

UMA ANÁLISE DO SISTEMA LAGUNAR DE ARARUAMA – RJ,
COM ENFOQUE HIDRODINÂMICO

Antonio Carlos Bittencourt Cunha

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Fernando Luiz Bastos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2003

CUNHA, ANTONIO CARLOS BITTENCOURT

Uma Análise do Sistema Lagunar de
Araruama - RJ, com Enfoque
Hidrodinâmico - RJ, [Rio de Janeiro]
2003.

XIII, 163 p, 29.7 cm (COPPE/UFRJ,
Msc., Engenharia Civil, 2003)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Circulação hidrodinâmica
2. Troca de massas de água
3. Lagoa de Araruama

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, aos meus filhos e aos meus pais pelo apoio.

Aos Professores Paulo Cesar Colonna Rosman e Otto Corrêa Rotunno Filho pelas orientações e sugestões fundamentais na execução deste trabalho.

Ao Professor Otto, pela orientação didático-pedagógica e científica, principalmente na definição do tema e na escolha das disciplinas que ajudaram no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Rosman, pelo acompanhamento, dedicação e incentivo no que concerne ao conteúdo técnico-científico deste trabalho.

Ao Professor Henrique Fonseca Netto, meu agradecimento pelo estímulo fornecido para realização deste estudo através do trabalho final da disciplina “Economia e Planejamento Regional e Urbano”.

Aos Professores Rui Carlos Vieira da Silva e Fernando Luiz Bastos Ribeiro pelo apoio que deram.

No período do desenvolvimento da tese, também foi de fundamental importância a presença e solicitude da engenheira Valéria Nunes de Oliveira, a quem não posso deixar de agradecer e deixar aqui meu reconhecimento.

No período de aulas e durante o período da pesquisa, tive a oportunidade de desfrutar da companhia de vários companheiros, aos quais também agradeço.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc).

Uma Análise do Sistema Lagunar de Araruama – RJ, com Enfoque Hidrodinâmico

Antonio Carlos Bittencourt Cunha

Março/2003

Orientadores: Paulo Cesar Colonna Rosman

Otto Corrêa Rotunno Filho

Programa: Engenharia Civil

O estado do Rio de Janeiro possui uma série de lagoas costeiras, distribuídas entre a Ilha Grande e a Baixada Campista, o que demanda um planejamento global para a gestão desse enorme patrimônio ambiental e recuperação das áreas degradadas.

Esta tese faz uma análise comparativa entre a hidrodinâmica atual do sistema lagunar de Araruama e a hidrodinâmica desse sistema após obras de melhoria projetadas em seu canal de ligação com o mar. A metodologia empregada consiste no uso do código computacional SisBAHIA para modelagem da circulação hidrodinâmica e das trocas de massas de água no sistema. Adicionalmente, a abordagem metodológica enfatiza o uso de documentos históricos, da história oral e da experiência do autor.

Os resultados mostram que a maior parte do sistema lagunar tem sua hidrodinâmica dominada pelo vento. A ação das marés na circulação hidrodinâmica é crescentemente relevante das salinas Perinas para a embocadura. Das Perinas para montante, a circulação é amplamente dominada pelo vento. Com as intervenções projetadas de desobstrução do canal de Itajuru até as Perinas, ocorre significativo aumento no prisma de maré. Verifica-se notável mudança nos padrões de circulação hidrodinâmica do trecho sujeito à ação das marés, com significativo aumento na intensidade das correntes. Não se notam mudanças significativas nos padrões de circulação na parte a montante das Perinas. Finalmente, com as obras de desobstrução, há maior troca de massas de água.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

**An Analysis of the Lagoon System of Araruama – RJ,
with a Hydrodynamic Focus**

Antonio Carlos Bittencourt Cunha

March/2003

Advisors: Paulo Cesar Colonna Rosman

Otto Corrêa Rotunno Filho

Department: Civil Engineering

The state of Rio de Janeiro has a series of coastal lagoons between Ilha Grande and Baixada Campista, requiring a global planning for management of this environmental patrimony, and restoration of degraded areas.

This thesis presents a comparative analysis between the current hydrodynamic of the Araruama lagoon system and the hydrodynamic of this system after the implementation of projected works to improve its tidal inlet. The methodology includes the use of the computer code SisBAHIA for modeling of the hydrodynamic circulation and the water masses exchanges in the system. Additionally, the methodological approach emphasizes the use of historical documents, of oral history and of author's experience.

The results show that the hydrodynamic circulation in the larger part of the lagoon system is dominated by wind action. Tidal effects in the hydrodynamic circulation are increasingly relevant from Perinas to the mouth of the canal. Upstream of Perinas, the circulation is amply dominated by the wind. With the projected dredging works for the improvement of the tidal inlet, the tidal prism increases significantly. It is verified a notable change in the circulation pattern in the region of the lagoon system affected by tides, with a significant increase in the intensity of currents. No appreciable modification in the circulation patterns are noticed upstream of Perinas. Finally, there are more exchanges of water masses within the lagoon with the improved tidal inlet.

ÍNDICE

1.	Introdução	1
2.	Aspectos da Evolução das Lagoas Costeiras	8
2.1	O Aparecimento e a Evolução das Lagoas Costeiras	8
2.1.1	Lagoas Costeiras em Regime de Marés (Lagunas)	9
2.1.2	Lagoas Costeiras em Regime de Cheias	10
2.1.3	Preservação das Lagoas Costeiras	11
2.2	Comportamento Físico	11
3.	Metodologia	14
3.1.	Relevância da Modelagem Computacional	15
3.2.	Domínio de Modelagem	16
3.3.	Dados Básicos	16
3.4.	Sistema de Modelagem	17
4.	Caracterização da Área de Estudo	22
4.1.	Introdução	22
4.2.	Localização e Descrição da Área	24
4.3.	Exploração Econômica da Lagoa de Araruama	31
4.3.1.	Exploração de Sal	32
4.3.2.	Exploração de Conchas	33
4.3.3.	Turismo	34
4.4.	Evolução da Região dos Lagos	35
4.4.1.	Canal Palmer e Canal de Mossoró	35
4.4.2.	Década de 40	36
4.4.3.	Década de 50	37
4.4.4.	Década de 60	38
4.4.5.	Década de 70	38
4.4.6.	Década de 80	39
4.4.7.	Década de 90	40
4.5.	Evolução Demográfica	40
4.6.	Ação do Homem	41
4.6.1.	Obras de Proteção das Margens	43
4.6.2.	Dragagens	43
4.6.3.	Obras de Acostagem	44
4.6.4.	Obras de Saneamento	44
4.6.5.	Aterros	45
4.7.	Características Ambientais	47
4.7.1.	Meio Físico	47
4.7.2.	Meio Biológico	55
4.7.3.	Meio Socioeconômico	57
5.	Circulação Hidrodinâmica na Lagoa de Araruama	58
5.1.	Domínio Modelado e Batimetria Atual	58
5.1.1.	Domínio Modelado com Dragagem de Canal	62
5.1.2.	Dados de Maré	63
5.1.3.	Dados de vento	64

5.1.4	Discretização do Domínio Modelado	65
5.2.	Padrões de Circulação Hidrodinâmica	68
5.2.1.	Padrões de Circulação sob Calmaria (sem Ventos)	69
5.2.2.	Padrões de Circulação sob Condições Usuais, Vento Nordeste (NE)	83
5.2.3.	Padrões de Circulação sob Entrada de Frente Fria, Vento Sudoeste (SO)	99
5.3.	Troca de Massas de Água	114
5.3.1.	Condições Iniciais	114
5.3.2.	Apresentação dos Cenários	115
6.	Impactos de Dragagem na Circulação Hidrodinâmica	120
6.1.	Comparação de Valores em Pontos Seleccionados	121
6.2.	Mapas Comparativos	123
7.	Conclusões e Recomendações	141
7.1.	Conclusões	142
7.2.	Recomendações	144
8.	Referências Bibliográficas	148
Anexo 1	Recuperação das Lagoas Costeiras	154
Anexo 2	Trabalhos Desenvolvidos com o SisBahia	157

FIGURAS

Figura	DISCRIMINAÇÃO	Página
1	Lagoa de de Araruama em 1929	3
2	Vista da desembocadura do canal de Itajuru, CaboFrio	4
3	Vista do interior do canal de Itajuru a partir de sua desembocadura	4
4	Canal de Itajuru, na Ponta do Ambrósio	5
5	Panorama geral da Lagoa de Araruama	22
6	Vista da Lagoa de Araruama, imagem de satélite sensor Landsat5-TM	24
7	Modificações nas margens do canal de Itajuru	27
8	Planta geral da Lagoa de Araruama	28
9	Evolução dos esporões	29
10	Ponta da Acaíra, Arraial do Cabo	30
11	Exemplos de marachas	31
12	Salinas e marnéis	32
13	Áreas de concessão de lavras	34
14	Canal Palmer, Cabo Frio	35
15	Estatística da direção do vento	48
16	Distribuição de velocidade e direção do vento entre 1976 e 1997	49
17	Dados de vento do vento NE	50
18	Dados de vento SO, condições de entrada de frente fria	50
19	Localização das estações maregráficas	52
20	Salinidades médias de algumas lagunas do litoral sul fluminense	54
21	Imagem de satélite com 15m de resolução da Lagoa de Araruama	59
22	Mapa da batimetria geral	60
23	Detalhe da batimetria atual entre Cabo Frio e São Pedro da Aldeia	61
24	Detalhe da batimetria entre Cabo Frio e São Pedro da Aldeia, com dragagem para 3,70 m de profundidade	62
25	Curvas de maré nas cercanias da embocadura do canal de Itajuru	64
26	Domínio modelado	66
27	Detalhes da malha de discretização entre São Pedroda Aldeia e Cabo Frio, acima com batimetria atual e abaixo com o canal dragado	67
28	Localização das estações	68
29	Gráfico com variação de níveis nas estações 1, 4, 5, 7 e10	69
30	Isolinhas de elevação da superfície livre na lagoa, com preamar na embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 32	71
31	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com preamar na embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 32	72
32	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, em situação de calmaria (sem ventos), com preamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 30, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 31	73
33	Isolinhas de elevação da superfície livre, com meia maré de vazante na embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 35	74
34	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com meia maré de vazante embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 35	75
35	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, em situação de	76

	calmaria (sem ventos), com meia maré de vazante na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 33, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 34	
36	Isolinhas de elevação da superfície livre, com baixamar na embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 38	77
37	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com baixamar de vazante embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 38	78
38	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, em situação de calmaria (sem ventos), com baixamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 36, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 37	79
39	Isolinhas de elevação da superfície livre, com meia maré de enchente na embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 41	80
40	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com meia maré de enchente embocadura, sem ventos, detalhe na Figura 41	81
41	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, em situação de calmaria (sem ventos), com meia maré de enchente na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 39, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 40	82
42	Elevação de níveis para vento usual (NE)	84
43	Isolinhas de elevação do NA, retratando a hora 68, onde ocorreram maiores desníveis entre leste e oeste, não causados pela ação da maré; vento de ENE	86
44	Mapa de correntes, retratando a hora 68, ocorreram os maiores desníveis entre leste e oeste na lagoa, independentes da ação da maré; vento de ENE	86
45	Isolinhas de elevação da superfície livre na lagoa, com preamar na embocadura, vento NE, detalhe na Figura 47	87
46	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com preamar na embocadura, vento NE, detalhe na Figura 47	88
47	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento NE, com preamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 45, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 46	89
48	Isolinhas de elevação da superfície livre, com meia maré de vazante na embocadura, vento NE, detalhe na Figura 50	90
49	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com meia maré de vazante embocadura, vento NE, detalhe na Figura 50	91
50	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento NE, com meia maré de vazante na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 48, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 49	92
51	Isolinhas de elevação da superfície livre, com baixamar na embocadura, vento NE, detalhe na Figura 53	93
52	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com baixamar de vazante embocadura, vento NE, detalhe na Figura 53	94
53	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento NE, com baixamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 51, e a inferior, o campo de correntes,	95

	conforme Figura 52	
54	Isolinhas de elevação da superfície livre, com meia maré de enchente na embocadura, vento NE, detalhe na Figura 56	96
55	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com meia maré de enchente embocadura, vento NE, detalhe na Figura 56	97
56	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento NE, com meia maré de enchente na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 54, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 55	98
57	Elevação de níveis para vento SO	100
58	Isolinhas de elevação da superfície livre na lagoa, com preamar na embocadura, vento SO, detalhe na Figura 60	102
59	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com preamar na embocadura, vento SO, detalhe na Figura 60	103
60	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento SO, com preamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 58, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 59	104
61	Isolinhas de elevação da superfície livre, com meia maré de vazante na embocadura, vento SO, detalhe na Figura 63	105
62	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com meia maré de vazante embocadura, vento SO, detalhe na Figura 63	106
63	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento SO, com meia maré de vazante na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 61, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 62	107
64	Isolinhas de elevação da superfície livre, com baixamar na embocadura, vento SO, detalhe na Figura 66	108
65	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com baixamar de vazante embocadura, vento SO, detalhe na Figura 66	109
66	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento SO, com baixamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 64, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 65	110
67	Isolinhas de elevação da superfície livre, com meia maré de enchente na embocadura, vento SO, detalhe na Figura 69	111
68	Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, com meia maré de enchente embocadura, vento SO, detalhe na Figura 69	112
69	Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica, vento SO, com meia maré de enchente na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 67, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 68	113
70	Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, ambas no instante 1 (instante inicial)	116
71	Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, ambas no instante 2, após 5 dias de simulação	117
72	Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, após 10 dias de simulação	118
73	Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa	119

	inferior, após 15 dias de simulação	
74	Localização das estações	120
75	Variação da maré em três pontos da lagoa; à esquerda, com batimetria atual, e, à direita, com canal dragado de 3,0 m	121
76	Detalhe da variação da maré em dois pontos da lagoa; à esquerda, com batimetria atual, e, à direita, com canal de 3,0 m	122
77	Séries temporais comparando magnitude de componentes de velocidade de correntes nas estações 4 e 6	123
78	Elevação da superfície livre em preamar na embocadura; vista geral da lagoa	124
79	Elevação da superfície livre em preamar na embocadura; detalhe do canal, na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	125
80	Padrão de correntes com preamar na embocadura; vista geral da lagoa: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	126
81	Padrão de correntes com preamar na embocadura; detalhe do canal: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	127
82	Elevação da superfície livre em meia maré de vazante; vista geral da lagoa: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	128
83	Elevação da superfície livre em meia maré de vazante; detalhe do canal: na estampa superior, com batimetria atual, e na inferior, com canal dragado de 3 m	129
84	Padrão de correntes em meia maré de vazante; vista geral da lagoa: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.	130
85	Padrão de correntes em meia maré de vazante; detalhe do canal: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.	131
86	Elevação da superfície livre em baixamar na embocadura; vista geral da lagoa: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	132
87	Elevação da superfície livre em baixamar na embocadura; detalhe do canal: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	133
88	Padrão de correntes em baixamar; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	134
89	Padrão de correntes em baixamar; detalhe do canal: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	135
90	Elevação da superfície livre em meia maré enchente; vista geral da lagoa: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	136
91	Elevação da superfície livre em meia maré enchente; na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado para 3 m	137

92	Padrão de correntes em meia maré vazante; vista geral da lagoa: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	138
93	Padrão de correntes em meia maré vazante; detalhe da região do canal: na estampa superior, com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m	139

TABELAS

Tabela	DISCRIMINAÇÃO	Página
1	Áreas drenadas na bacia da Lagoa de Araruama	25
2	Vazão média dos principais rios afluentes	26
3	Evolução demográfica na Região dos Lagos, RJ (CIDE, 1999)	40
4	Principais constantes harmônicas do Porto de Arraial do Cabo (DHN)	63

1. INTRODUÇÃO

O processo natural de evolução de estuários pode ser modificado pela atividade humana. Tal atividade pode ser positiva ou prejudicial à preservação do sistema, devendo ser submetida a um planejamento em um contexto de gestão ambiental.

Em consequência, a intervenção a partir de obras de engenharia requer cuidados para que se minimize o impacto no meio ambiente. Os seguintes aspectos devem ser considerados na análise do meio físico:

- conhecer sua evolução;
- entender fisicamente seu comportamento;
- levantar os seus dados principais e pertinentes;
- interpretar os dados e os resultados;
- propor alternativas de solução.

Um estuário é um corpo de água semi-confinado na costa, que tem ligação com o mar, no qual a interação da água do mar com a água doce, proveniente da drenagem das bacias hidrográficas de seu entorno, é a principal característica. Nele, os principais processos sedimentológicos e morfológicos têm a maré como principal agente físico (Motta, 1978).

Por serem abundantes em peixes e crustáceos e contando, ainda, com a presença periódica de outros animais que vão ao local em busca de alimentos, os sistemas estuarinos são classificados como ecossistemas ricos em quantidade e variedade de espécies. Em decorrência, constituem elementos fixadores de população, sendo que muitos possuem profundidades que viabilizam a navegação.

Por essa razão, as grandes e antigas cidades como Londres, Nova York, Lisboa, Rotterdam, Amsterdam, Antuérpia, Liverpool, Hamburgo, Bremen, Bordeaux, Buenos Aires, Santos, Rio de Janeiro, entre muitas outras, desenvolveram-se às margens de

estuários ou de sistemas estuarinos. Na sua grande maioria, foram construídos portos às suas margens, tanto para escoar as riquezas produzidas, como também para facilitar sua proteção (Motta, 1978).

Com o tempo, viraram grandes cidades, tornando-se pólos industriais e/ou turísticos com grande desenvolvimento, ofertando, além de empregos, uma melhor qualidade de vida com os maiores e os melhores recursos disponíveis. Essa ocupação gerou várias intervenções humanas sem planejamento, tais como:

- lançamento de efluentes domésticos e industriais;
- interferência no fluxo de sedimentos e na hidrodinâmica, em decorrência de dragagens e aterros, bem como construções de espigões, trapiches e toda sorte de elementos estranhos sobre o espelho de água, áreas marginais e mangues;
- desvios de cursos de rio ou de canais;
- diques de proteção e construção de canais artificiais.

Essa falta de planejamento acelerou a degradação natural, apresentando, com o tempo, problemas de ordem ambiental e social, destacando-se a poluição das águas, atingindo os rios, os sistemas estuarinos e as praias oceânicas.

O planejamento da gestão de um sistema estuarino consiste na aplicação de um conjunto de metodologias e procedimentos que avaliam as consequências ambientais de uma ação a ser proposta.

Por outro lado, o impacto no meio ambiente pode ser considerado como um desequilíbrio ou conflito de interesses entre as diversas atividades humanas, bem como entre as necessidades dos processos naturais e os recursos ambientais existentes. Para atingir o equilíbrio é necessário:

- ação corretiva, a fim de equacionar os desequilíbrios, por meio do levantamento dos dados pertinentes, de projeto de recuperação do passivo ambiental e de projetos adequados às novas condicionantes;

- ação preventiva, para intervir na natureza e controlar as atividades humanas de forma a evitar desequilíbrios futuros.

A ação preventiva pode ser dividida em dois aspectos: controle e planejamento. A ação corretiva, por sua vez, consiste em um processo político e administrativo (Almeida *et al.*, 1993).

Nesse contexto, o corpo hídrico escolhido para este trabalho foi a Lagoa de Araruama (Figura 1), que é um estuário tipo laguna, assoreada em seu canal de ligação com o mar e no seu interior, tanto por processo natural quanto pela ação do homem. Portanto, há necessidade de uma ação corretiva para possibilitar trocas de massas de água e biológica entre o mar e a lagoa em cada ciclo de maré.

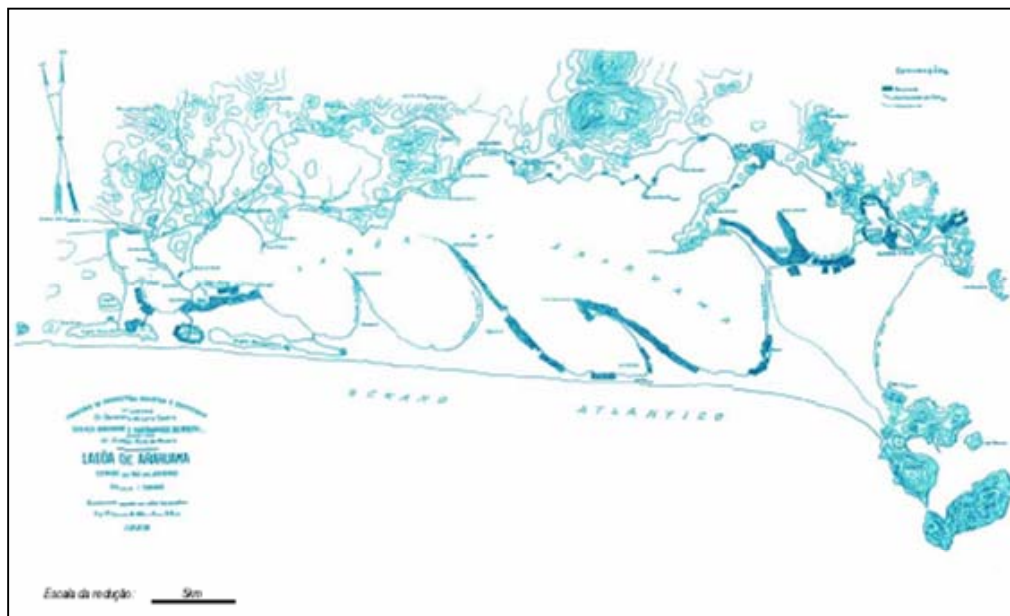


Figura 1 – Lagoa de de Araruama em 1929 (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

Mais especificamente, a saída do canal de Itajuru (Figura 2) encontra-se em equilíbrio sedimentométrico estável. Por outro lado, o interior de seu canal de ligação com o mar está bastante alterado devido aos sucessivos aterros e construções sem planejamento (Figuras 3 e 4).



Figura 2 - Vista da desembocadura do canal de Itajuru, Cabo Frio, RJ.



Figura 3 - Vista do interior do canal de Itajuru a partir de sua desembocadura; observa-se, na foto, a existência de uma ilha no meio do canal muito próximo à foz; tanto nela quanto na margem à esquerda da foto há várias construções.



Figura 4 - Canal de Itajuru, na Ponta do Ambrósio (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

É importante observar que o presente trabalho inspira-se no projeto de “Desobstrução do Canal de Itajuru”, realizado pelo autor e pelo engenheiro Augusto César Cunha Muller (Cunha e Muller, 1997), ambos da Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) na época, e apresentado ao Fundo Estadual de Conservação Ambiental (FECAM) pela Prefeitura de Cabo Frio em nome das outras prefeituras do entorno da Lagoa de Araruama. O projeto contemplava serviços de levantamento de dados, projeto de dragagem e dragagem. Na oportunidade, propunha-se, também, a elaboração de estudos hidrodinâmicos relativos ao impacto que poderia ocorrer em função de diferentes profundidades do canal de Itajuru.

Destaca-se, ainda, que, durante o ano de 2002, o autor esteve envolvido em um projeto desenvolvido pela COPPE (COPPETEC, 2002) sobre o sistema lagunar de Araruama. A imersão do autor no tema permitiu que houvesse um aprofundamento científico, com a conseqüente elaboração deste texto.

Feita essa breve exposição, destaca-se que o objetivo do presente trabalho é fazer uma análise do sistema lagunar de Araruama com enfoque hidrodinâmico. Para tanto, são

comparados o sistema na situação atual e o sistema em situação projetada, na qual se considera a desobstrução do seu canal de ligação com o mar. Nessa comparação, investiga-se como são e como seriam a circulação hidrodinâmica e a mistura de massas de água.

A comparação é feita a partir da avaliação da circulação hidrodinâmica e da troca de massas de água, quando são mostradas:

- a circulação hidrodinâmica na lagoa atual, ou seja, sem qualquer intervenção, através de variações tanto das marés quanto dos ventos;
- as mudanças na circulação hidrodinâmica em função da dragagem do canal de ligação do corpo principal da lagoa com o mar.

Para cumprir o objetivo deste estudo, foi utilizada modelagem computacional como subsídio para proposição de ações corretivas e/ou preventivas. Os modelos utilizados no estudo apresentado fazem parte do Sistema BAse de HIdrodinâmica Ambiental, SisBAHIA, em contínuo desenvolvimento na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ desde 1987.

Na sequência do texto desta dissertação, o Capítulo 2 discute os aspectos da evolução das lagoas costeiras onde são abordados os problemas relacionados a elas e seus respectivos comportamentos físicos.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, destacando o domínio e os dados considerados pelos modelos. Enfatiza-se ainda que a abordagem metodológica inclui o resgate histórico da evolução do sistema lagunar com base em documentos históricos e depoimentos orais.

No Capítulo 4, descreve-se a área de estudo com a sua localização, características geográficas e ambientais. Também apresenta-se, brevemente, alguns aspectos econômicos da região, de modo a ressaltar a importância da Lagoa de Araruama. Os dados expostos, nesse capítulo, foram tirados de vários trabalhos e publicações relativas à lagoa conseguidos na época em que o autor era gerente regional da Fundação Superintendência

Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) em Araruama. Inclusive, na ocasião, obteve-se experiência em diligências, pois, em sua grande maioria, eram acompanhadas por técnicos (biólogos, engenheiros, geógrafos, entre outros) da Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente (FEEMA) e Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Ainda no Capítulo 4, foi de grande utilidade, além dos elementos obtidos, a experiência de um antigo engenheiro do DER-RJ (Antonio Portellada Cunha), que trabalhou na década de 50 na implantação e pavimentação da rodovia Amaral Peixoto (RJ 106) e na rodovia de ligação São Pedro da Aldeia – Cabo Frio (RJ 140), no entorno da Lagoa de Araruama.

No Capítulo 5, apresentam-se os parâmetros implementados na simulação. São feitas considerações que envolvem a estratégia adotada na modelagem de circulação, a batimetria, as marés, as condições de contorno e as condições iniciais. São expostos, também, os cenários de simulação construídos para caracterizar a circulação hidrodinâmica da área em estudo. Ainda neste capítulo, é comparado como é e como seria a troca de massa de água após a intervenção.

O Capítulo 6 dedica-se à análise e discussão dos resultados obtidos, incluindo os impactos que a dragagem de recuperação do canal de acesso podem trazer ao sistema lagunar de Araruama. Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e recomendações deste trabalho.

2. ASPECTOS DA EVOLUÇÃO DAS LAGOAS COSTEIRAS

O objetivo deste capítulo é mostrar a evolução e as principais características das lagoas costeiras com ligação para o mar.

Existem lagoas costeiras de água doce, resultantes de afloramentos de um lençol freático em depressões do terreno atrás de cordões de dunas, e de água salgada. Porém, neste trabalho, destacam-se apenas as lagoas costeiras salinas ligadas ao mar. Essas lagoas decorrem da formação de restingas em frente a reentrâncias no litoral, criando uma área protegida das ondas e ressacas, formando assim um sistema ou sistemas lagunares (Muehe, 1993).

2.1. O APARECIMENTO E A EVOLUÇÃO DAS LAGOAS COSTEIRAS

No início, uma lagoa costeira salina apresenta um ou mais canais, que propiciam ligação permanente com o mar, e que a faz funcionar sob regime de marés. Essas lagoas, mais propriamente denominadas lagunas, com o tempo, tendem a ter seus canais assoreados. Usualmente, em épocas de estiagem, a ligação com o mar fecha, podendo voltar a abrir em épocas de cheia. Nessa situação, diz-se que a lagoa passou a funcionar em regime de cheias. Paulatinamente, a lagoa vai se assoreando, passando a um mero alagado, para se transformar, finalmente, em planície costeira.

Uma laguna torna-se uma lagoa costeira em regime de cheias quando seu canal é obstruído. Essa obstrução pode ocorrer naturalmente quando o assoreamento, na laguna, atinge um ponto em que o prisma de maré não é suficiente para gerar correntes de enchente e vazante capazes de manter a dinâmica da barra estuarina com um canal de maré estável. Esse processo de obstrução pode ser acelerado, se houver interferência antrópica.

Essa transformação de uma laguna ou lagoa em regime de marés para lagoa em regime de cheias é um sinal claro de degenerescência avançada. Nessa mudança, ocorre o maior dos impactos ambientais, pois o que era um riquíssimo sistema estuarino, com morfologia lagunar de águas variando de doces a salgadas, transforma-se em uma mera lagoa costeira salobra, que, eventualmente, em épocas de cheias, extravasa suas águas para o mar.

Ao fim desse extravasamento, os processos litorâneos encarregam-se de fechar novamente a barra. Por ser evento relativamente raro e súbito, o rompimento da barra ocasiona impacto significativo no ambiente que se adaptou à lagoa, outrora laguna.

2.1.1. LAGOAS COSTEIRAS EM REGIME DE MARÉS (LAGUNAS)

O canal de maré é muito importante para a sobrevivência da laguna, pois devido à variação do nível do mar, ele permite os fluxos de enchente e vazante. Tais fluxos propiciam a típica dinâmica estuarina no sistema lagunar, fazendo a renovação das águas e possibilitando intensas trocas biológicas entre o mar e a laguna.

Um canal de maré desobstruído e com dimensões adequadas permite que a influência da maré alcance maiores distâncias, particularmente durante as marés de sizígia, que ocorrem nas luas novas e cheias. Podemos citar, como exemplo, a própria Lagoa de Araruama, onde a variação de maré era sentida em toda a lagoa quando o canal de Itajuru e o canal central estavam desassoreados, conforme testemunho de antigos pescadores.

As condições de estabilidade na embocadura de canais de maré dependem dos seguintes fatores: marés, regime de ondas, transporte litorâneo ao longo da praia adjacente, descarga fluvial e características morfológicas da bacia interior. Os critérios de estabilidade de canais de maré são usualmente representados por relações empíricas, envolvendo parâmetros como o prisma de maré, a área da menor seção transversal do canal, sua profundidade e largura, o comprimento do canal, o transporte litorâneo total, entre outros.

Tais relações foram desenvolvidas devido ao conhecimento atual sobre estabilidade de embocaduras lagunares, decorrente do desenvolvimento da engenharia costeira nas últimas décadas (Rosman, 1996).

Há, pelo menos, duas maneiras de melhorar a circulação hidrodinâmica de uma lagoa costeira que não tenha mais o canal de ligação com o mar estável, permitindo, assim, aumentar a renovação de suas águas: 1. através da abertura ou manutenção de um canal para o mar; 2. por sistema de bombas e adutoras. Sempre que possível, é preferível a estabilização do canal de comunicação com o mar. De fato, através de um canal de maré estável, é possível revitalizar a lagoa, renovando suas águas e melhorando sua qualidade através do bombeamento natural das marés. Nessa situação, permite franca troca biológica com o mar e pode constituir-se em mais uma atração turística, incentivando, por vezes, a navegação, a construção de marinas, os esportes e outras práticas náuticas.

2.1.2. LAGOAS COSTEIRAS EM REGIME DE CHEIAS

Uma lagoa costeira em regime de maré, quando o canal de ligação com o mar torna-se instável, e passa a funcionar de modo intermitente, transforma-se em uma lagoa costeira em regime de cheias. Em termos sedimentológicos, as conseqüências imediatas são:

- as taxas de assoreamento tendem a aumentar, devido à maior tranquilidade de suas águas, que deixaram de ter as correntes devidas à dinâmica das marés;
- os sedimentos carregados pelos rios são retidos em sua totalidade.

Além disso, a qualidade das águas tende a piorar quando existem despejos de esgotos. Se a lagoa funcionasse em regime de marés, o volume de esgoto lançado poderia até ser desprezível em relação ao volume de água do mar que entra e sai, diluindo os esgotos e renovando suas águas, o que, sem dúvida, manteria uma qualidade de água melhor. Entretanto, deve ficar claro que isso não seria aceitável, pois o esgoto afetaria a balneabilidade das praias oceânicas e o contorno do estuário. De fato, a diluição pode ajudar, mas não resolve um problema de poluição.

A consequência de ter sua ligação com o mar intermitente é que a capacidade de renovação das águas da lagoa fica reduzida, facilitando o assoreamento e eliminando trocas salustares com o mar. Outro aspecto inconveniente é que uma lagoa em regime de cheias tem, em épocas de chuva, seu nível de água mais alto que o do mar, o que poderá ocasionar inundações antes do rompimento da barra e reabertura do canal (Oliveira *et al.*, 1953).

2.1.3. PRESERVAÇÃO DAS LAGOAS COSTEIRAS

Por se constituírem em elementos fixadores de população, por sua fartura de alimentos e por serem motivo de grande atração turística, sendo assim sujeitas a desequilíbrios constantes provocados pela natureza e pelas atividades humanas, as lagoas costeiras necessitam de ações de planejamento e de gestão que as preservem, incluindo o seu entorno.

No Brasil, foram realizadas intervenções nesse sentido, e as principais estão no Anexo 1 do presente trabalho. Porém, qualquer interferência necessita de prévio conhecimento dos agentes que influem em seu comportamento físico e governam seu ecossistema.

2.2. COMPORTAMENTO FÍSICO

As principais características e agentes que interferem na dinâmica de um estuário são:

- morfologia e batimetria;
- hidrologia, em especial as vazões fluviais;
- meteorologia e, especialmente, regime de ventos;
- marés.

A morfologia de um estuário é um reflexo dos processos que formam e mantêm o sistema. A embocadura é um dos controles morfológicos fundamentais, pois é fator determinante para a troca de água com o mar. Os transportes de sedimentos litorâneos e cargas de sedimento fluvial estabelecem áreas de depósito, que vão sendo esculpidas e vão adquirindo forma em função das ondas e correntes.

O volume das vazões fluviais é importante para caracterizar o estuário, pois pode alterar os gradientes de salinidade e influir na qualidade da água. No caso da Lagoa de Araruama, por ser uma região seca e por ter a água salgada, a maior influência é a poluição e a transferência das águas do rio São João para a bacia da lagoa, através das adutoras da Álcalis e da CEDAE.

Por outro lado, existe a forte influência dos agentes meteorológicos, sendo o vento o mais importante, pois gera ondas capazes de influir no movimento dos sedimentos do fundo, particularmente em se tratando de corpo hídrico raso. Pode, também, gerar circulações autônomas em seu interior.

A Lagoa de Araruama sofre influência muito grande do vento, sendo os principais o nordeste e o sudoeste, que sopram na direção de seu eixo maior. Como ela é um corpo hídrico raso, o vento provoca o movimento dos sedimentos do fundo na direção de São Pedro da Aldeia para Araruama, se for vento nordeste, e de Araruama para São Pedro da Aldeia, se for vento sudoeste.

Devido à constância das ações do vento e do sol combinadas, a Lagoa de Araruama funciona tal qual uma grande salina. Nas salinas, a água salgada é impulsionada para a parte mais alta por catavento ou por bomba, enquanto que, na lagoa, esses elementos são substituídos pela ação da maré. Tanto na salina quanto na lagoa, o vento e o sol constantes combinados evaporam a água salgada, deixando sal nas salinas e a água mais salgada no interior da lagoa.

Finalmente, salienta-se que a Lagoa de Araruama é um estuário com característica peculiar. Ao longo de sua extensão, a pluviosidade média anual varia entre 750 mm e 900

mm. Por outro lado, a evaporação média anual situa-se na faixa entre 890 mm e 1.370 mm (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002), apresentando, portanto, balanço hídrico negativo, razão pela qual ela é hipersalina.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, apresenta-se uma análise do sistema lagunar de Araruama angulada segundo seus aspectos hidrodinâmicos. A análise desenvolve-se através da seguinte metodologia:

1. resenha histórica mostrando a evolução do sistema lagunar até os dias de hoje; nesta resenha, analisam-se as principais ações antrópicas e eventos naturais que levaram a lagoa às suas atuais condições; destacam-se os aspectos pertinentes à circulação hidrodinâmica e à qualidade de água, bem como fatores pertinentes aos processos sedimentológicos e de obras que mudaram os contornos da lagoa e de canais;
2. modelagem computacional da circulação hidrodinâmica e transporte de escalares para caracterização da dinâmica atual da lagoa;
3. modelagem computacional da circulação hidrodinâmica e transporte de escalares para uma situação projetada, de modo a ilustrar como ações de engenharia corretamente planejadas podem influenciar positivamente na lagoa.

Por conveniência de exposição deste trabalho, optou-se por realizar a resenha histórica, parte integrante da abordagem metodológica, conjuntamente com a apresentação do estudo de caso detalhado no Capítulo 4. Essa resenha histórica segue uma metodologia narrativa baseada em:

- revisão bibliográfica de documentos existentes;
- relatos de antigos pescadores;
- relatos do engenheiro Antonio Portellada Cunha, que desenvolveu muitos trabalhos na região desde a década de 50;
- experiência pessoal como conhecedor e freqüentador da região desde 1954, e como gerente regional da SERLA do governo do estado do Rio de Janeiro em 1997.

A modelagem computacional segue a metodologia desenvolvida na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica. Tal metodologia baseia-se na aplicação do sistema de modelos computacionais denominado Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBAHIA à Lagoa de Araruama. A seguir,

descrevem-se os aspectos metodológicos envolvidos no desenvolvimento da modelagem computacional. Expõe-se, também, as premissas e considerações supostas pertinentes à relevância da modelagem computacional para o estudo da Lagoa de Araruama, incluindo o domínio de modelagem considerado e os dados básicos necessários.

3.1. RELEVÂNCIA DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Modelos são ferramentas integradoras, sem os quais torna-se mais difícil uma visão da dinâmica dos processos em sistemas ambientais complexos como lagoas e baías, por exemplo.

Normalmente, quando se levantam dados ambientais para estudos e projetos, visando o planejamento, gestão ou gerenciamento, obtêm-se séries temporais em uns poucos pontos distribuídos na área a ser estudada. A análise de dados ambientais medidos em pontos isolados pode ser prejudicada se não se tiver uma idéia clara da dinâmica do sistema como um todo.

Em modelos calibrados, as informações obtidas em estações de medições pontuais podem ser estendidas para a área inteira estudada. Além da capacidade de reproduzir situações para as quais foram feitos os levantamentos, os modelos podem ser utilizados para prever os impactos de intervenções que possam ser realizadas, ou simular situações em cenários distintos.

Os modelos tornam-se assim, ferramentas importantes, fornecendo subsídios a projetos, e auxiliando na tomada de decisão no gerenciamento de sistemas ambientais complexos. Permitem, pois, a integração de dados dispersos espacialmente, estendendo as informações para áreas onde não há medições e ajudando na interpretação de medições pontuais. Podendo prever situações ao simular cenários futuros e, quase em tempo real, permitem planejar operações de limpeza ambiental em decorrência de derrames acidentais de contaminantes. Enfatiza-se que o potencial de utilização e coerência dos resultados eleva-se quando estão calibrados. É através de um processo iterativo de comparação entre

valores medidos e valores computados, seguidos de ajustes, que se faz a calibração dos modelos.

A modelagem consiste em três atividades distintas:

- implementação do modelo com as características do sistema em estudo;
- calibração e validação do modelo, procedimento em que, através de um processo iterativo, ajustam-se parâmetros para que os resultados do modelo tenham boa coerência e aderência com valores medidos e avalia-se a confiabilidade do modelo;
- aplicação do modelo, etapa na qual o modelo é operado para o estudo desejado.

3.2. DOMÍNIO DE MODELAGEM

Antes da implementação do modelo, é preciso definir o domínio de interesse. Para isso, precisa-se conhecer os contornos do litoral e ilhas, a batimetria e o posicionamento de eventuais estruturas, como, por exemplo, salinas e atracadouros. Tais dados são obtidos preferencialmente de mapas e plantas batimétricas. Quando necessário, recorre-se também a fotos aéreas e imagens de satélite. No caso do sistema lagunar de Araruama, como os mapas e plantas disponíveis encontravam-se desatualizados, recorreu-se também a uma imagem de satélite do sensor Landsat5-TM, adquirida em julho de 1999, que foi georeferenciada.

3.3. DADOS BÁSICOS

Para a modelagem do sistema lagunar de Araruama, foram obtidos os seguintes dados:

- topo-hidrografias do sistema - rios contribuintes, canal de interligação, zona da embocadura no mar e costa adjacente;
- curvas de maré e constantes harmônicas no porto de Arraial do Cabo;
- séries temporais de ventos na região;

- vazão nos principais rios afluentes;
- estimativa de cargas de fontes poluidoras nos rios e diretamente nas lagoas.

3.4. SISTEMA DE MODELAGEM

O sistema de modelagem adotado foi o SisBAHIA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Trata-se de um sistema de modelagem em ambiente Windows, registrado pela Fundação Coppetec, que possui recursos para a modelagem em diversos corpos hídricos, tais como: rios, reservatórios, estuários, lagoas, baías e águas costeiras.

O sistema encontra-se em contínuo desenvolvimento na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O SisBAHIA[®] já foi utilizado em dezenas de projetos e estudos contratados com a Fundação Coppetec. Maiores detalhes sobre o SisBAHIA[®] podem ser obtidos em Rosman (2001).

O SisBAHIA possui os seguintes modelos:

1. **modelo hidrodinâmico** - é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D/2DH com densidade constante, otimizado para corpos de água naturais; resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada; otimizado é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa; processos de calibração são minimizados devido a discretização espacial via elementos finitos quadráticos e a transformação σ , relativo a mudança de coordenadas, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multi-escala baseada em simulação de grandes vórtices;
2. **modelo de transporte Euleriano** - é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou escoamentos 2DH;

3. **modelos de qualidade de água** - trata-se de um conjunto de modelos de transporte Eulerianos, para simulação acoplada de parâmetros de qualidade de água, incluindo salinidade, temperatura, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), compostos de nitrogênio, compostos de fósforo, e biomassa; os modelos podem ser aplicados a camadas selecionadas de escoamentos 3D ou a escoamentos 2DH;
4. **modelo de transporte Lagrangeano** - é um modelo de uso geral na simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH; esse modelo é especialmente adequado para simulações de fontes poluidoras localizadas; exemplos comuns de fontes poluidoras localizadas são as associadas a lançamentos através de emissários ou tubos e galerias em corpos de água receptores; o modelo Lagrangeano do SisBAHIA[®] também é ideal para simulações de derrames de óleo, podendo seguir as mesmas curvas de balanço de massa do ADIOS2 e dinâmica de Fay na fase inicial do derrame; através desse modelo, também pode-se marcar regiões de um corpo de água com derivadores diferenciados, e estudar como se processam misturas de massas de água.

3.4.1. ATRIBUTOS DO SISBAHIA

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBAHIA[®] possui atributos para minimizar o processo de calibração e maximizar a confiabilidade dos resultados, como enfatizado a seguir. Alguns dos atributos do sistema adotado são:

1. as estratégias de discretização espacial são otimizadas para corpos de água naturais, pois permitem excepcional detalhamento de contornos recortados e batimetrias complexas; a discretização espacial é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode igualmente ser feita via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos; tal método de discretização espacial é potencialmente de quarta ordem; em simulações de escoamentos tridimensionais, a discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação σ , de sorte que a discretização completa do domínio resulta em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível Z da transformação σ ;

2. tensões e difusividades turbulentas são modeladas de uma maneira que torne a calibragem dos modelos diretamente relacionada a variáveis naturais; o emprego de esquemas auto-ajustáveis para a turbulência em escala submalha minimiza a necessidade de calibragem; a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem que levam à simulação de grandes vórtices ou vórtices resolvíveis; tal técnica é conhecida, na literatura internacional, como LES (*large eddy simulation*), sendo considerada estado da arte para modelagem de turbulência em escoamentos geofísicos de grande escala;
3. o modelo hidrodinâmico admite especificação pontual do tipo de material de fundo e usa interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo, permitindo ótima acurácia na representação física do leito;
4. permite que a ação do vento, na superfície livre, e o atrito, no fundo, sejam variáveis no tempo e no espaço; tal realismo é extremamente relevante para simulações de escoamentos em regiões costeiras, baías, estuários, rios e lagoas; com a fidelidade conseguida no mapeamento da batimetria e contornos, bem como das tensões de vento e atrito no fundo, a coerência entre resultados medidos e modelados é naturalmente maximizada, minimizando a necessidade de um processo de calibração;
5. o modelo hidrodinâmico do SisBAHIA é capaz de calcular tanto campos de velocidades tridimensionais, 3D, obtendo os perfis de velocidade ao longo da profundidade, como de dar os resultados em forma de campos de correntes promediadas na vertical, 2DH;
6. os modelos são baseados em esquemas numéricos bem estabelecidos para garantia de validade e aceitação.

