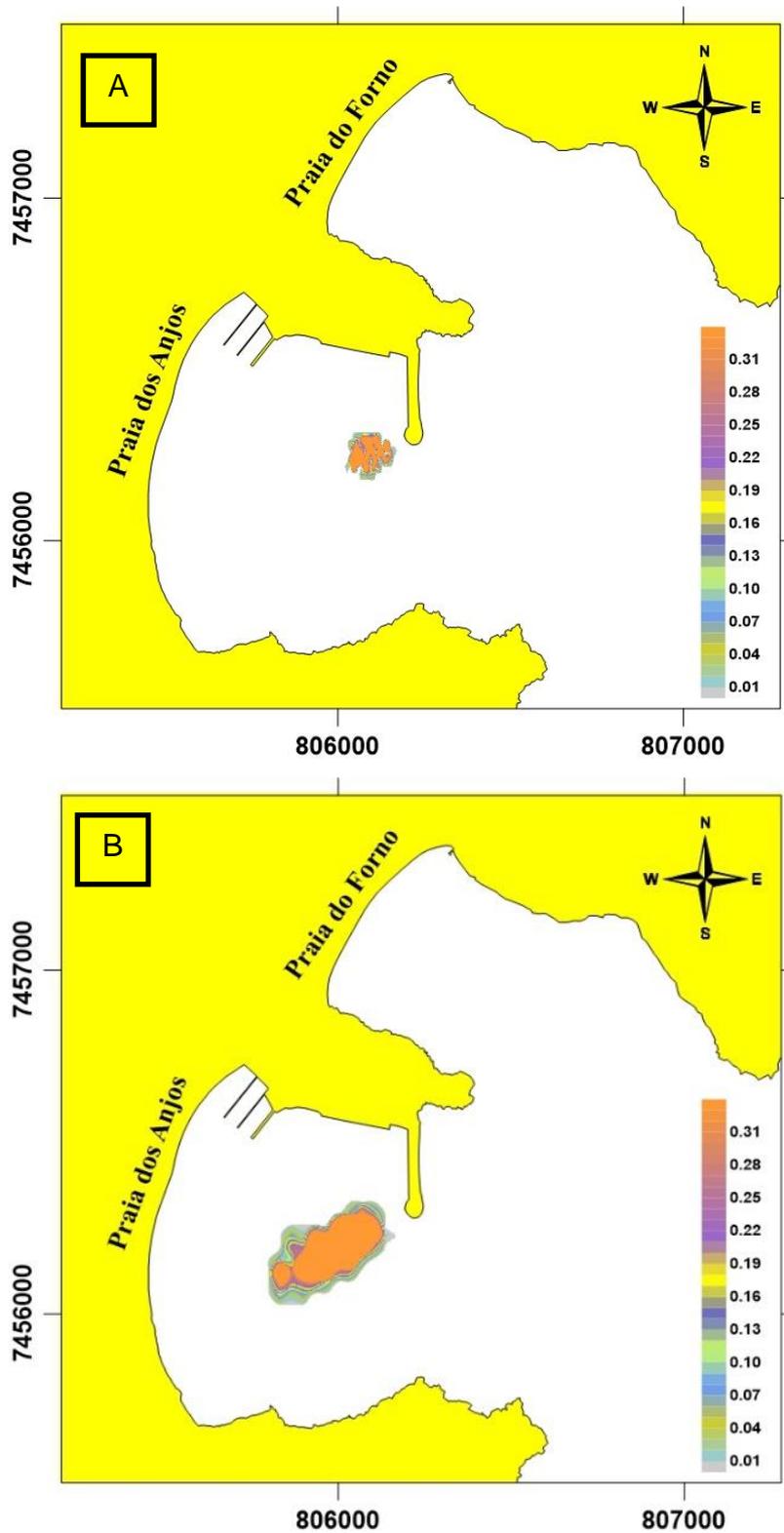


Figura 65 A e B: Modelo determinístico para vazamento de óleo (50 m³) com ventos do quadrante N-E. Na figura 61B, observa-se a forte influência do vento no deslocamento da mancha após 30 minutos.

Ventos do quadrante N-E – Espessura da mancha de óleo (mm)