Em função dos atributos acima, e garantindo-se as condições expostas, a seguir, o emprego do SisBAHIA, em muitos trabalhos, ensina que, mesmo sem qualquer calibração, os resultados obtidos pelos modelos apresentam a seguinte confiabilidade:

- coerências entre valores reais e valores computados de níveis de água são, em geral, melhores que 90%; após a calibração, é usual que sejam superiores a 95%;

- coerências entre valores reais e valores computados de velocidade e direção de correntes são usualmente melhores que 70%; após a calibração, é comum ter-se coerências superiores a 90%;
- coerências entre valores reais e valores medidos de concentração de contaminantes ou parâmetros de qualidade de água são semelhantes às verificadas para velocidade e direção de correntes; uma vez que os modelos de transporte de contaminantes recebem, como dados de entrada, os resultados de níveis e correntes dos modelos hidrodinâmicos, a confiabilidade dos modelos de transporte é intrinsecamente função da qualidade dos resultados hidrodinâmicos.

Para atingir tais coerências, é necessário atender as seguintes condições:

1. garantir que a geometria do corpo de água implementada no sistema de modelos esteja correta e seja condizente com a existente na época de medição de níveis e correntes; tal garantia depende não apenas da disponibilidade de dados corretos, mas também de uma malha de discretização adequada às escalas dos fenômenos de interesse; discrepâncias em dados de batimetria e contornos são freqüentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados;
2. garantir que os forçantes dos escoamentos, como, por exemplo, curvas de maré, ventos e vazões fluviais, estejam corretamente implementados no sistema de modelos, e sejam condizentes com os existentes na época de medição de níveis e correntes; erros na especificação dos forçantes dos escoamentos são freqüentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados;
3. garantir que as intensidades das fontes contaminantes e os parâmetros das reações cinéticas estejam corretamente implementados no sistema de modelos e sejam condizentes com os existentes na época de medição de concentrações; erros na especificação de intensidades de fontes e parâmetros de reações cinéticas são freqüentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados.

Nesta tese, optou-se por modelar o sistema lagunar de Araruama através do modelo 2DH, uma vez que se trata de um corpo hídrico raso, com 2,50 metros em média de

profundidade (Hansen, 1993), e atende as necessidades da análise conduzida e mostrada nos Capítulos 5 e 6. O próximo capítulo detalha o complexo lagunar de Araruama, estudo de caso escolhido neste trabalho.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo caracteriza a região quanto aos aspectos geográficos e ambientais. Por essa razão, são apresentados o aspecto econômico e o histórico da evolução do sistema lagunar e de seu entorno, onde se tenta evidenciar as principais ações antrópicas e eventos naturais que levaram a lagoa às condições atuais. Esses dados podem ser importantes em ações preventivas e corretivas no futuro, para comparações e para mostrar as tendências de sua evolução.

Essa caracterização, a seguir, baseia-se em dados obtidos de diversos trabalhos, de documentos de órgãos municipais e estaduais sobre o sistema lagunar de Araruama, bem como de relatos e memórias de antigos pescadores, e do engenheiro do DER-RJ Antonio Portellada Cunha. A Figura 5 mostra uma vista geral da lagoa.



Figura 5 - Panorama geral da Lagoa de Araruama (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

4.1. INTRODUÇÃO

O estado do Rio de Janeiro foi contemplado com uma série de lagunas costeiras, distribuídas entre a Ilha Grande e a Baixada Campista. Tais lagunas são do período

holocênico, idade também atribuída aos cordões litorâneos responsáveis por suas formações. Diversos trabalhos relativos ao assunto mostram que grande parte de sua forma topográfica foi resultado de processos erosivos e deposicionais atuantes após a transgressão holocênica (Lamego, 1938 e 1940; Amador, 1986; Kjerfve e Knoppers, 1999).

A elevação do nível relativo do mar, resultante da intensificação do efeito estufa, representa um importante mecanismo de modificação da morfologia. A morfologia também sofre os efeitos das interferências artificiais decorrentes de obras no entorno lagunar. A formação da barreira (cordão litorâneo, pontal, restinga) constitui condição essencial para a formação lagunar. A interpretação da evolução dessa barreira caracterizou os primeiros trabalhos relacionados com a geomorfologia da Lagoa de Araruama (Muehe, 1993).

Posteriormente, foi realizado o mapeamento da geomorfologia do fundo e do entorno lagunar, da cobertura sedimentar e da reserva de calcáreo da Lagoa de Araruama, pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), por solicitação da Companhia Nacional de Álcalis.

Na restinga, verificam-se duas linhas de cordões litorâneos, sendo um deles mais antigo, mais interior e mais alto que o outro. Os cordões foram formados de oeste para leste em diferentes estágios de nível médio do mar, havendo uma descontinuidade a leste no cordão mais antigo (Muehe, 1993).

Nesse compartimento do litoral sudeste, é onde está inserida a Região dos Lagos, que é uma microrregião integrante da região das baixadas litorâneas do estado do Rio de Janeiro, sendo composta dos seguintes municípios:

- Araruama;
- Armação dos Búzios;
- Arraial do Cabo;
- Cabo Frio;
- Iguaba Grande;
- São Pedro da Aldeia;

- Saquarema.

4.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA

A seguir, são apresentadas as principais características da bacia hidrográfica da Lagoa de Araruama (Figura 6), que devem ser analisadas para a compreensão dos problemas ambientais que a envolvem.

A Lagoa de Araruama localiza-se entre as latitudes 22° 49'S e 22° 57'S e as longitudes 42° 00'W e 42° 23'W, possuindo uma área de espelho de água de aproximadamente 220 km², perímetro com cerca de 190 km e um volume de água em torno de 560 milhões de m³. Dividindo-se o volume pela área do espelho de água, obtêm-se uma profundidade média com cerca de 2,5 m. A bacia lagunar estende-se na direção leste-oeste, com várias enseadas recortadas por pontais de areia, que se dirigem para o interior do corpo de água, marcando assim o contorno lagunar na parte sul. A lagoa tem largura máxima de 14 km e comprimento de 33 km, possuindo águas hipersalinas e comunicando-se permanentemente com o mar através do canal de Itajuru, canal natural com aproximadamente 8 km de extensão (CIDE, 1999; Hansen, 1993).



Figura 6 - Vista da Lagoa de Araruama obtida mediante imagem de satélite sensor Landsat5-TM (Borges-Pereira, 2001).

Percorrendo a região compreendida entre Niterói e Cabo Frio pelo litoral, verifica-se que a linha de costa desenvolve-se na direção leste-oeste até Cabo Frio, quando se inclina

para nordeste. Deslocando-se pelo interior, verifica-se que o maciço litorâneo é interrompido ao aproximar-se da Região dos Lagos e intercalado por regiões de baixadas, terminando em Búzios.

O afloramento do embasamento é mais moderno nessa região, não havendo uma formação contínua, destacando-se a serra de Sapeatiba com 267 metros de altitude e a ilha de Cabo Frio, que atinge a altitude de 390 metros. O relevo reveste-se de importância, pois influi sobre as características meteorológicas da região do entorno da lagoa (Marcílio e Oliveira, 1980; Radambrasil, 1983; Coe-Neto, Froidefond e Turcq, 1986; Muehe, 1989; Amador, 1991).

A Lagoa de Araruama é receptor de uma série de sub-bacias hidrográficas, totalizando uma área de drenagem de 430 km². Na bacia contribuinte, destacam-se o rio das Moças com uma bacia de 92 km² e o rio Mataruna com 47 km² de área drenada (Hansen, 1993). A Tabela 1 apresenta as áreas drenadas pelos rios contribuintes da bacia hidrográfica da lagoa.

Tabela 1 – Áreas drenadas na bacia da Lagoa de Araruama.

	SUB-BACIA	ÁREA (km ²)
	Rio Congo	8,0
	Rio das Moças	94,0
	Área entre bacias: Moça/Mataruna	13,3
	Rio Mataruna	46,6
	Área entre bacias: Mataruna/ Salgado	15,5
	Rio Salgado	29,2
	Área entre bacias: Salgado/ Iguaçaba	5,6
	Rio Iguaçaba	8,6
	Área entre bacias: Iguaçaba/ Ubá	1,2
	Rio Ubá	15,0
	Área entre bacias: Ubá/ Joaquim da Mota	24,0
	Área entre bacias: Joaquim da Mota/ Canal de Itajuru	39,2
	Canal de Itajuru	14,0
	Área entre bacias: Canal de Itajuru/ Rio Congo	124,0
	Total	429,2

As vazões dos rios afluentes foram definidas a partir dos dados de distribuição média das chuvas na região da estação de Cabo Frio, no período de 1961 a 1970,

utilizando-se o método racional para transformação de chuva em vazão. Os sete principais rios afluentes da Lagoa de Araruama têm as vazões médias apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Vazão média dos principais rios afluentes à Lagoa de Araruama.

Rio	Vazão Média
Rio das Moças =	1,02 m ³ /s
Rio Mataruna =	0,51 m ³ /s
Rio Salgado =	0,32 m ³ /s
Rio Ubá =	0,16 m ³ /s
Canal de Itajurú =	0,15 m ³ /s
Rio Congo =	0,09 m ³ /s
Rio Iguaçaba =	0,09 m ³ /s

Ao estudar o complexo lagunar, não se pode dissociar três partes integrantes da lagoa:

- a embocadura com sua barra e canal principal;
- os cordões litorâneos com suas praias, dunas e pontais arenosos;
- a bacia propriamente dita, com suas enseadas, canais, rios afluentes e baixios.

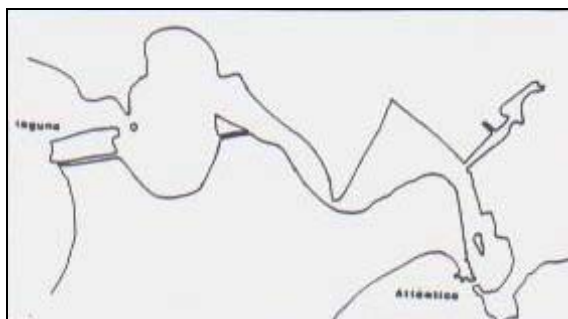
Sucessivos aterros têm sido realizados na Lagoa de Araruama, causando problemas ao ambiente lagunar. Já na década de 70, tais aterros causavam problemas, conforme descreve Oliveira (1976) em seu relatório sobre os aterros no canal de Itajuru.

Lessa (1990) mostra em seu trabalho a extensa área aterrada ao longo do canal desde o século XVII e o estreitamento da barra, razão pela qual foi reduzido significativamente o prisma de maré, restringindo o acesso à navegação e degradando o estado sanitário, pela alteração da circulação de água e pelo aumento do assoreamento nessa região (Figura 7).

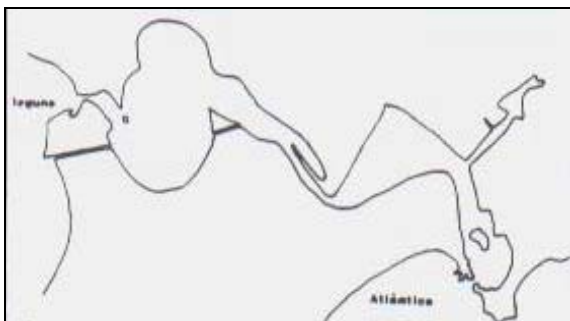
A (Figura 8) apresenta um mapa da região com a localização de rios e localidades citadas.



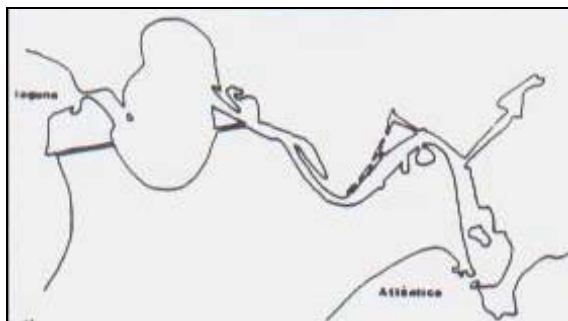
Canal de Itajuru no século XVI.



Canal de Itajuru no início do século XX.



Canal de Itajuru em meados do século XX.



Canal de Itajuru no final do século XX.

Figura 7 - Modificações nas margens do canal de Itajuru segundo LESSA (1990).

Ao sul, verifica-se que a totalidade das praias é formada de areia, enquanto que, ao norte, existem diversas formações rochosas que se prolongam para o interior da lagoa. Tais pontas rochosas limitarão unidades fisiográficas para transportes de sedimentos.

As seguintes enseadas destacam-se na bacia lagunar (no sentido de oeste para leste): rio das Moças, Convento, Parati, Saco da Tiririca, Figueira, Gaivotas, Tucuns, Saco da Teresa e da Palmeiras. As profundidades maiores são encontradas, ao norte, na enseada de Tucuns e as menores na enseada do rio das Moças (Figura 7). Constata-se que a declividade do fundo, junto aos pontais arenosos que separam as diversas enseadas no lado sul, apresenta-se sempre mais suave a leste, como pôde ser observado, fato este explicado pelo transporte de sedimento associado às correntes locais (Hansen, 1993).

Observa-se, ainda, que os sedimentos existentes nas extremidades dos pontais encontram-se em constante movimento (Figura 9). Aventa-se a possibilidade de divisão da Lagoa de Araruama em lagoas menores, porém verifica-se que essa divisão só ocorrerá em escala de tempo geológica (Coimbra, 1991).

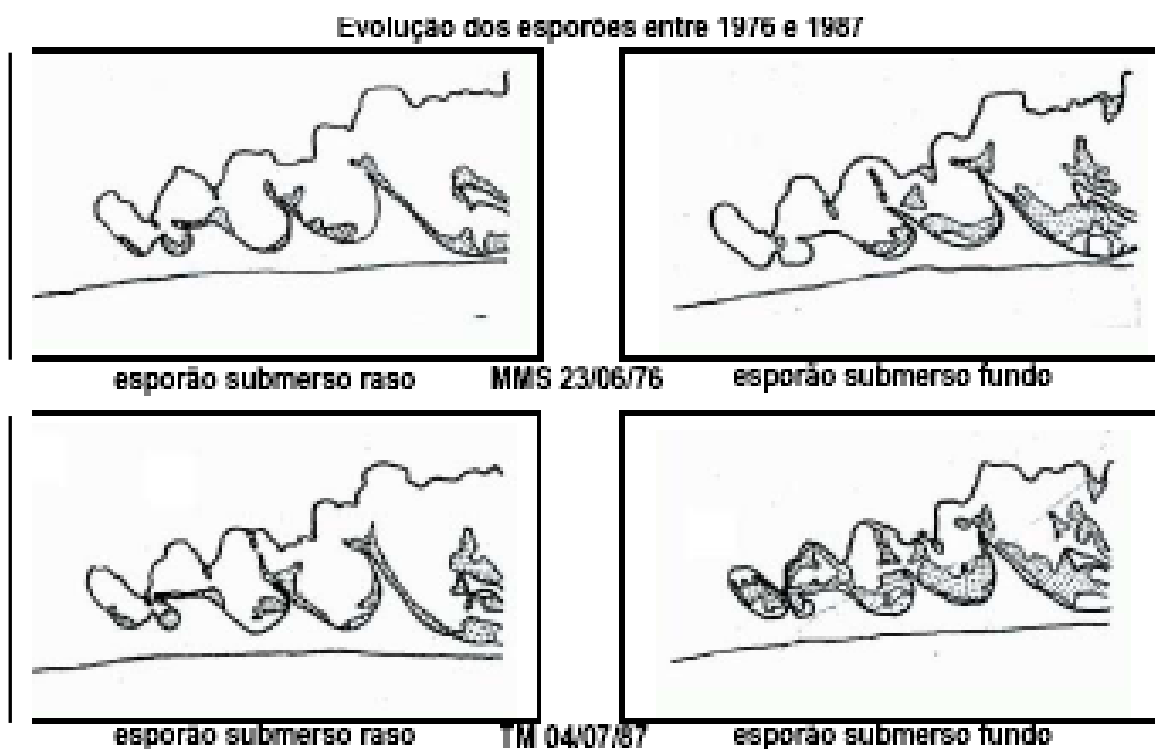


Figura 9 – Evolução dos esporões (Argento, 1989; Coimbra, 1991).

Encontra-se descrito em artigo de autor anônimo no Boletim do Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro (IHGB, 1883) que as salinas eram estabelecidas nos diversos pontais (Figura 10). Isto fez com que a fixação dos pontais fosse acelerada pela expansão gradual dos mesmos, com posterior avanço para o centro da lagoa (Hansen, 1993; Coimbra, 1991).



Figura 10 – Ponta da Acaíra, Arraial do Cabo (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

A Lagoa de Araruama sofre os efeitos da ocupação crescente de suas margens, com modificações no seu balanço hídrico, decorrente de introdução artificial de água doce, lançamento de efluentes domésticos e industriais e intervenções no fluxo de sedimentos em decorrência de espigões, trapiches, marachas (Figura 11) e aterros, além de ter muito reduzida a influência benéfica da maré.



Figura 11 – Exemplos de marachas (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

4.3. EXPLORAÇÃO ECONÔMICA DA LAGOA DE ARARUAMA

Desde o século XVI, a evolução econômica da Região dos Lagos esteve ligada à Lagoa de Araruama, que fornecia o pescado e o sal, além de facilitar o comércio do pau-brasil, realizado por intermédio dos veleiros, que acessavam a lagoa através do canal de Itajuru. Em 1616, para consolidar a ocupação militar, Estevão Gomes, então governador, mandou construir o Forte São Mateus, que ficou pronto em 1620.

Livre da ocupação dos aventureiros e com a dominação dos Goitacazes, que ocuparam a região após o extermínio dos Tamoios, a cidade começou a atrair colonos e as terras passaram a ser cultivadas sem maiores problemas. A economia baseava-se em pesca e agricultura (Anônimo, 1883; Beranger, 1962).

Segundo versão de antigos pescadores a lagoa era abastecida de água salgada do mar, que fluía através do canal de Itajuru e por um canal central que, sob o efeito das marés e a ação do vento nordeste, estendia-se até a cidade de Araruama.

As elevações junto à ilha de Cabo Frio e a serra de Sapeatiba constituem um corredor na direção dos ventos alíseos, o que permite que a temperatura média da região permaneça cerca de 5° centígrados inferior à temperatura das regiões vizinhas, fazendo inclusive com que as nuvens de chuvas sejam afastadas.

4.3.1. EXPLORAÇÃO DE SAL

As características de uma grande salina tornaram a Lagoa de Araruama hipersalina e, por isso, produtora de sal. Por essa razão, várias indústrias foram implantadas no seu entorno e em seu canal de ligação com o mar. A Figura 12 mostra as salinas existentes na Lagoa de Araruama com seus marnéis.

Segundo o relato de antigos pescadores, o contorno original da lagoa, há mais de 100 anos, vem sendo alterado. Esse processo de modificação do contorno da lagoa iniciou-se com os salineiros devido à implantação das quadras de sal, marnéis, diques de proteção, aterros, entre outros, incluindo a construção canais artificiais dentro do espelho de água da lagoa.

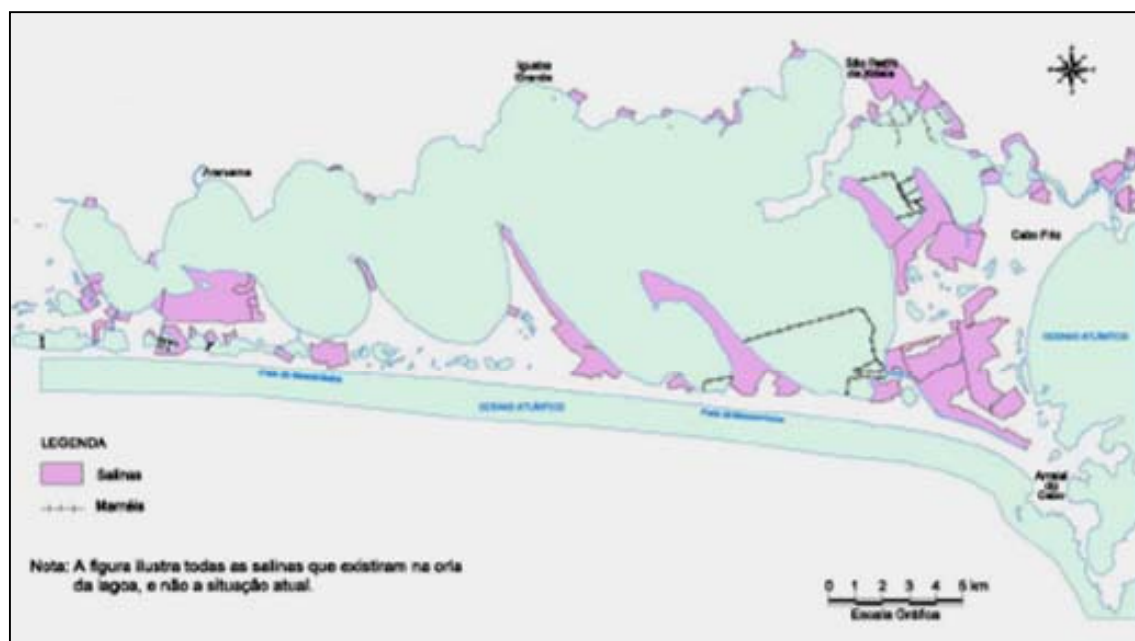


Figura 12 – Salinas e marnéis (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

Para abastecer as salinas de água salgada, a solução comum era combinar dois procedimentos: abrir canais dentro das propriedades ou construir canais dentro do espelho de água da lagoa. Eram construídas valas para levar a água salgada até a parte mais alta das salinas (marnéis superiores), e esta era impulsionada por cataventos ou bombas, posicionados junto à área marginal da lagoa.

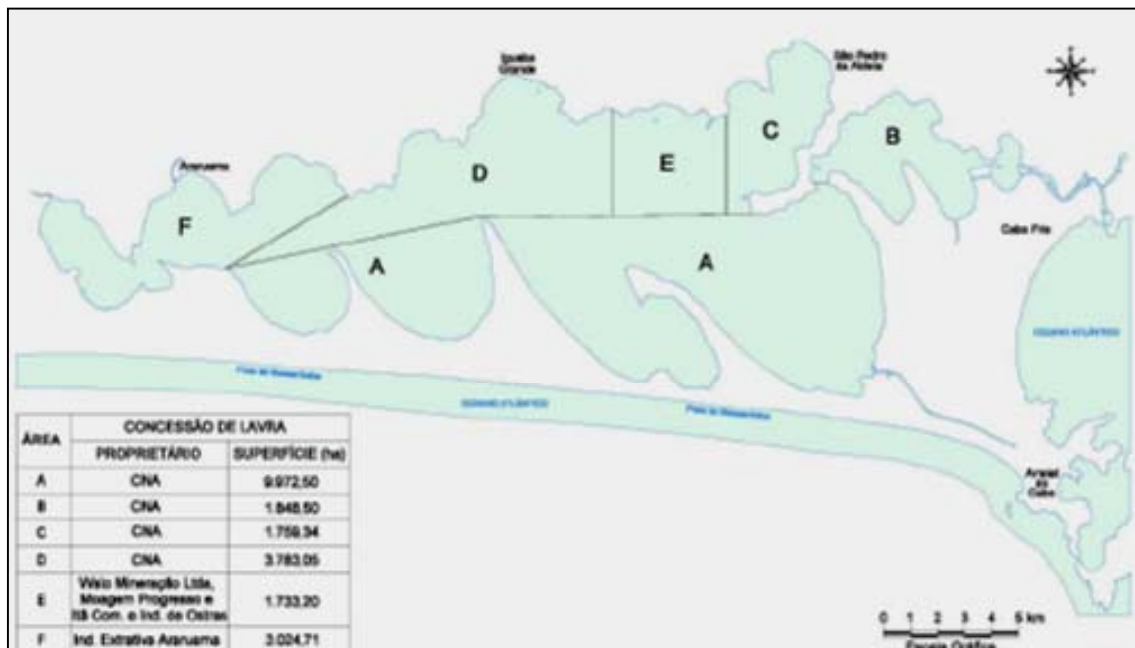
Nos marnéis superiores, a água é represada e, sob a ação do sol e do vento, parte da água é evaporada. Após alguns dias, a água é transferida para quadras concentradoras menores, por gravidade, e, mais uma vez, por evaporação, tem sua concentração de água diminuída da mistura. E assim é transferida sucessivamente para concentradores menores, até chegar aos chamados cristalizadores, que se encontram na parte mais baixa da salina, nos quais, ainda por evaporação, se obtém o sal quase puro.

Embora na cidade de Cabo Frio existissem algumas salinas, estas não eram tão produtivas quanto às de Araruama, pois, nesta última, a salinidade é o dobro que na primeira.

4.3.2. EXPLORAÇÃO DE CONCHAS

Outra atividade que contribuiu desde o final do século XIX e contribui até os dias de hoje na alteração do contorno da lagoa é a retirada de conchas. Essa atividade, no passado, posicionava, às margens da lagoa, as caieiras, constituídas de um forno primitivo, no qual as conchas eram queimadas, misturadas com carvão ou turfa.

A maior indústria da região, que extrai conchas, é a Companhia Nacional de Álcalis, que as obtém para, junto com a salmoura, proveniente dos marnéis de suas salinas, fabricar barrilha. As demais empresas extraem conchas para servirem no preparo de ração para granjas e fabricação de cal. A Figura 13 mostra as áreas de concessão para a exploração de conchas.



4.3.3. TURISMO

A partir da década de 60, o turismo na Região dos Lagos começou a ser incrementado, inclusive com a presença da atriz francesa Brigitte Bardot em Armação dos Búzios, com repercussão internacional.

A implantação do aeroporto de Búzios e, mais recentemente, do aeroporto de Cabo Frio permitiram uma maior presença de turistas de outras regiões do país e do exterior. Hoje, o turismo é a maior indústria da Região dos Lagos, transformando Cabo Frio, Armação dos Búzios e Arraial do Cabo em pólos sofisticados, que apresentam o que há de melhor da indústria de turismo no Brasil.

4.4. EVOLUÇÃO DA REGIÃO DOS LAGOS

Ocupada desde o século XVI, a Região dos Lagos evoluiu de forma significativa, particularmente a partir da década de 40.

4.4.1 CANAL PALMER E CANAL DE MOSSORÓ

Em 1910, por problemas de circulação da água salgada e para atender à navegação, único meio de transporte na região, o presidente da República Nilo Peçanha mandou abrir o canal Palmer (Figura 14).



Figura 14 – Canal Palmer, Cabo Frio (Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002).

Nessa época, já existiam problemas de assoreamento e erosões em volta da lagoa, assim como no canal de Itajuru em toda sua extensão, mesmo não existindo grande ocupação no seu entorno.

Outro canal artificial, construído para facilitar o transporte e melhorar a circulação da água salgada (inclusive alimentando algumas salinas), foi o canal do Mossoró. Esse

canal começa no centro urbano de São Pedro da Aldeia e vai até a localidade de Maracanã, Campo Redondo, transformando a sede do município em uma ilha artificial.

4.4.2 DÉCADA DE 40

Antes dessa década, o acesso à região era feito por mar, por onde chegava-se a Cabo Frio e, a partir daí, por embarcação pela Lagoa de Araruama ou por carroça.

Nessa década, foi concluída a estrada de ferro Maricá, tornando-se a ferrovia o principal acesso à Região dos Lagos. Exatamente por essa dificuldade, os municípios mais próximos da capital do antigo estado do Rio de Janeiro (Niterói) eram os mais habitados. Nos anos de 1940 e de 1950, os municípios com maior número de pessoas eram, por ordem (CIDE, 1999): Araruama, Saquarema, São Pedro da Aldeia e Cabo Frio.

Os demais municípios foram criados mais tarde. As principais atividades da região eram a agropecuária, a pesca, a salineira e a extração de conchas. Não havia água encanada nem luz. O comércio era pequeno, mal atendia à população local. Havia poucas escolas, inclusive para cursar o ginásio, e os estudantes tinham de ir para a capital do estado, na época Niterói.

Ainda nessa década, com o aumento do processo de industrialização no Brasil, houve necessidade que o país produzisse barrilha, produto importante para o desenvolvimento industrial, sem a dependência de importações. Em 20/07/1943, foi criada, pelo Governo Federal, a Companhia Nacional de Álcalis, que começou a operar na lagoa, na década de 50, para a retirada de conchas, matéria prima da produção de barrilha. A importância da barrilha para a indústria é a sua utilização na fabricação de vidro, papel, celulose, fertilizantes, tecidos, gases, couros, tratamento de água, metalurgia e siderurgia.

O empreendimento foi localizado em Arraial do Cabo, que reunia as condições necessárias para a implantação da indústria naquela época:

- enseada propícia para a construção de um porto na Praia do Forno, favorecendo o transporte marítimo;
- clima favorável para a produção de sal marinho;
- disponibilidade do calcário, a partir das conchas de moluscos, no interior da Lagoa de Araruama.

4.4.3 DÉCADA DE 50

Ocorreram vários acontecimentos que mudaram o cenário da década anterior, como a entrada em operação de duas grandes indústrias:

- Companhia Nacional de Álcalis, que proporcionou muitos empregos na região, fazendo com que muitas pessoas se mudassem para a vila operária em Arraial do Cabo;
- Companhia Salinas Perynas, em Cabo Frio, que também proporcionou muitos empregos.

O único meio de transporte na região era a navegação, até a entrada em operação da estrada de ferro Maricá. No final da década de 40, foi implantada a rodovia Amaral Peixoto (RJ 106). Na década seguinte, essa rodovia, foi pavimentada, facilitando o deslocamento das pessoas e turistas na região, ligando Niterói a Campos.

Na década de 50, foi implantada e pavimentada a rodovia de ligação entre as cidades de São Pedro da Aldeia e Cabo Frio (RJ 140), o que facilitou o transporte rodoviário e o início do turismo na Região dos Lagos.

Ainda no final da década de 50, começou a construção da base aeronaval de São Pedro da Aldeia da Marinha do Brasil, que, embora tenha sempre se pautado por uma atuação discreta, proporcionou incremento na economia e afluxo de pessoas, que se fixaram no município.

Em fins da década de 50, a Álcalis importou casuarinas, que foram plantadas às margens da lagoa, para conter a erosão já verificada, principalmente nas enseadas de Tucuns e Gaivotas (Figura 8).

4.4.4 DÉCADA DE 60

Nessa década, outra indústria de grande porte entrou em operação: a Companhia Salinas Ponta do Costa, também localizada em Cabo Frio.

Devido ao seu grande porte, nessa década, a Álcalis fez as seguintes ampliações:

- no intuito de atender sua fábrica e sua vila operária, a Álcalis concluiu uma adutora de água, a partir da Lagoa de Juturnaíba, no município de Silva Jardim;
- construiu o porto de Arraial do Cabo na praia dos Anjos;
- acordou com o governo do antigo estado do Rio de Janeiro a ampliação do fornecimento de água da adutora da Lagoa de Juturnaíba para poder abastecer os municípios integrantes da Região dos Lagos.

Por sua beleza, a principal atividade que passou a ser desenvolvida na Região dos Lagos foi o turismo, para a qual começou a ser desenvolvida uma infraestrutura, visando as pessoas que se deslocavam para suas praias durante o verão e feriados. Nessa década, os municípios da região foram eletrificados.

Cabo Frio era a maior atração. O antigo distrito de Cabo Frio e até então uma simples vila de pescadores, Armação dos Búzios, passou a ser conhecido internacionalmente, devido à presença da famosa atriz francesa Brigitte Bardot. No município de São Pedro da Aldeia, entrou em operação a base aérea naval da Marinha do Brasil.

4.4.5 DÉCADA DE 70

Foram construídas a Ponte Rio-Niterói e as rodovias BR-101 (federal) e a Rio Bonito-Araruama (estadual), o que acabou facilitando ainda mais os deslocamentos para a região, tanto em tempo, quanto em segurança. Essas obras intensificaram a procura por casas e terrenos, principalmente no município de Cabo Frio. Com a construção da rodovia Rio Bonito-Araruama, o município de Saquarema ficou um pouco isolado.

Além das atividades já existentes, houve incremento das atividades agrícolas e pecuárias, como também de diversas pedreiras e areais que apareceram para atender as necessidades da construção civil, além do comércio e serviços especializados e não especializados.

O grande impulso turístico da região na década de 70 trouxe como consequência uma grande alta nos custos dos imóveis da região, sendo os mais próximos às praias oceânicas e lagoas os mais procurados e valorizados. Foram construídos muitos imóveis, principalmente grandes loteamentos e condomínios por serem mais seguros. Algumas dessas ocupações deram-se em aterros sobre o espelho de água da lagoa, sobre salinas, sobre brejos, ocorrendo desvios de cursos de rio ou de canais.

4.4.6 DÉCADA DE 80

Solidificou a vocação turística da região, principalmente em Cabo Frio e seu distrito Armação dos Búzios, com hotéis, restaurantes e pousadas de bom padrão, e melhor infraestrutura local, transporte, comércio, saúde, escolas, serviços especializados e gerais.

4.4.7 DÉCADA DE 90

Nessa década, o problema da falta da água tornou-se agudo, principalmente no verão e feriados, quando a população da Região dos Lagos quase triplica. Além da água, a região começou a apresentar problemas crescentes em várias áreas: esgoto sanitário, coleta de lixo, uso do solo e criminalidade.

No final da década, ocorreu um grande programa de investimentos em infraestrutura, com a recuperação da malha rodoviária, a concessão da ligação Rio Bonito – São Pedro da Aldeia para a Via Lagos, a concessão do abastecimento de água e coleta e tratamento de esgotos sanitários para o consórcio Pró-Lagos e a implantação do aeroporto de Cabo Frio.

4.5. EVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA

A evolução demográfica da Região dos Lagos pode ser analisada através da Tabela 3.

Tabela 3 - Evolução demográfica na Região dos Lagos, RJ (CIDE, 1999).

MUNICÍPIO	HABITANTES						
	1940	1950	1960	1970	1980	1991	1996
ARARUAMA	25.049	26.242	30.904	40.031	49.822	59.024	66.148
ARMAÇÃO DOS BÚZIOS	3.235	3.231	3.520	4.108	5.354	8.604	14.361
ARRAIAL DO CABO	2.897	3.195	7.275	10.974	15.362	19.866	21.548
CABO FRIO	8.816	9.750	16.646	29.297	50.239	76.311	101.398
IGUABA GRANDE	2.877	2.877	3.528	4.153	4.131	8.074	9.221
SÃO PEDRO DA ALDEIA	14.340	16.109	15.868	23.568	33.371	42.400	55.926
SAQUAREMA	18.970	18.880	19.865	24.378	28.194	37.888	44.017

Na Tabela 3, verifica-se que os municípios tiveram o seguinte crescimento total no período de 1940 a 1996:

- Araruama – 164%;
- Armação dos Búzios – 344%;
- Arraial do Cabo – 644%;

- Cabo Frio – 1.050%;
- Iguaba Grande – 221%;
- São Pedro da Aldeia – 290%;
- Saquarema – 132%.

Observa-se que os municípios mais próximos de Niterói e Rio de Janeiro tiveram os menores crescimentos (Saquarema e Araruama), e os mais afastados cresceram mais (Armação dos Búzios, Arraial do Cabo e Cabo Frio). Esse crescimento foi devido a beleza natural dos municípios e a vocação turística destes.

4.6. AÇÃO DO HOMEM

O grande incremento turístico da região deu-se a partir da construção da ponte Rio-Niterói, na década de 70, com a procura de imóveis da região e a construção de grandes loteamentos e condomínios, inclusive com aterros sobre o espelho de água da lagoa, sobre salinas, sobre brejos e desvios de cursos de rio ou canais.

As obras mais comuns e que mais afetaram a dinâmica do corpo hídrico foram: espigões, muros de proteção para aterro da praia e atracadores que alteram a circulação e o transporte de sedimentos.

Por outro lado, as dragagens e aterros hidráulicos, inclusive para exploração de calcário, nunca tiveram qualquer acompanhamento técnico dos órgãos fiscalizadores, sempre objetivando o menor custo.

Por essa razão, as dragagens e aterros hidráulicos acabaram prejudicando a circulação das águas e alterando de forma bastante significativa a profundidade da lagoa.

Por outro lado, na exploração das jazidas calcárias, a lavagem das conchas é feita sem cuidar dos rejeitos finos, o que representa a introdução artificial de sedimentos na orla,

ocasionando o avanço da área marginal sobre o espelho de água, prejudicando a qualidade de água nessas áreas e alterando seu equilíbrio.

As unidades residenciais, industriais ou comerciais, situadas às margens da lagoa ou de algum contribuinte da bacia hidrográfica, lançam seus efluentes diretamente sobre os mesmos ou sobre o lençol freático. Outras unidades situadas mais afastadas dos corpos hídricos lançam seus efluentes sobre o lençol freático.

Assim, a transferência da água doce do rio São João, através das adutoras provenientes da Lagoa de Juturnaíba, está alterando a salinidade da Lagoa de Araruama, com a conseqüente modificação do ecossistema. A contribuição antes estimada em 1.200l/s (Hansen – 1993), agora é de 2.300 l/s (COPPETEC, 2002).

A renovação da água, feita através do canal de Itajuru e do canal central, encontra-se bastante prejudicada devido ao assoreamento, dragagens e aterros, que alteraram a capacidade de circulação das águas. O canal também recebe grande parte dos efluentes da cidade de Cabo Frio.

A restinga de Maçambaba até Praia Seca, parte integrante do ecossistema da Lagoa de Araruama, é a última área que está sendo ocupada, também desordenadamente, sem qualquer infraestrutura e planejamento. Ela apresenta ainda os mais diversos problemas ambientais: aterros de lagoas e brejos; desmatamento; invasão de terrenos; destruição de sítios arqueológicos, da flora e das dunas; urbanização e retirada de areia dos cordões litorâneos para aterros e comércio ilegal. A ocupação desordenada acarreta, também, a impermeabilização do solo e a ocupação de encostas, alterando ainda mais o equilíbrio ambiental.

Essa retirada de areia na restinga está associada aos processos de acomodação da faixa oceânica durante as ressacas. Os cordões litorâneos existentes em uma restinga são a proteção contra a ação de tempestades, pois, ao interagir com as ondas, têm seus perfis transversal e longitudinal moldados pela direção e altura das ondas incidentes.

Em um possível cenário de subida do nível do mar, o cordão litorâneo externo da restinga da Massambaba constitui uma proteção, responsável pela manutenção do equilíbrio do ecossistema. Com a exploração da areia das dunas e a crescente urbanização, esse elemento moderador perde sua capacidade de proteção, podendo haver erosão costeira, que, se muito agressiva, poderia causar rompimento da restinga, o que acarretaria alterações significativas para a lagoa.

4.6.1 OBRAS DE PROTEÇÃO DAS MARGENS

As obras mais comuns de proteção na lagoa são: espigões, marachas (Figura 11), expansão artificial de praias e muros de proteção. Espigões e marachas são obras com função de reter sedimentos em trechos sujeitos ao transporte longitudinal de sedimentos. No entanto, essas obras vêm sendo realizadas indiscriminadamente, sem previsão dos impactos ambientais que poderão causar.

Expansão artificial de praias é a colocação de sedimentos na praia, vindos de outros locais, inclusive por aterros hidráulicos. Entretanto, é necessário que seja precedido de estudo específico de todas as condicionantes locais, para não prejudicar o ecossistema e a circulação das águas.

Outro tipo de obra comum é o muro de proteção, construído paralelamente à margem da lagoa, para proteção dos aterros efetuados.

4.6.2 DRAGAGENS

As jazidas de conchas calcárias, há quase cinquenta anos, são exploradas pela Companhia Nacional de Álcalis e, há mais tempo, por outras empresas de menor porte. As empresas, como a Álcalis, têm suas áreas de concessão definidas para exploração do calcário. As dragas são posicionadas sobre uma jazida identificada preliminarmente e operam fazendo buracos até não encontrar mais conchas, com a operação obedecendo a critérios de produção e custos.

Embora essa atividade seja bastante antiga, nunca houve estudo dos impactos ambientais decorrentes, sendo que, teoricamente, a freqüente mudança na batimetria acarreta problemas de circulação de água e conseqüente alteração no transporte de sedimentos. Outras dragagens são feitas para utilização da areia sem qualquer autorização ou critérios.

4.6.3 OBRAS DE ACOSTAGEM

Em alguns locais da lagoa, existem cais, estruturas contíguas à praia utilizada para atracação e amarração de embarcação. Também, com freqüência, encontramos o atracadouro, que é uma estrutura que se projeta perpendicularmente à linha de costa, podendo ser utilizado de ambos os lados. A SERLA determina que essas estruturas sejam vazadas e que sejam de uso público, já que se encontram em áreas públicas. Geralmente essas estruturas são constituídas de pilares espaçados, permitindo a livre movimentação da água.

Outro tipo de obra muito comum é a rampa de concreto para os barcos, que pode servir como um obstáculo ao transporte de sedimentos, causando acúmulo de um lado e erosão do outro. Uma obra grande desse tipo é a Marina Pública de Araruama, com uma área de 40.000 m², dotada de quebra-mares e cais para acostagem.

4.6.4 OBRAS DE SANEAMENTO

A crescente ocupação do entorno da Lagoa de Araruama resultou, também, no aterro de áreas que pertenciam ao seu ecossistema, como mangues, brejos e baixios, uma vez que a lagoa funciona como receptora das águas de várias sub-bacias hidrográficas. Durante o período de chuvas, já se observam sérios problemas de drenagem, em função da ocupação desordenada, da topografia ou devido à elevação do nível da lagoa pela ação do vento e ondas.

Para minimizar esses problemas, construiu-se um sistema de rede de águas pluviais, em que o destino final são os rios, canais ou praias, causando mudanças na qualidade da água, no transporte de sedimentos e na circulação local. Algumas manilhas nas praias, muitas vezes, impedem o transporte de sedimentos, além de provocarem mudanças na qualidade da água local com o lançamento de esgotos, que são ligados às galerias de águas pluviais *in natura*, comprometendo a balneabilidade do corpo hídrico. Com exceção de Arraial do Cabo, os municípios do entorno da lagoa só agora estão construindo redes de coleta para tratamento de esgoto sanitário.

4.6.5 ATERROS

Durante décadas, o aterro em salinas, brejos, mangues e margens no entorno da lagoa e do seu canal de ligação com o mar vem reduzindo seus respectivos espelhos de água. No canal, provocou, inclusive, a redução do prisma de maré com a diminuição do volume de água que flui para dentro e para fora da lagoa durante o ciclo da maré (Figura 7).

Até a década de 50, Araruama, São Pedro da Aldeia e Cabo Frio eram cidades típicas de interior, ignorando a lagoa e o mar, a não ser para atividades de sal, de pesca e de retirada de conchas.

Na época, Cabo Frio era desenvolvida apenas à beira do canal de Itajuru, sendo separada do mar por dunas com cerca de 20 metros de altura, que se localizavam desde o

forte São Mateus até próximo ao seu distrito Arraial do Cabo. Por serem constituídas de areias muito finas, as dunas se movimentavam sempre devido à ação dos ventos constantes na região, algumas vezes ameaçando as construções existentes.

Na década de 50, a prefeitura de Cabo Frio começou a retirar areia das dunas, em princípio para afastá-las das construções, mas depois, também, para aterrar zonas de mangues existentes no entorno do canal e da lagoa, particularmente na região onde hoje se encontra a rodoviária e o bairro de São Cristóvão. Após o aterro, a própria prefeitura loteava a área e doava terrenos para quem quisesse construir, permitindo assim a expansão da zona urbana.

Em 1952, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Rio de Janeiro (DER-RJ) e a Companhia Urbanizadora de Araruama executaram um projeto urbanístico entre o centro urbano e a lagoa, que resultou na construção de uma pista dupla nas suas margens, tornando Araruama a primeira cidade praiana da Região dos Lagos. Na ocasião, foi construída uma praia artificial com areia retirada, pela primeira vez, das dunas de Cabo Frio.

A partir da década de 70, paulatinamente a retirada de areia das dunas foi sendo aumentada para aterros particulares, com utilização em jato de areia na indústria naval de reparos e com uso em materiais de construção. A retirada em ritmo acelerado da areia das dunas resultou na sua extinção e na abertura de Cabo Frio para o mar, transformando-a em uma cidade praiana, incrementando ainda mais a sua vocação turística. Por outro lado, entre Araruama e Cabo Frio, foram implantados inúmeros loteamentos e condomínios, que ocuparam as margens da lagoa com aterros para diversas finalidades.

Hoje, apenas o centro de São Pedro da Aldeia permanece como cidade do interior. Em 2002, na gestão atual, foi iniciada a construção de uma avenida margeando a lagoa, em que a implantação e pavimentação, finalmente, tornará São Pedro da Aldeia uma cidade praiana, possivelmente atraindo turistas, o que atualmente não ocorre, porque está de costas para a lagoa.

Finalmente, ressalta-se que as prefeituras dos antigos municípios e dos recentemente criados, também em diversas ocasiões, executaram aterros nas margens da lagoa para a construção de obras públicas.

4.7. CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

O meio ambiente pode ser caracterizado como a integração entre o meio biótico, meio socioeconômico e meio físico. O ambiente da Lagoa de Araruama é complexo, razão pela qual é relevante o caráter multidisciplinar da engenharia para atingir seus objetivos e solucionar os problemas decorrentes da exploração, da ocupação e da utilização desse ambiente, propondo soluções adequadas, sem destruí-lo e em benefício da comunidade. Nesse contexto, é necessário coletar dados e identificar parâmetros relacionados aos meios supracitados, não devendo se esquecer, fundamentalmente, da compreensão da evolução histórica do ecossistema em estudo.

4.7.1 MEIO FÍSICO

Neste item, é realizada uma breve retrospectiva dos dados meteorológicos e climatológicos existentes na área de estudo. São enfatizados, ainda, alguns parâmetros de qualidade de água e suas relações com o balanço hídrico na região. Finalmente, dados de níveis de água bem como aspectos geológicos, geomorfológicos, topográficos, e de transporte litorâneos são abordados.

✓ Ventos

Os ventos na região são relativamente intensos e freqüentes, tendo influência na geração das ondas no mar, na lagoa e em seu canal de ligação com o mar, no padrão de circulação, nos níveis e na qualidade da água, como também nos processos sedimentológicos. Na região, existem duas estações metereológicas:

- estação Cabo Frio, localizada em Figueira, Arraial do Cabo, estação metereológica operada inicialmente pelo Ministério da Agricultura e, atualmente, pelo Instituto do Mar Almirante Paulo Moreira, com anemógrafo FUESS, instalado a 10 metros de altura;
- estação São Pedro da Aldeia, localizada na torre de controle da base aeronaval, com anemômetro BENDIX, instalado a 10 metros de altura.

Os dados de direção e intensidade de ventos a serem utilizados neste trabalho referem-se a medições feitas na estação 83759 em São Pedro da Aldeia durante um período de 20 anos (12/07/76 a 22/07/97). Eles são compostos de uma série temporal de medições de velocidade e direção do vento referenciada ao norte verdadeiro com intervalos de amostragem de 3 horas.

Os dados, a seguir, mostram a predominância dos ventos NE, e que cerca de 2/3 das ocorrências são nas direções N-NE-E, conforme apresentado na Figura 15. Para os mesmos dados de vento, apresentam ainda as distribuições de freqüência para diferentes direções e intensidades de vento (Figura 16). Adicionalmente, são ilustrados os dados de ventos de nordeste (Figura 17) e de ventos sudoeste (Figura 18).

Direção	Ocorrência
N	15,9%
NE	31,0%
E	18,8%
SE	3,2%
S	8,4%
SW	11,4%
W	6,4%
NW	5,0%

Direção de Ventos - São Pedro da Aldeia (1976-1997)

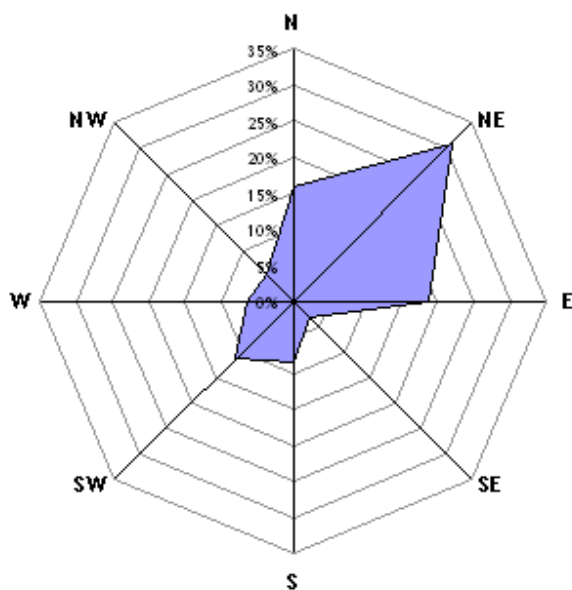


Figura 15 – Estatística da direção do vento (Marinha do Brasil, 1997) .

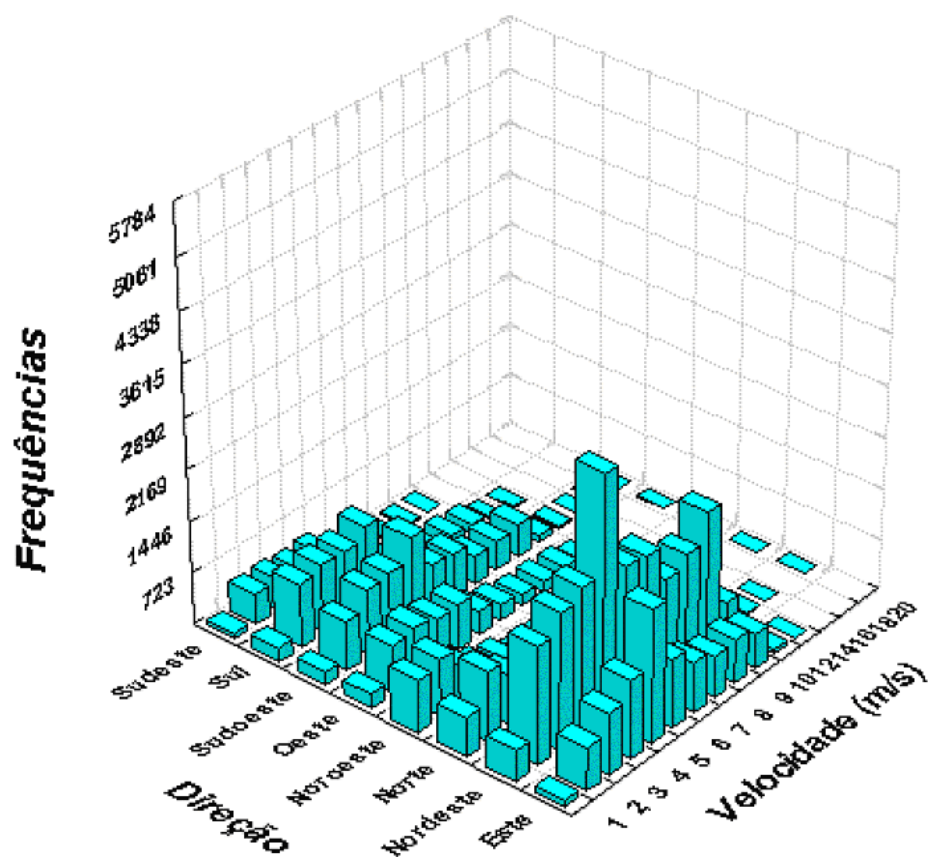


Figura 16 – Distribuição de velocidade e direção do vento entre 1976 e 1997, em São Pedro da Aldeia (Marinha do Brasil, 1997).

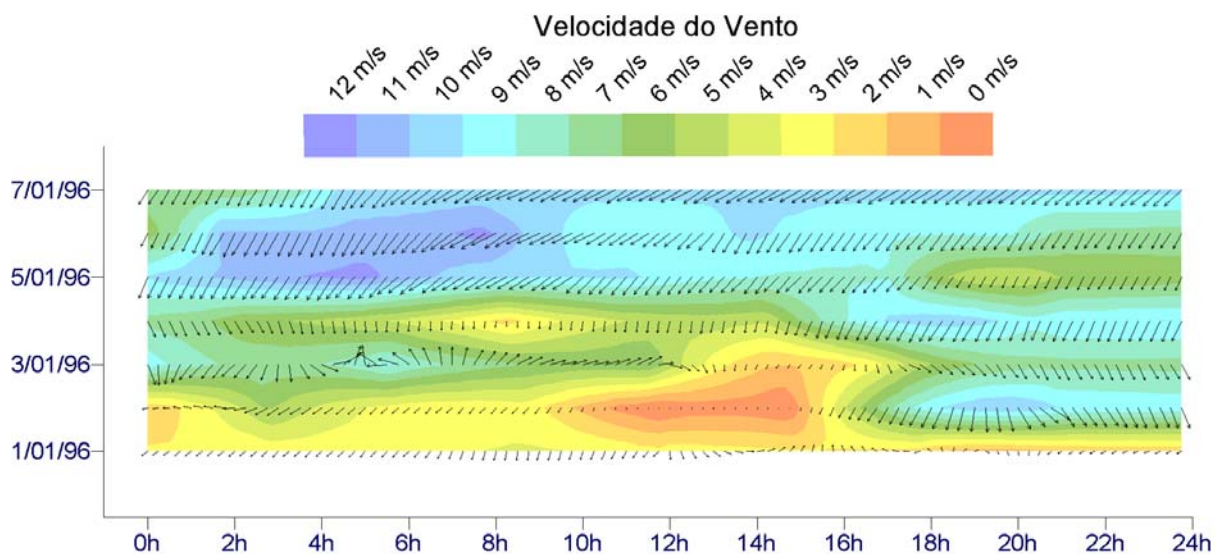


Figura 17 – Dados de vento do vento NE, situação mais usual; os valores mostrados a cada 15 minutos são interpolados a partir dos dados medidos a cada 3 horas (Marinha do Brasil, 1997).

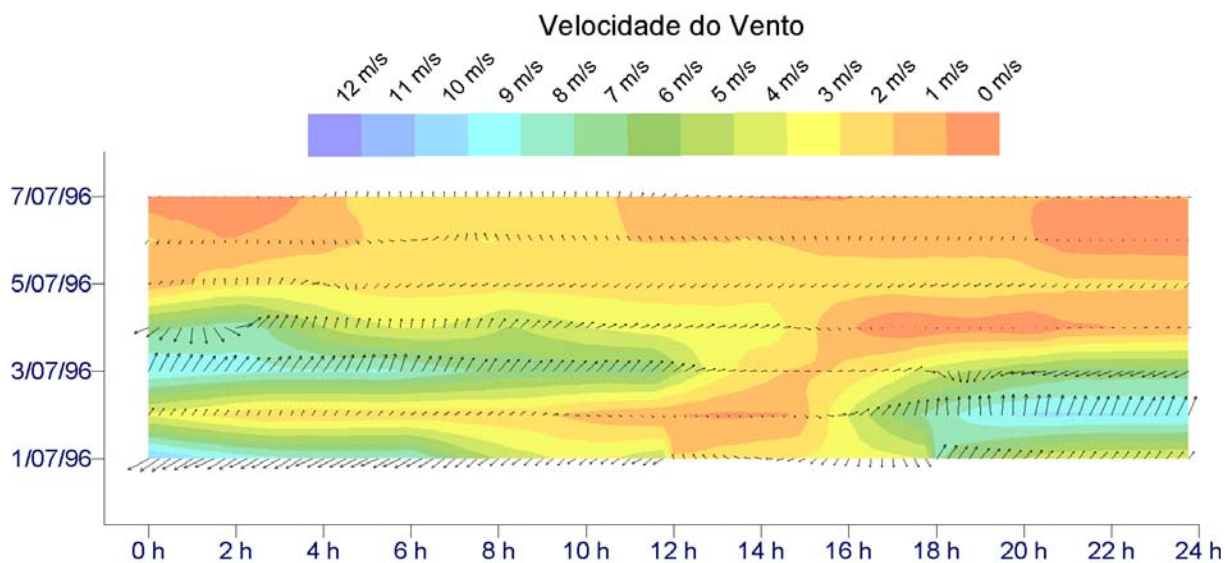


Figura 18 – Dados de vento SO, condições de entrada de frente fria; os valores mostrados a cada 15 minutos são interpolados a partir dos dados medidos a cada 3 horas (Marinha do Brasil, 1997).

Vale ressaltar que, pelos dados de vento disponíveis, tanto o vento reinante (o que apresenta a maior frequência), quanto o dominante (o que apresenta o maior produto frequência versus o quadrado da intensidade) são ventos de Nordeste. O reinante apresenta intensidade de 5,0 m/s e o dominante de 10,0 m/s.

✓ Ondas e Correntes

As ondas geradas pelos ventos são parâmetros fundamentais a serem coletados e usados pela Engenharia Costeira no cálculo das estruturas, dimensionamento de obras de proteção, etc. Não se conhece medição de ondas na laguna, razão pela qual Hansen (1993), estimou as características das ondas a partir de dados de ventos.

Alguns estudos foram realizados pelo INPH (1986 e 1988), Lessa (1990) e Kjerve (1992), porém são insuficientes, sendo necessário uma maior amostragem (Hansen, 1993).

✓ Níveis da Água

Oliveira, em 1976, recomendou a instalação de nove linígrafos. Entre 1976 e 1977, ocorreram as primeiras medições. Posteriormente, em 1978, o próprio Oliveira, ao analisar os registros disponíveis, constatou a não existência de variação maregráfica no interior da laguna.

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH, ao realizar medições de nível de água, constatou que a propagação de maré ocorreria até a localidade do Boqueirão, em São Pedro da Aldeia, sendo que, a partir deste ponto em direção ao interior, a variação podia ser considerada desprezível. Foram realizadas medições de níveis entre os dias 27/11 e 30/11 e entre os dias 9/12 e 10/12 de 1986, que correspondem a marés de sizígia e quadratura com marégrafos tipo Hidrologia. Os marégrafos M1 (praia do Hospício) e M4 (ponte na RJ 140, divisa entre Cabo Frio e São Pedro da Aldeia) são mantidos pela SERLA até hoje.

Resultados obtidos pelo INPH, citados em Hansen (1993), indicam as seguintes variações de níveis, supostamente pertinentes a marés de sizígia e quadratura em marégrafos ilustrados na Figura 19:

- marégrafo M1 apresenta variação na faixa de 70~82 cm acima do zero do DHN;

- marégrafos M2 (Salina Boa Vista) e M6 (Ponta de Acaíra) apresentam pequenas variações de nível em torno 70 cm acima do zero do DHN para os dois períodos;
- marégrafo M3 (condomínio Praia Azul, ao lado da praia da Baleia, em São Pedro da Aldeia) denota pequena oscilação em torno de 40 cm acima do zero do DHN;
- marégrafos M4 e M5, próximos da ilha dos Anjos, permitem observar nitidamente a influência da maré oceânica.

Mais adiante, no Capítulo 6, essas informações serão contrastadas com os resultados das simulações computacionais apresentadas no Capítulo 5.

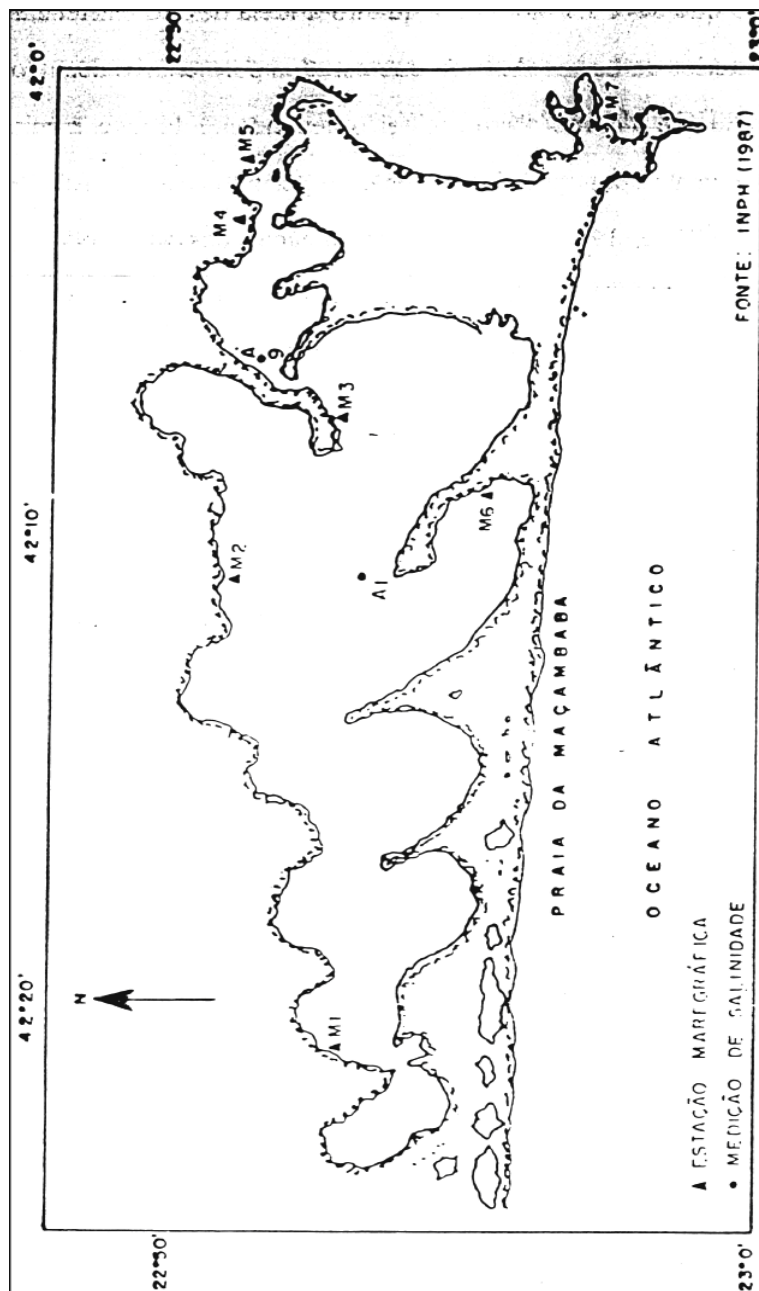


Figura 19 – Localização das estações maregráficas (Hansen, 1993).

✓ **Dados Geológicos e Geomorfológicos**

Essas informações são úteis para a caracterização dos aterros, de construções no entorno e da faixa marginal; podendo ser encontradas em Amador (1985), INPH (1986), FEEMA (1988), Lessa (1990) e Hansen (1993).

✓ **Transporte Litorâneo, Erosão e Assoreamento**

Ao longo do entorno da laguna, existe um constante processo de transporte de sedimentos, que ocasiona erosões e assoreamentos, dependendo do vento. Os processos físicos responsáveis por esse transporte devem ser analisados em uma escala reduzida e global. Essa caracterização dos processos físicos e das diversas fontes de sedimentos permitirá uma pré-avaliação e o gerenciamento dos problemas da laguna.

As principais atividades humanas que alteram esse equilíbrio são: dragagens para a extração de conchas, dragagens para aterros, dragagem para desobstrução de canais e obras para proteção do contorno e navegação (marachas, espigões, muros, atracadouros e canais).

✓ **Dados Topográficos; Hidrográficos e Batimétricos**

Para definir a faixa marginal de proteção, que é de suma importância no controle e proteção das margens, é necessário atualizar as informações topográficas, hidrográficas e batimétricas. É necessário também o nivelamento entre si dos marégrafos instalados.

A caracterização desses parâmetros servirá para interrelacionar as atividades (aterros, construções no contorno, dragagens, etc.), se tornando ferramenta indispensável em modelos matemáticos, que caracterizem o ambiente físico.

✓ **Dados de Qualidade de Água**

O controle de qualidade de água deveria ser priorizado, tendo em vista a crescente degradação em torno do ambiente lagunar, inclusive de suas sub-bacias hidrográficas. As bacias hidrográficas recebem todo o esgoto sanitário, que, por sua vez, lançam na Lagoa de Araruama, ficando imprópria ao banho. A lagoa não apresenta, portanto, em alguns locais, como as praias de Araruama e Siqueira, as condições mínimas de qualidade, configurando a degradação do ambiente.

Adicionalmente, devido ao lançamento de águas servidas oriundas da bacia do rio São João, a salinidade da Lagoa de Araruama vem diminuindo com o tempo, tendo reduzido de 57‰ para 52‰ entre 1965 e 1990, mas ainda representa a maior laguna hipersalina do Brasil (Muehe e Valentini, 1998). O gráfico mostrado na Figura 20 indica as salinidades médias das lagunas do litoral sul fluminense, onde se constata quão acima do nível médio oceânico encontra-se a salinidade da Lagoa de Araruama.

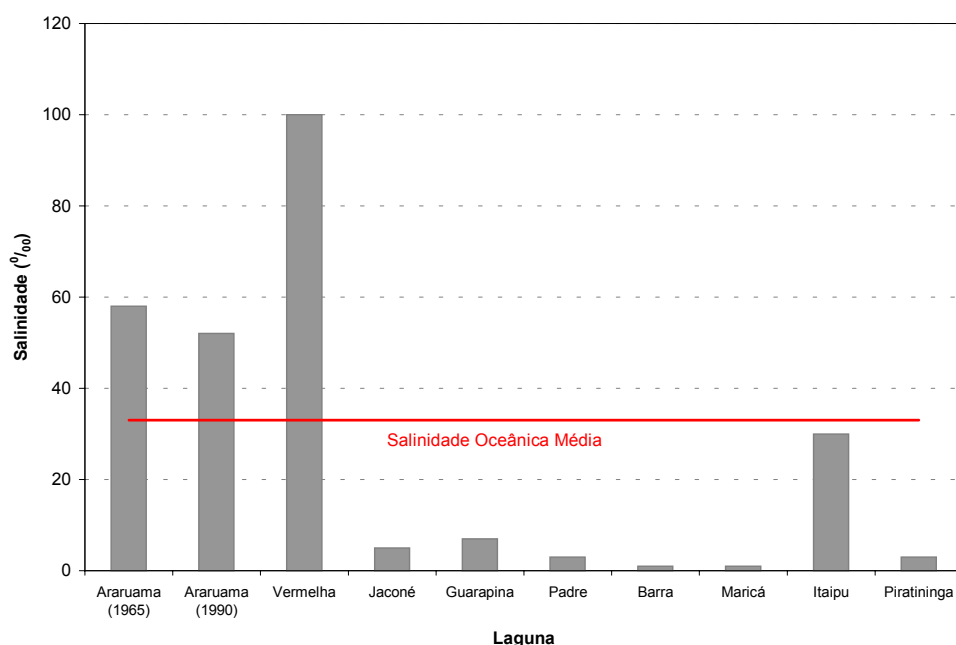


Figura 20 – Salinidades médias de algumas lagunas do litoral sul fluminense.

Em 1988 o INPH, realizou nove medições em pontos diferentes da lagoa. Para o ponto A1 (Figura 19), os valores médios de temperatura e salinidade foram 28,6°C e 64,7‰, respectivamente. Para o ponto A9, mais a leste, os valores foram de 20,4°C e 36,7‰, para a temperatura e salinidade respectivamente (Figura 19).

A salinidade varia devido a um ciclo diário, assim como em função de variações sazonais. Portanto, uma medição esporádica desse parâmetro não é suficiente, sendo necessário um monitoramento mais abrangente.

Essa alta salinidade e temperatura na laguna proporcionaram o desenvolvimento de uma flora e fauna, que não suportariam uma brusca mudança de salinidade e temperatura que ocorreria em função da abertura da barra, através da enseada da Figueira ou enseada das Gaivotas, intervenção defendida por alguns. A água do mar, com a salinidade e temperatura bem mais baixas que a da lagoa, traria impactos de proporções imprevisíveis.

✓ **Balanço Hídrico e Salinidade**

A região onde se encontra a Lagoa de Araruama reúne aspectos climáticos e topográficos que propiciam uma baixa precipitação e alta evaporação. Lessa (1990) apresentou os resultados do balanço entre a evaporação e a precipitação, contrastando-os com a salinidade média de um ponto localizado nas proximidades da Praia do Sudoeste para os anos de 1960 a 1989. Esses resultados não são para todo o corpo lagunar. Portanto, o balanço hídrico apresentado por ele é válido para a estação meteorológica na qual os dados foram amostrados, enfatizando-se que a salinidade é representativa de apenas um ponto.

Segundo dados apresentados no Projeto Planágua Semads / GTZ (2002), a Lagoa de Araruama, ao longo de sua extensão, possui uma pluviosidade média anual entre 750 mm e 900 mm e uma evaporação média anual na faixa de 890 mm a 1370 mm.

4.7.2 MEIO BIOLÓGICO

Por ser mais salgada que o mar, as espécies de fauna e flora que nela vivem estão adaptadas a essa situação.

A principal característica da laguna é o seu reduzido número de espécies, fato este justificado por sua alta salinidade, que, em alguns locais, chega a 70 partes por mil, onde apenas espécies com grande resistência conseguem sobreviver. Essa alta salinidade pode, em alguns casos, atuar na modificação da forma ou redução do tamanho dos organismos.

Os mecanismos fisiológicos e genéticos, isto é, a maneira pela qual essas espécies conseguem se adaptar a esse ambiente é pouco conhecido, pois a maioria dos estudos, nessa área, é de sistemas costeiros, que tem menor teor de salinidade. Por essa razão, deveriam ser incentivados novos estudos nessa área, pois, por ser uma das poucas lagoas hipersalinas do Brasil, possui uma grande importância ecológica.

As espécies descritas, a seguir, encontradas na lagoa, são de origem marinha, sendo a salinidade o principal fator de distribuição das espécies. As mesmas são selecionadas segundo a sua resistência a esse fator.

Os seres mais simples encontrados são bactérias do gênero *Beggiatoa*, ocorrendo em maiores quantidades nas áreas que tem até 80% de saturação em oxigênio.

Dentre as algas, as *Cianofíceas* são os organismos dominantes, podendo, em algumas regiões, cobrir o fundo da lagoa, evidenciando uma melhor adaptação desses vegetais às condições hipersalinas. A dominância de espécies do gênero *Oscillatoria*, na maior parte da laguna, sugere uma condição favorável em termos de qualidade de água. O mesmo pode ser constatado com a presença das diatomáceas bentônicas do gênero *Nitzschia*, características de estágios iniciais de sucessão ecológica.

Na fauna bentônica, destaca-se a grande quantidade de Amphipoda e do bivalve *A. brasiliiana*, ambos sendo uma fonte alimentar para os peixes.

O espécime de maior valor econômico é o camarão rosa, ocorrendo em pequena quantidade no interior da lagoa. Os espécimes de maior quantidade são a carapeba e a tainha. Essas espécies descritas são comuns, com uma ampla distribuição, quer seja nas regiões costeiras ou em outros estuários e lagoas, não estando ameaçadas de extinção.

Contudo, espécies migratórias, como a tainha que entra na laguna ainda jovem para crescer e maturar em seu interior, são impedidas de retornar ao oceano, devido à colocação

de redes de espera, fato que pode causar prejuízos às populações oceânicas dessas espécies e à pesca na lagoa (CNA, 1992).

4.7.3 MEIO SOCIOECONÔMICO

O ambiente e as atividades criadas e desenvolvidas pelo homem é chamado de meio socioeconômico ou meio antrópico. A principal atividade desenvolvida na região é o turismo, para o qual foi criada e está sendo desenvolvida uma melhor infraestrutura, visando as pessoas que se deslocam para suas praias durante o verão e feriados.

Outras atividades existentes são a pesqueira e indústrias do sal e das conchas. Há um incremento também nas atividades agrícolas e pecuárias. Nas últimas décadas, diversas pedreiras e areais apareceram para atender as necessidades da construção civil.

5. CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NA LAGOA DE ARARUAMA

Neste capítulo, são descritos e analisados padrões de circulação hidrodinâmica e troca de massas de água para o sistema lagunar de Araruama. Apresenta-se a análise para duas situações. A primeira representa o que se pode considerar como situação atual. A segunda representa uma situação projetada, no qual o canal de ligação com o mar seria dragado e desobstruído desde o canal de Itajuru até a península Perinas. Também é comparada a troca de massas de água nas duas situações.

No princípio, pensou-se em comparar três situações: canal atual, canal de 3,0 metros e de 4,0 metros. Segundo a história, o canal de ligação com o mar tinha entre 4 e 6 metros, na época em que piratas entravam na lagoa para pegar pau-brasil. Porém, optou-se por fazer a comparação somente entre o canal atual com o canal de 3,0 metros devido aos aterros nas suas margens. Nos dias de hoje, dragar para 4,0 metros necessitaria de obras de contenção nas margens.

5.1. DOMÍNIO MODELADO E BATIMETRIA ATUAL

O posicionamento das margens atuais foi obtido através de uma imagem de satélite do sensor Landsat5-TM com resolução espacial de 15m, datada de julho de 1999, cedida pelo Instituto de Geociências da UFRJ. A imagem teve seu posicionamento corrigido para o norte verdadeiro e foi georeferenciada como mostra a Figura 21.

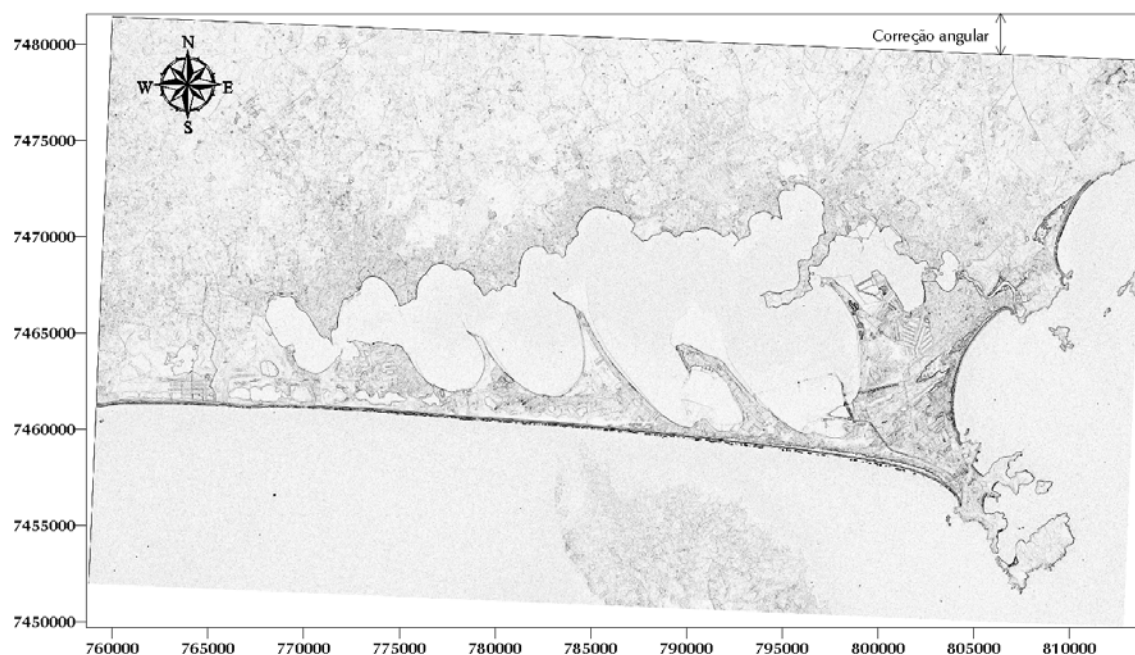


Figura 21 – Imagem de satélite com 15m de resolução, corrigida e georeferenciada em coordenadas UTM, utilizada para definir contornos atuais das margens da Lagoa de Araruama.

As plantas e mapas disponíveis datam de mais de 20 anos. Foram obtidas batimetrias em diferentes regiões, realizadas em datas diversas, a partir das quais foi feito um mosaico. As sondagens batimétricas utilizadas foram:

- sondagem batimétrica no período de 26/11/1985 a 10/12/1985, realizada pela empresa Oceanotécnica para a Companhia Brasileira de Dragagem, apresentadas em três plantas, que juntas vão da foz do canal de Itajurú até o início da lagoa;
- sondagem batimétrica no interior da lagoa, realizada em 1977, (autor desconhecido);
- em virtude da falta de sondagem batimétrica no trecho na região das Perinas, canal Palmer e o Baixo Grande (Figura 14), a sondagem foi estimada a partir das cartas publicadas pelo CREA-RJ; essas cartas têm caráter ilustrativo, tendo acurácia e confiabilidade muito baixas para fins de modelagem.

A Figura 22 mostra o domínio modelado e a batimetria considerada no modelo.

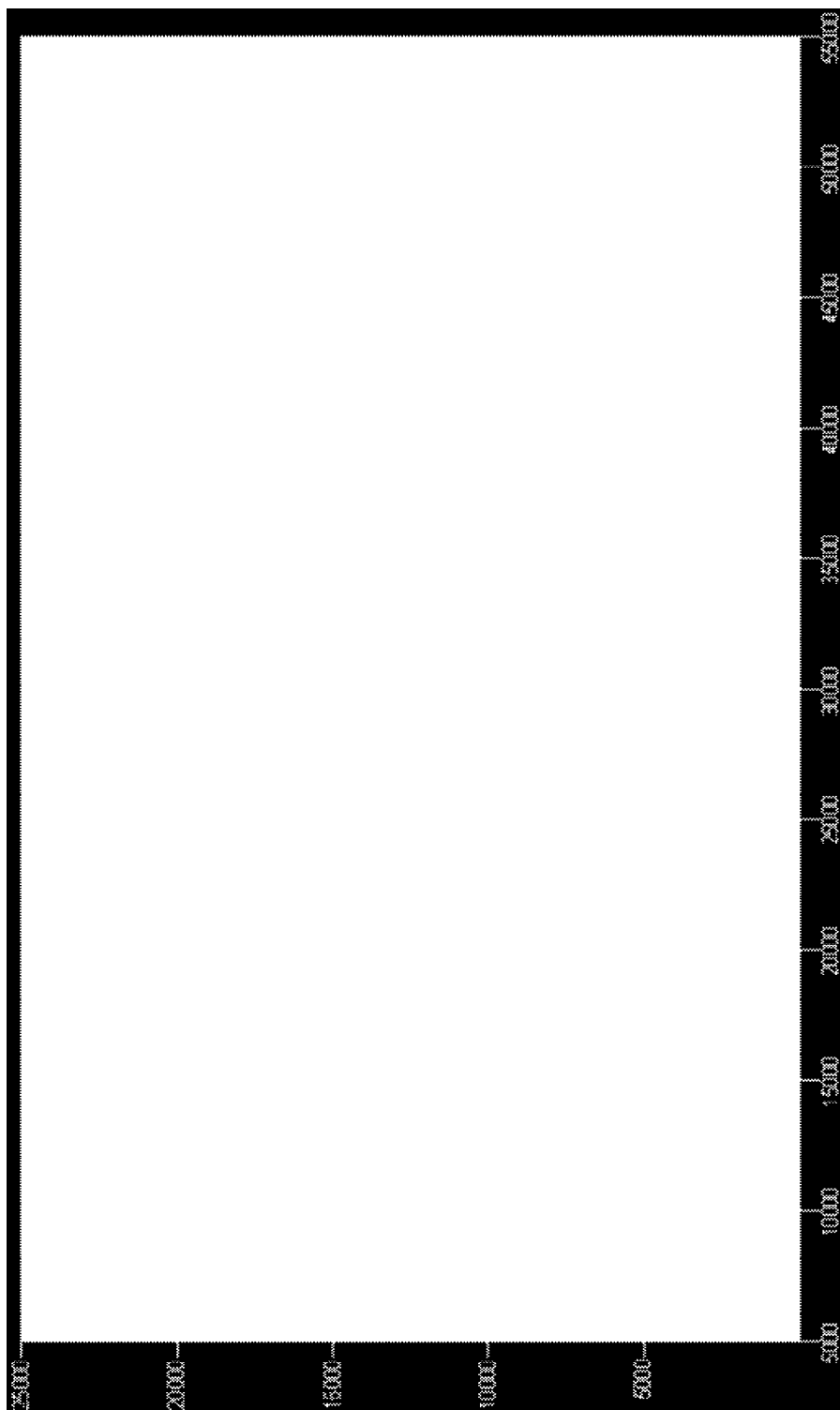


Figura 22 – Mapa da batimetria geral da Lagoa de Araruama.

É importante ressaltar que:

1. as cotas de fundo têm como referência o nível médio do mar (NMM) em Arraial do Cabo; para ter a mesma referência das Cartas Náuticas, é necessário descontar 0,70 metros dos valores lidos nos mapas apresentados neste capítulo;
2. as áreas hachuradas representam salinas e marnéis, que, como se encontram cercadas, ficam estagnadas, e, portanto, fora da dinâmica da lagoa.

Na Figura 23, é apresentado, em maior detalhe a batimetria atual considerada no domínio modelado entre São Pedro da Aldeia e Cabo Frio, inclusive no canal de Itajuru.

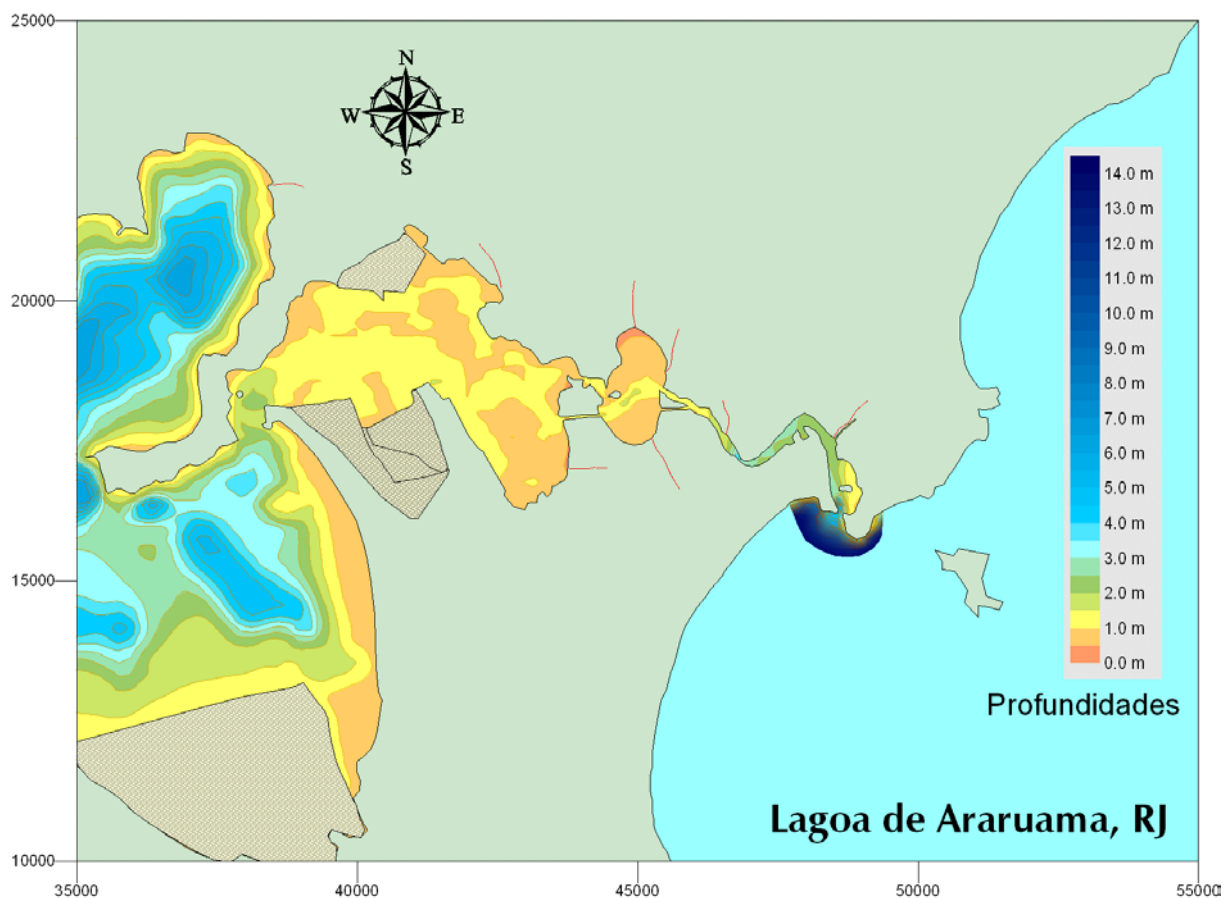


Figura 23 – Detalhe da batimetria atual na região do canal de Itajuru, Cabo Frio e São Pedro da Aldeia; no mapa, as profundidades são referenciadas ao NMM em Arraial do Cabo.

5.1.1 DOMÍNIO MODELADO COM DRAGAGEM DE CANAL

A Figura 24 apresenta a batimetria com um canal de 3,0 m. A dragagem sugerida seguiria pelo de canal de Itajuru, passando pela lagoa das Palmeiras, e indo de forma sinuosa da ilha das Pombas até o Baixo Grande, em Perinas.

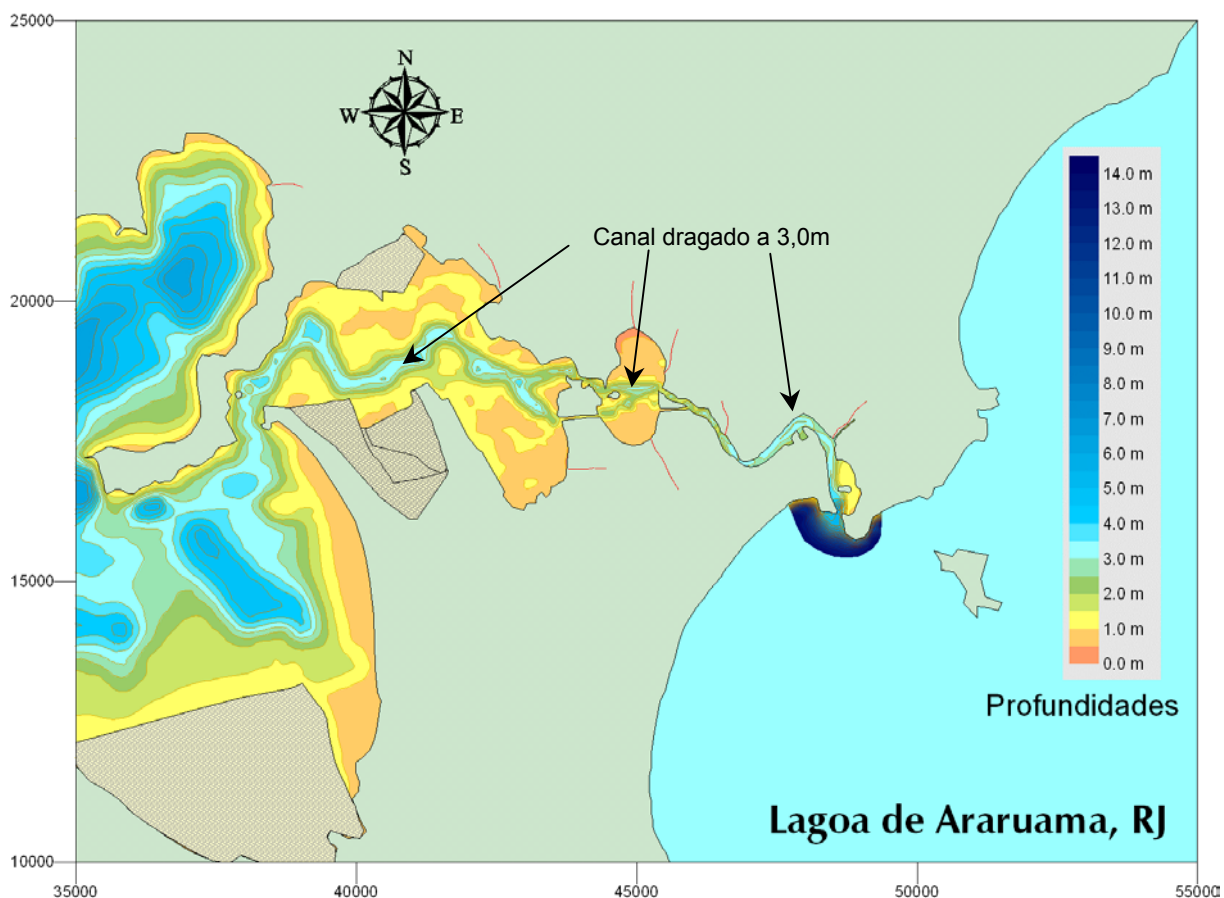


Figura 24 – Detalhe da batimetria na região do canal de Itajuru, Cabo Frio e São Pedro da Aldeia, com dragagem de um canal para 3,7 m de profundidade; as profundidades são referenciadas ao NMM em Arraial do Cabo.

5.1.2 DADOS DE MARÉ

Para iniciar a modelagem computacional, é necessário fazer uso dos dados de maré para produzir as energias que gerarão as forças resultantes (forçantes) e assim usar o modelo para realizar os cálculos matemáticos.