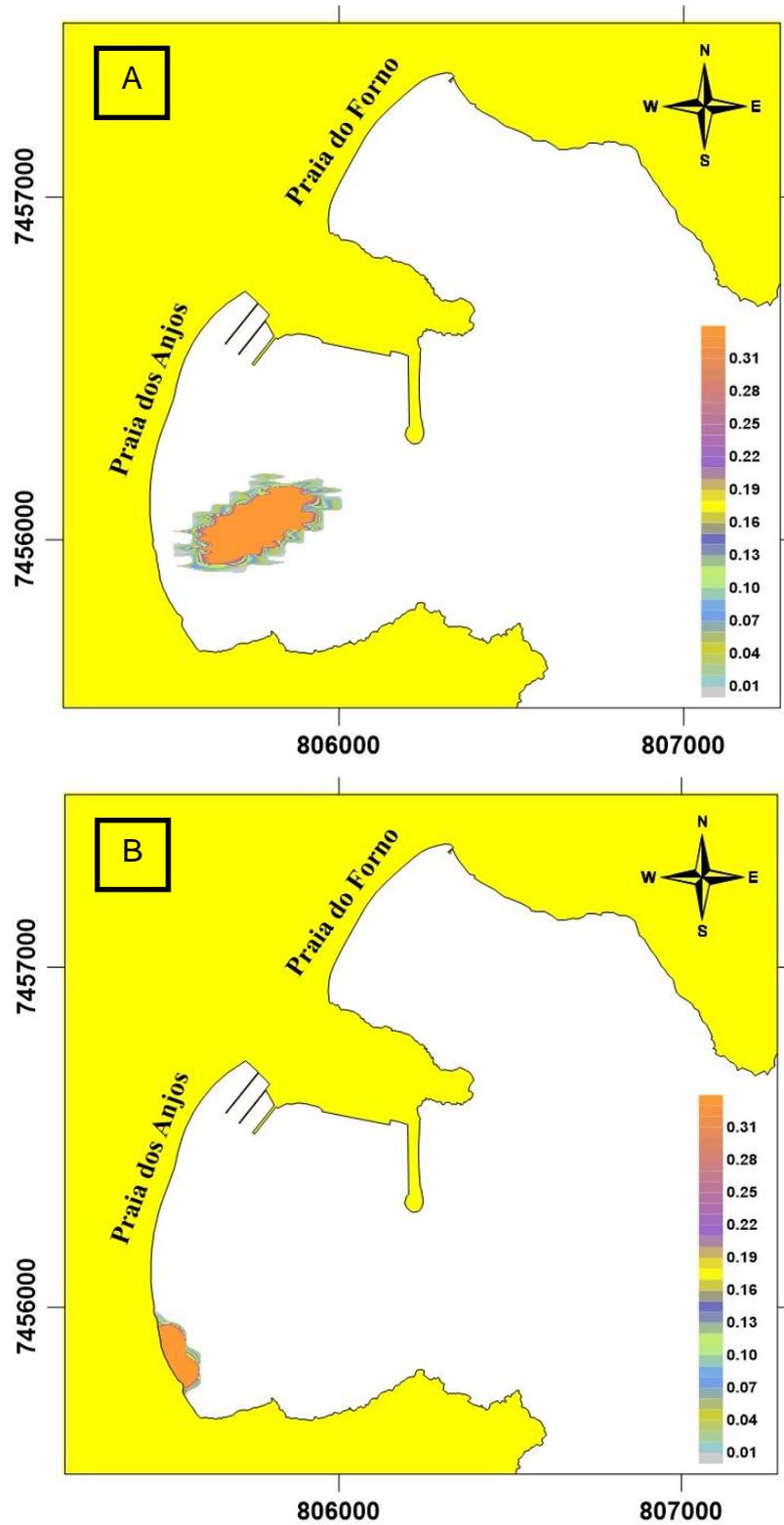


Figura 66 A e B: Após cerca de uma hora, o óleo está prestes a tocar a Praia dos Anjos (62A) e na figura seguinte, após 2 horas do lançamento, já se espalha ao longo da mesma.

Com relação ao toque no litoral (anexo), observamos que as fontes 7, 22, 23, 30, 49, 63, 64 e 65 atingem a costa com o menor tempo (0.11h). As condições meteorológicas reinantes nesses períodos remetem a ventos intensos de SW que deslocariam a mancha para a parte interna do mole a poucos metros da fonte sugerida. Já a fonte 16 é a que leva mais tempo para tocar o litoral (12.39h) em virtude de condições meteorológicas de ventos fracos.

7.5 Medidas Mitigadoras

Medidas mitigadoras são ações tomadas visando a não concretização deste impacto ou a minimização de seus efeitos quando ocorrido.

A ação inicial para se evitar ou reduzir os impactos de um derrame de óleo é a criação de um PEI, que deve ser sempre atualizado, além da promoção de um permanente treinamento teórico, mobilização de recursos e simulados de campo (figura xx), de forma a torná-lo mais eficiente em situações reais.



Figura 67: Treinamento simulando de vazamento de óleo com ventos de NE com a utilização de barreiras de contenção nas proximidades do Porto do Forno. Fonte: Arquivo do IEAPM.

Nos casos de um vazamento de maiores proporções, os responsáveis deverão se utilizar de métodos físicos para conter e recuperar o volume

derramado, antes que a mancha de óleo atinja áreas especiais ou áreas de uso turístico e pesqueiro.

Considera métodos físicos, o uso de sistemas de contenção (barreiras), para um posterior recolhimento através de equipamentos mecânicos, ou por meio de material absorvente exemplificado na figura abaixo (figura 69).