A variação do nível do mar na embocadura do canal de Itajuru foi modelada através de curvas de maré sintéticas. As constantes harmônicas utilizadas para geração de curvas sintéticas de maré, são as do Porto de Arraial do Cabo, fornecidas pelo Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Dentre as dezenas de constantes harmônicas pertinentes ao Porto de Arraial, foram usadas as 16 com maiores amplitudes, como listadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais constantes harmônicas do Porto de Arraial do Cabo (DHN)

Nome	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (rad)
M2	44714.16	0.3256	1.370607062
S2	43200.00	0.1718	1.539729466
O1	92949.63	0.0999	1.524894167
K1	86164.09	0.0504	2.568426527
K2	43082.05	0.0467	1.553517567
N2	45570.05	0.0418	1.609891702
Q1	96726.08	0.0267	1.312313065
L2	43889.83	0.0222	1.611986097
M4	22357.08	0.0193	0.429176463
P1	86637.20	0.0167	2.490235777
KQ1	77681.65	0.0145	0.358665161
M1	89399.69	0.0140	0.800757061
MNS2	42430.07	0.0108	2.244144352
T2	43259.22	0.0101	1.532922682
MS4	21972.02	0.0100	2.011666496
J1	83154.52	0.0098	2.162462943

Para as simulações que serão apresentadas, utilizou-se, como condição de contorno de elevação do nível do mar, as curvas de maré apresentadas na Figura 25, geradas com as constantes listadas na Tabela 4.

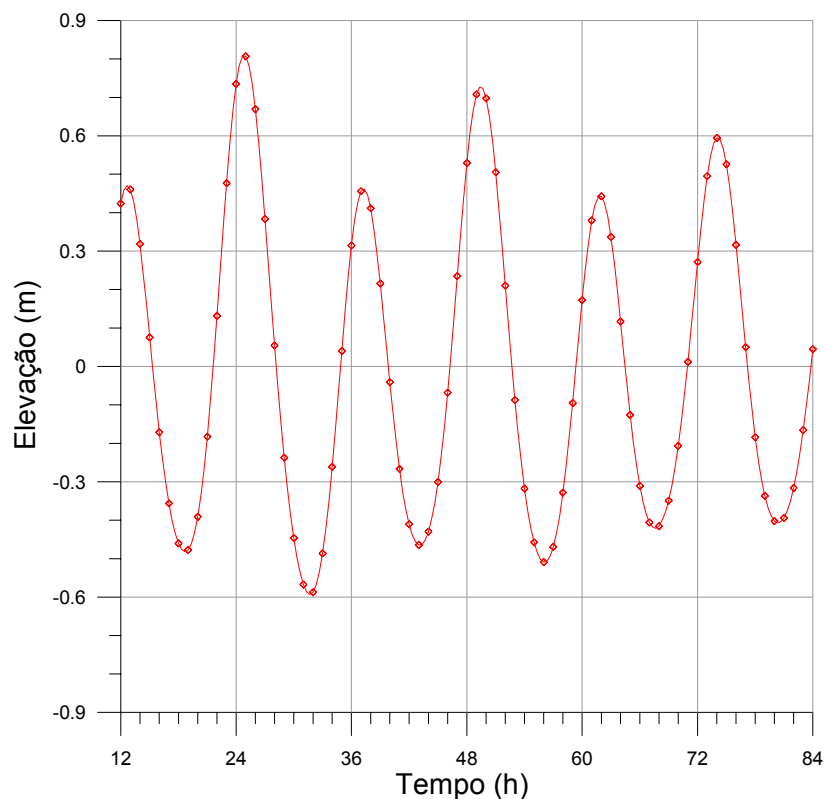


Figura 25 – *Curvas de maré geradas como condição de contorno em mar aberto, nas cercanias da embocadura do canal de Itajuru.*

5.1.3 DADOS DE VENTO

Os dados de vento utilizados na simulação encontram-se na descrição do estudo de caso, item 4.7.1. As simulações permitem a comparação entre a lagoa com a batimetria atual e a lagoa tendo o canal dragado para 3,0 m. Para essas comparações, foi selecionada uma situação de vento que retrata o segundo pico mais dominante da distribuição de frequências indicada na Figura 15. Na Figura 17, há um pico de ventos de direção NE com intensidade de 10 m/s. Simulou-se, também, para a condição de ventos SO, que ocorrem com entradas de frente fria (Figura 18).

Para ventos usuais de NE, foi usado o padrão de ventos registrado na primeira semana de janeiro de 1996, como ilustra a Figura 17, e ventos tipificando a entrada de frente fria durante a primeira semana de julho de 1996, conforme Figura 18.

5.1.4 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO MODELADO

O domínio modelado foi discretizado em elementos finitos Lagrangeanos. A malha de discretização contém 800 elementos finitos quadrangulares, com 3729 pontos de cálculo, ou nós, representando colunas de água. Os contornos de terra são demarcados por 1060 nós e os de mar por 21 nós (Figura 26).

A Figura 27 mostra detalhes da malha de discretização no trecho entre São Pedro da Aldeia e a barra do canal de Itajuru.

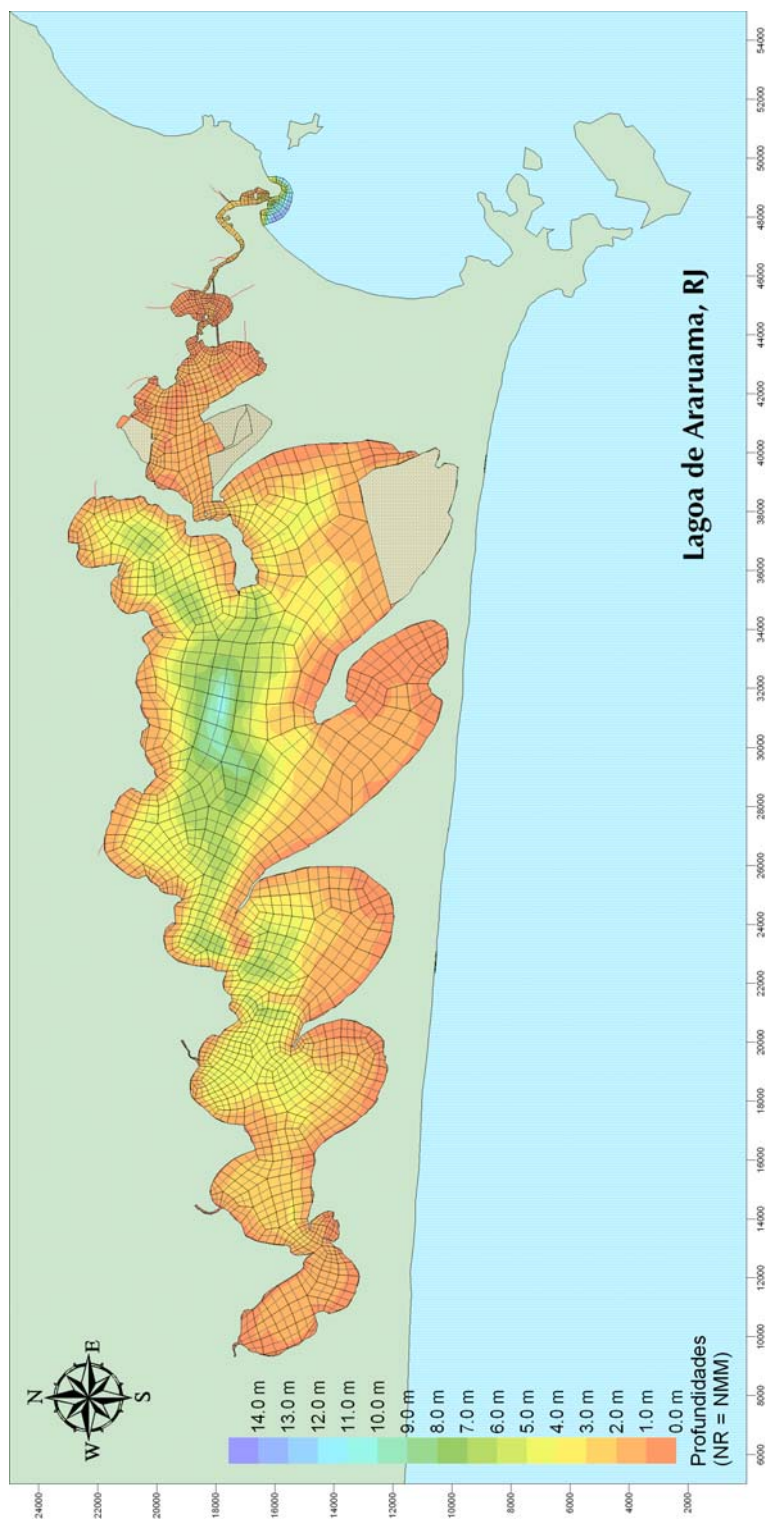


Figura 26 – Domínio modelado, discretizado em 800 elementos finitos quadrangulares, com 3729 nós representando colunas de água; o contorno de terra tem 1060 nós e o de mar 21 nós; há 2650 nós internos; mais detalhes na Figura 27.

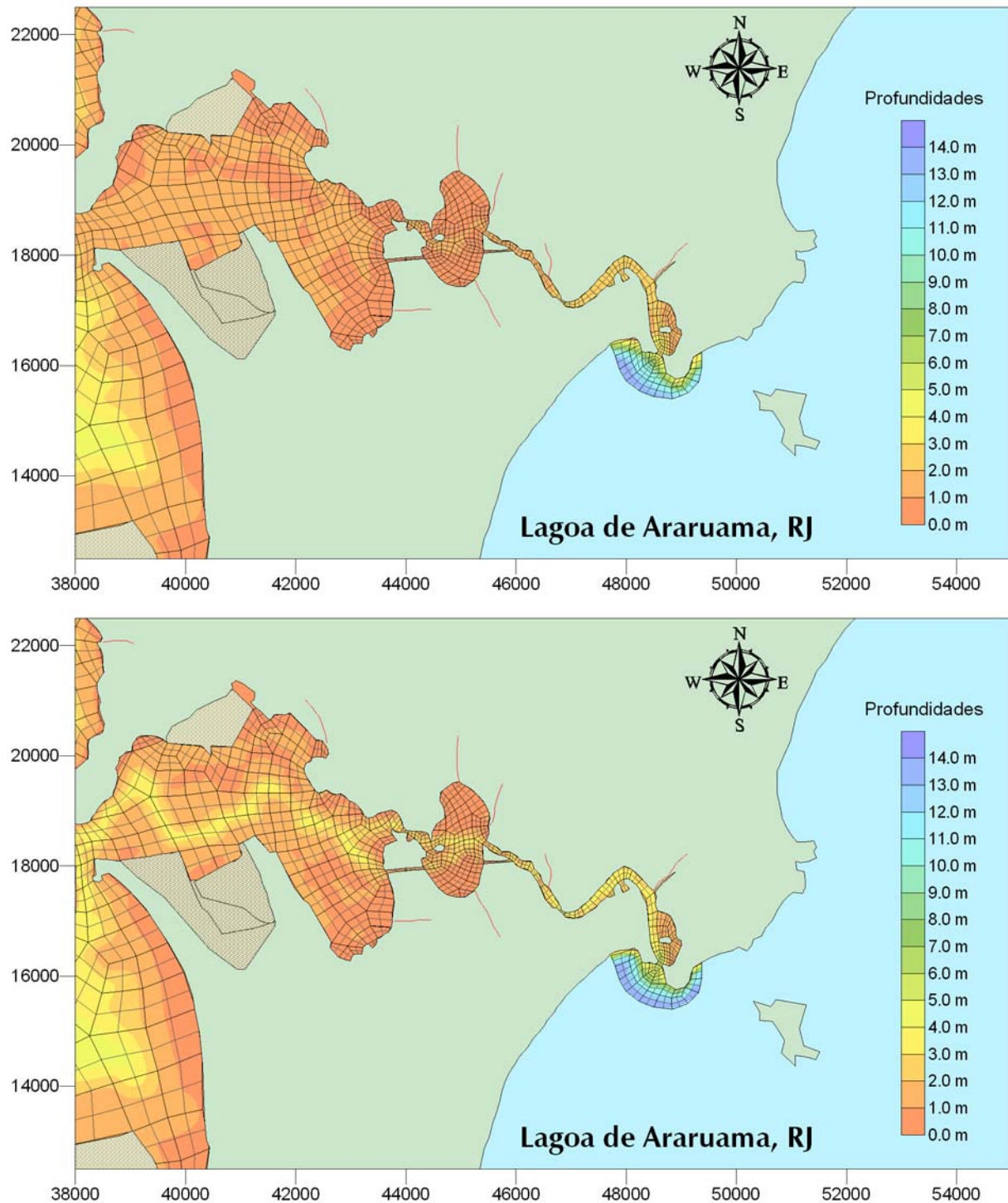


Figura 27 – Detalhes da malha de discretização na região entre Baixo Grande (São Pedro da Aldeia) e a embocadura do canal de Itajuru (Cabo Frio); a malha de cima detalha o trecho com a batimetria atual e a de baixo com o canal dragado para 3,0m.

5.2. PADRÕES DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Foram selecionados alguns pontos (estações) no sistema lagunar, para auxiliar no acompanhamento dos resultados a serem obtidos nas simulações (figura abaixo). Serão apresentados gráficos de séries temporais nessas estações para caracterizar os padrões de circulação hidrodinâmica.

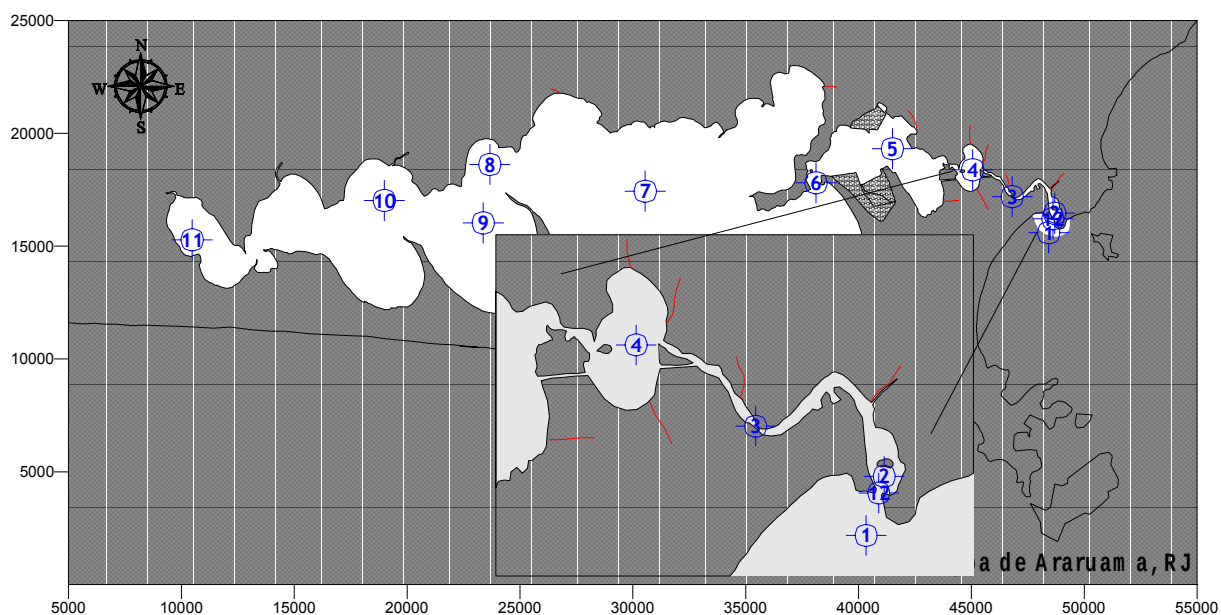


Figura 28 – Localização das estações.

De modo a caracterizar os padrões de circulação atual, serão apresentados os resultados para as seguintes situações:

- batimetria atual, como ilustrado na Figura 22, e detalhe do canal de acesso na Figura 23, sem vento (calmaria).
- batimetria atual, como ilustrado na Figura 22, e detalhe do canal de acesso na Figura 23, com vento NE, conforme Figura 17.
- batimetria atual, como ilustrado na Figura 22, e detalhe do canal de acesso na Figura 23, em situação de vento de SO, conforme Figura 18.

5.2.1 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO SOB CALMARIA (SEM VENTO)

Para verificar a influência das marés, foram adotados, como forçantes, as amplitudes de sizígia da Figura 25 e os rios com vazões médias constantes. Os resultados dos padrões de circulação sob calmaria encontram-se, a seguir, da Figura 29 a Figura 41.

Os mapas de elevação do nível de água mostram que praticamente não há variação de nível de água no interior da lagoa durante o ciclo da maré.

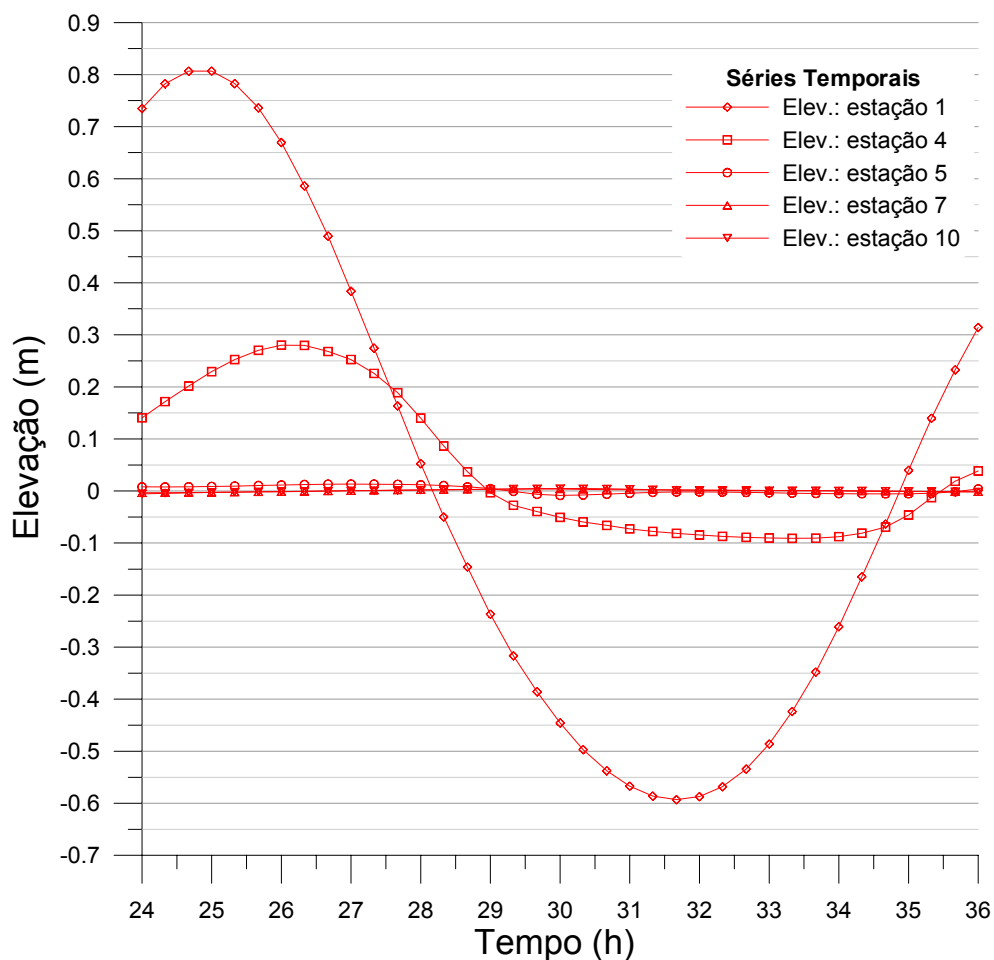


Figura 29 – Gráfico retratando a variação de níveis nas estações 1, 4, 5, 7 e 10 (vide posição na Figura 28).

Mesmo com a variação da maré na embocadura com cerca de 1,4 m entre preamar e baixamar, o nível de água na maior parte da lagoa não varia (estações 7 e 10). Na estação 5,

a variação é da ordem de 0,02 m, e na Laguna das Palmeiras (estação 4) não chega a 0,4 m entre preamar e baixamar.

A lagoa sob calmaria permanece praticamente estagnada na sua maior parte. Apenas na região da embocadura do canal de Itajurú até a península de São Pedro da Aldeia apresenta uma dinâmica significativa, como detalhado na Figura 31, Figura 34, Figura 37 e Figura 40.

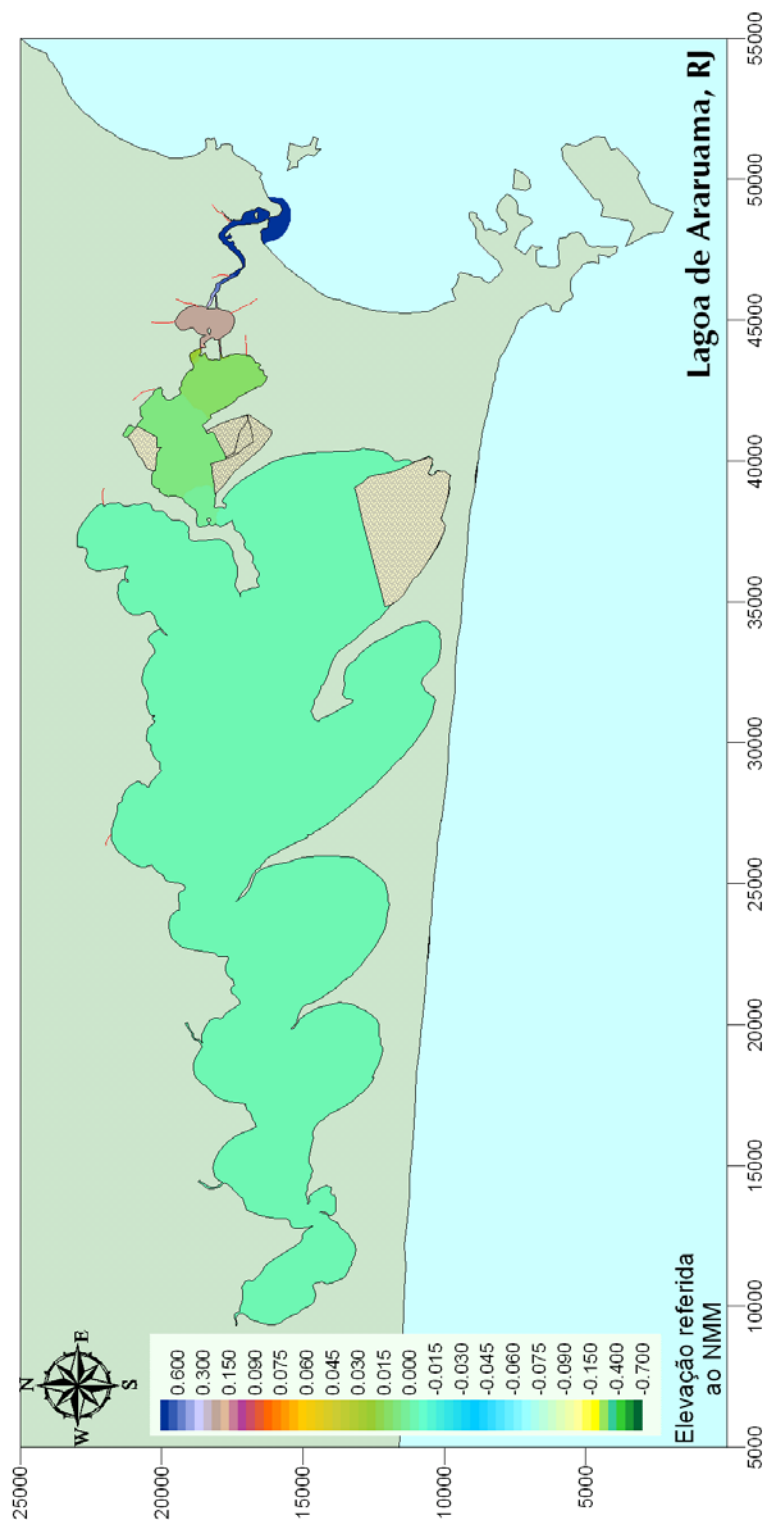


Figura 30 – Isolinhas de elevação da superfície livre com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos); detalhe na Figura 32.

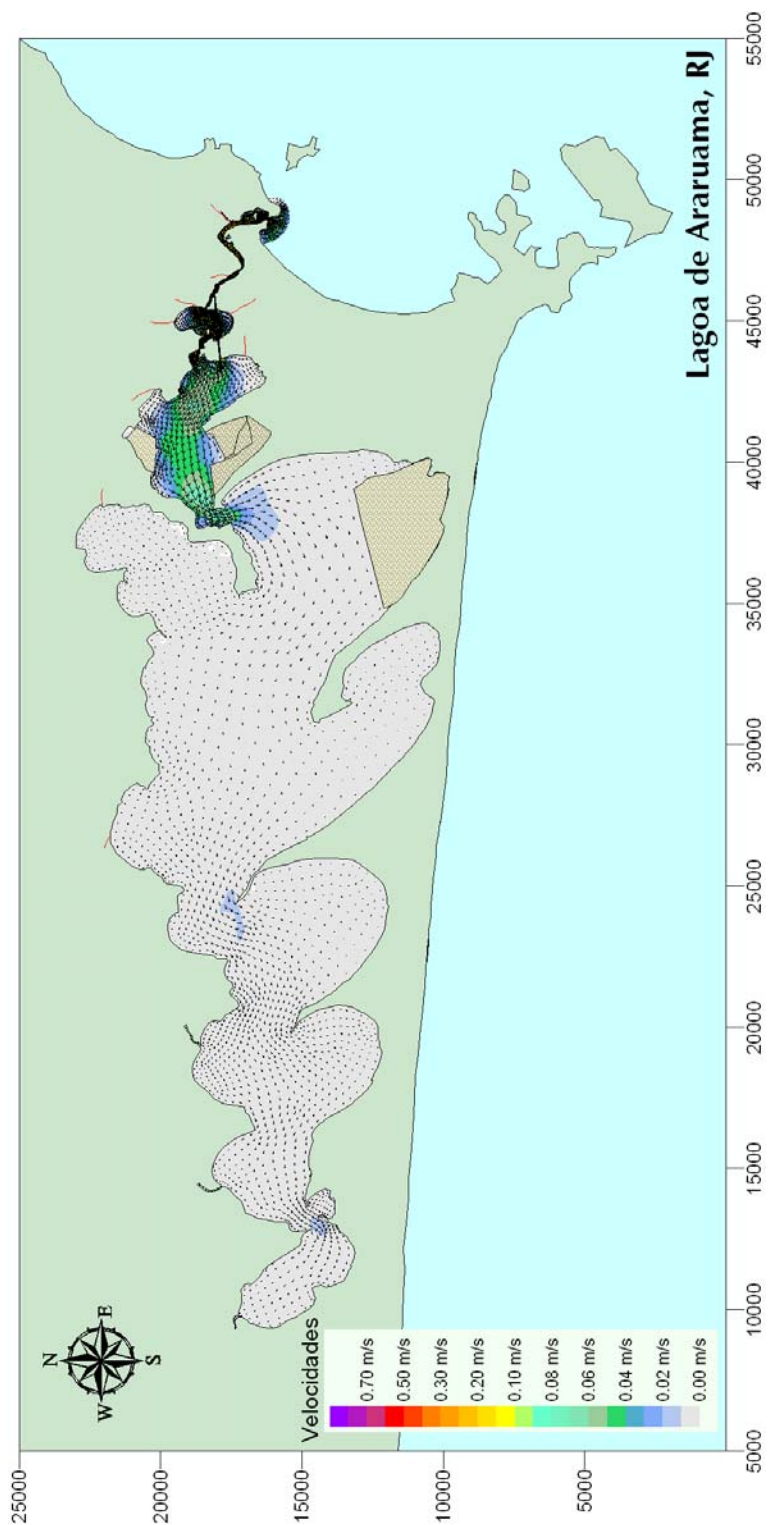


Figura 31 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos), com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; detalhe na Figura 32.

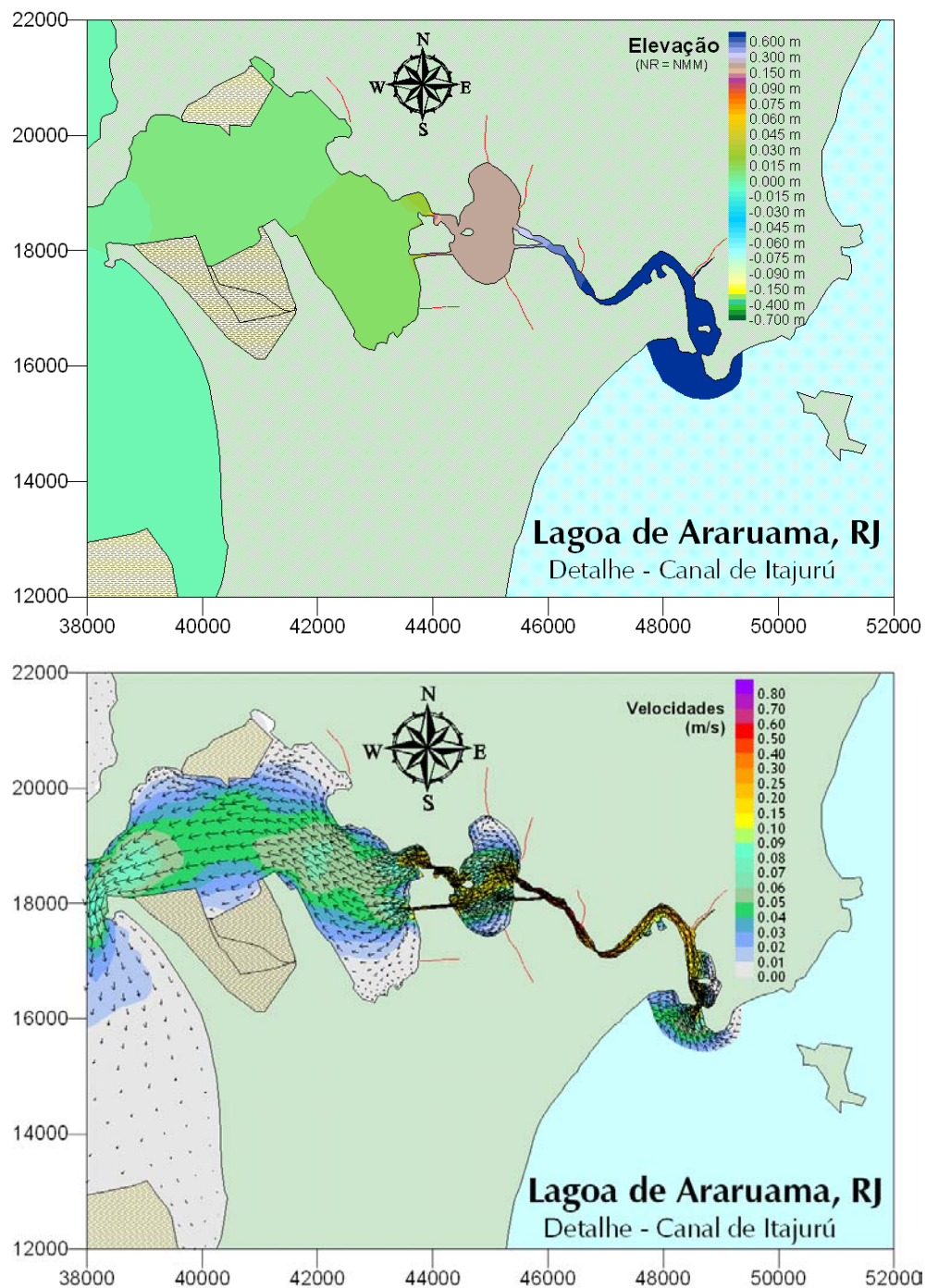


Figura 32 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de calmaria (sem ventos), com preamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 30, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 31.

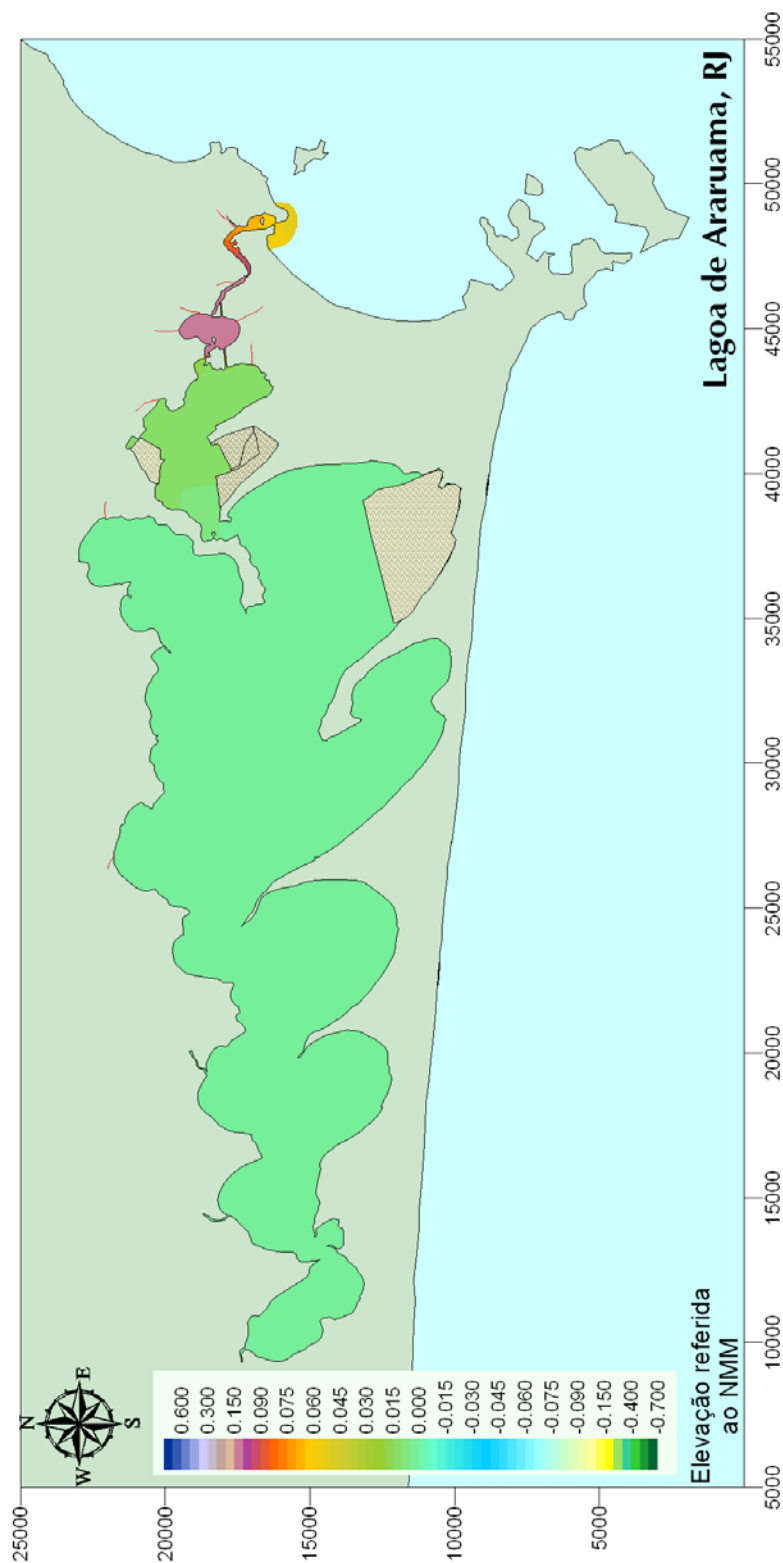


Figura 33. Isolinhas de elevação da superfície livre com meia maré vazante na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos); detalhe na Figura 35.

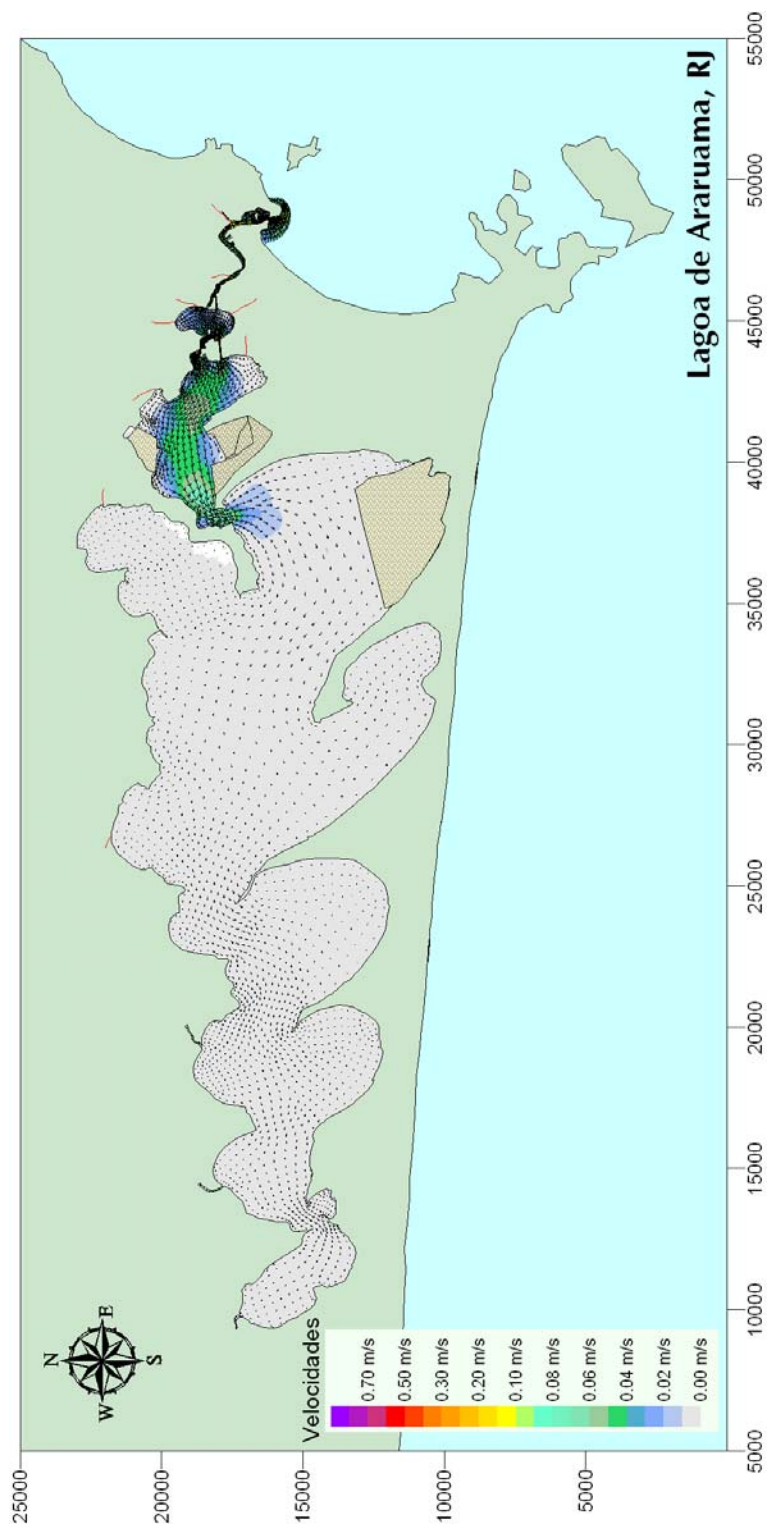


Figura 34 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos), com meia maré vazante na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; detalhe na Figura 35.

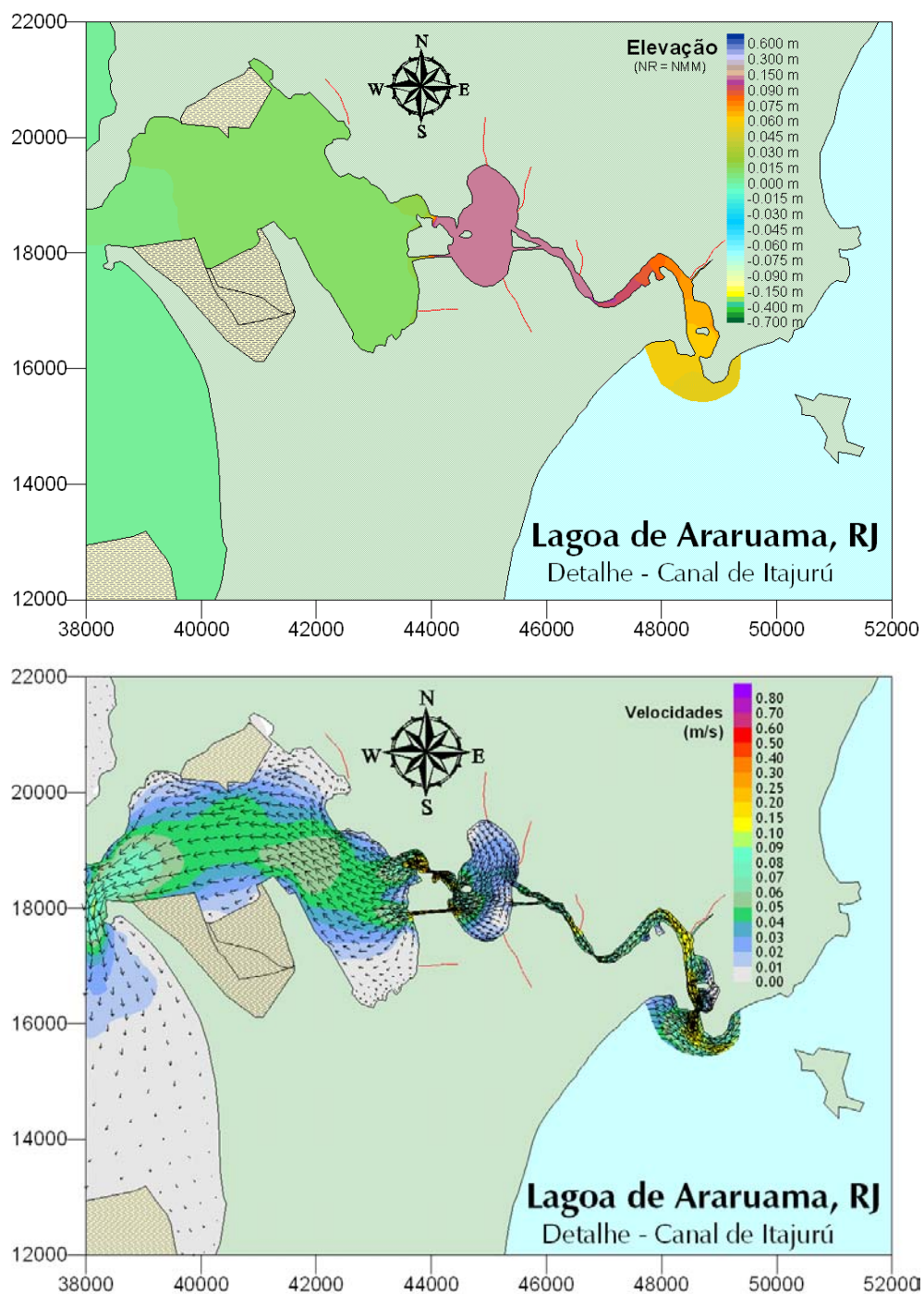


Figura 35 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de calmaria (sem ventos), com meia maré vazante na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 33, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 34.

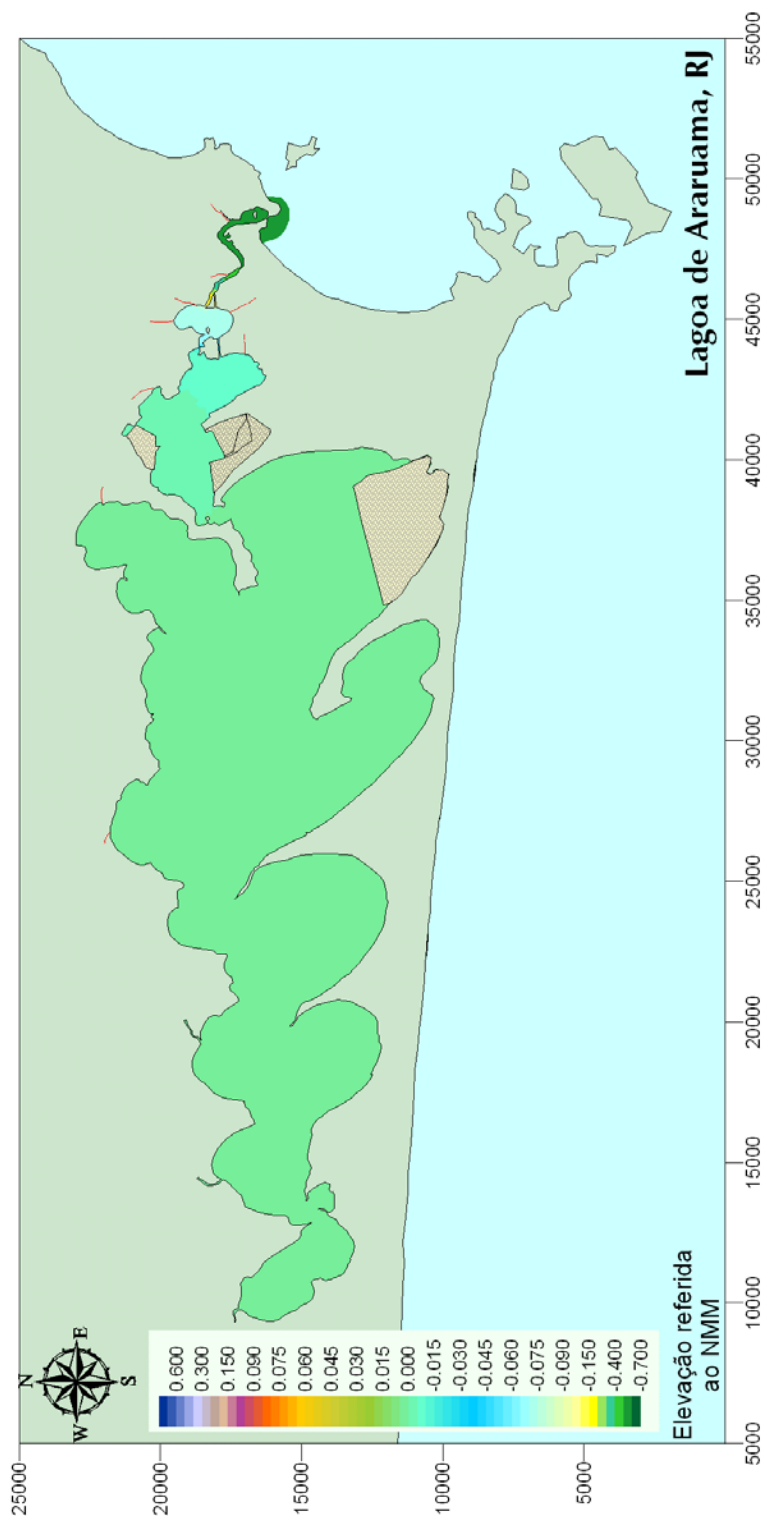


Figura 36 – Isolinhas de elevação da superfície livre com baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos); detalhe na Figura 38.

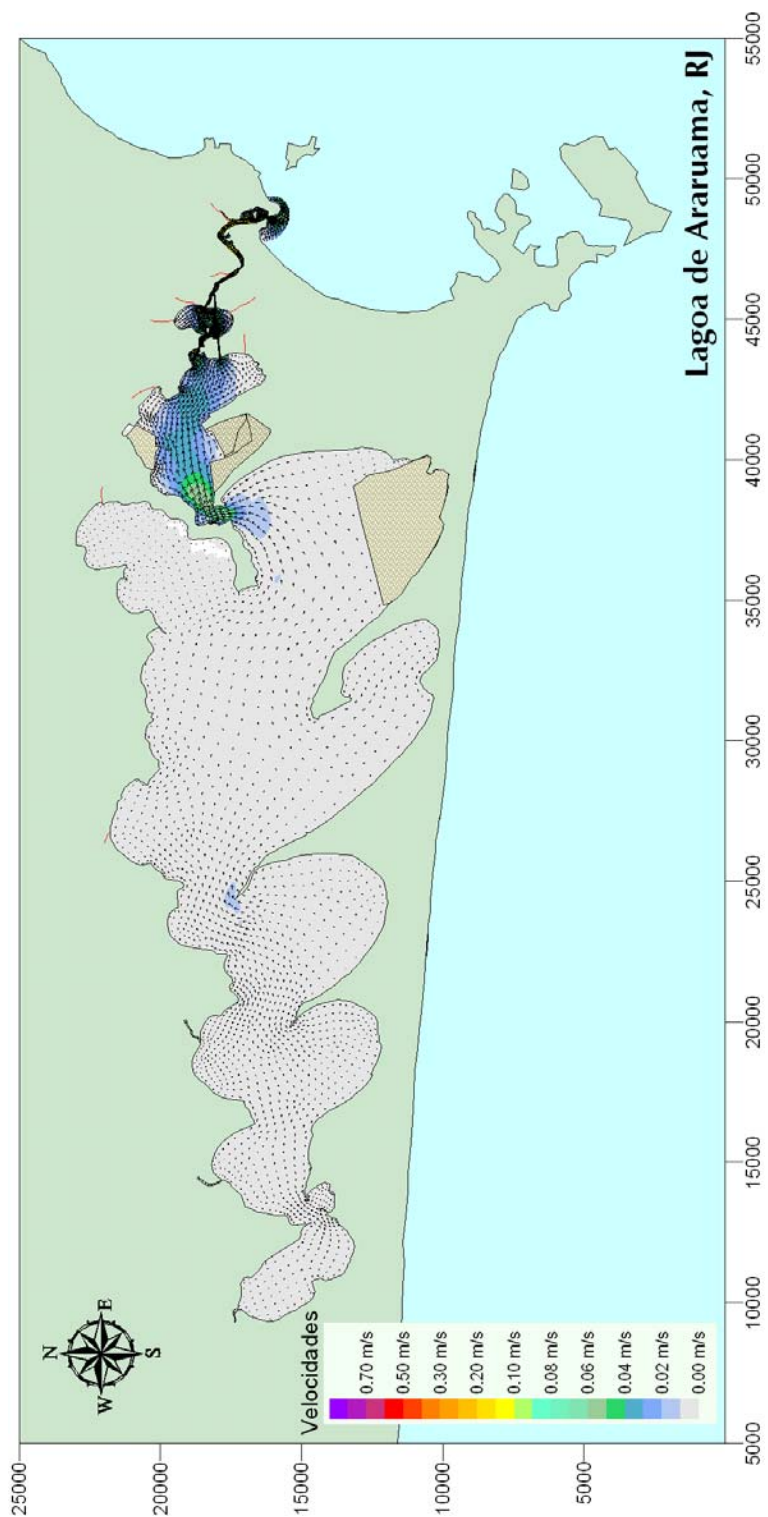


Figura 37 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos), com baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; detalhe na Figura 38.

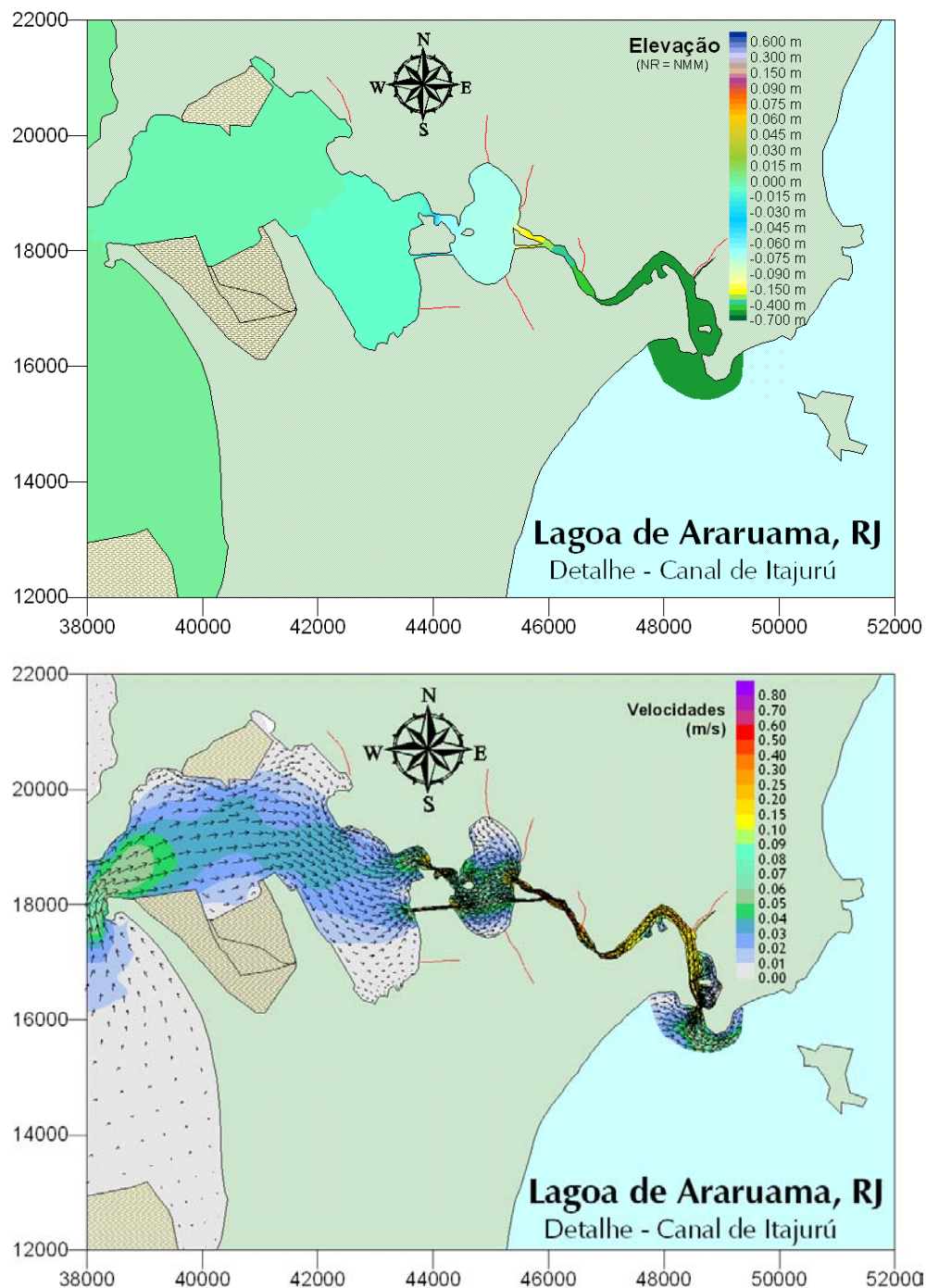


Figura 38 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de calmaria (sem ventos), com baixamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 36, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 37.

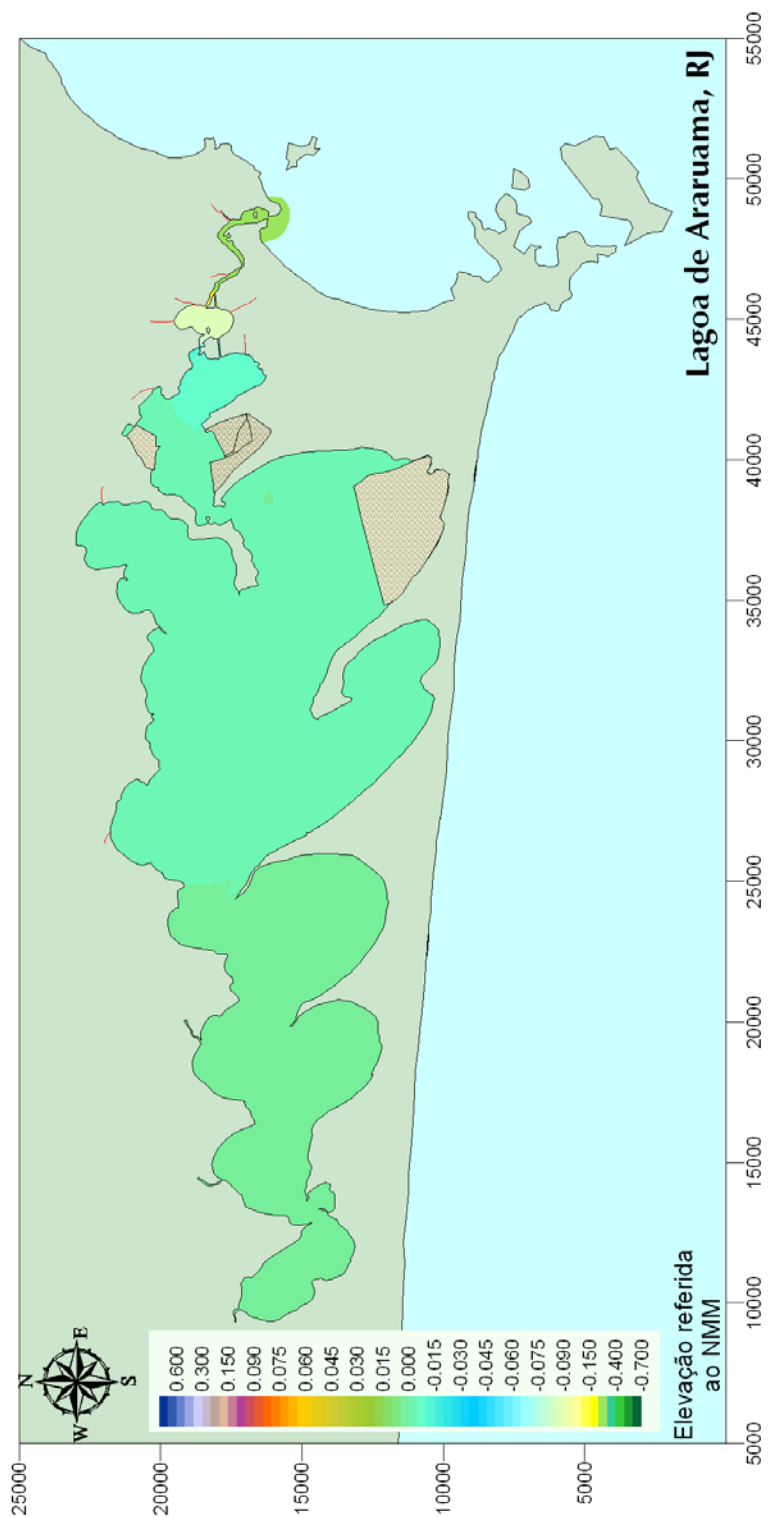


Figura 39 – Isolinhas de elevação da superfície livre com meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos); detalhe na Figura 41.

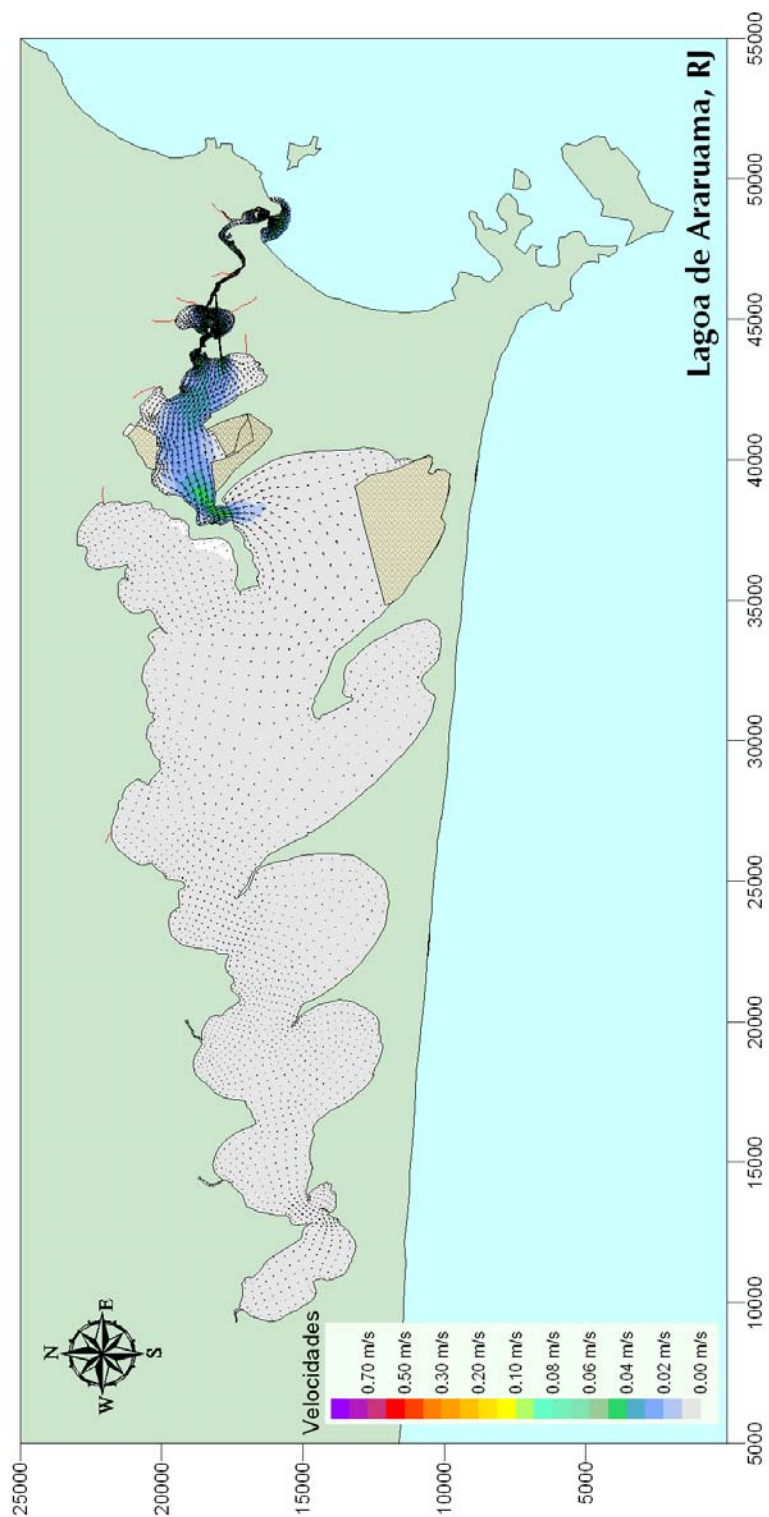


Figura 40 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de calmaria (sem ventos), com meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; detalhe na Figura 41.

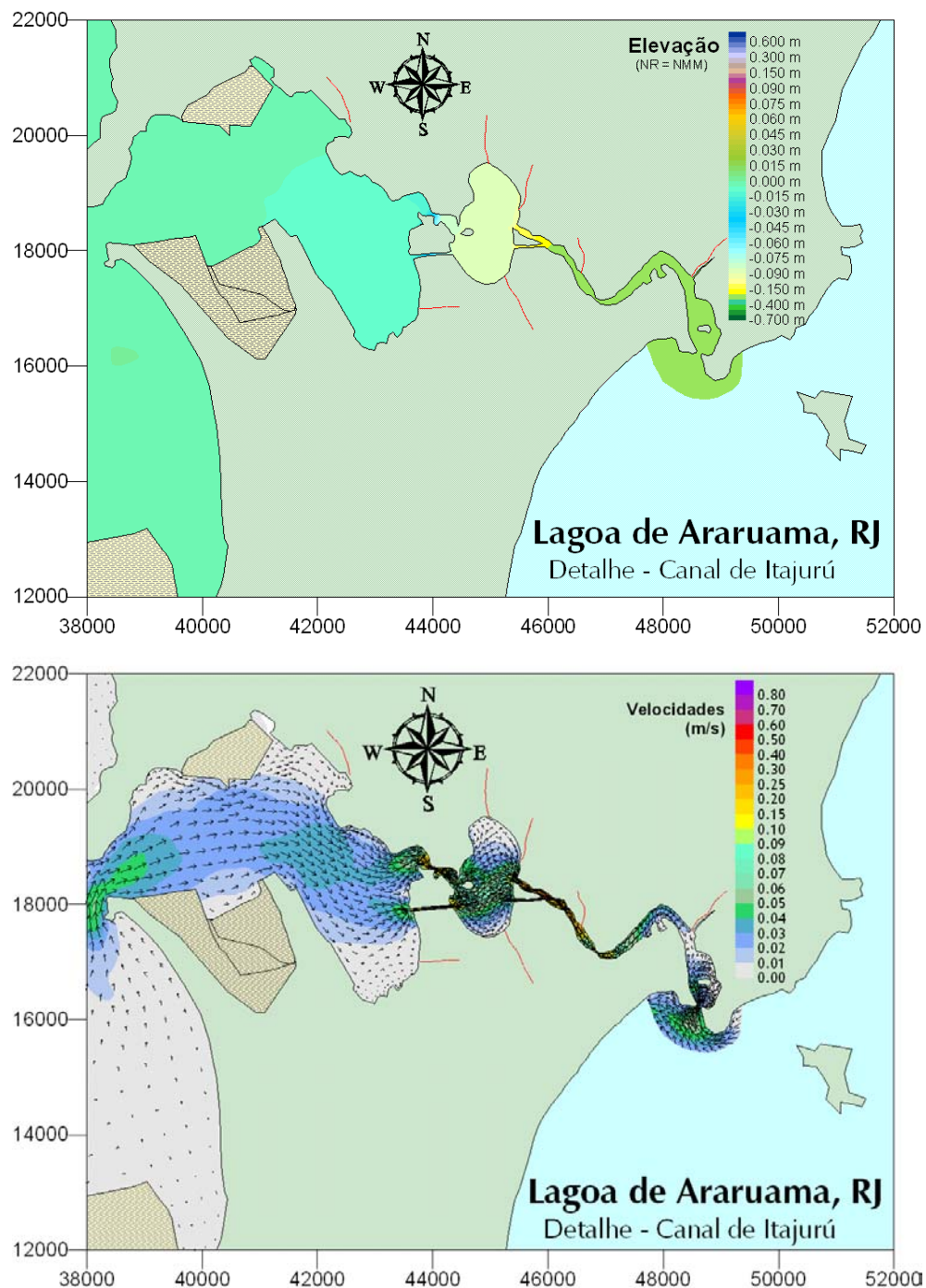


Figura 41 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de calmaria (sem ventos), com meia maré de enchente na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 39, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 40.

5.2.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO SOB CONDIÇÕES USUAIS, VENTO NORDESTE (NE)

Nesse item, serão apresentados os padrões de circulação em condições usuais, ou seja, vento Nordeste (NE) (Figura 42 a Figura 56). A fim de criar um mesmo critério para facilitar a comparação com a situação de calmaria (item 5.2.1), adotou-se o mesmo forçante de marés, amplitudes típicas de sizígia, conforme Figura 25, e rios com vazões médias constantes.

Por se tratar de um corpo de águas rasas, sujeito à ação dos ventos, o vento NE também foi imposto como forçante dos escoamentos. Os ventos utilizados são os que ocorreram a partir das 12:00h do dia 04/01/96, que está na Figura 17. Com relação aos padrões de circulação hidrodinâmica que podem ser observados nos mapas da Figura 45 a Figura 56, destaca-se:

- os mapas de elevação do nível da água (NA) mostram significativa diferença de níveis entre as extremidades leste e oeste da lagoa em função da ação dos ventos de NE; há empilhamento de água com subida de nível à SO da lagoa e, em consequência, abaixamento de nível à NE;
- apesar das diferenças de níveis causadas pelo vento, praticamente não há variação de nível de água no centro da lagoa decorrente da ação das marés.

Os gráficos abaixo retratam a variação de níveis nas estações 1, 4, 5, 7 e 11 (Figura 28). O gráfico à esquerda mostra variações ao longo de 72 horas, e o da direita mostra detalhes ao longo do ciclo de maré destacado nos mapas da Figura 45 a Figura 56.

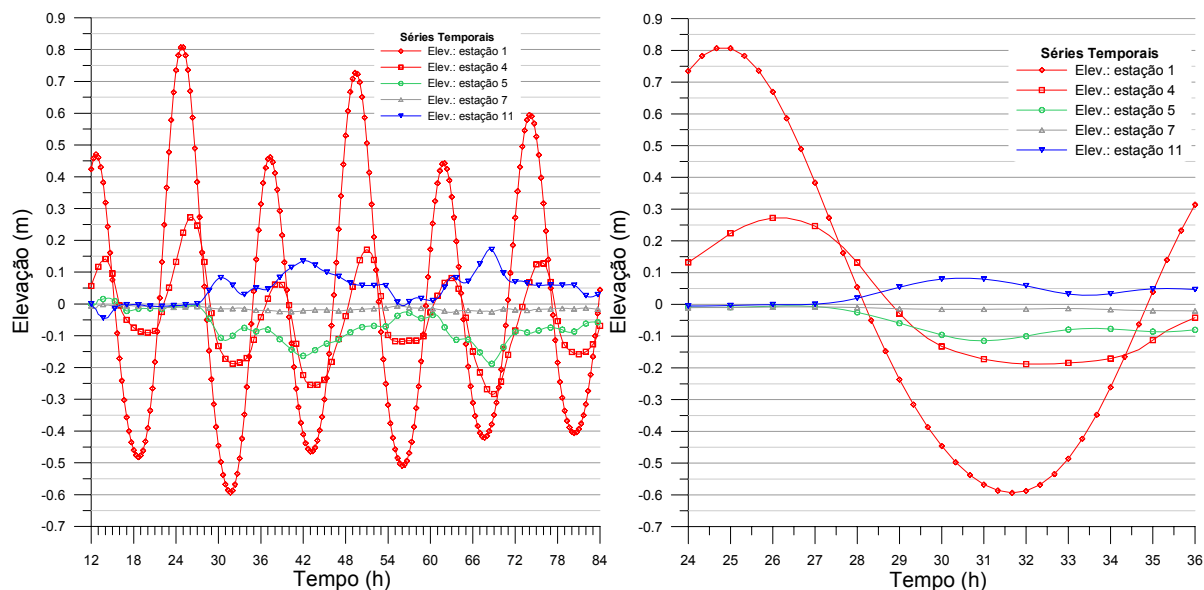


Figura 42 – Elevação de níveis para vento usual (NE).

Analisando-se conjuntamente os gráficos de elevação da superfície livre (Figura 42) e as respectivas intensidade e direção do vento pertinente a cada instante (Figura 17), vê-se que:

- as isolinhas de elevação nos mapas tendem a ser perpendiculares à direção de ação do vento;
- a diferença de elevação do nível da água na lagoa causada pela ação dos ventos depende da intensidade e da direção do vento; para uma dada intensidade de vento, quanto mais alinhada a direção do vento estiver com o eixo longitudinal da lagoa maior será a elevação;
- apesar da variação da maré na embocadura atingir cerca de 1,4 m entre preamar e baixamar, a variação do nível de água na maior parte da lagoa, estações 7 e 11, é praticamente independente da maré; mesmo na estação 5, a variação que se verifica é muito mais função do vento que da maré, como claramente mostram os gráficos da Figura 42; na estação 4 (laguna das Palmeiras), a ação das marés é dominante, apresentando variações da ordem de 0,4 m entre preamar e baixamar;
- sob ação dos ventos de NE a lagoa ganha significativa circulação hidrodinâmica, em forte contraste com a estagnação verificada na situação de calmaria; verifica-se claramente que a circulação entre a extremidade oeste da lagoa e a península de São Pedro da Aldeia é amplamente dominada pela ação dos ventos;

- em contrapartida, indo da península de São Pedro da Aldeia para a embocadura do canal de Itajuru, nota-se que a circulação vai tornando-se crescentemente dominada pela ação das marés, como detalhado na Figura 47, Figura 50, Figura 53 e Figura 56; especialmente a partir da laguna das Palmeiras, as diferenças de nível, e a magnitude e direção das correntes afetadas pelo vento são pouco significativas em relação às causadas pela ação das marés;
- na circulação causada pelos ventos de NE na Lagoa de Araruama, nota-se o aparecimento de grandes vórtices girando no sentido horário nas porções sul da lagoa, e no sentido anti-horário nas porções norte; é notável a constância dos padrões gerais de tais vórtices ao longo do ciclo de maré, indicando a plena dominância dos ventos na sua dinâmica;
- durante as horas de ação mais intensa de vento NE, como mostra a Figura 51, a diferença de níveis de água entre as extremidades oeste e este da lagoa chega a ser maior que 0,25 metros; e, comparando o gráfico na página anterior, nota-se que sob a ação de intensos ventos de ENE mais alinhados com o eixo longitudinal da lagoa que os ventos de NE, como, por exemplo, a hora 68, a diferença de nível entre as estações 5 e 11 chega a cerca de 0,35 m, registrando um abaixamento de cerca -0,18 m na estação 5 contra uma subida de +0,17 m na estação 11; na Figura 43 e na Figura 44, mostram-se mapas de elevação de NA e correntes na lagoa durante tal hora; o vento atuante de ENE corresponde às 08:00 h do dia 06/01/96 retratado na Figura 17.

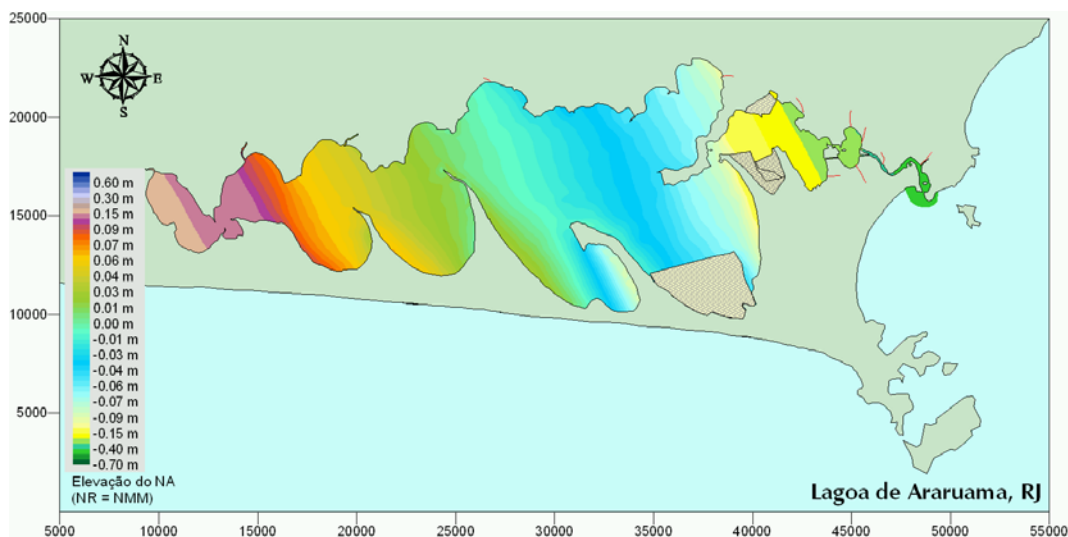


Figura 43 – Mapa de isolinhas de elevação do NA, retratando a hora 68, na qual ocorreram os maiores desníveis entre as extremidades leste e oeste na Lagoa de Araruama, não causados pela ação da maré; o vento atuante de ENE corresponde às 08:00 h do dia 06/01/96, como indicado na Figura 17.

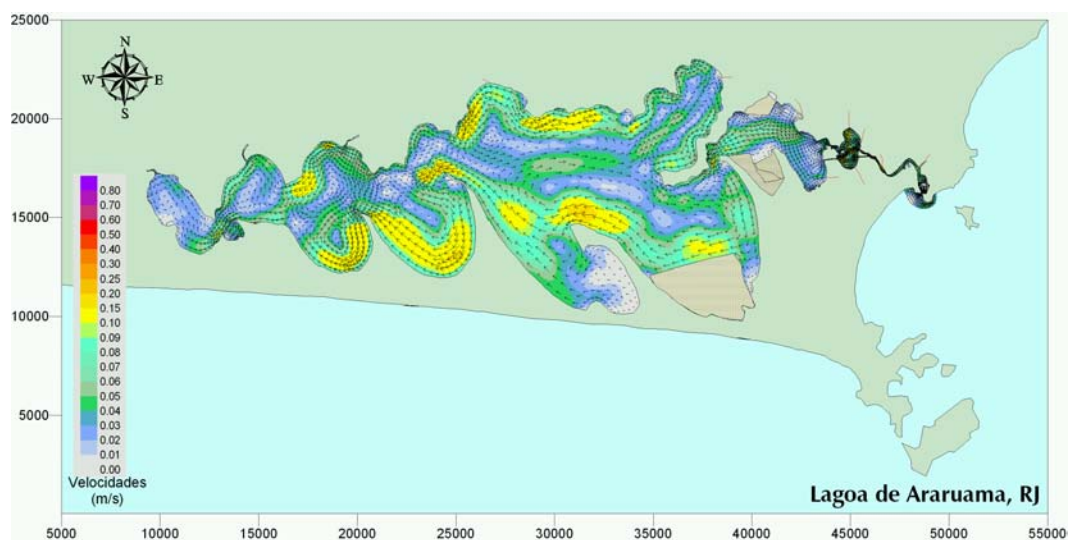


Figura 44 – Mapa de correntes, retratando a hora 68, na qual ocorreram os maiores desníveis entre as extremidades leste e oeste na lagoa, independentes da ação da maré; o vento atuante de ENE corresponde às 08:00 h do dia 06/01/96 como indicado na Figura 17.

Sob ação de ventos intensos de ENE, além dos fortes desníveis são gerados fortes vórtices de circulação na lagoa, girando no sentido horário nos bolsões Sul e no sentido anti-horário nos bolsões Norte.

A seguir, apresenta-se, da Figura 45 a Figura 56, mapas de elevação de superfície livre e de correntes ao longo de um ciclo de maré, com detalhamento para a região entre São Pedro da Aldeia e a embocadura do canal de Itajuru.

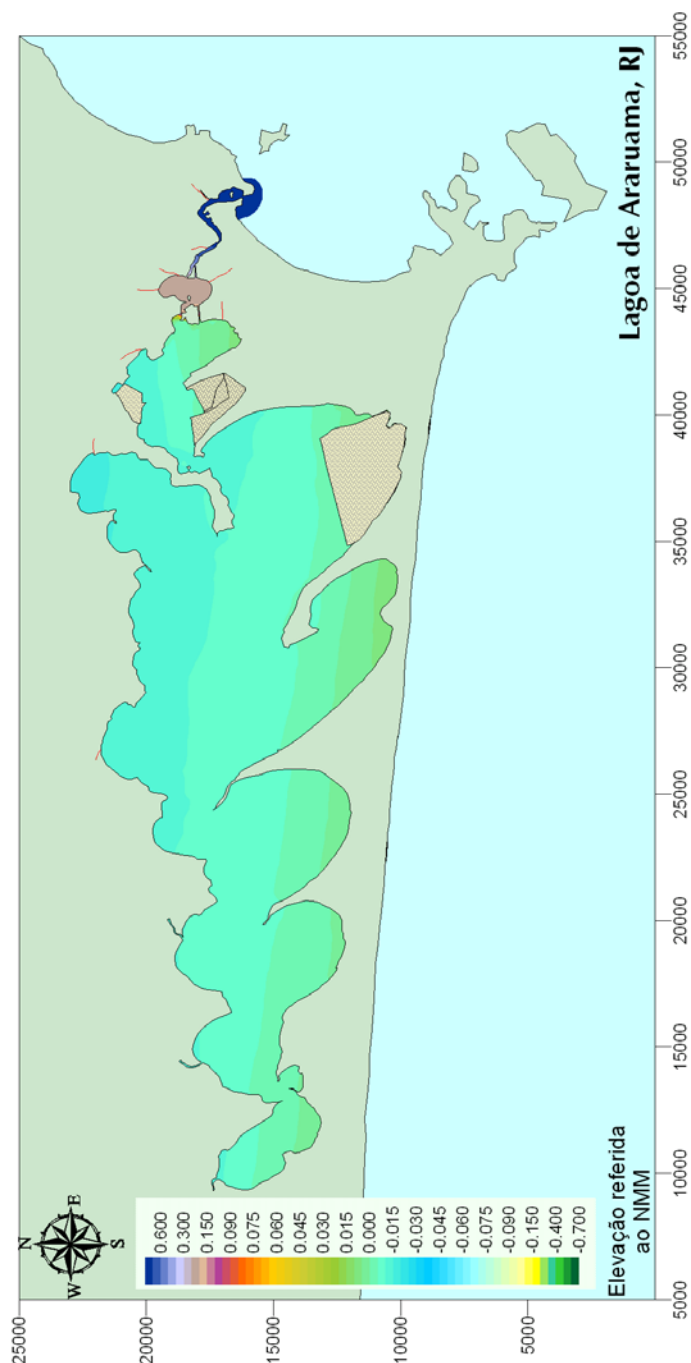


Figura 45 – Isolinhas de elevação da superfície livre com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de vento NE, como indicado na Figura 17, dia 04/01/96 às 13:00h; veja detalhe na Figura 47.

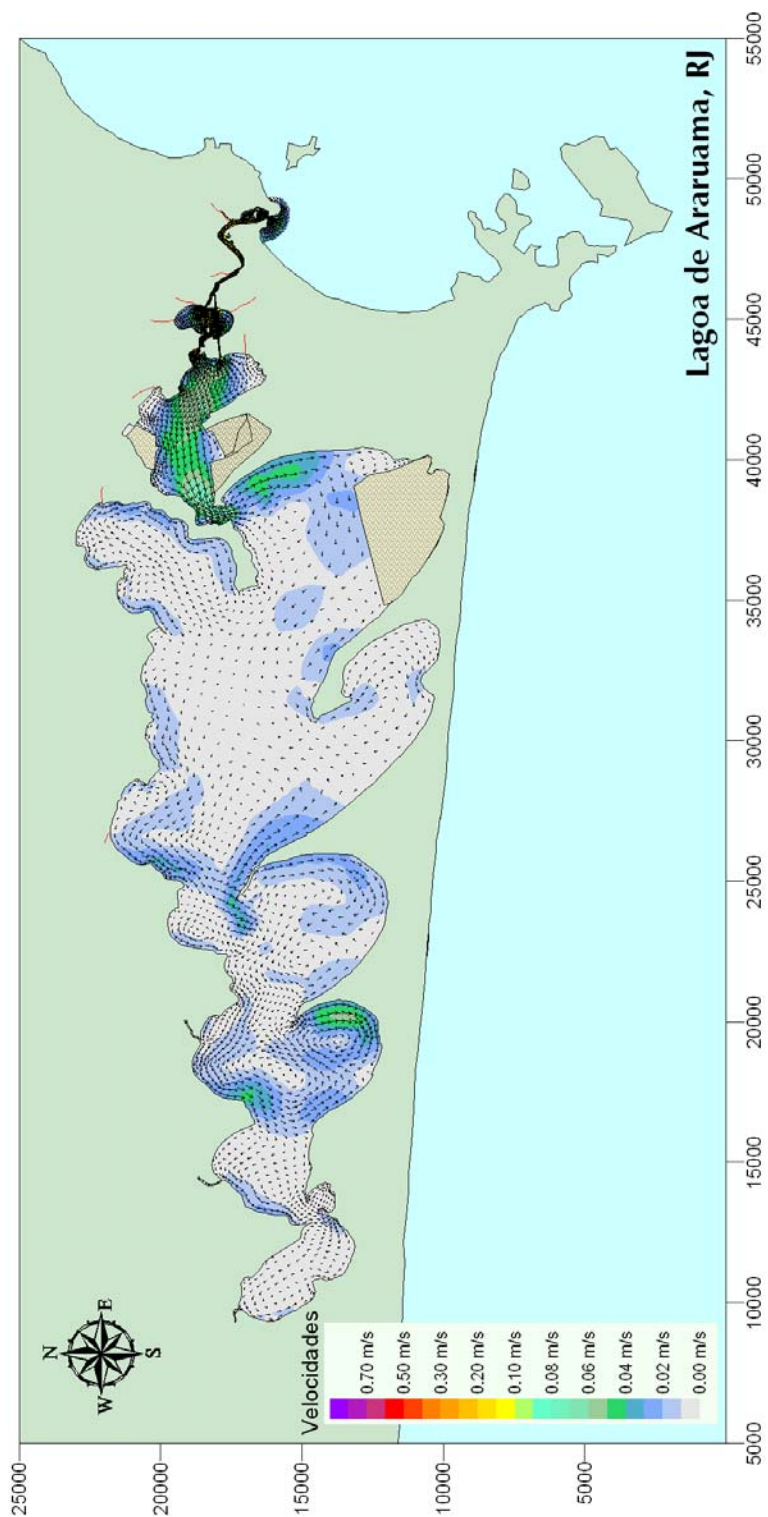


Figura 46 - Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de vento NE, com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 17, dia 04/01/96 às 13:00h; detalhe na Figura 47.

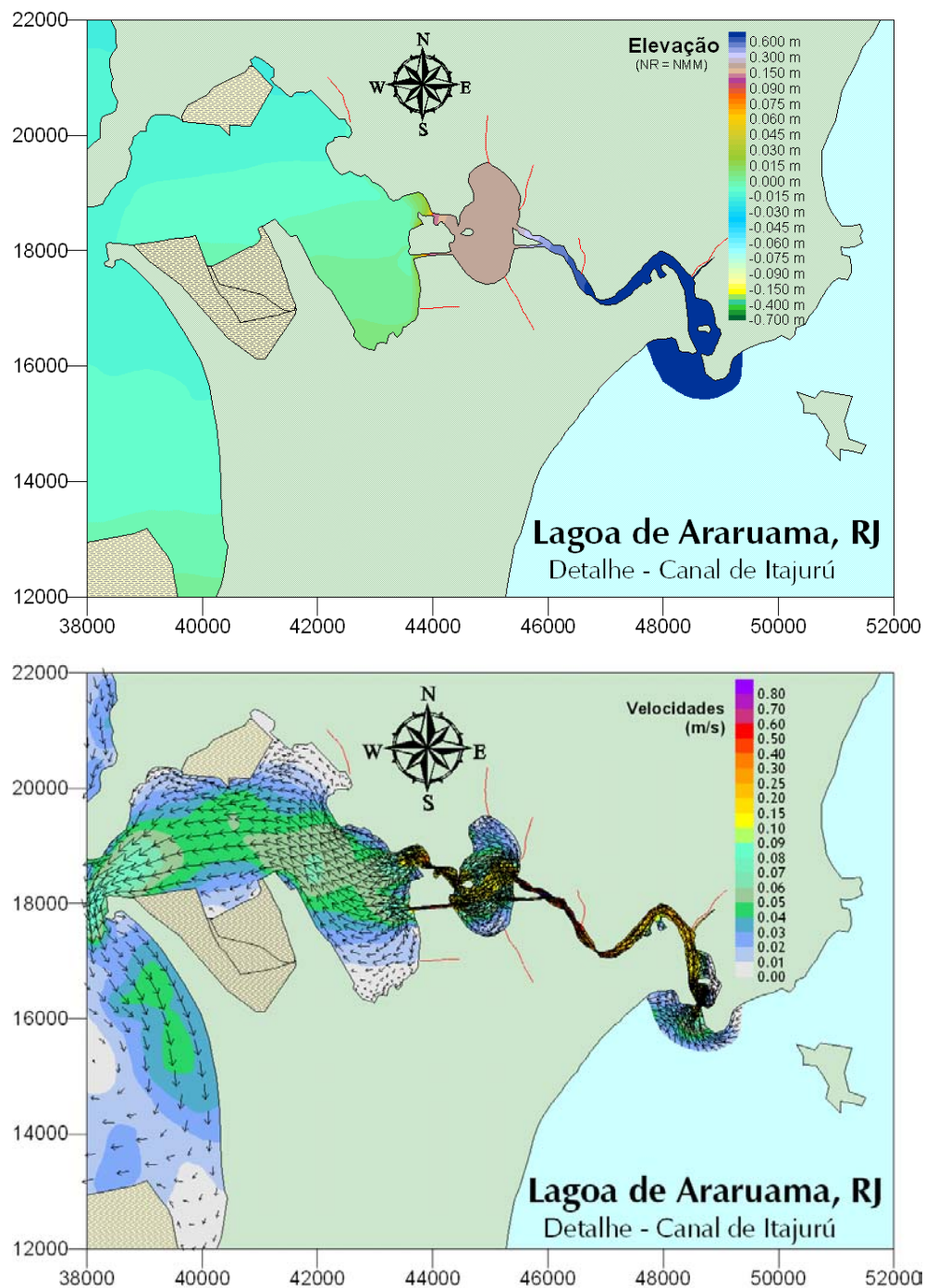


Figura 47 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de ventos usuais de NE, com preamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 45, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 46.