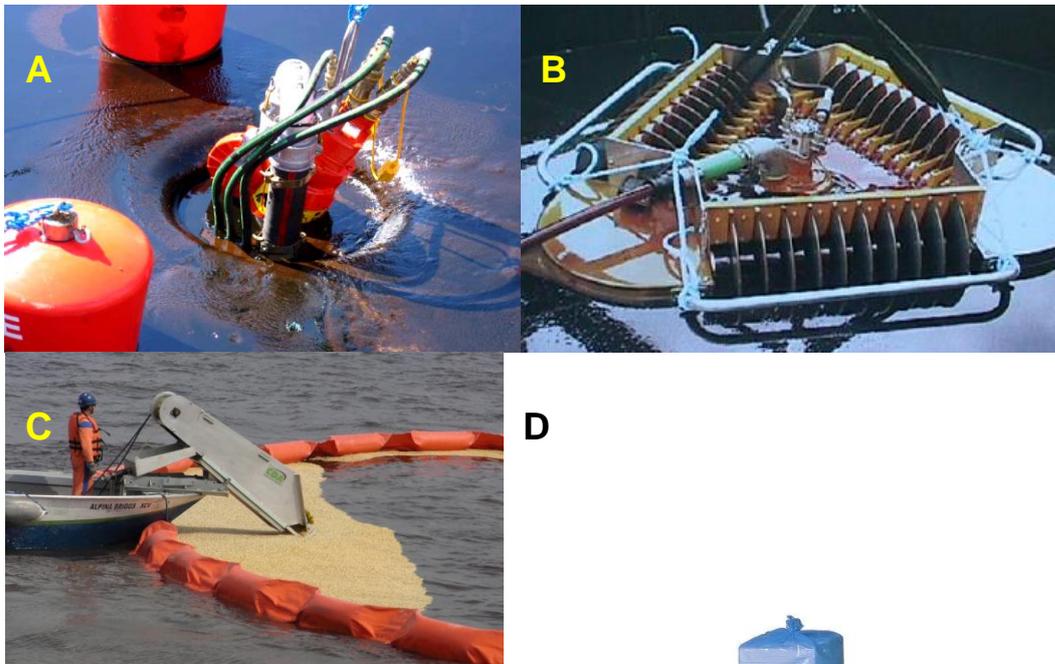


Figura 68: Recolhedores de óleo: A) tipo vertedouro; B) tipo oleofílico; C) tipo mecânico; D) materiais absorventes. Sistemas de contenção – barreiras – (figuras xx e xxC).



No caso de ventos de SW, a pluma tenderá a permanecer na área do porto. Deverão ser lançadas barreiras de contenção (150 metros) junto ao quebra-mar para conter o espalhamento do óleo para fora da área do porto. No caso de a mancha superar o quebra-mar e contorná-lo, as manchas de óleo se deslocarão em direção à Ponta d'Água na Enseada do Forno.

Nessa situação deverão ser montadas barreiras de contenção (300 metros) na altura da Ponta d'Água, pois, existe maricultura (criação de ostras e vieiras) na área (figura 66A).

Em situações de vento NE (figura 66B), de acordo com os dados da simulação, deverão ser montadas barreiras de contenção (200 metros), na parte sul

do quebra-mar do Porto do Forno de modo a evitar o espalhamento e a evolução da mancha.

O tempo de resposta nestas ocasiões é diminuto, o que exigirá uma grande perícia da equipe. Em situações de variações de maré e ventos menos intensos e, por conseguinte, correntes mais amenas haverá maior disponibilidade para o tempo de reação, como verificado nos resultados simulados no item 7.4.

Paralelamente, a tripulação/funcionários do meio contaminante deverá atuar na região da fonte do vazamento procurando estancá-lo através de tamponamento ou bujonamento do rombo no casco dos navios e/ou interrupção da operação de transferência de combustível. As operações de descarga devem ser paralisadas o mais rápido possível.

Deve-se sempre ponderar entre deixar que se processe a evaporação ou se fazer a contenção, lembrando que em determinadas áreas esta contenção pode tornar-se perigosa dado o efeito de concentração de vapores inflamáveis. Toda a zona portuária deverá ser isolada e todas as fontes de ignição eliminadas.

Quando não houver a possibilidade de o poluidor conter e recolher a tempo o óleo derramado, por conseguinte, a contaminação dos ecossistemas costeiros, o mesmo deverá efetuar a remoção dos resíduos das áreas contaminadas, reestabelecendo as condições ambientais do local afetado. Ademais, poderá arcar com as implicações jurídico-financeiras cabíveis, no caso de prejuízos à pesca ou ao turismo (BRASIL, 2015).

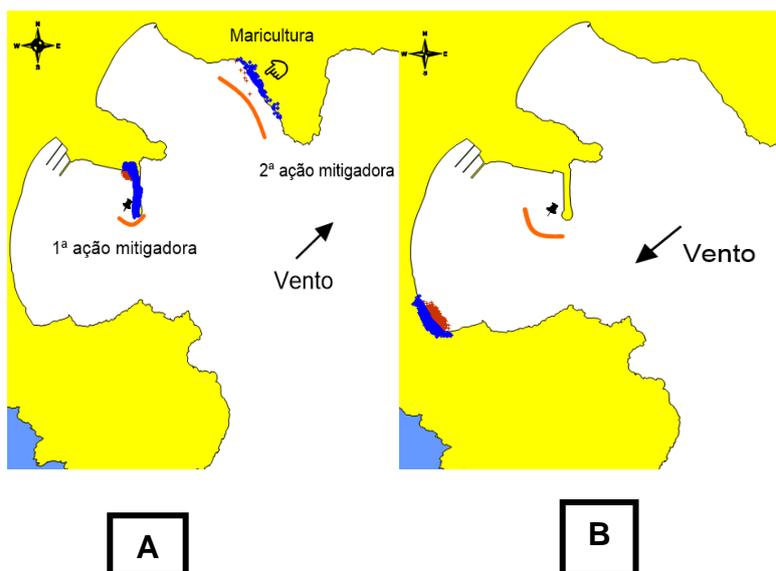


Figura 69: Propostas de ação de mitigadoras para derrames de óleo com ventos predominantes nas EAC. A barreira de contenção está em laranja. A nuvem azul indica os locais onde o contaminante toca o litoral. A) Ventos de SW. B) Ventos de NE.

7.6

Consequências do Derramamento de Óleo nas Enseadas do Arraial do Cabo

Grande parte das ocorrências de derrames acidentais estão na área de influência de portos e representam um risco contínuo e potencial de contaminação do ambiente.

No caso de Arraial do Cabo não é diferente. As consequências de um vazamento, na área do porto do Forno apresentam potenciais impactos de contaminação que se alastram por toda a comunidade biológica marinha, sendo diretamente proporcionais ao volume do óleo derramado. Conforme visto anteriormente, a possibilidade de um contaminante atingir a praia dos Anjos e os costões rochosos é bem factível, originando sérios danos aos recursos naturais e às atividades socioeconômicas da população local.

Conforme prescrito na carta SAO³⁸ da região (figura 62), mais detalhada na figura 63, podemos constatar a presença das seguintes características das feições costeiras locais:

- Índice 1 (ISL 1) – são substratos impermeáveis, de declividade alta a média, expostos com costões rochosos lisos, de alta declividade e falésias em rochas sedimentares expostas localizadas na Ilha do Cabo Frio e dos Porcos, normalmente sujeitas a ondas de um ou mais metros de altura com fortes correntes de maré, e estruturas artificiais lisas (cais comercial do Porto do Forno).

³⁸ Carta de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo da Bacia de Santos. De Barra de São João à Praia de Itaipuaçu-RJ. SAN 10. Fonte: MMA (2007).

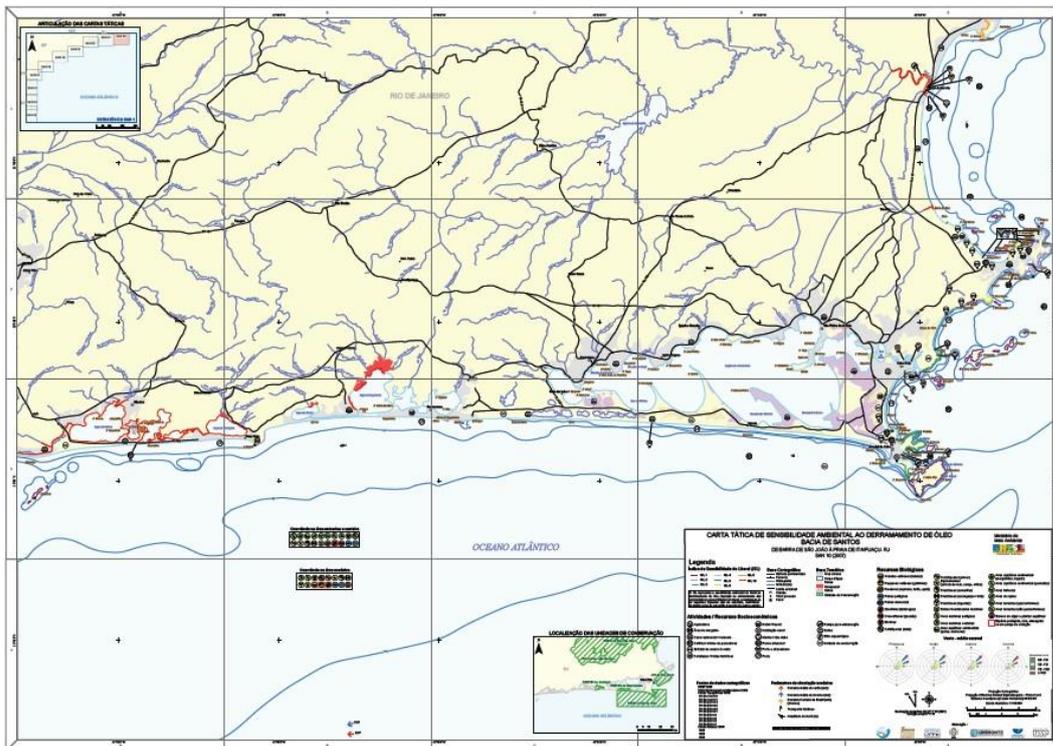


Figura 70: Carta de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo da Bacia de Santos. De Barra de São João à Praia de Itaipuaçu-RJ. SAN 10. Fonte: MMA (2007).

Possuem tendência refletiva, substrato impermeável, sem rugosidades e declividade superior a 30 graus (zona intermarés estreita). Por serem impermeáveis, caracterizam-se por uma área com baixa permanência do óleo, de remoção rápida, de forma natural.

Apesar de ser considerada de baixa sensibilidade, a Ilha do Cabo Frio é um local de pouso, abrigo e reprodução de aves, além de possuir algumas espécies endêmicas que podem ser atingidas por um vazamento de óleo na região (BRASIL, 2014).

- Índice 3 (ISL 3) – são substratos semipermeáveis com baixa penetração. As “praias” do morro do Atalaia foram consideradas praias dissipativas de areia média a fina, com reflexão média de ondas, com declividade da face praial da ordem de 3 a 5 graus (zona intermarés larga) e sedimentos bem selecionados e geralmente compactos (fundo duro).

sedimento. Pode haver a transposição da praia por ondas em situações de tempestade, com potencial contaminação da retaguarda do cordão litorâneo.

As praias da região elevam seu nível de sensibilidade devido à cidade ser um pólo turístico.

- Índice 6 (ISL 6) – são substratos de elevada permeabilidade e alta penetração. Compõem a maior parte do litoral continental como a costa do morro do Atalaia, da enseada do Forno e do Saco do Cherne, além do quebra-mar do Porto do Forno. São na sua maior parte fragmentos rochosos grandes de zonas escarpadas.

Apresentam possibilidade de percolação do óleo até cerca de 100 cm com alta persistência do óleo. Para realizar a limpeza, o jateamento com água pode ser uma solução parcial.

Segundo Coutinho (2007), os costões rochosos que margeiam as Enseadas dos Anjos e do Forno e o Pontal do Atalaia são áreas, ecologicamente sensíveis, por localizarem parte significativa da fauna constituída de bi-valves (mexilhões).

Os costões da Ilha do Cabo Frio são o habitat de fauna e flora de diversidade característica de ambientes tropicais com grande abundância de corais³⁹.

A zona de arrebentação de todas as praias constitui-se em criadouro ou berçário de peixes juvenis (GAELZER, 2005).