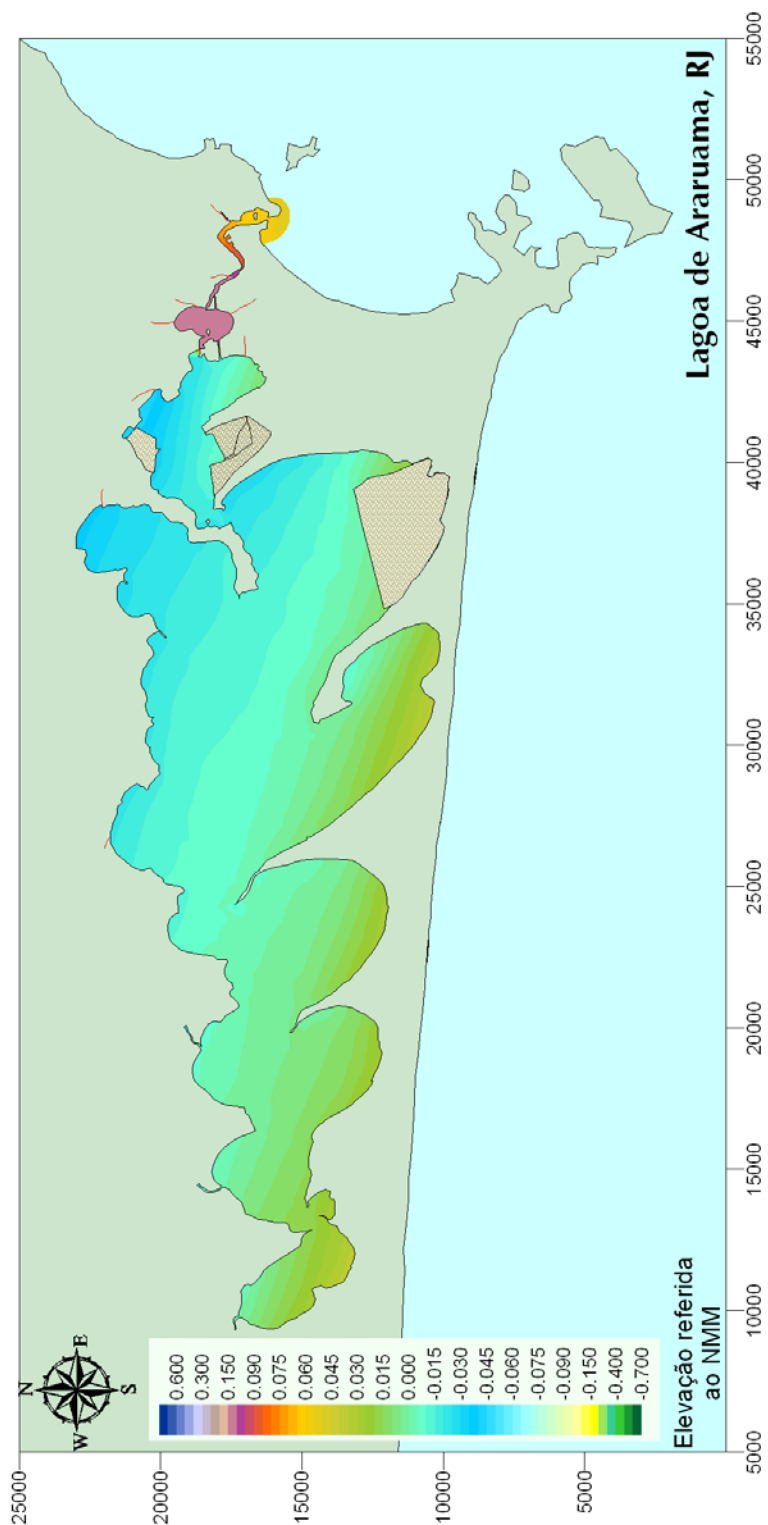


Figura 48 – Isolinhas de elevação da superfície livre com meia maré vazante na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25, padrão geral na lagoa, em situação de vento NE, como indicado na Figura 17, dia 04/01/96 às 16:00h; detalhe na Figura 50.

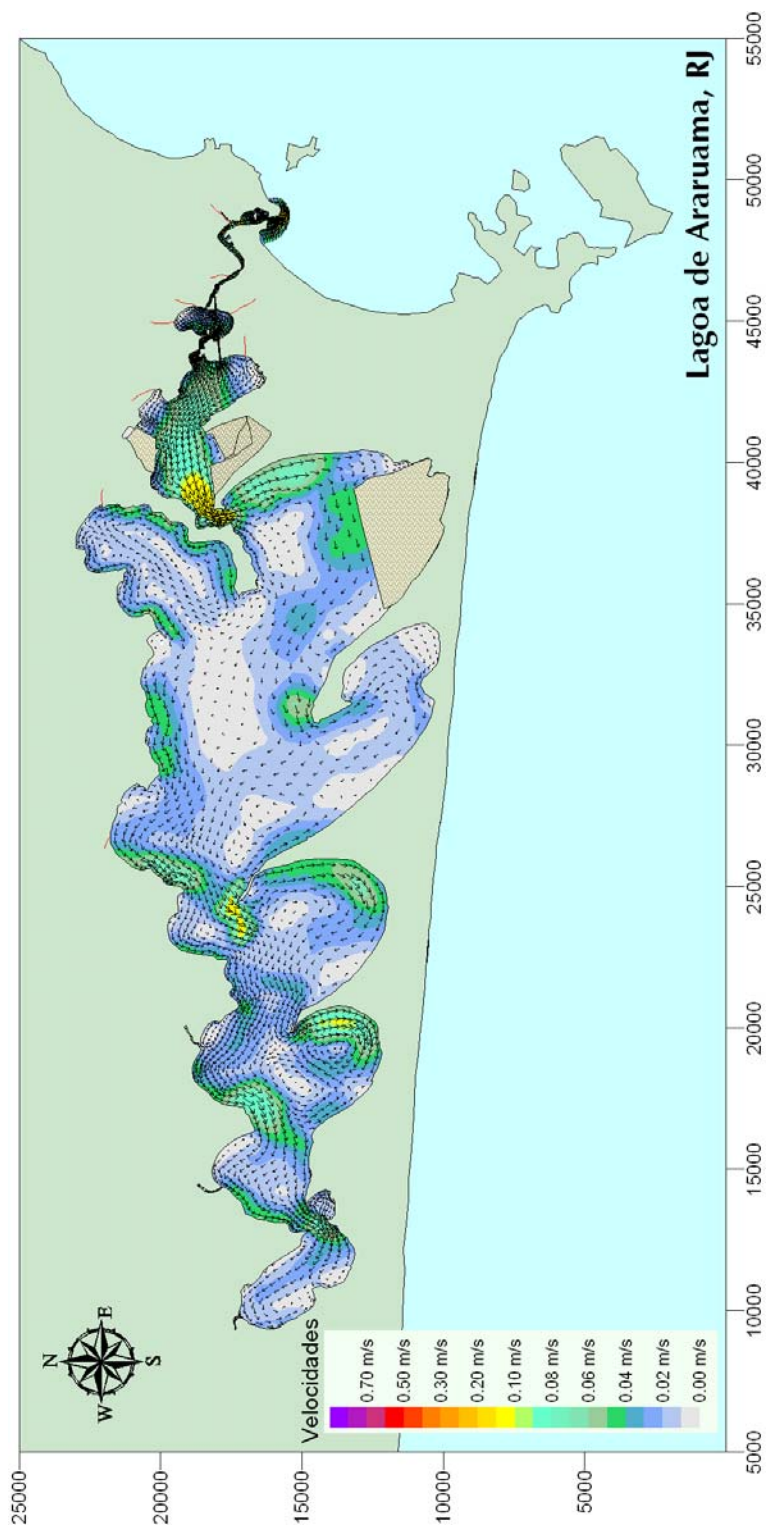


Figura 49 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de vento NE, com meia maré vazante na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 17, dia 04/01/96 às 16:00h; detalhe na Figura 50.

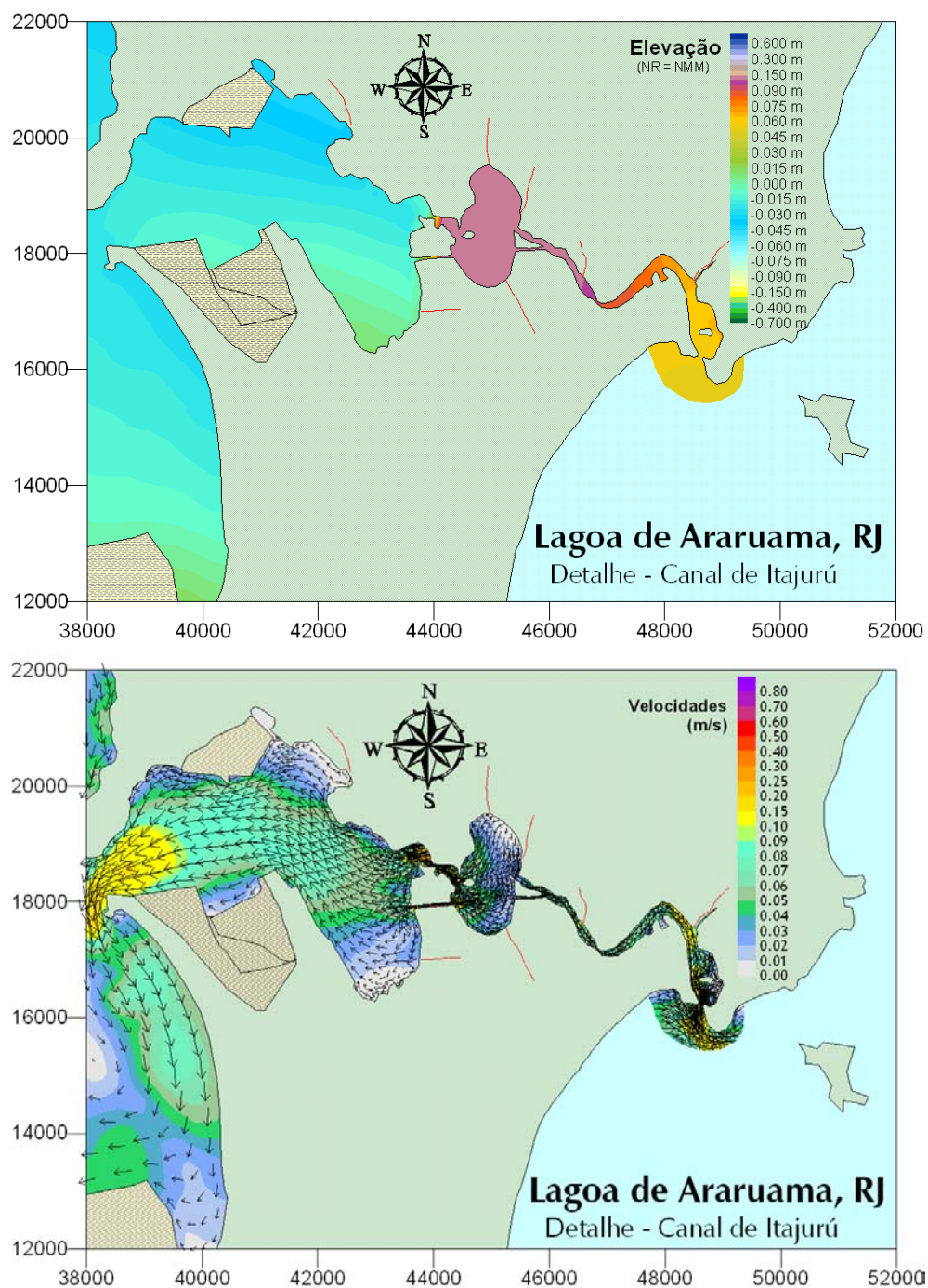


Figura 50 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de ventos usuais de NE, com meia maré vazante na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 48, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 49.

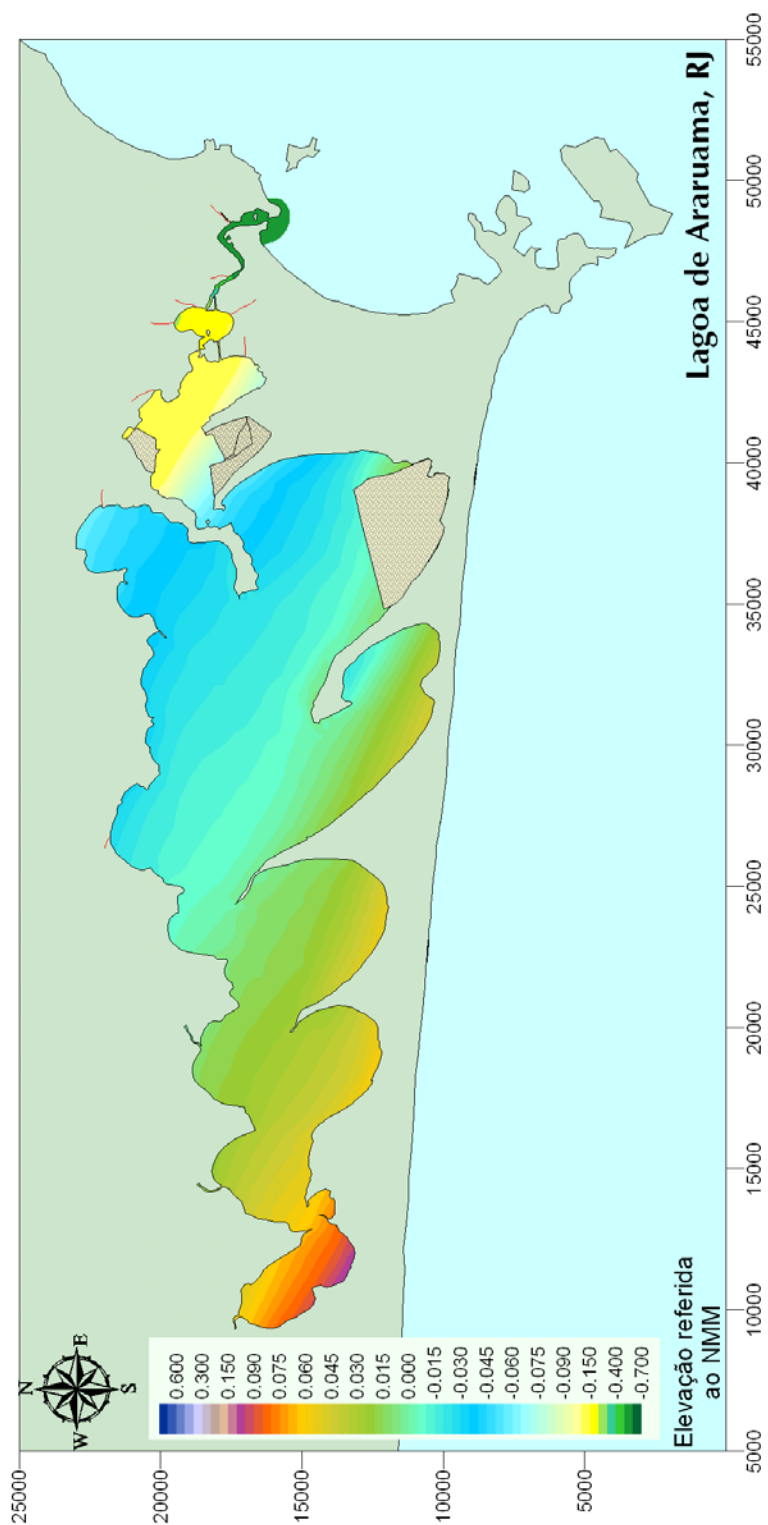


Figura 51 – Isolinhas de elevação da superfície livre com baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de vento NE, como indicado na Figura 17, dia 04/01/96 às 19:00h; detalhe na Figura 53.

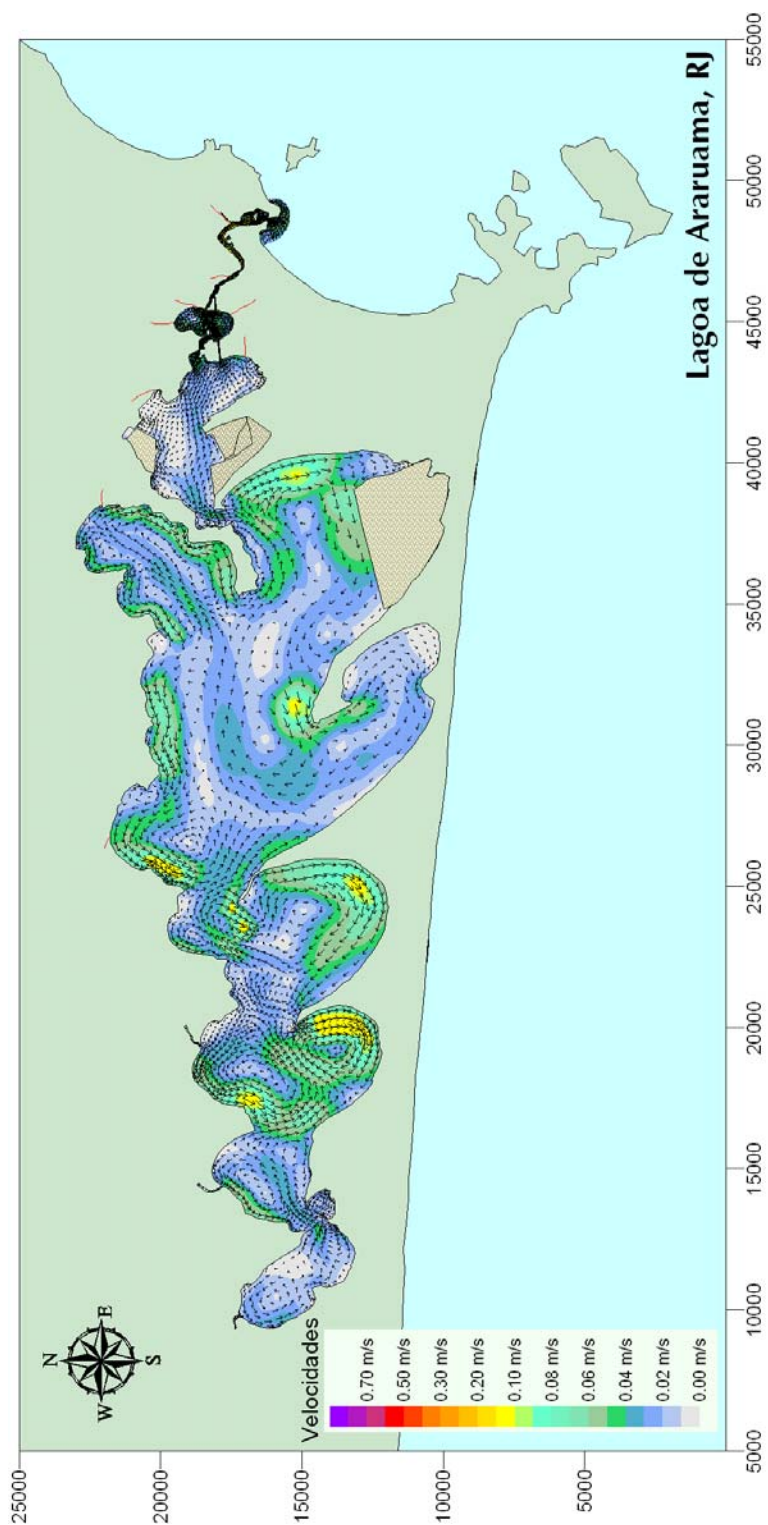


Figura 52 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de vento NE, com baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 17, dia 04/01 /96 às 19:00h; detalhe na Figura 53.

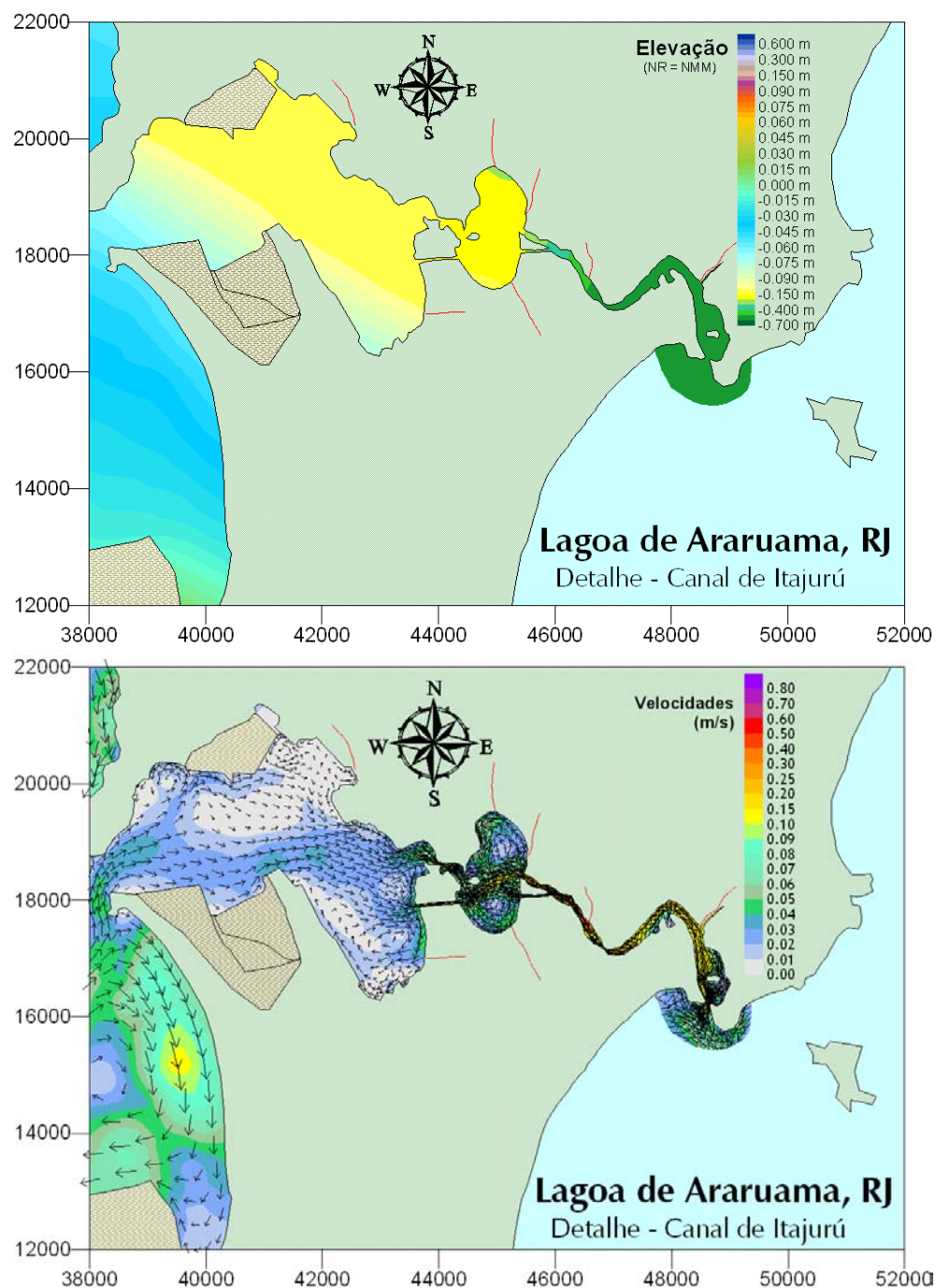


Figura 53 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de ventos usuais de NE, com baixamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 51, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 52.

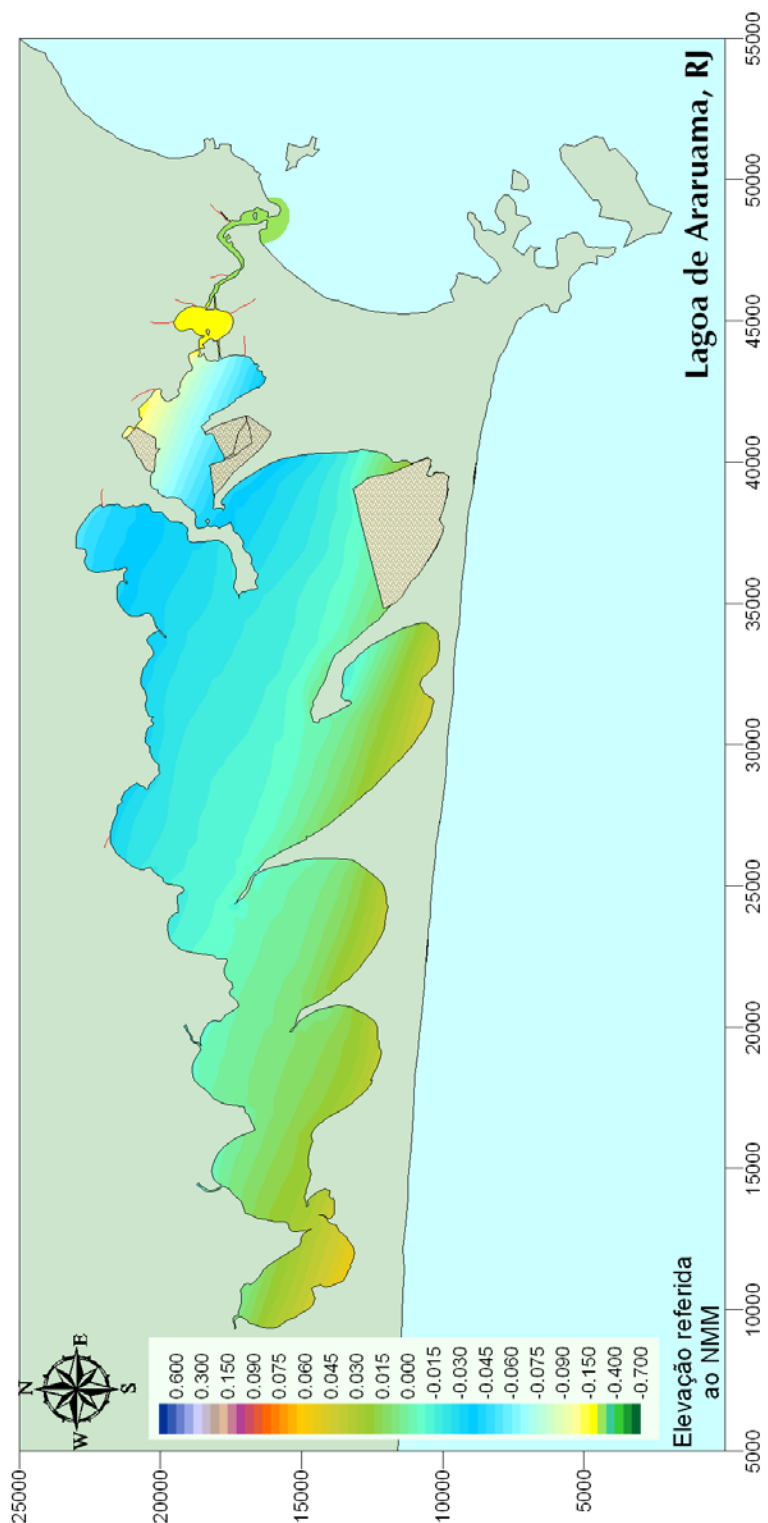


Figura 54 – Isolinhas de elevação da superfície livre com meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de vento NE, como indicado na Figura 17, dia 04/01/96 às 22:00h; detalhe na Figura 56.

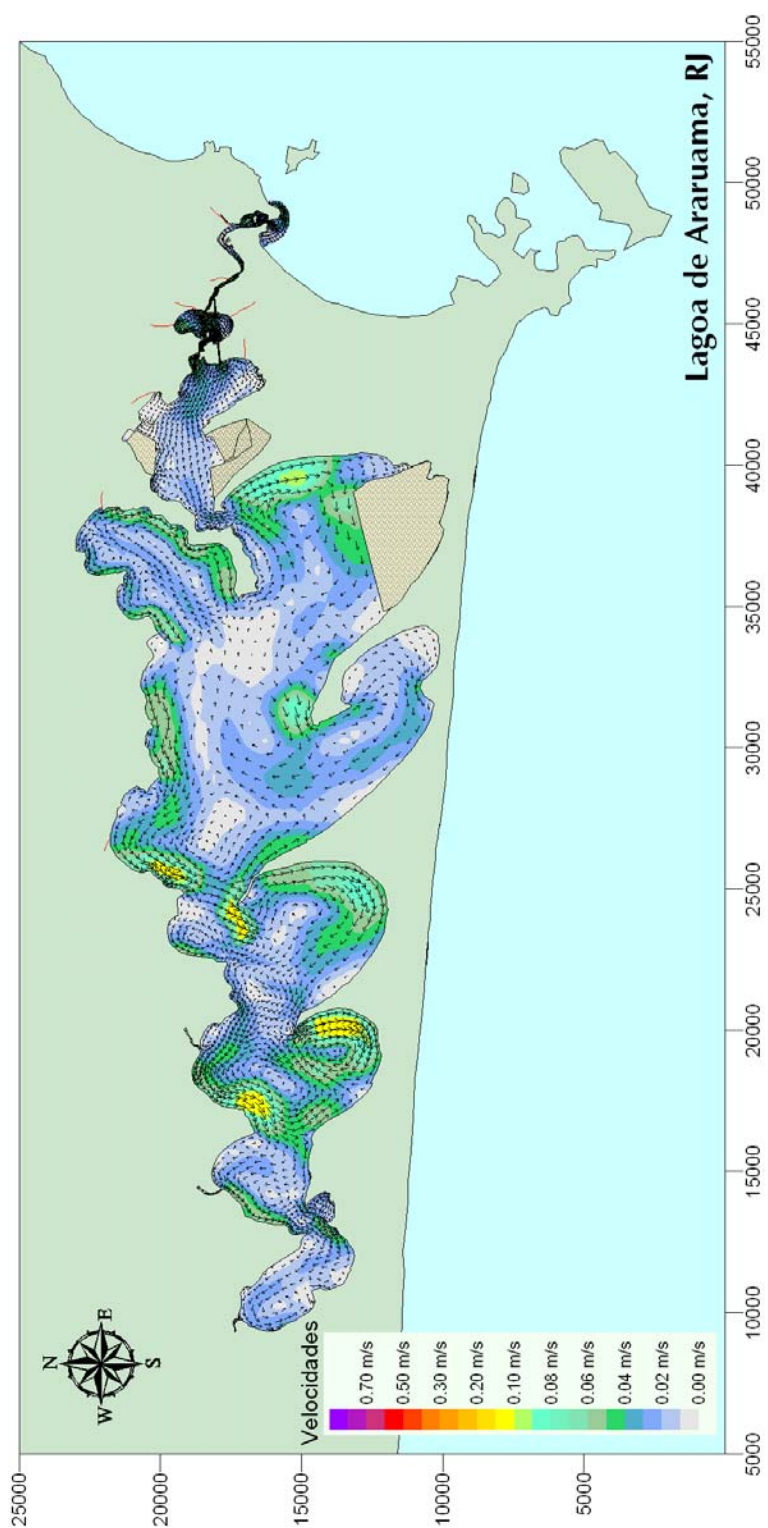


Figura 55 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de vento NE, com meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 17, dia 04/01 /96 às 22:00h; detalhe na Figura 56.

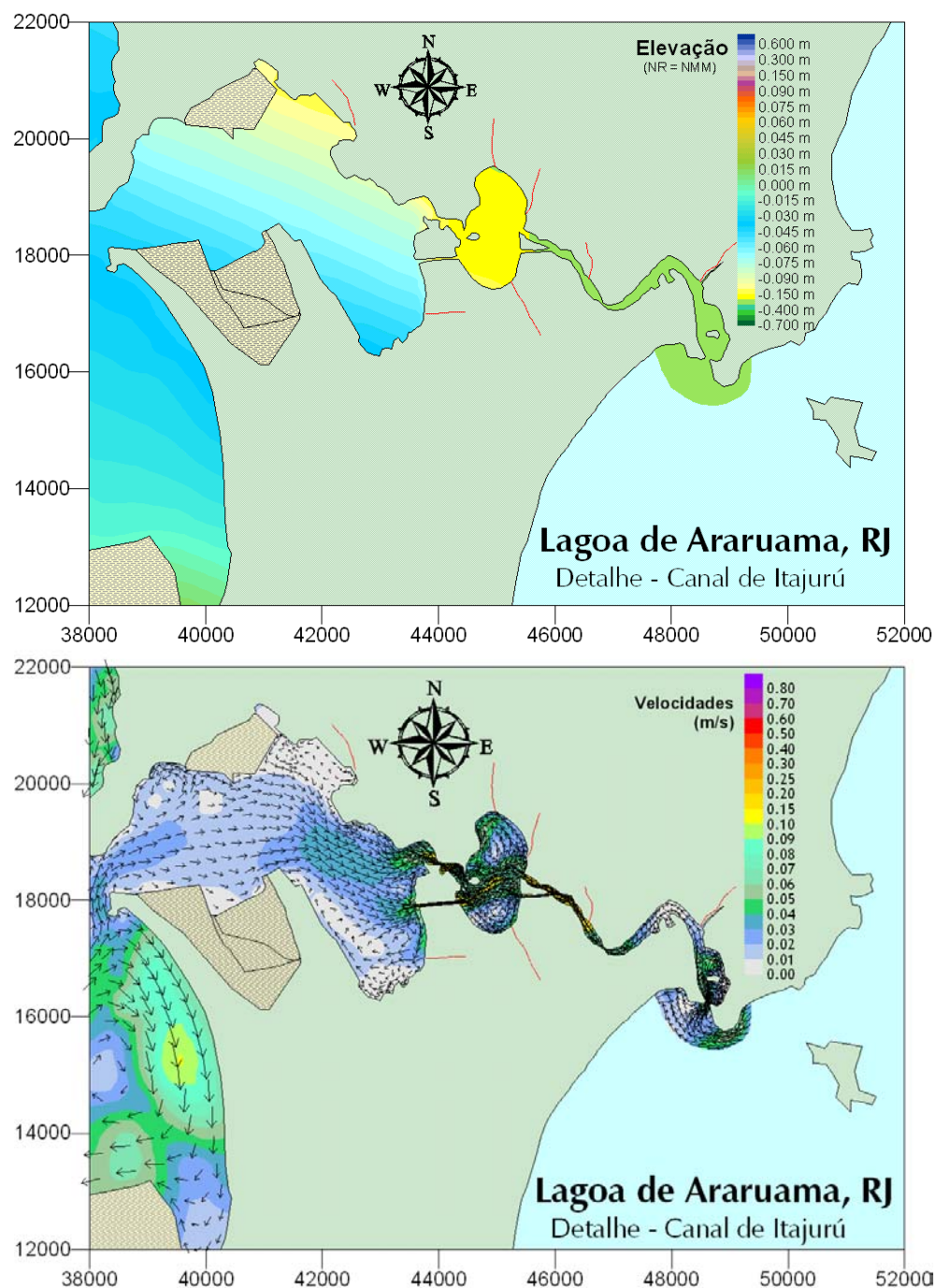


Figura 56 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de ventos usuais de NE, com meia maré enchente na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 54, e a inferior, o campo de correntes, conforme Figura 55.

5.2.3 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO SOB ENTRADA DE FRENTE FRIA, VENTO SUDOESTE (SO)

Os padrões de circulação na lagoa de Araruama, em condições de entrada de frente fria com ventos de SO, podem ser analisados através dos mapas da Figura 58 a Figura 69. De modo a se comparar com a situação de calmaria e com a de ventos usuais de NE, apresentadas nos itens anteriores, também será adotado o mesmo forçante ou seja, de marés com amplitudes típicas de sizígia, conforme Figura 25, e rios com vazões médias constantes. Além desses forçantes, foram utilizados os ventos de SO. Os ventos são os que ocorreram a partir das 12:00h do dia 02/07/96, como demonstra a Figura 18. Com relação aos padrões de circulação hidrodinâmica que se pode observar nos mapas da Figura 58 a Figura 69, destaca-se:

- os mapas de elevação da superfície livre, ou nível da água (NA), mostram que ocorre significativa diferença de níveis entre as extremidades leste e oeste da lagoa; em resposta à ação dos ventos de SO, nota-se o empilhamento de água e subida de nível nas porções NE da lagoa e o conseqüente abaixamento de níveis nas porções SO;
- apesar das diferenças de níveis causadas pelo vento, praticamente não há variação de nível de água no centro da lagoa decorrente da ação das marés;
- os gráficos da Figura 57 retratam a variação de níveis nas estações 1, 4, 5, 7 e 11 (Figura 28); o gráfico à esquerda mostra variações ao longo de 36 horas, e o da direita mostra detalhes ao longo do ciclo de maré destacado nos mapas da Figura 58 a Figura 69;

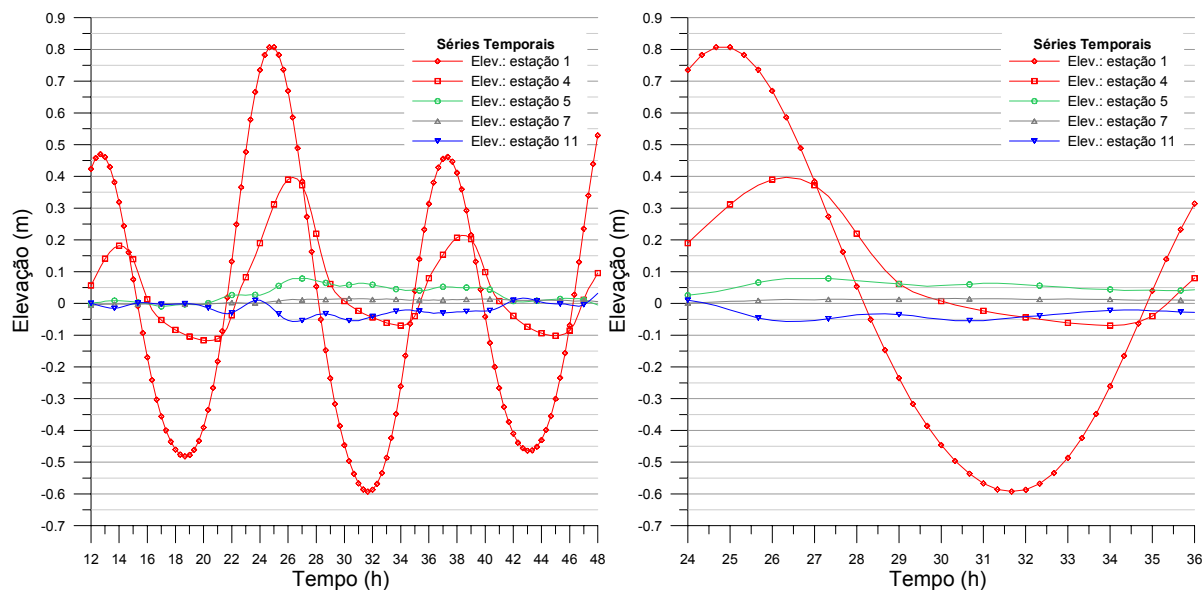


Figura 57 – Elevação de níveis para vento SO.

- observando-se a Figura 57, que contém os gráficos de elevação da superfície livre, e verificando, na Figura 18, as respectivas intensidade e direção do vento pertinente a cada instante, verifica-se que
 - as isolinhas de elevação observadas nos mapas tendem a ser perpendiculares à direção de ação do vento;
 - a magnitude da diferença de elevação do nível da água na lagoa causada pela ação dos ventos depende da intensidade e da direção do vento; para uma dada intensidade de vento, quanto mais alinhada a direção do vento estiver com o eixo longitudinal da lagoa, maior será a diferença de elevação; e, para uma dada direção de vento, quanto maior a intensidade do vento, maior será a diferença de elevação;
- verifica-se que, mesmo com uma grande variação da maré na embocadura, atingindo cerca de 1,4 m entre preamar e baixamar, a variação do nível de água na maior parte da lagoa, estações 7 e 11 é praticamente independente da maré; mesmo na estação 5, a variação que se verifica é muito mais função do vento que da maré, conforme demonstram os gráficos da Figura 57; na Laguna das Palmeiras (estação 4), a ação das

marés é fortemente predominante, causando variações da ordem de 0,4 m entre preamar e baixamar;

- com os ventos de SO, a lagoa ganha significativa circulação hidrodinâmica, em contraste com a estagnação verificada na calmaria (sem ventos); verifica-se que a circulação entre a extremidade oeste da lagoa e a península de São Pedro da Aldeia é fortemente dominada pela ação dos ventos;
- em compensação, indo da península de São Pedro da Aldeia para a embocadura do canal de Itajurú, a circulação vai sendo crescentemente dominada pela ação das marés, como é verificado nas Figura 60, Figura 63, Figura 66 e Figura 69; a partir da laguna das Palmeiras, inclusive, nota-se que as diferenças de nível, e a magnitude e direção das correntes afetadas pelo vento são pouco significativas em relação às causadas pela ação das marés;
- diferentemente do que ocorre nos ventos de NE, na circulação causada pelos ventos de SO na Lagoa de Araruama, verifica-se o aparecimento de grandes vórtices girando no sentido anti-horário nas porções sul da lagoa, e no sentido horário nas porções norte; ressalta-se a constância dos padrões gerais de tais vórtices ao longo de um ciclo de maré;
- durante as horas de ação mais intensa de vento SO, como mostra a Figura 62, a diferença de níveis de água entre as extremidades oeste e leste da lagoa chega a ser de 0,15 m; os desníveis são menores que os ocorridos nas simulações com ventos de NE, conforme Figura 17, apresentados no item 5.2.2, porque as intensidades dos ventos de SO, conforme Figura 18, são um pouco menores, e as direções menos alinhadas com o eixo longitudinal da Lagoa de Araruama.

A seguir, apresenta-se da Figura 58 a Figura 69, mapas de elevação de superfície livre e de correntes ao longo de um ciclo de maré, com detalhamento para a região entre São Pedro da Aldeia e a embocadura do canal de Itajuru, pertinentes à situação de ventos de SO típicos de entrada de frente fria.

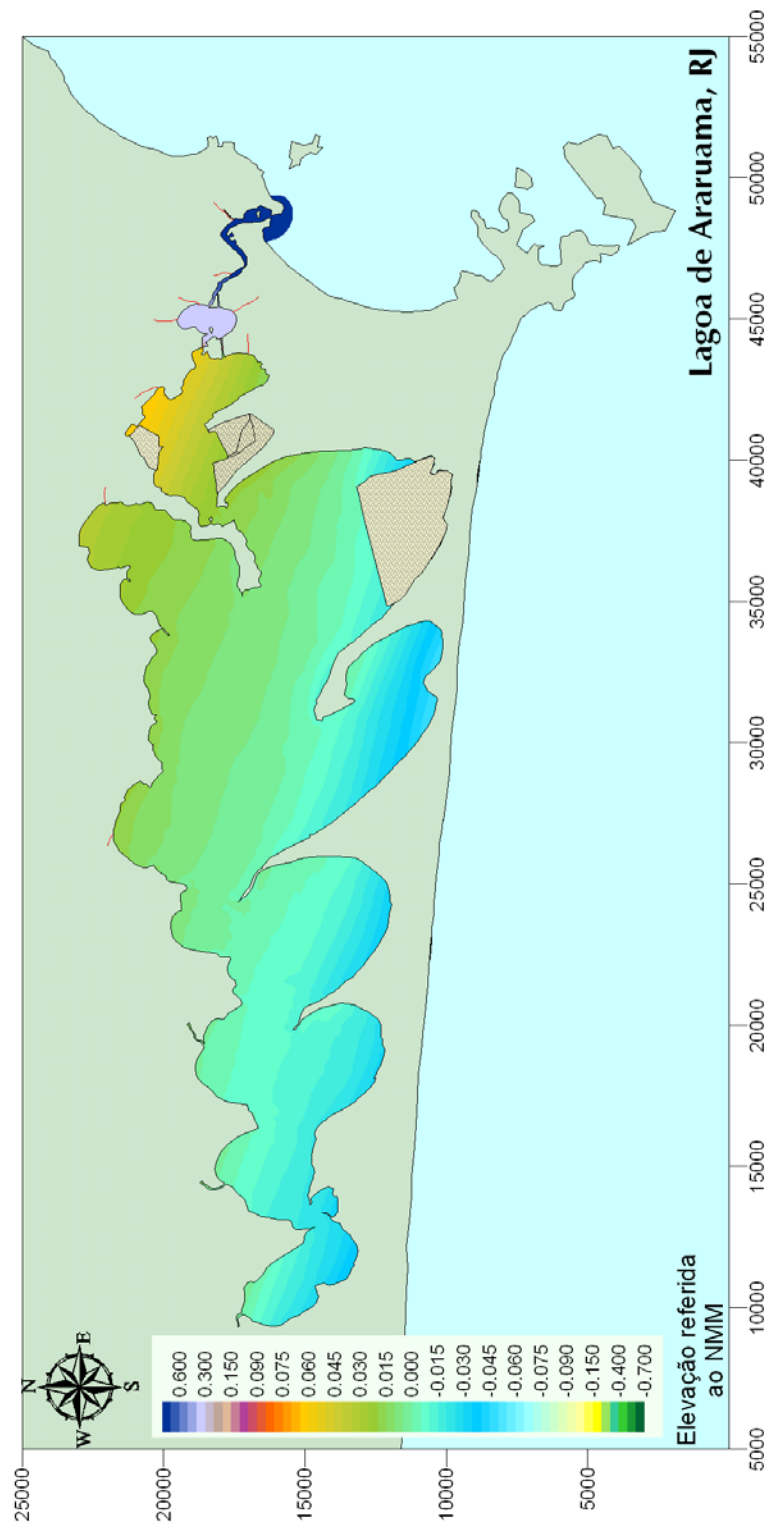


Figura 58 - Isolinhas de elevação da superfície livre com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, como indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 01:00h; detalhe na Figura 60.