As cartas SAO também fornecem outras informações através de símbolos como a presença de um porto, a existência de uma unidade de conservação, a existência de praias destinadas ao turismo, uma forte presença de pescadores e áreas de pesca artesanal.

Conforme apresentado na Carta SAO, as atividades socioeconômicas preponderantes na região são a portuária, a pesca e o turismo.

Na Enseada de Arraial do Cabo são praticadas pescas de cerco com traineiras, na Praia dos Anjos e pescas de cerco de praia e com canoa, na Ilha do Cabo Frio. Nos costões externos à Ilha do Cabo Frio e do Pontal do Atalaia são praticadas pesca de linha⁴⁰.

³⁹ COUTINHO, Ricardo. Biodiversidade dos costões da enseada dos anjos, ilha de cabo frio e águas adjacentes. Comunicação Pessoal. IEAPM. 2007.

⁴⁰ FAGUNDES Netto, Eduardo Barros. Tipos de pescarias realizadas nas águas da enseada dos anjos, ilha de cabo frio e águas adjacentes. Comunicação Pessoal. IEAPM (2007).

Em relação ao turismo, Arraial do Cabo oferece inúmeros atrativos para lazer tais como passeios náuticos, pesca esportiva e mergulhos subaquáticos.

Outro fator que deve ser considerado, é a sazonalidade do fluxo de turistas. A maior parte intensifica-se no verão, carnaval, período de férias escolares e feriados.

A Ilha do Cabo Frio é uma área de interesse da Defesa Nacional, sob responsabilidade administrativa da Marinha do Brasil e controlada pelo IEAPM. Possui uma praia de águas cristalinas e extenso campo de dunas com elevado estado de preservação ambiental.

A praia é amplamente procurada por turistas em passeios náuticos. O IEAPM contabilizou uma média mensal superior a 30.000 visitantes⁴¹, chegando a mais de 80.000 no mês de fevereiro do corrente ano, reduzindo para cerca de 16.000 turistas nos períodos de baixa temporada.

Ademais, Arraial do Cabo é conhecida como a “capital” do Mergulho sendo um dos segmentos do turismo que mais cresce no município. A região possui dezenas de naufrágios catalogados⁴².

⁴¹ Arquivo do IEAPM.

⁴² Disponível em: < <http://www.arraial.rj.gov.br/prefeitura/?local=mergulho>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

8 Conclusões

Os testes realizados com intenção de validar o modelo computacional mostraram boa aderência entre os resultados obtidos com o modelo e os resultados provenientes do ADCP. Para melhorar a aderência dos resultados do modelo, sugere-se uma malha de discretização e dados batimétricos refinados de forma a exprimir o complexo relevo do fundo.

Existe uma significativa influência da maré com as correntes medidas pelo ADCP, tanto na Componente Zonal (U) e a Componente Meridional (V).

Foi identificado que a ação dos ventos do quadrante NE provoca um rebaixamento do NM e a ação dos ventos do quadrante SW provocam o empilhamento de águas junto à costa e, por consequência, o levantamento do NM, em concordância com os estudos de Paiva (1993).

O padrão de circulação hidrodinâmico na região estudada tem significativa influência do vento de meso-escala que é o gerador das correntes externas sendo modulado pela maré (BRANCO, 2000). As correntes de meso-escala intensas regem o sentido da circulação. Em situações de ventos fracos, as correntes dominantes são geradas pela maré.

O regime de correntes no local de fundeio do ADCP, próximo ao Boqueirão Sul, retratam a existência de duas direções, NE e SW, com predominância do fluxo para SW. As correntes para NE são menos frequentes, porém mais intensas, normalmente associadas a passagem de frente frias.

Foi observado a ocorrência do fenômeno da ressurgência no período estudado com temperaturas variando entre 14 e 18 °C, resultante da combinação dos intensos e constantes ventos de NE.

As simulações do derrame demonstraram, pelo modelo probabilístico, que existe uma grande possibilidade de a deriva da mancha de óleo afetar toda Enseada dos Anjos. Possibilidade menor de passagem da mancha (no máximo de 20%) na Ponta d'Água na Enseada do Forno e Ilha dos Porcos. Outra parte deriva para NE em torno de 10% e, com possibilidade reduzida (5%) parte da mancha se dirige para saída pelo Boqueirão Sul atingindo a Ilha do Cabo Frio.

O modelo probabilístico reflete bem os padrões de vento no período do inverno, fornecidos pela estação meteorológica do INMET no IEAPM em termos percentuais.

As frequências dos ventos do quadrante SW possuem uma frequência de cerca de 18%, e os do quadrante NE com predominância de 68%, ambos, assumem probabilidades semelhantes na deriva da mancha de óleo, conforme disposto no modelo probabilístico. Através destes resultados, confirma-se a significativa influência do vento no espalhamento do hidrocarboneto.

As principais consequências do derrame nas EAC, no que tange às atividades socioeconômicas para o caso estudado, implicam em interrupções das atividades do porto, da marina dos Pescadores, da atividade pesqueira local, dos passeios turísticos e das atividades de mergulho.

O cancelamento temporário de tais atividades traz sérios prejuízos à economia local.

Em relação aos impactos ambientais, um acidente desse tipo causaria efeitos indesejáveis sobre quatro compartimentos, quais sejam: praias, costões rochosos, coluna d'água e o ambiente bentônico.

9

Trabalhos Futuros

Ampliar o presente estudo para todas as bases navais, arsenais, estações navais da Marinha do Brasil que sejam organizações militares, potencialmente poluidoras, atualizando os PEI já existentes.

Realizar estudo na EAC em Arraial do Cabo que proponha uma solução mitigadora para o processo de erosão que a praia dos Anjos vem sofrendo com a ampliação do cais do Porto do Forno.