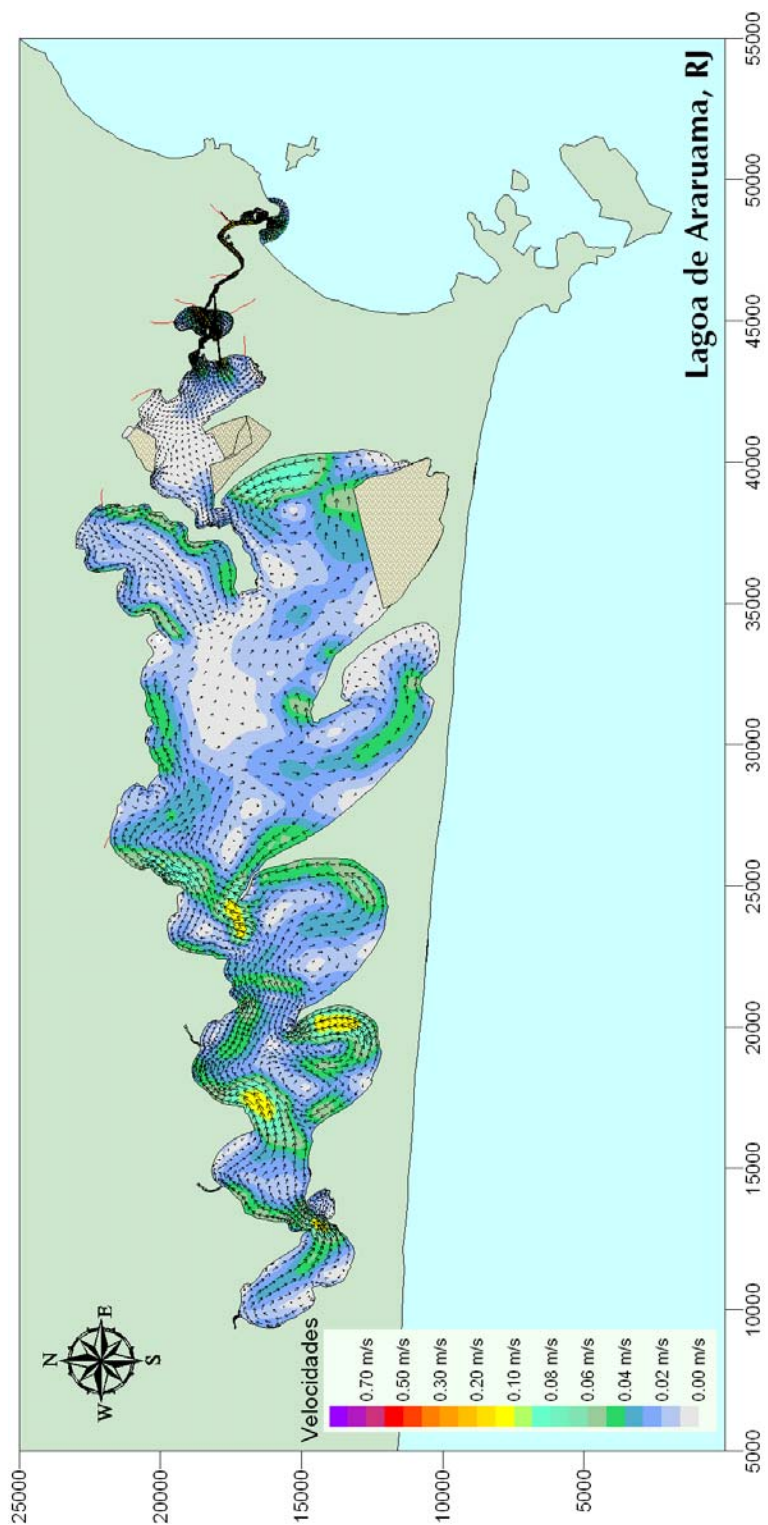


Figura 59 – Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 01:00h; detalhe na Figura 60.

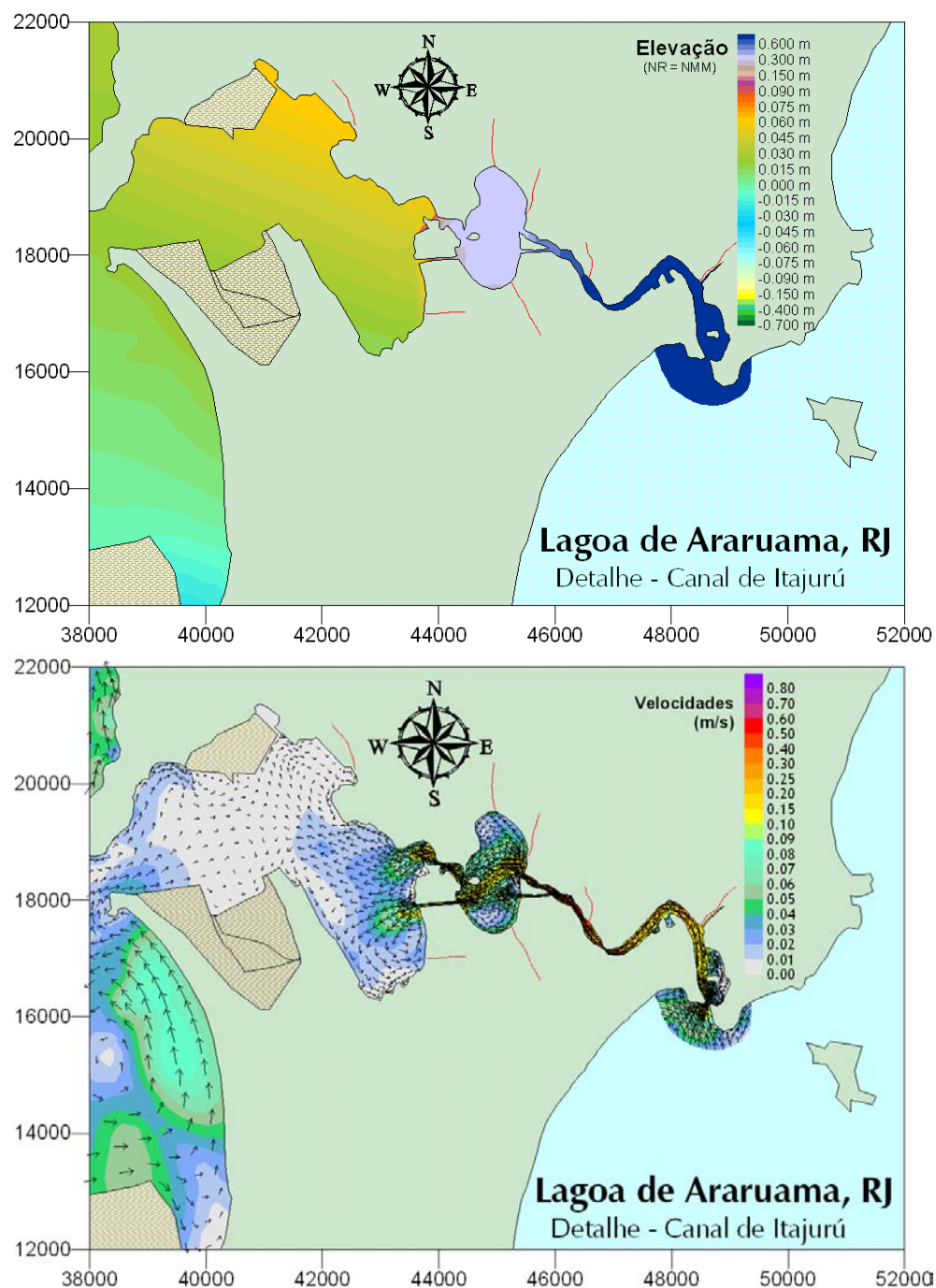


Figura 60 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de frente fria com ventos SO, com preamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 58, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 59.

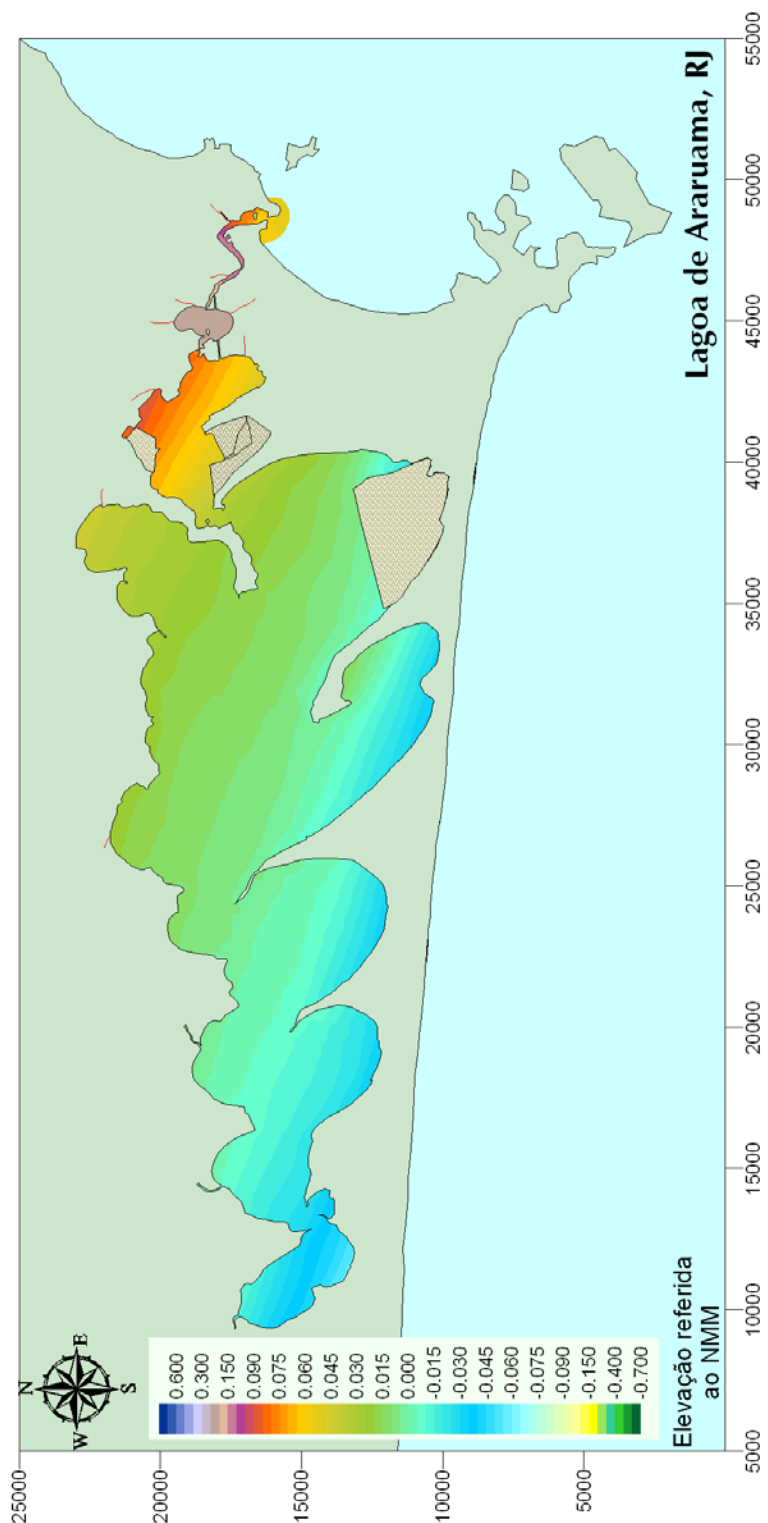


Figura 61 – Isolinhas de elevação da superfície livre com meia maré vazante na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, como indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 04:00h; veja detalhe na Figura 63.

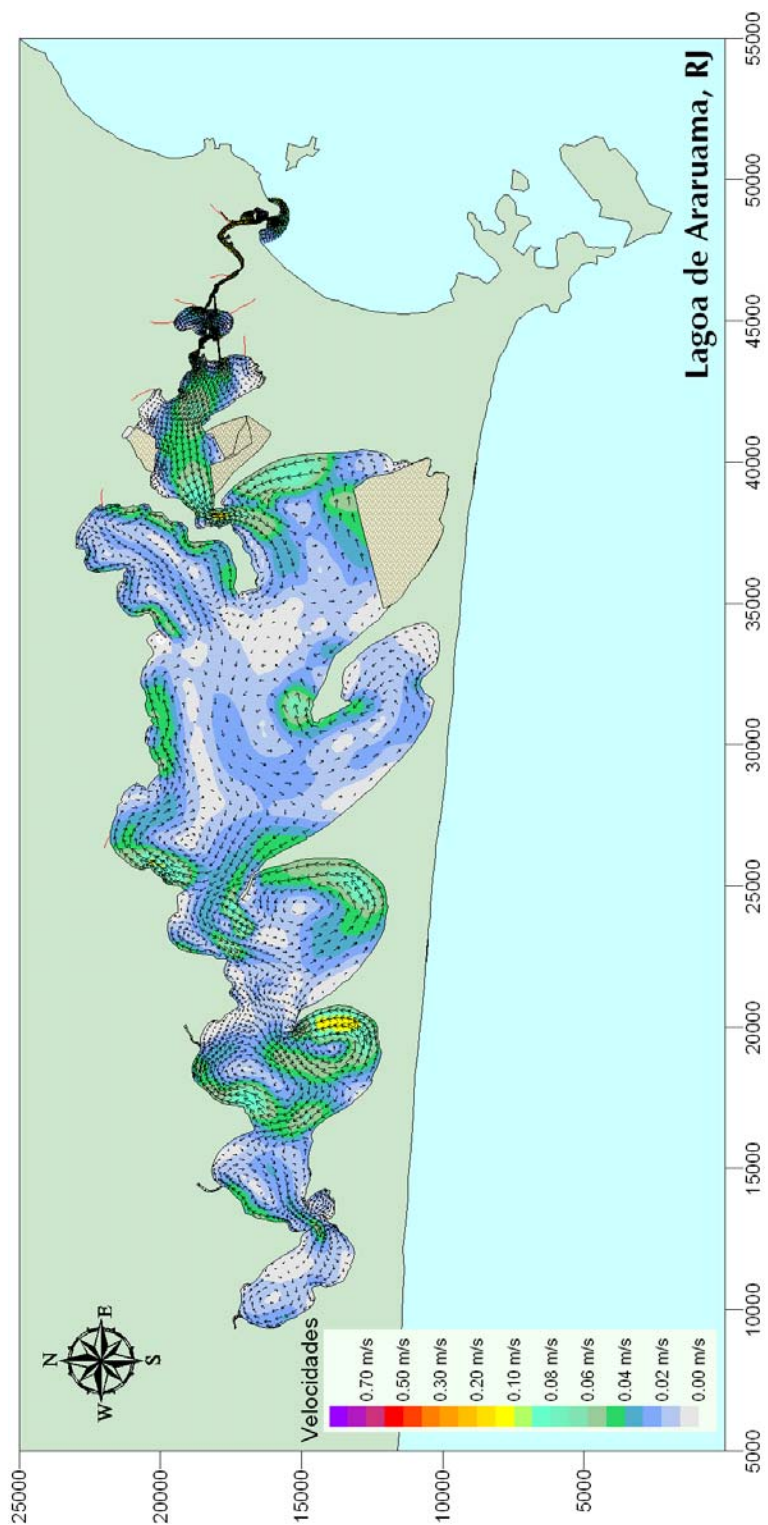


Figura 62 - Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, com meia maré vazante na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 04:00h; detalhe na Figura 63.

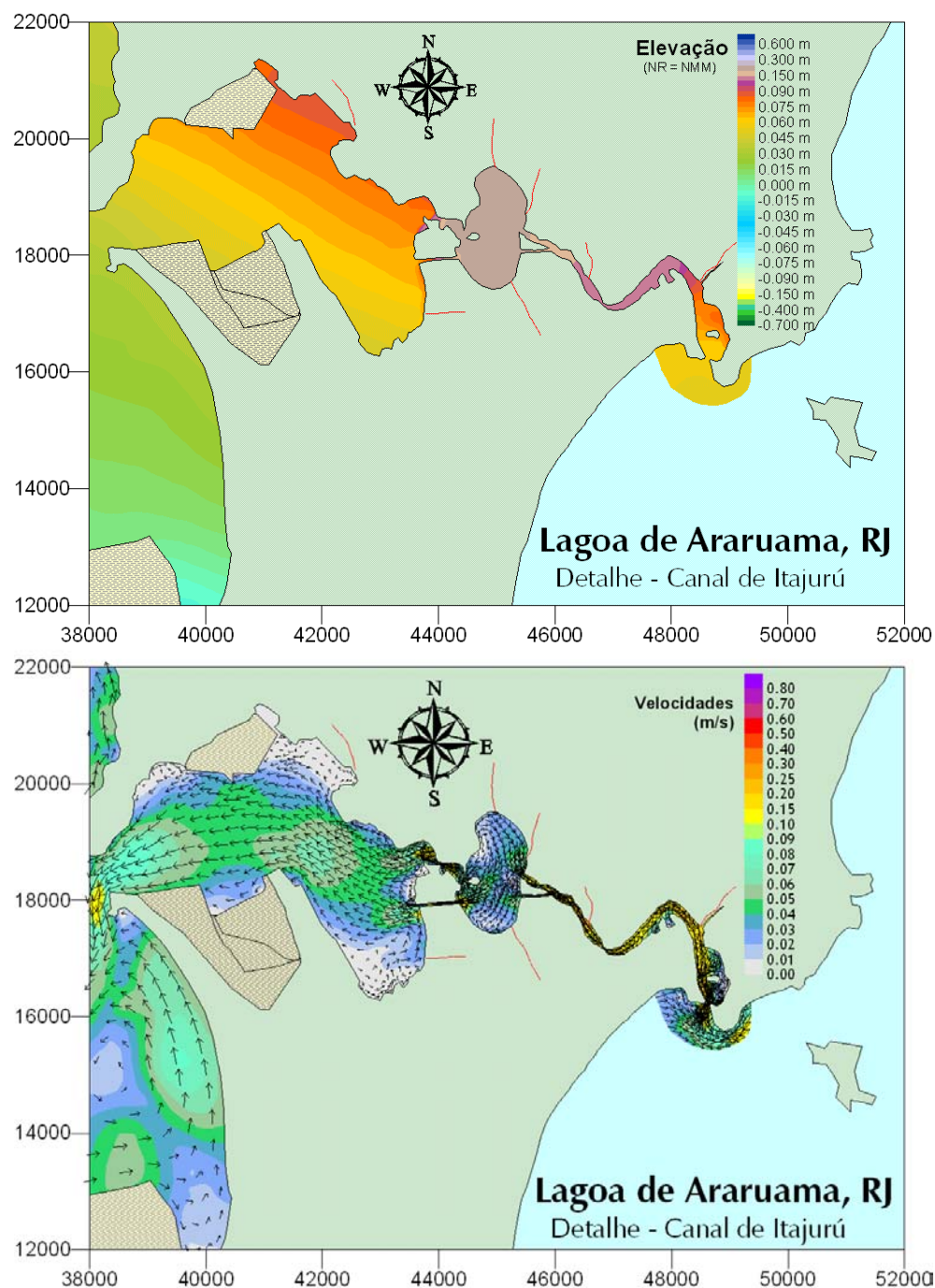


Figura 63 - Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de frente fria com ventos de SO, com meia maré vazante na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 61 e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 62.

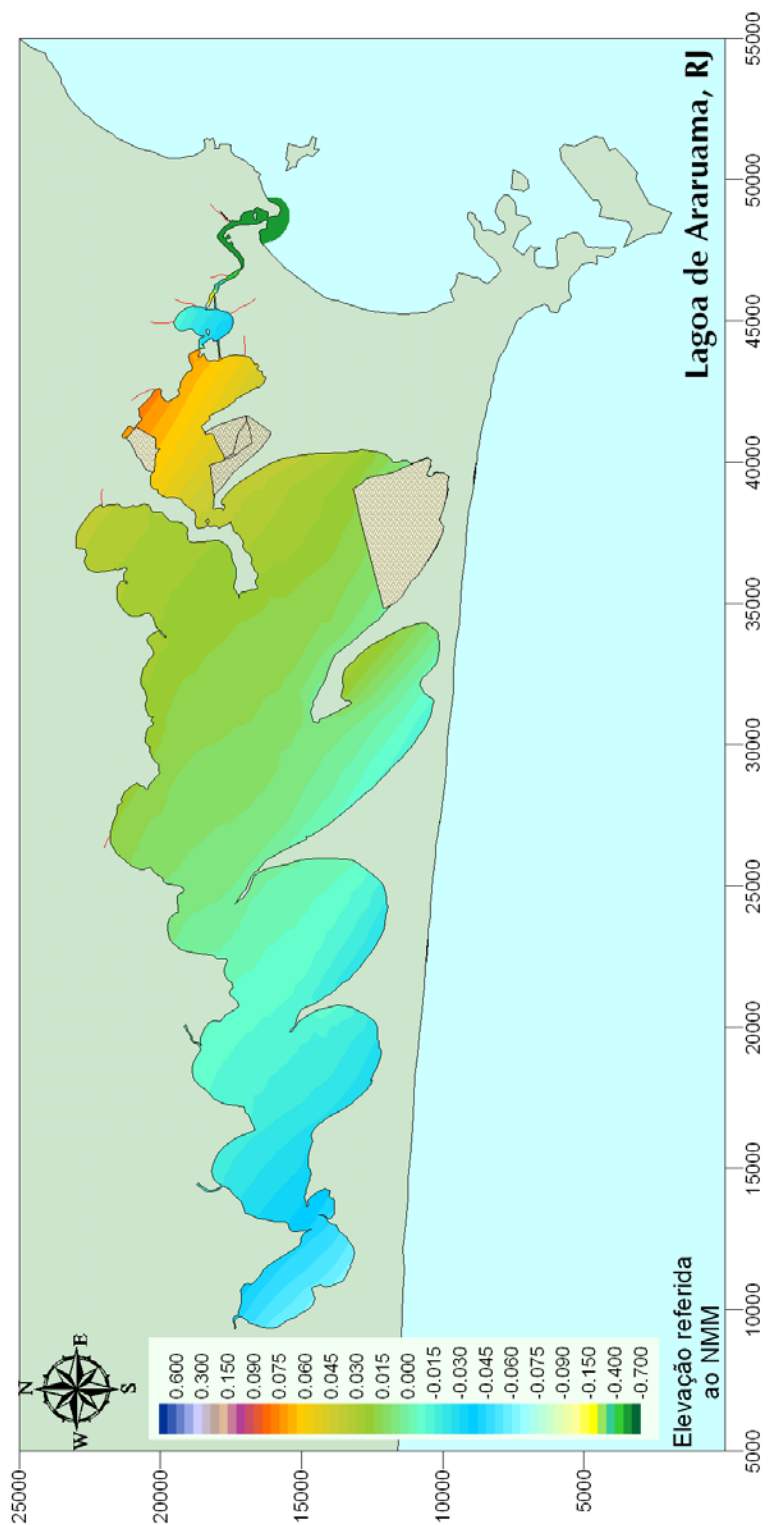


Figura 64 - Isolinhas de elevação da superfície livre com baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, como indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 07:00h; veja detalhe na Figura 66.

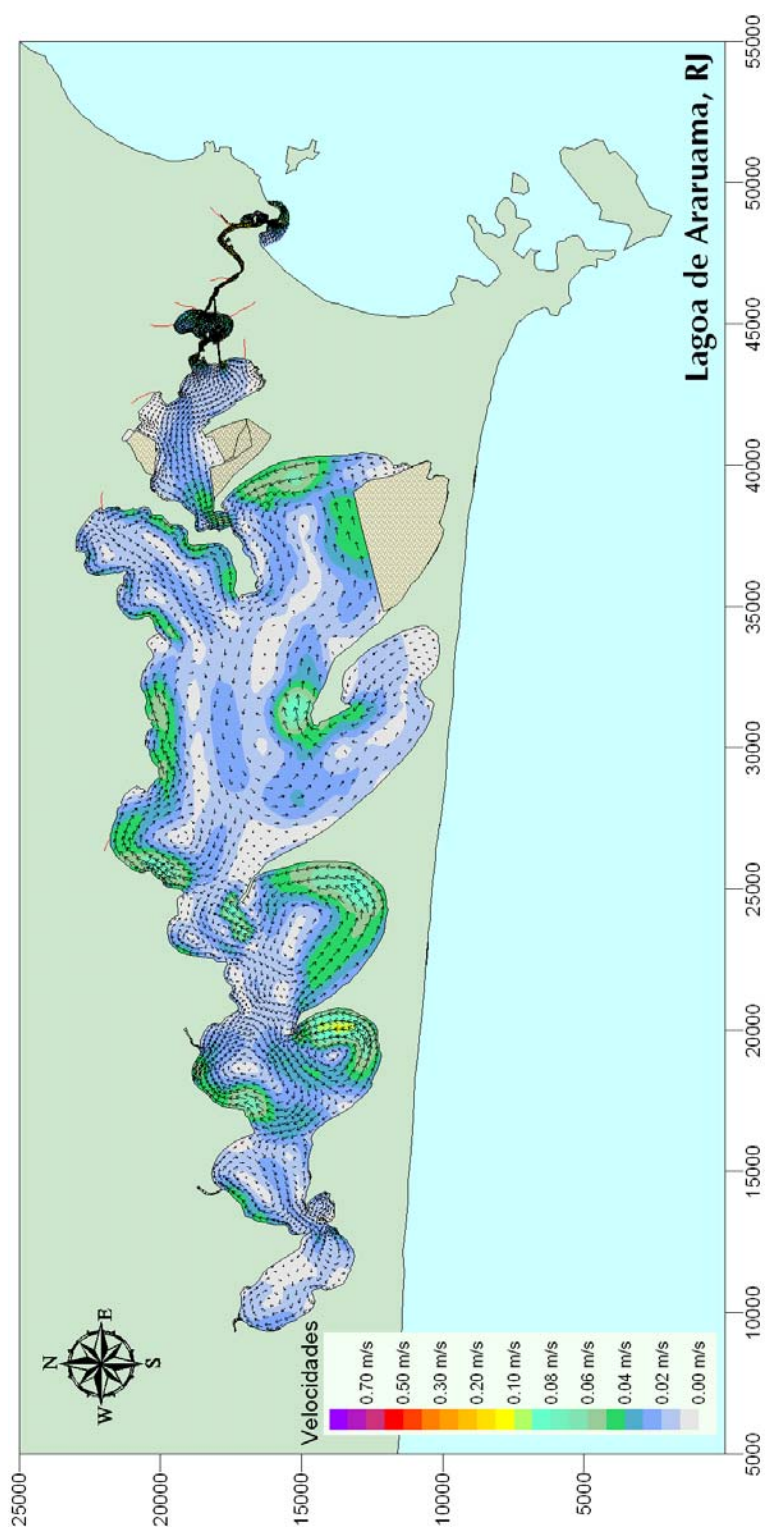


Figura 65 - Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, com baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 18, dia 03/07 /96 às 07:00h; veja detalhe na Figura 66.

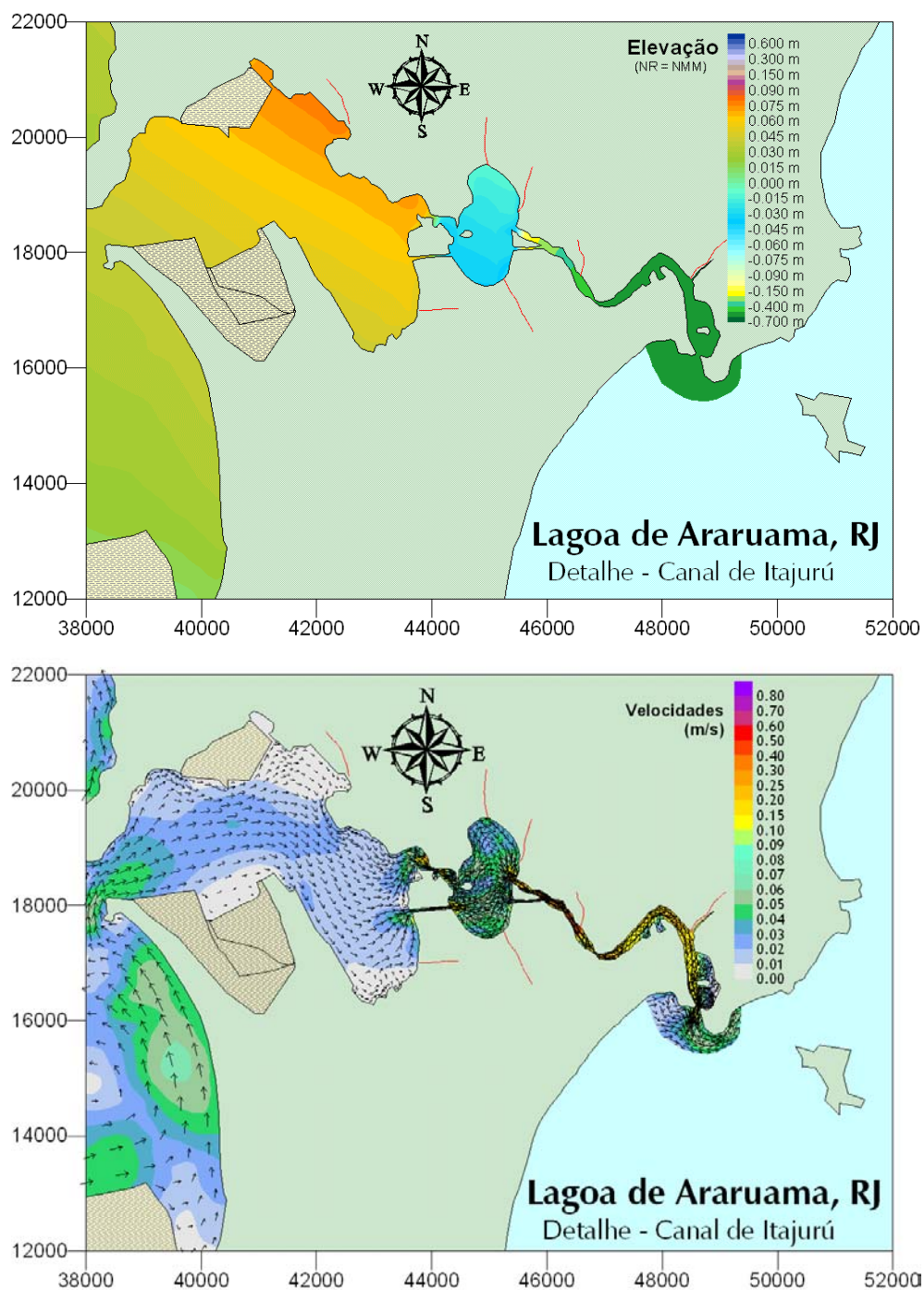


Figura 66 - Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de frente fria com ventos de SO, com baixamar na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 64, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 65.

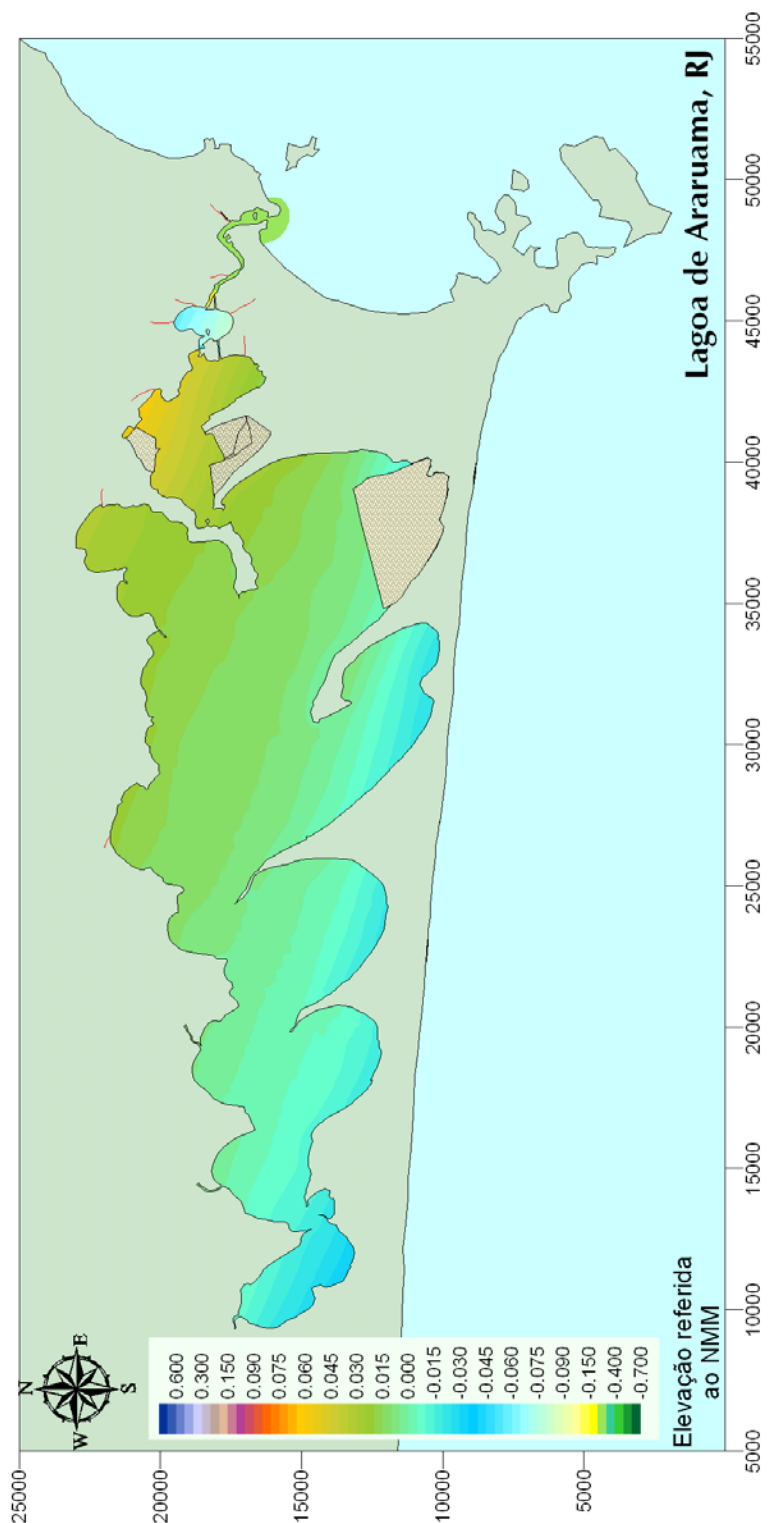


Figura 67 – Isolinhas de elevação da superfície livre com meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; padrão geral na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, como indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 10:00h; veja detalhe na Figura 69.

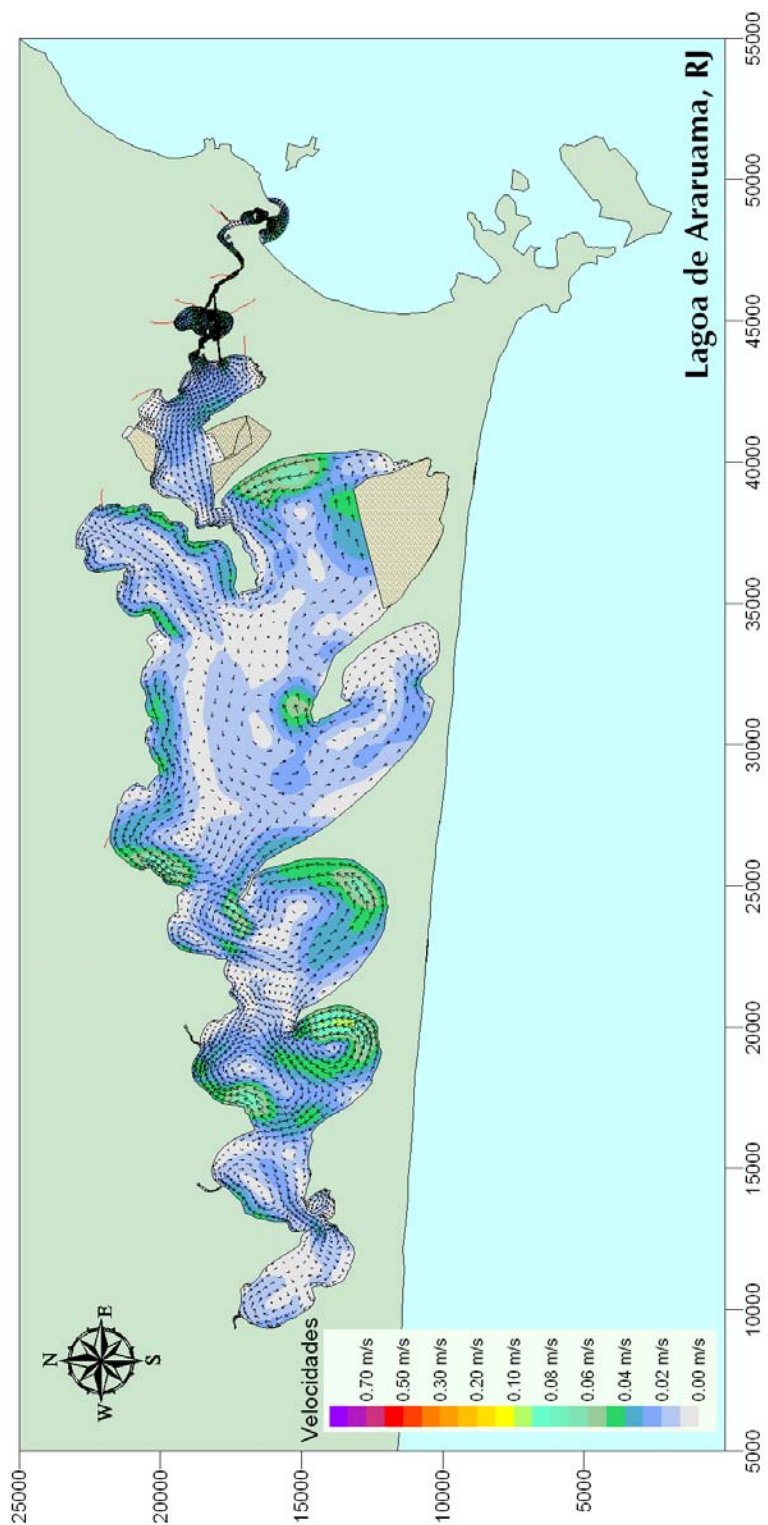


Figura 68 - Padrão geral de circulação hidrodinâmica na lagoa, em situação de frente fria com vento SO, com meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; vento atuante indicado na Figura 18, dia 03/07/96 às 10:00h; veja detalhe na Figura 69.

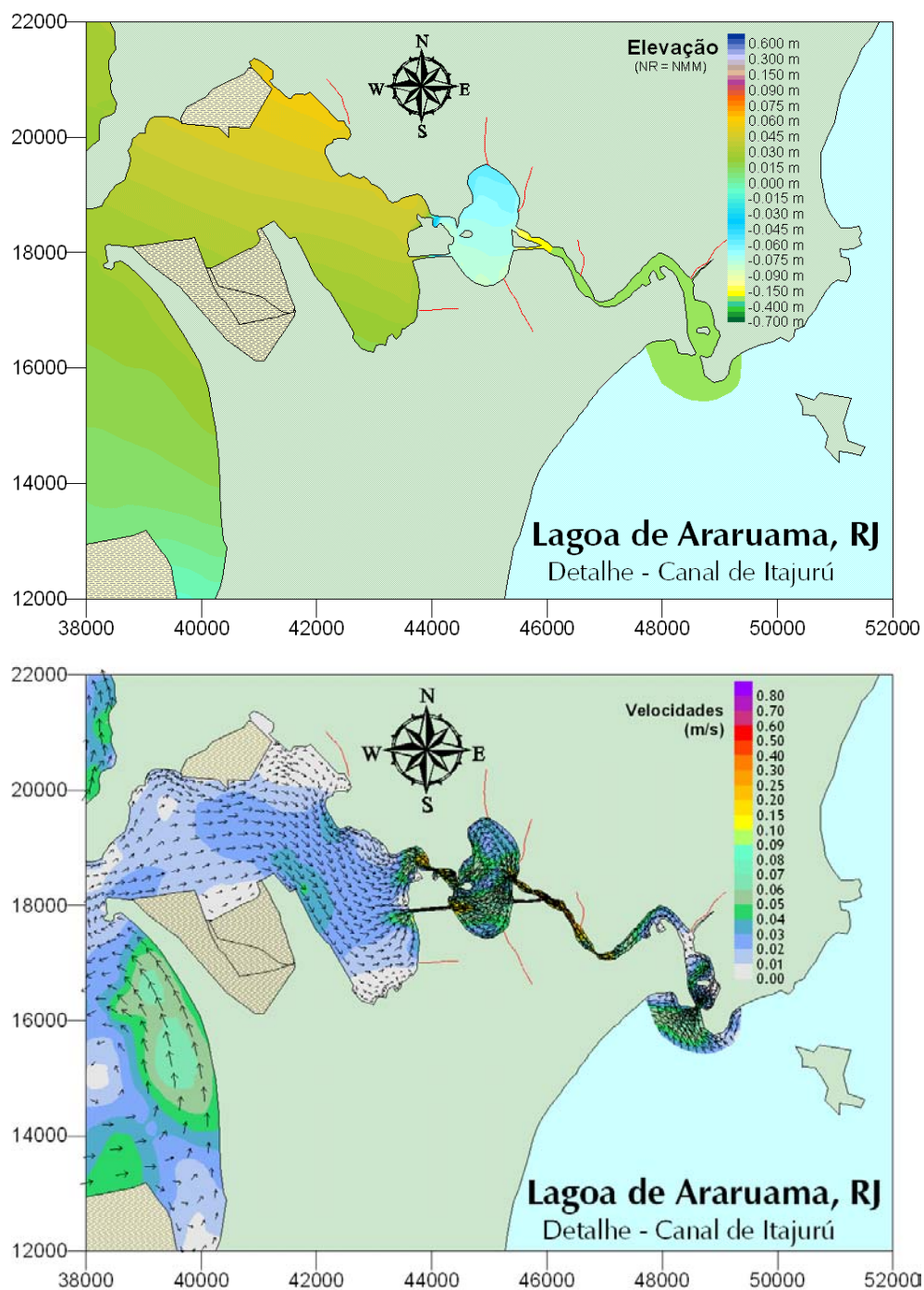


Figura 69 – Detalhes do padrão de circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama, em situação de frente fria com ventos de SO, com meia maré enchente na embocadura; estampa superior detalha as isolinhas de elevação, conforme Figura 67, e a inferior o campo de correntes, conforme Figura 68.

5.3. TROCAS DE MASSAS DE ÁGUA

Em lagoas costeiras, é salutar a renovação de suas águas através do canal de ligação com o mar, conforme visto no Capítulo 2. Na Lagoa de Araruama, um corpo hídrico de geometria complexa, é recomendável verificar como suas águas misturam-se.

O presente trabalho utiliza o modelo de transporte Lagrangeano do SisBAHIA que mostra os deslocamentos das partículas por diferentes áreas. As partículas funcionam como milhares de derivadores neutros, distribuídas em cores diferentes no interior da lagoa. No deslocamento desses derivadores, verifica-se como ocorrem as misturas de massas de água.

5.3.1 CONDIÇÕES INICIAIS

As simulações foram realizadas para prognóstico da distribuição de troca de massa de água, comparando o sistema na situação atual com o sistema em situação projetada, onde é considerada a desobstrução do canal de ligação com o mar.

As simulações utilizam o modelo 2DH para a hidrodinâmica, gerando o campo de velocidades para a resolução das equações de transporte na condição predominante na região de vento nordeste, sendo comparados os instantes 5 dias, 10 dias e 15 dias.

A lagoa foi dividida em 7 regiões, sendo escolhidas cores diferentes para cada uma, para melhor avaliação, de modo a distingui-las ao ocorrer as misturas de massas de água, a saber:

- região 1 – cor marrom;
- região 2 – cor verde escuro;
- região 3 – cor azul claro;
- região 4 – cor lilás;
- região 5 – cor amarela;
- região 6 – cor verde claro;
- região 7 – cor azul escuro.