10 Referências bibliográficas

ALPINA BRIGGS. Curso *On Scene Comander*. 2012.

BARBIERI, E.B. **Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas distintos a um curto intervalo espacial**. In: LACERDA, L.D. de; ARAÚJO, D.S.D. de; CERQUEIRA, R.; TURCQ, B.C. RESTINGAS: Origem, Estrutura, Processos. Niterói: UFF, 1984. P. 3-12.

BARROSO JÚNIOR, V. **Metodologia para geração de cartas de correntes de maré em sistemas estuarinos e recintos portuários com aplicação na Baía de Todos os Santos, BA**. 2009. 176p. Dissertação (Mestre em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

BRANCO, F. V. **Análise de dados de circulação (enseada dos anjos - arraial do cabo - rj) com base nos dados de perfilador acústico doppler de correntes (ADCP)**. 2000. 50 p. Monografia. (Bacharelado em Oceanografia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BRASIL. Comando da Marinha. **Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. IEAPM 30 anos: (1984-2014)**. Arraial do Cabo, RJ, Public Editora & Publicidade, 2014. 113 p.

_____. Comando da Marinha. **Diretoria de Hidrografia e Navegação. Roteiro: Costa Sul – Do Cabo Frio ao Arroio Chuí. Lagoas dos Patos e Mirim – 12. ed.; 5. – Niterói, RJ: A Diretoria, 2013. 282 p.**

_____. Comando da Marinha do Brasil. **Diretoria de Portos e Costas. Norma Técnica Ambiental para Elaboração de Laudo Técnico Ambiental.** 62p. 2007

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente - **CONAMA. Resolução nº 398/2008. Plano de Emergência Individual.** Brasília, DF. 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 22 de jul. de 2014.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2000. Características da População e dos Domicílios.** Contagem 2006.

_____. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006b. **A Reserva Marinha Extrativista do Arraial do Cabo.** Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/resex/arraial/visite.htm>. Acesso em 3/02/2009.

_____. **Lei nº 9.605/1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 22 de jul. de 2014.

_____. **Lei nº 9.966/2000.** Dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9966.htm>. Acesso em: 22 de jul. de 2014.

_____. **Lei nº 8.127/2013**. Institui o Plano Nacional de Contingência para Incidentes de Poluição por Óleo em Águas sob Jurisdição Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Decreto/D8127.htm>. Acesso em: 22 de jul. De 2014.

_____. **Ministério do Meio Ambiente**. Cartas de Sensibilidade ao Óleo. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/cartas-de-sensibilidade-ao-oleo>>. Acesso em: 18 de mar. de 2016.

_____. **Ministério do Meio Ambiente**. Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/projeto/_arquivos/cartassao2007port.pdf>. Acesso em: 12 de mar. 2015.

_____. **Reserva Extrativista Marinha do Arraial do Cabo**. Decreto de 3 de janeiro de 1997. Dispõe sobre a criação da Reserva Extrativista Marinha do Arraial do Cabo, no Município de Arraial do Cabo, Estado do Rio de Janeiro, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/DNN/Anterior20a202000/1997/Dnn5025.htm>. Acesso em: 10 jul. 2014.

CANDELLA, R. N. **Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul Através de Modelagem Numérica**. Dissertação de Mestrado. PENO/COPPE/UFRJ. 1997.

_____. **Avaliação da Influência da Construção de um Quebra-mar em uma Enseada Semi-Fechada**. *Relatório Interno, IEAPM*. 2000.

CANDELLA, R. N. & CALIL, L. M. **Marés Meteorológicas em Arraial do Cabo, RJ. III Simpósio Brasileiro de Oceanografia. IOUSP**, São Paulo, SP. 2006.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Ambientes Costeiros Contaminados por Óleo Procedimentos de Limpeza*. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/wp-content/uploads/sites/53/2013/12/ambientes-costeiros.pdf>>. Acesso em: 17 nov.. 2015.

CLARK, R. B. **Marine Pollution**. Oxford University Press. New York. 3ª Ed. 1986.

CODATO, G. **Previsão numérica da perda do sinal acústico submarino na região da ressurgência costeira de Cabo Frio - RJ**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. 2015.

COMAP. Companhia Municipal de Administração Portuária. *Relatório de Impacto Ambiental do Porto do Forno*. 112p. 2009.

CUNHA, Márcio Werneck da. **América de Américo: O desencontro de dois mundos em Cabo Frio (1503-1512)**, incluindo o naufrágio da capitânia de Gonçalo Coelho em Fernando de Noronha. Armação dos Búzios: Ágama, 2004.

ELIAS, L. M. C. **Variabilidade Interanual da Ressurgência de Cabo Frio - RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2009. 118 p.

FABIANO, C. C. L. **O Turismo e a sua Contribuição na Manutenção e na Preservação da Pesca Artesanal e da Cultura Tradicional na Reserva Extrativista Marinha de Arraial do Cabo-RJ**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília, DF, 2011. 152 P.

FEMAR. **Fundação de Estudos do Mar**. Catálogo de Estações Maregráficas. Disponível em: < <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/183.html>>. Acesso em: 06 de mar. de 2016.

FERNANDES, R.; GALVÃO P.; LOURENÇO, F.; VIEGAS, C. NEVES, R. **Modelação de Derrames de Poluentes: Desenvolvimento e Integração na Nova Geração de Ferramentas de Apoio à Decisão. Aplicação na Costa Continental Portuguesa e no Estuário do Tejo**. 11º Congresso das Águas. Porto, Portugal. 2011.

FISCH, C. I. & CANDELLA, R. N. Propagação de Ondas na Enseada dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ; **III Simpósio sobre Oceanografia IOUSP**; São Paulo, SP. 1996.

GAELZER, Luiz Ricardo. **Estrutura da Comunidade de Peixes em Praias Arenosas de Arraial do Cabo, RJ: Variação Nictemal e Influência da Maré**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos. RJ. 2005.

GONZALEZ RODRIGUEZ; E. **La résurgence de Cabo Frio (RJ, Brésil): Fertilité, facteurs nutritionnels limitant la biomasse algale; essai**

d'amélioration. Thèse Doct. Spéc. Océanol., Univ. Aix-Marseille II :112p. 1982.

GONZALEZ RODRIGUEZ, E. et al. Upwelling and downwelling at Cabo Frio (Brazil): comparasion of biomass and primary production responses. **Journal of Plankton Research.** v. 14, nº 2, 289-306. 1992.

GUIMARÃES, V. F., Guyot, J. P., J., & E., O. (s.d.). Uso do ADCP (Correntômetro de Perfilagem Acústica por Efeito Doppler) para Medição de Sedimentos nos Grandes Rios da Bacia Amazônica. **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 8. Disponível em:<https://www.researchgate.net/profile/Jean-Loup_Guyot/publication/271907740_uso_doADCP_correntometro_de_perfilagem_acustico_por_efeito_Doppler_para_medicao_de_vazao_e_estimativa_do_fluxo_de_sedimentos_nos_grandes_rios_da_bacia_amazonica/links/54d610a70cf2464758098044.pdf> . Acesso em: 12 de jul. de 2016.

KLIPPEL, S. **Sensoriamento Remoto dos Oceanos. Ensaio Teórico: Dinâmica dos Oceanos.** Disponível em: <http://ess.inpe.br/courses/lib/exe/fetch.php?media=wiki:user:wiki:user:sandroklippel:trabalho_teorico_sandro_kilppel.pdf>. Acesso em: 03 de out. de 2012.

LAUTRUP, B. **Stoke Waves.** Disponível em: <<http://www.nbi.dk/~lautrup/continuousmatter2/addenda/stokeswaves.pdf>> Acesso em 04 de mar. 2016.

LEMOS, H. M., **Notas de aula do curso de MBE/COPPE/UFRJ.** 2012.

MEGA, A. M.; ALVAREZ, Y. G.; ROMANO, R. C. G.; SANTOS, J. **Caracterização dos Sedimentos Encontrados na Área de Testes do IEAPM.** In: A ressurgência. 53-60. 84p. 2015.

MIRANDA, L. P.; CASTRO, B. M., KJERVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários.** Editora da Universidade de São Paulo. 411p. 2002.

MONTEIRO, A. G. **Metodologia de Avaliação de Custos Ambientais Provocados por Vazamento de Óleo. O Estudo de Caso do Complexo Reduc-DTSE.** 293 p. . Tese (Doutor em Planejamento Energético e Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

MONTEZUMA, P. N. **Impactos nos Processos de Assoreamento na Baía de Sepetiba-RJ, de Sedimentos Oriundos da Bacia Contribuinte e de Dragagens Portuárias.** 105 p. . Dissertação (Mestre em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

_____. **Modelagem de cenários de derramamento de óleo na Baía de Ilha Grande para elaboração do Plano de Emergência.** 91 p. Projeto Final de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MOURA, T. G. R.; ALVES F. N. A.; SOARES, I. D. **Influência De Ondas De Gravidade De Superfície Na Dispersão de Eventuais Derrames de Óleo na Região Costeira do Rio Grande do Sul.** 4o PDPETRO, Campinas, SP, Outubro de 2007.

ODA, T. O. **Influência da Ressurgência Costeira sobre a Circulação Local em Cabo Frio (RJ)**. 177 p. Dissertação (Mestre em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, 1997.

PAIXÃO, S. V., CASTRO, B. M., SOUSA JÚNIOR, S. B. **Estudo de caso de duas condições hidrográficas em Arraial do Cabo com ventos predominantes de sudoeste e nordeste**. In: Revista Pesquisa Naval. n. 25, p. 2-11, 2013.

PAIXÃO, S. V., CASTRO, B. M. **Comparação de Parâmetros Hidrográficos em Arraial do Cabo em duas Situações: Verão e Inverno**. In: Anais Hidrográficos. n. 70, p. 88-100, 2013.

PECLY, J. O. G. **Metodologia para Aquisição, Processamento e Análise de Dados Ambientais em Suporte à Modelagem Computacional Costeira e Estuarina**. 265 p. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

PEDROSA, L. F. **Análise dos Mecanismos de Planejamento e Resposta para Incidentes com Derramamento de Óleo no Mar: Uma Proposta de Ação/ Luciene Ferreira Pedrosa**. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012. XIV, 118 p.: il.; 29,7 cm.

PICKARD, G. L. **Oceanografia Física e Descritiva**. Editora Carioca. 2ª Edição. 180p. 1974.

POND, S.; PICKARD, G. L. **Introductory Dynamical Oceanography**. Pergamon Press. 2º Ed. 329p. 1983.

ROSMAN, P. C. C. **Sistema base de hidrodinâmica ambiental. Referência Técnica.** Programa de Engenharia Oceânica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 347 p. Disponível em: http://www.SisBaHiA@coppe.ufrj.br/SisBaHiA@_RefTec_V95.pdf. Acesso em: 20 de ago. de 2014.

_____. **Um critério para uniformizar os limites de apresentação de resultados de modelos de derrame de óleo.** 4 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2000.

_____. **Modelagem em Tempo Real para Planejamento de Ações Emergenciais.** 26 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

_____. **Modelo Lagrangeano para transporte de escalares passivos.** 4 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

ROSMAN, P. C. C. (coord.) **Vulnerabilidade da Zona Costeira às Mudanças Climáticas.** Fundação COPPETEC. Março, 2009. 537 p.

ROSMAN, P. C. C. Et al. **Subsídios para Modelagens de Sistemas Estuarinos. In: Métodos numéricos em recursos hídricos.** Capítulo 3. 121 p. Rio de Janeiro: v. 3, ABRH. 1997.

ROSSO, T. C. A. **Modelo hidrodinâmico para o transporte de mancha de óleo em regiões costeiras.** 1997. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

SAVI, D. C. **Efeito da construção de um quebra-mar sobre os processos morfodinâmicos e sedimentares na enseada dos anjos, Arraial do Cabo**, RJ. 120 p. Dissertação (Mestre em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

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

SIVAMAR – **Sistema de Vigilância Marítima. Poluição Marinha por Petróleo**. Disponível em: <<http://www.sivamar.org/pesquisa/polho1.htm>> Acesso em: 12 dez. 2015.

SOTO, Y. J. M. **A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR. 2004**. 187 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2004.

SZEWCZYK, S. B. O., **Processos envolvidos em um derramamento de óleo no mar**. FURG. 19p. 2006.

TENÓRIO, M.C; AFONSO M. C.; PINTO, D. C. **Arqueologia do Arraial do Cabo com foco nos sítios da Ilha do Cabo Frio**. Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia de São Paulo. Nº 20. 127-145 p. 2010.

VALENTINI, E. M. S.; ROSMAN, P. C. C. **Apostila Engenharia Costeira & Fluvial**. 142 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

Anexo

Estatística de Toque no Litoral

Fonte	Toque Inicial (h)	Massa Acumulada	Volume Acumulado
1	1.28	38039.942	44.7
2	1.94	42795.147	50.288
3	0.89	42796.177	50.289
4	1.22	42797.127	50.29
5	2.22	42798.666	50.292
6	0.22	42794.374	50.287
7	0.11	42787.69	50.279
8	0.17	42797.476	50.291
9	0.22	42639.021	50.105
10	8.22	42792.435	50.285
11	1.89	42793.157	50.286
12	3.33	42791.917	50.284
13	1.78	42791.582	50.284
14	5.22	42791.802	50.284
15	3.94	42797.368	50.291
16	12.39	42792.872	50.285
17	3.89	42794.333	50.287
18	1.33	42795.585	50.289
19	1.11	42782.504	50.273
20	1.72	41275.568	48.502
21	1.67	13416.722	15.766
22	0.11	41391.886	48.639
23	0.11	42778.781	50.269
24	6.06	42732.884	50.215
25	2.28	42784.924	50.276
26	7.28	42597.984	50.056
27	1.83	42433.78	49.863
28	1.94	35912.707	42.201
29	3.61	3383.457	3.976

30	0.11	42787.194	50.279
31	12.28	42760.365	50.247
32	0.33	42791.006	50.283
33	11.5	42790.769	50.283
34	2.44	42791.601	50.284
35	2.39	42791.154	50.283
36	6	42791.718	50.284
37	0.56	42791.661	50.284
38	1.33	42792.416	50.285
39	1.28	42793.871	50.287
40	2.28	42793.903	50.287
41	2.94	42794.013	50.287
42	1.28	42794.855	50.288
43	2.06	42795.457	50.288
44	0.89	42796.746	50.29
45	1.06	42796.295	50.289
46	1.17	42794.968	50.288
47	1.94	42229.077	49.623
48	1.67	35073.44	41.214
49	0.11	39235.494	46.105
50	0.28	42792.071	50.284
51	3.22	42793.654	50.286
52	4.67	42793.826	50.287
53	2.28	42794.047	50.287
54	2.61	42793.892	50.287
55	1.61	42793.167	50.286
56	3.72	42792.605	50.285
57	3.5	42792.882	50.285
58	5.22	42793.995	50.287
59	2	42795.308	50.288
60	2.39	42782.183	50.273
61	2.06	42751.381	50.237
62	0.28	41841.001	49.167

63	0.11	42676.169	50.148
64	0.11	42797.933	50.291
65	0.11	42804.555	50.299
66	0.17	8719.762	10.246
67	2.06	39.849	0.047
68	3.22	42793.771	50.286
69	0.94	42793.944	50.287
70	1.33	42793.937	50.287
71	1.72	42793.832	50.287
72	3.89	42794.077	50.287
73	1.11	42793.876	50.287
74	4.72	42793.686	50.286
75	2.17	42793.955	50.287
76	1.83	42793.819	50.287
77	3.22	42793.967	50.287
78	2.28	42793.944	50.287
79	6.44	42793.978	50.287
80	1.11	42795.122	50.288
81	1.61	42795.212	50.288
82	1.22	42796.283	50.289
83	1.33	42791.609	50.284
84	1.33	42791.576	50.284
85	0.22	42791.556	50.284
86	0.28	42793.026	50.286
87	0.44	42793.949	50.287
88	2.78	42793.899	50.287
89	2.22	42794.692	50.288
90	1	42795.167	50.288
91	1.61	42794.932	50.288
92	1.5	42796.81	50.29
93	1.61	42798.128	50.292
94	0.28	42793.313	50.286
95	0.28	42790.71	50.283

96	7.06	42781.801	50.272
97	1.17	42763.124	50.25
98	1.78	39925.594	46.916
99	0.89	36041.945	42.352
100	0.17	24032.468	28.24