5.3.2 APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS

Para facilitar o entendimento das simulações apresentadas nas Figura 70 a Figura 73, foram utilizados os mesmos dois cenários empregados na análise da circulação hidrodinâmica:

A - Cenário 1 - Lagoa atual

Instante 1 – início;

Instante 2 – lagoa com 5 dias de troca de massa de água;

Instante 3 – lagoa com 10 dias de troca de massa de água;

Instante 4 – lagoa com 15 dias de troca de massa de água;

B – Cenário 2 - Lagoa após intervenção em seu canal de acesso

Instante 1 – início;

Instante 2 – lagoa com 5 dias de troca de massa de água;

Instante 3 – lagoa com 10 dias de troca de massa de água;

Instante 4 – lagoa com 15 dias de troca de massa de água.

A seguir, são apresentadas as simulações nos instantes selecionados acima.

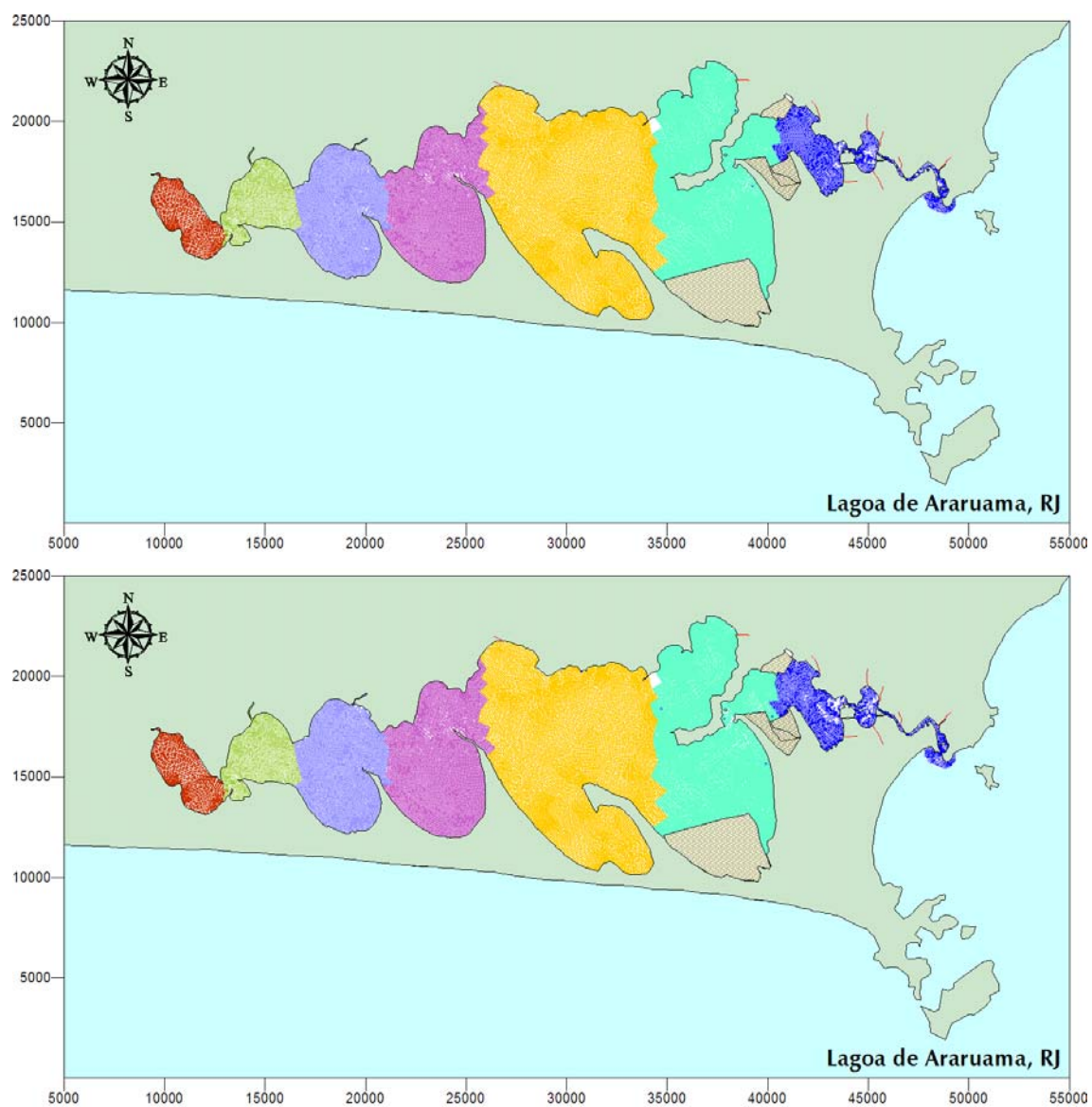


Figura 70 – Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, ambas no instante 1 (instante inicial).

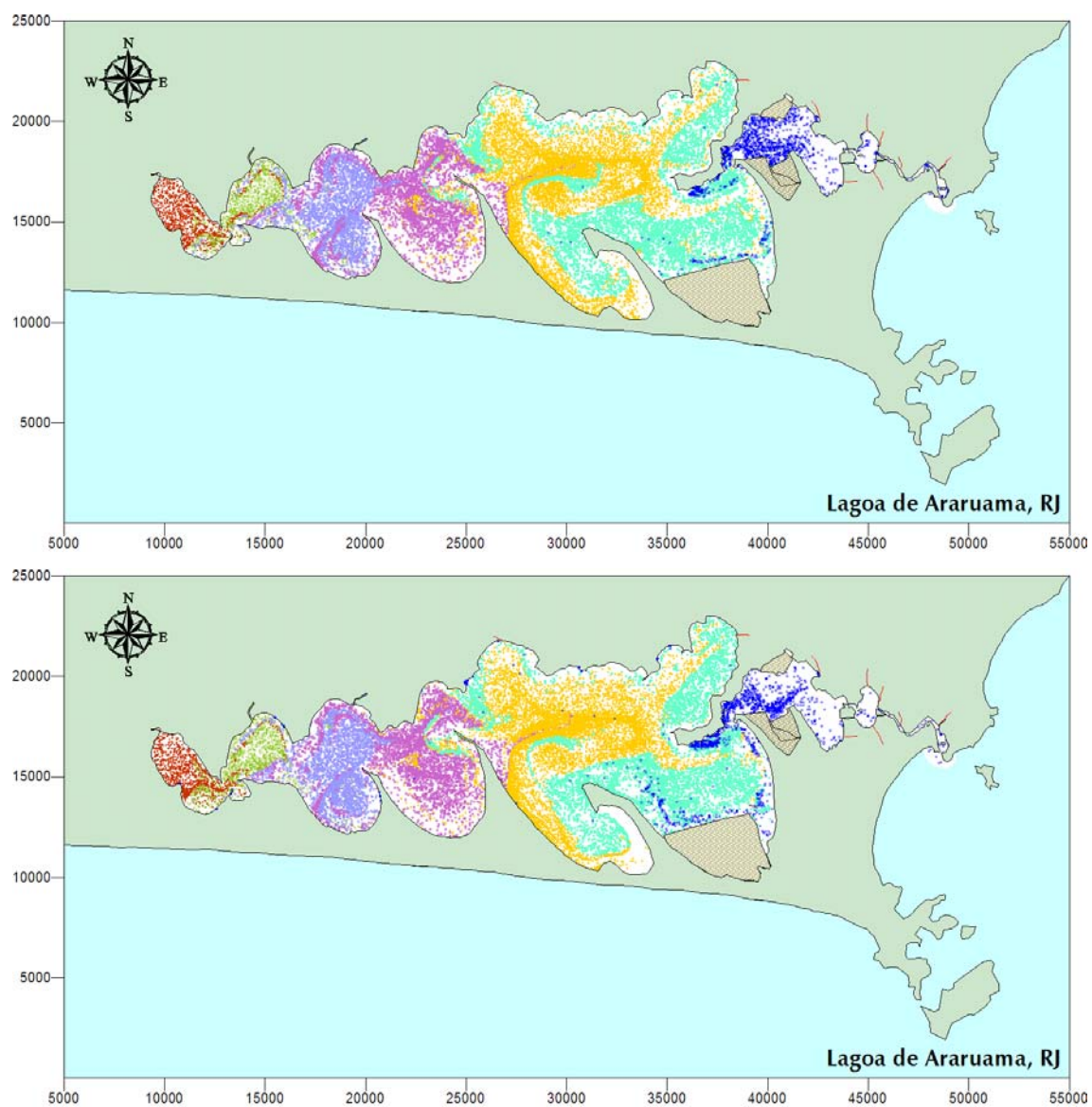


Figura 71 – Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, ambas no instante 2, após 5 dias de simulação.

O instante 2 mostra que a troca de massa de água é maior após a dragagem, no canal de acesso e no interior da lagoa, fato já verificado na simulação hidrodinâmica, pois a lagoa sofre uma maior influência das marés.

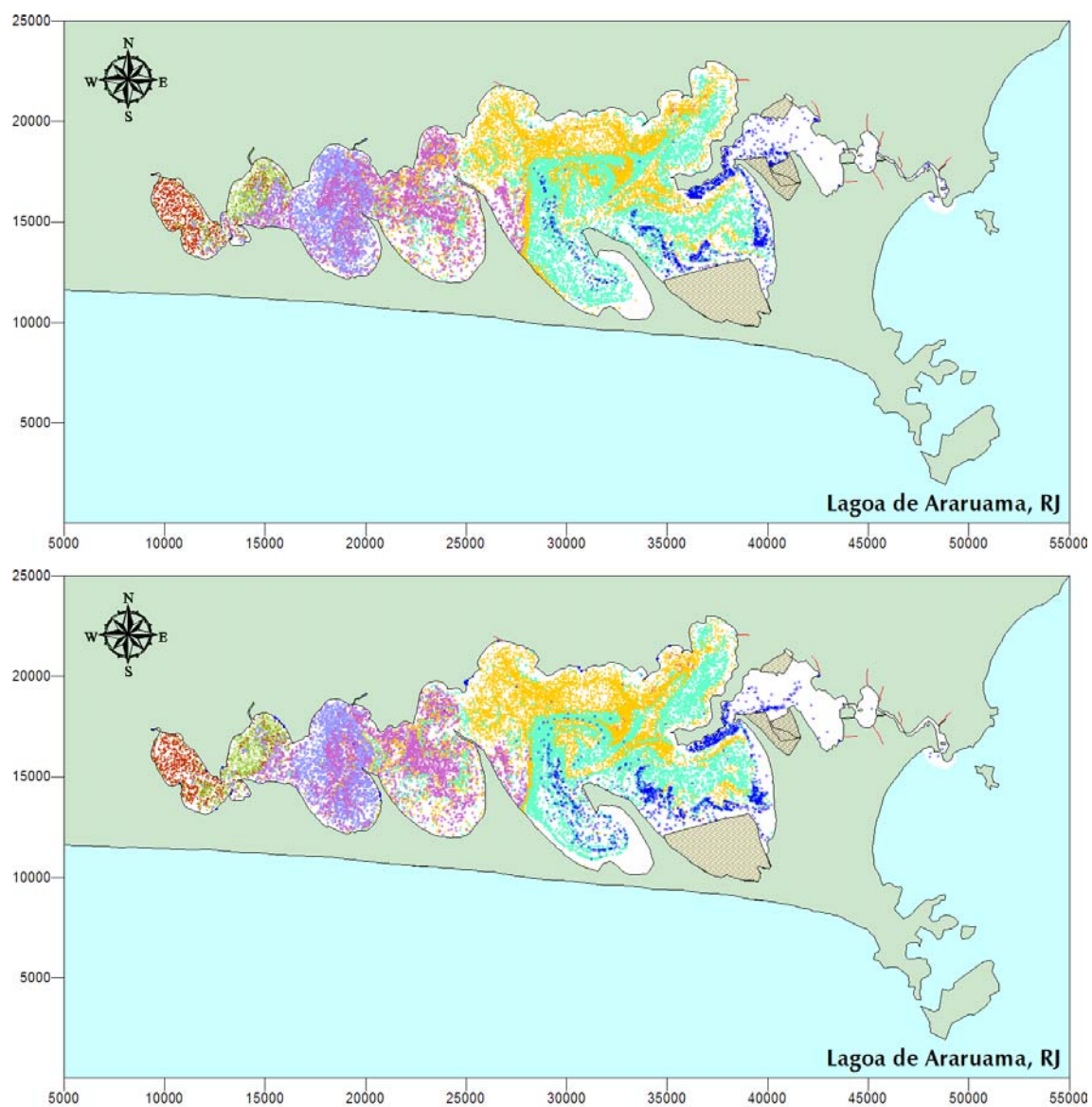


Figura 72 – Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, após 10 dias de simulação.

O instante 3 mostra ser mais acentuada a troca de massa de água no canal de acesso e no interior da lagoa após a intervenção.

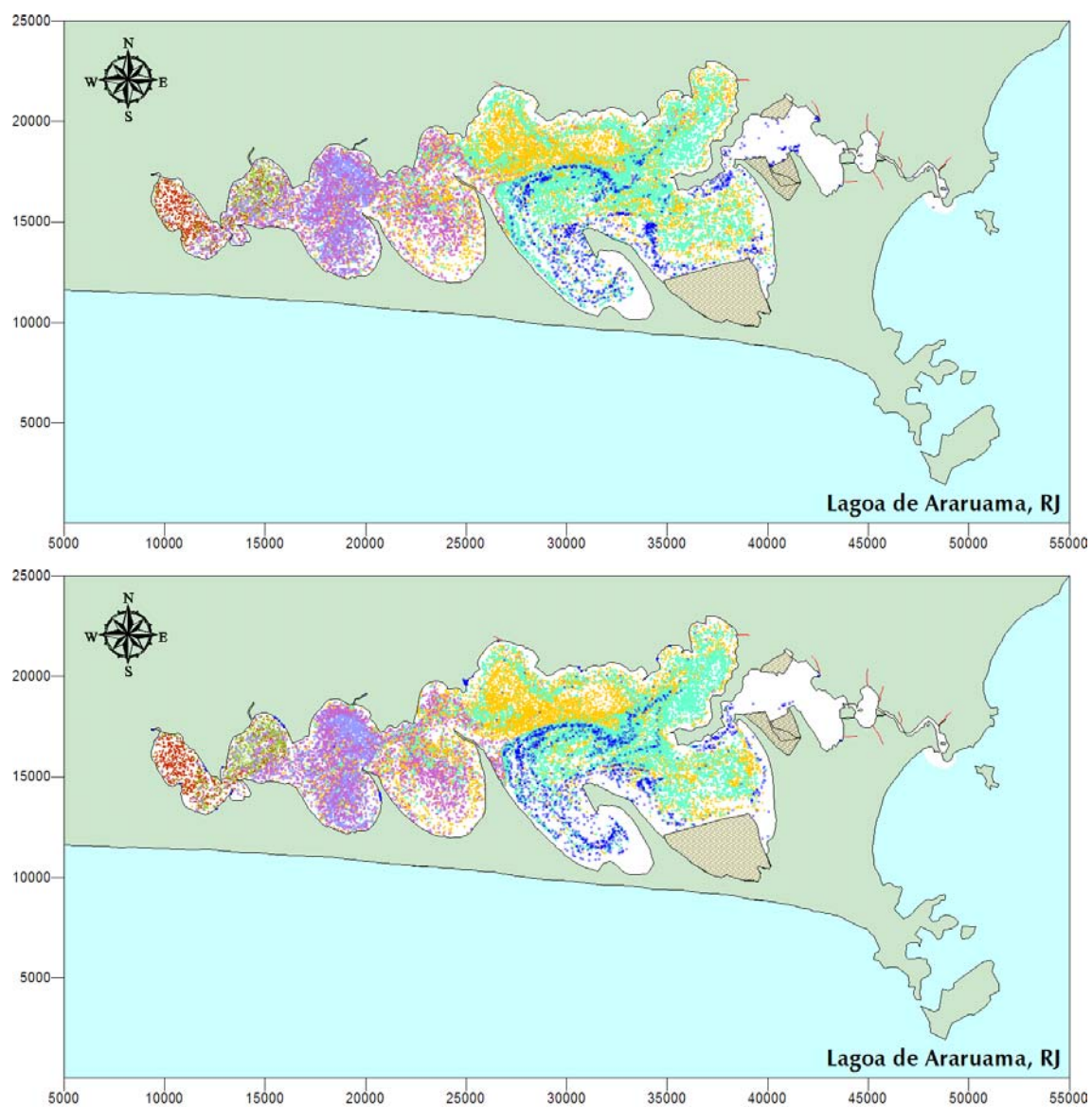


Figura 73 – Comparação do cenário 1, estampa superior, com o cenário 2, estampa inferior, após 15 dias de simulação.

Após a intervenção, a cada instante que passa, é verificada uma melhora na troca de massa de água em relação ao instante anterior, o que mostra o quanto é benéfica a dragagem no canal de acesso.

6. IMPACTOS DE DRAGAGEM NA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Neste item, são apresentados os resultados relativos ao contraste entre os padrões de circulação hidrodinâmica da lagoa obtidos a partir da batimetria atual, conforme Figura 22 e detalhe na Figura 23, e os padrões resultantes da dragagem do canal de 3,0m, conforme Figura 24. As comparações são realizadas para ação de ventos usuais de NE, conforme Figura 17.

De modo a possibilitar uma melhor confrontação entre a situação atual e a situação da simulação da dragagem, os resultados serão apresentados nas duas seguintes formas:

- resultados em forma de séries temporais de níveis de água e velocidades de correntes na situação atual e na situação pós-dragagem; as séries temporais são referenciadas a estações numeradas com posição indicada na Figura 74;
- mapas comparativos de níveis de água e de correntes ao longo de um ciclo de maré, para cada um dos casos.

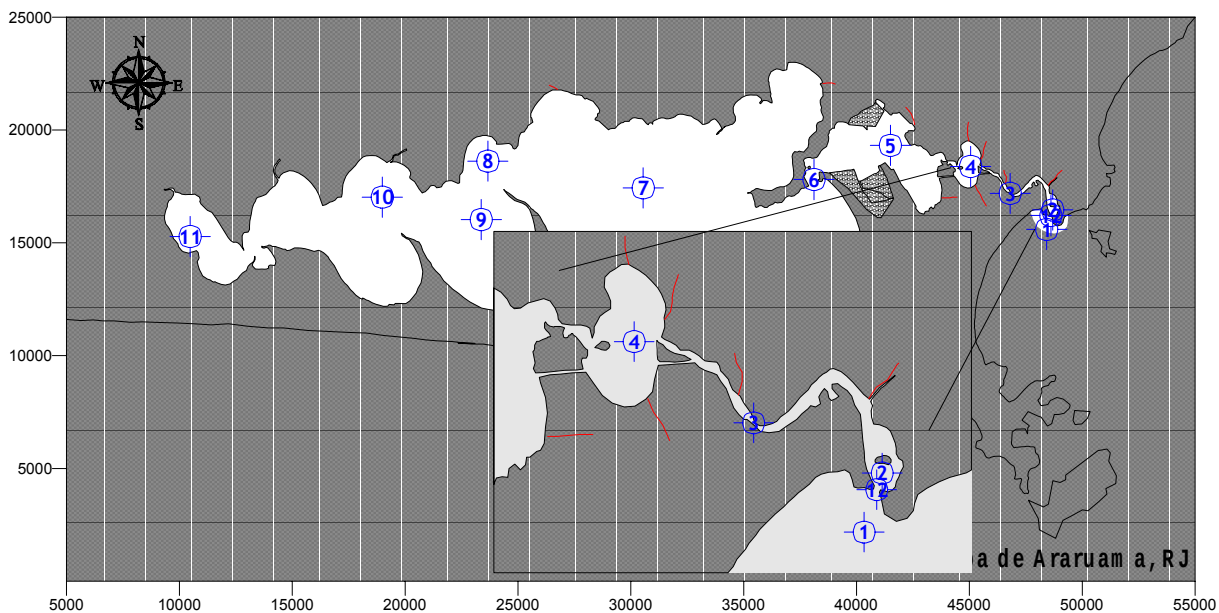


Figura 74 - Localização das 12 estações nas quais foram registradas séries temporais de níveis de água e velocidades de correntes.

6.1. COMPARAÇÃO DE VALORES EM PONTOS SELECIONADOS

A seguir, são apresentados gráficos de séries temporais de elevações de nível da água e de velocidades de correntes, dos quais destacam-se os seguintes pontos:

- na Figura 75 e na Figura 76, observa-se que o efeito da dragagem do canal de 3,0 m em relação a variação dos níveis da água no corpo principal da lagoa seria muito pequeno;
- porém, a Figura 75 mostra que os níveis no meio da lagoa passaram a apresentar uma amplitude um pouco maior; entretanto, é verificado, uma pequena diminuição nas amplitudes da lagoa das Palmeiras; isso se verifica porque, com a dragagem, passaria a fluir um maior volume de água;

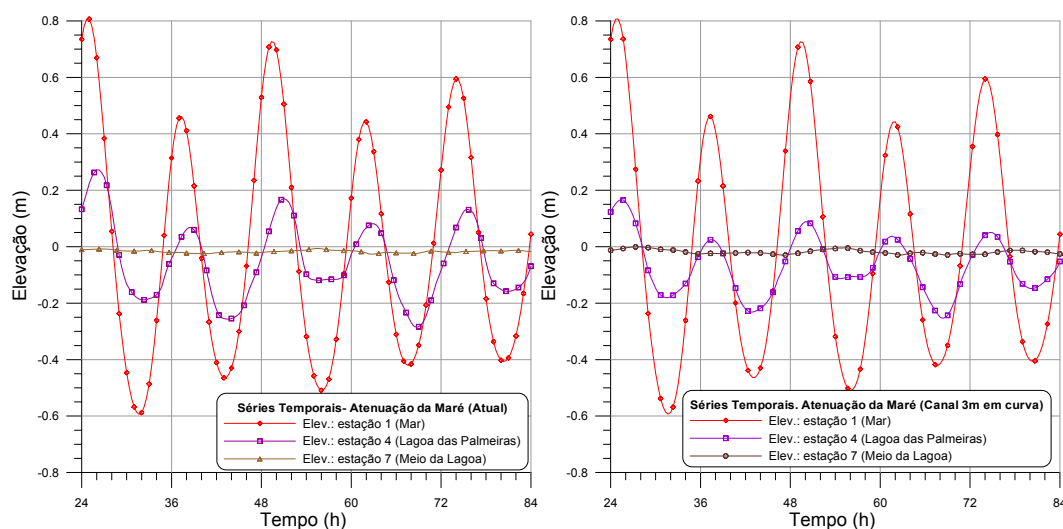


Figura 75 – Variação da maré em três pontos na Lagoa de Araruama; à esquerda, com batimetria atual, e, à direita, com canal dragado de 3,0 m (estações na Figura 74).

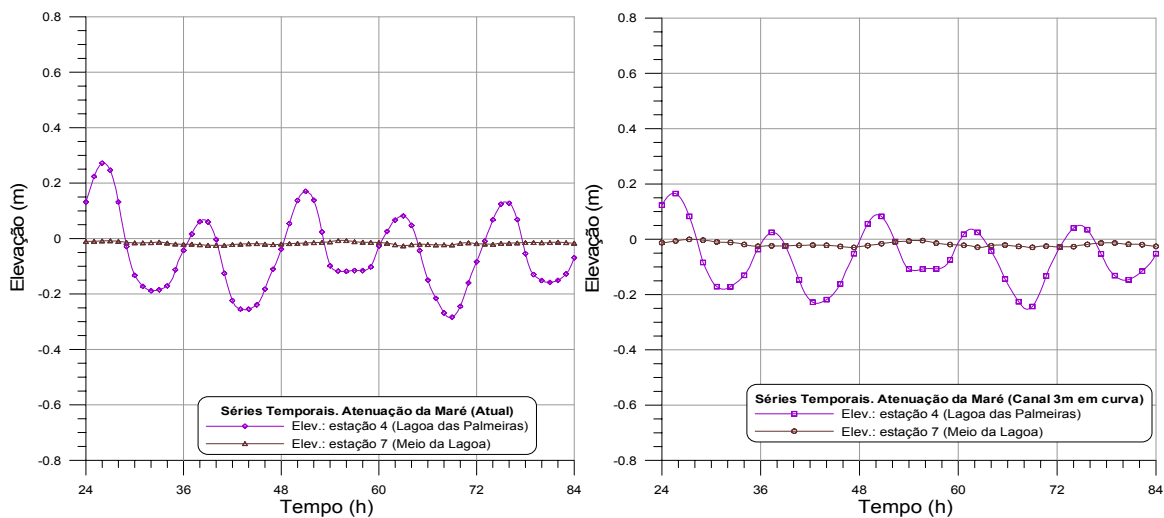


Figura 76 – Detalhe da variação da maré em dois pontos na Lagoa de Araruama; à esquerda, com batimetria atual, e, à direita, com canal de 3,0 m.

- os efeitos acima mencionados parecem contraditórios, mas a desobstrução obtida com a dragagem do canal propiciou um significativo aumento no prisma de maré, isto é, no volume de água do mar que entra na lagoa durante a enchente; porém, grande parte do acréscimo está na maior amplitude da variação de níveis no corpo principal da Lagoa de Araruama; por conta disso, há uma diminuição na amplitude das marés na lagoa das Palmeiras;
- a Figura 77 mostra também como a desobstrução propiciada pela dragagem, aumenta consideravelmente as correntes de enchente e de vazante na lagoa; em outras palavras, embora os níveis de água não sejam afetados de forma muito sensível por conta da enorme área do espelho de água, ocorre um forte aumento nos fluxos de água entre as lagoas;
- os gráficos da Figura 77 mostram a magnitude das correntes antes e depois da dragagem; à esquerda, para a estação 4, e à direita, para a estação 6; no caso da estação 4, as magnitudes chegam a triplicar, e, na estação 6, além do forte acréscimo em magnitude, ocorre nítida mudança de fase.

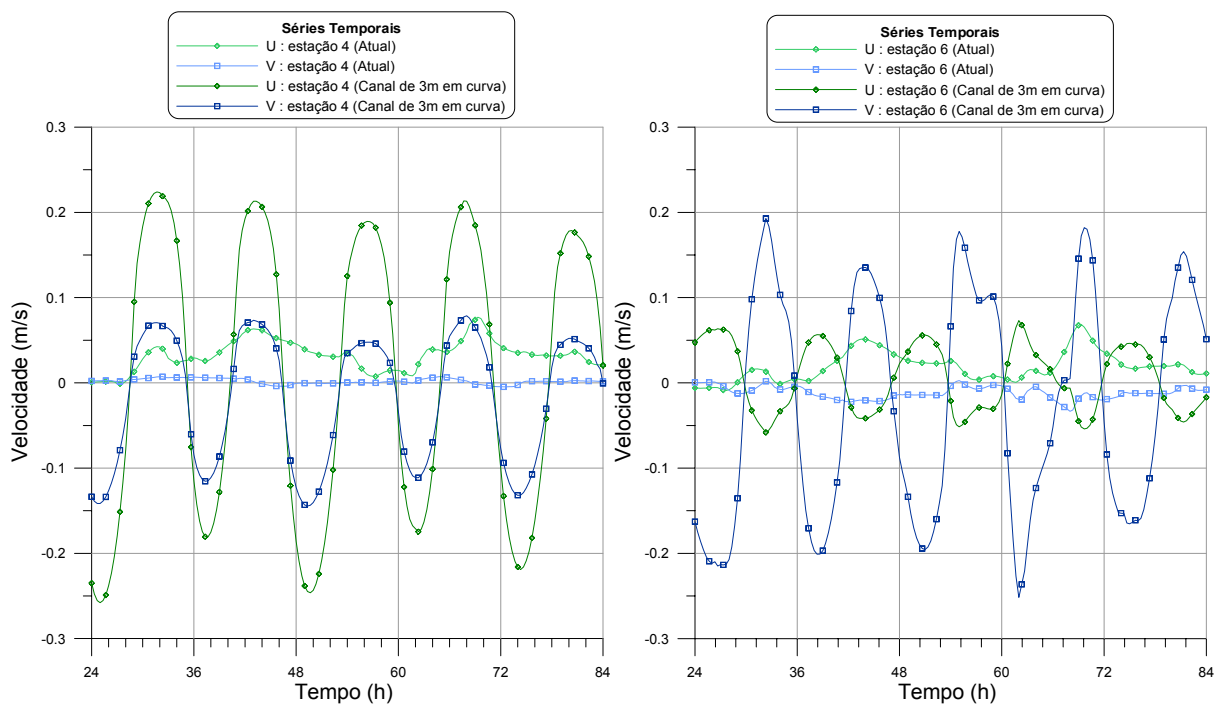


Figura 77 - Séries temporais comparando magnitude de componentes de velocidade de correntes nas estações 4_ (Lagoa das Palmeiras) e 6_ (Pontal Perinas); nota-se forte aumento nas correntes em decorrência da desobstrução propiciada pelo canal dragado de 3,0m.

Tais efeitos podem ser vistos em toda a lagoa através dos mapas comparativos a seguir.

6.2. MAPAS COMPARATIVOS

A seguir, são mostradas algumas figuras ilustrativas (Figura 78 a Figura 93), que servirão para mostrar a variação de níveis de água e padrões de correntes na lagoa, sob a ação de mesmas marés e mesmos ventos, antes e depois da dragagem de um canal com 3,0 m de profundidade mínima, em relação ao nível usual das cartas náuticas.

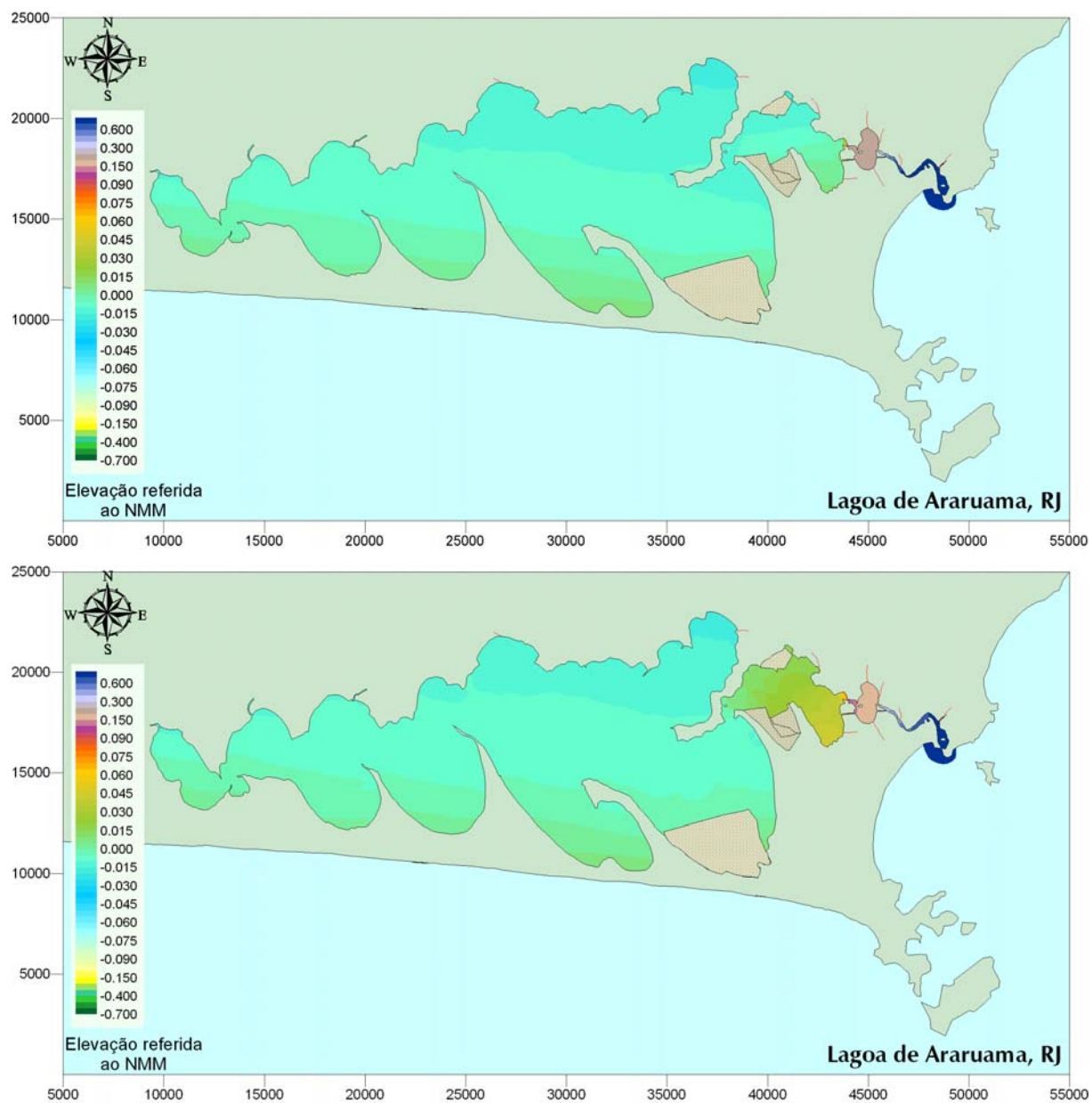


Figura 78 – Elevação da superfície livre em preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

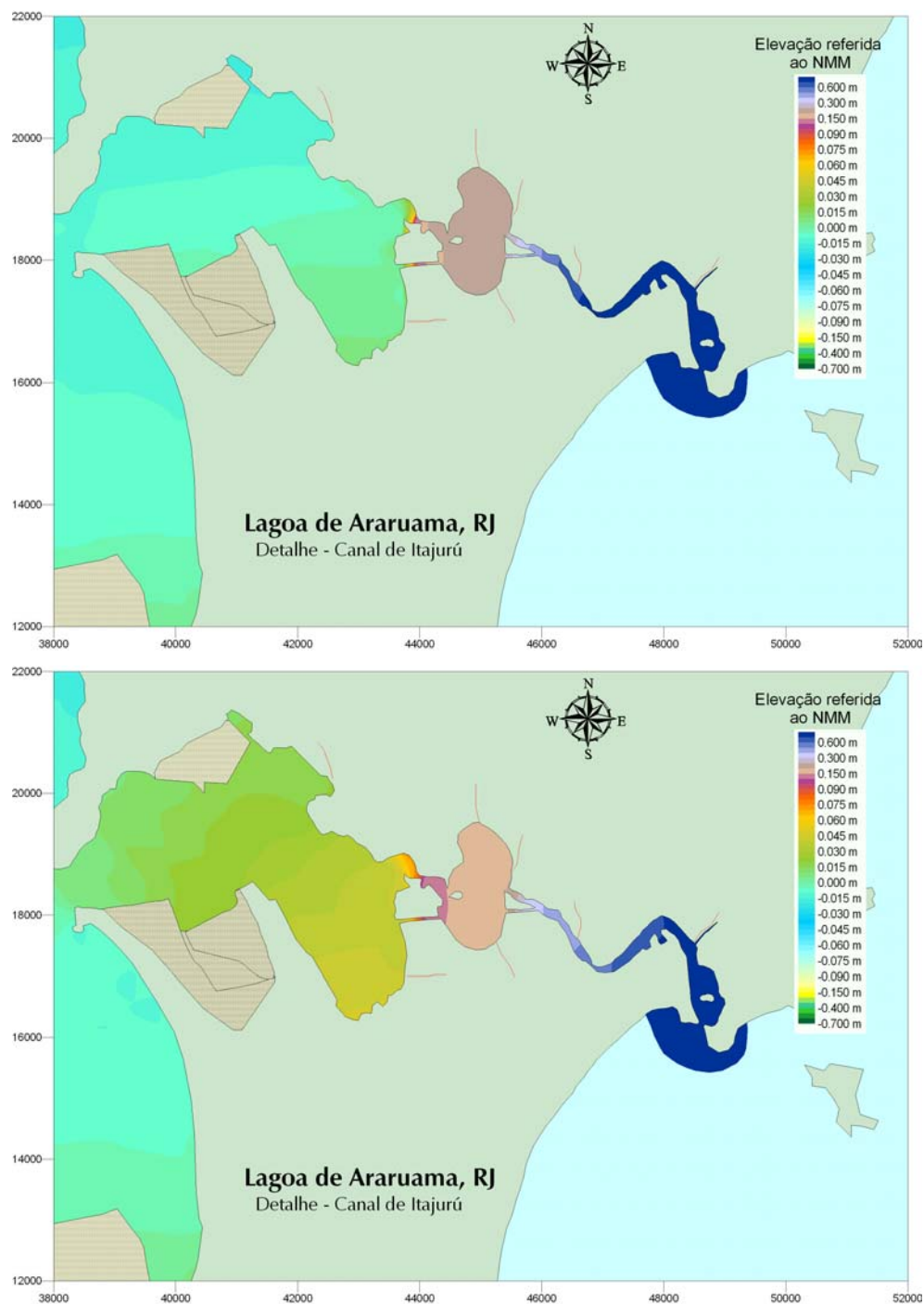


Figura 79 – Elevação da superfície livre em preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

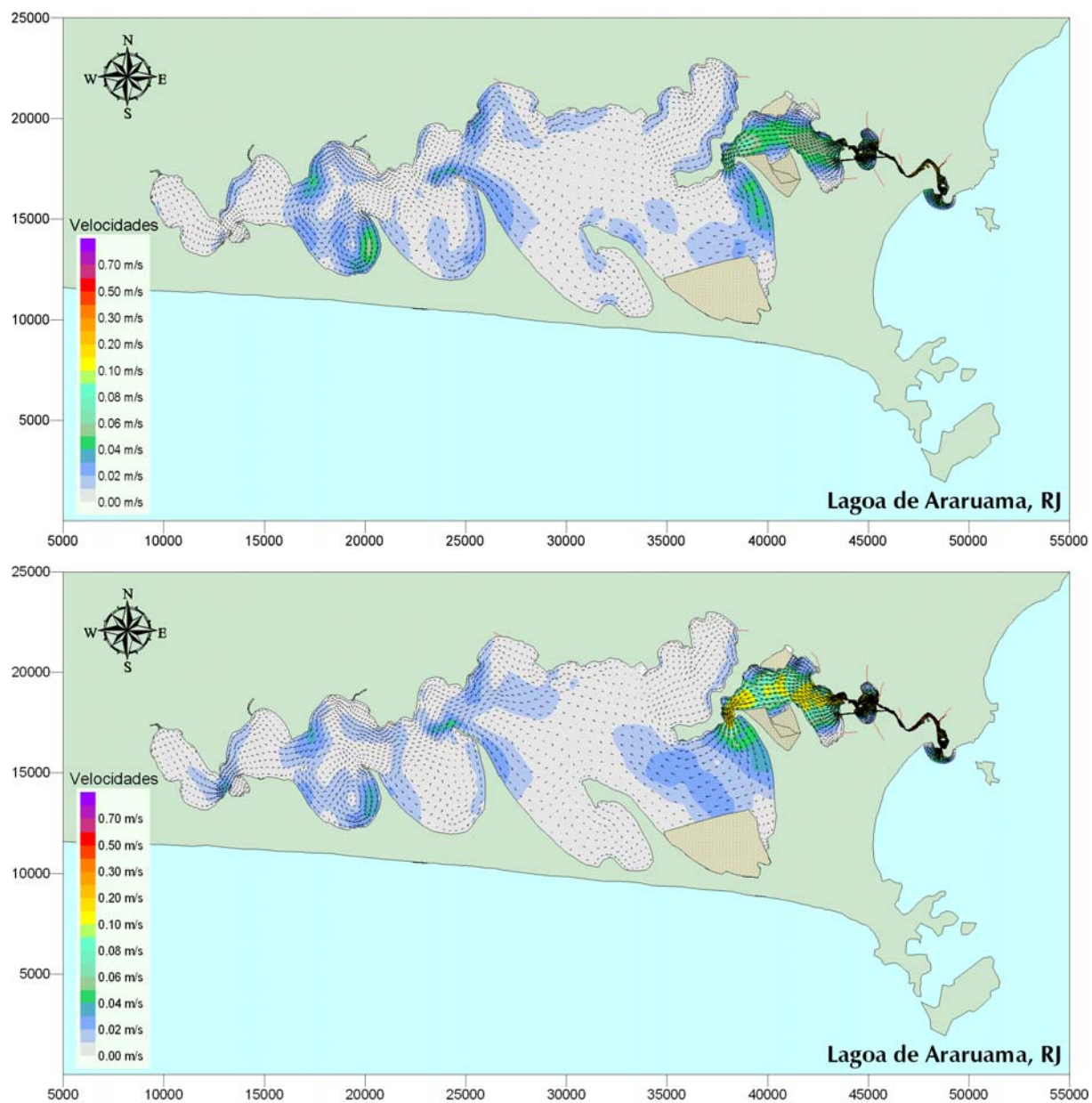


Figura 80 – Padrão de correntes com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

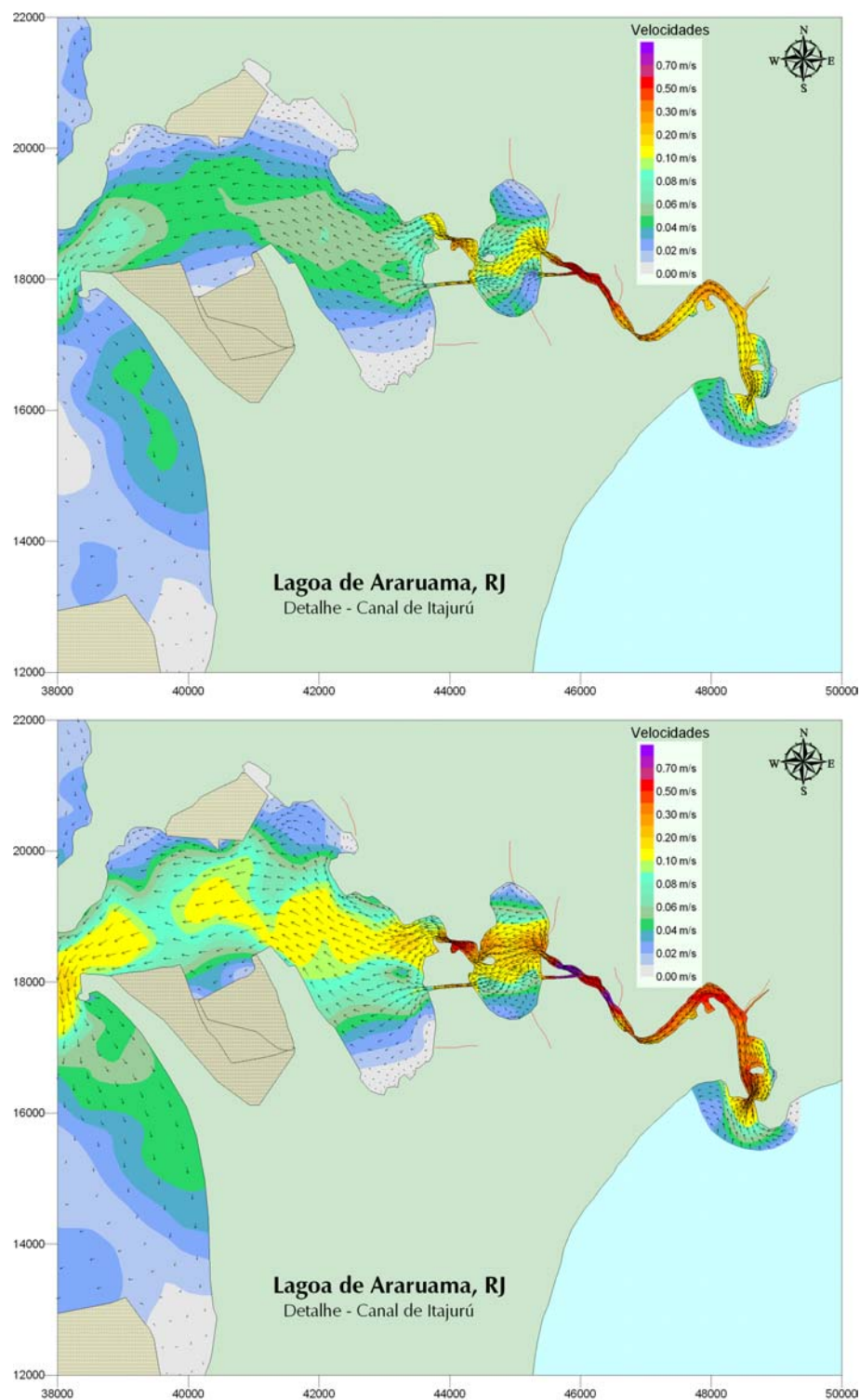


Figura 81 - Padrão de correntes com preamar na embocadura, conforme hora 25 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

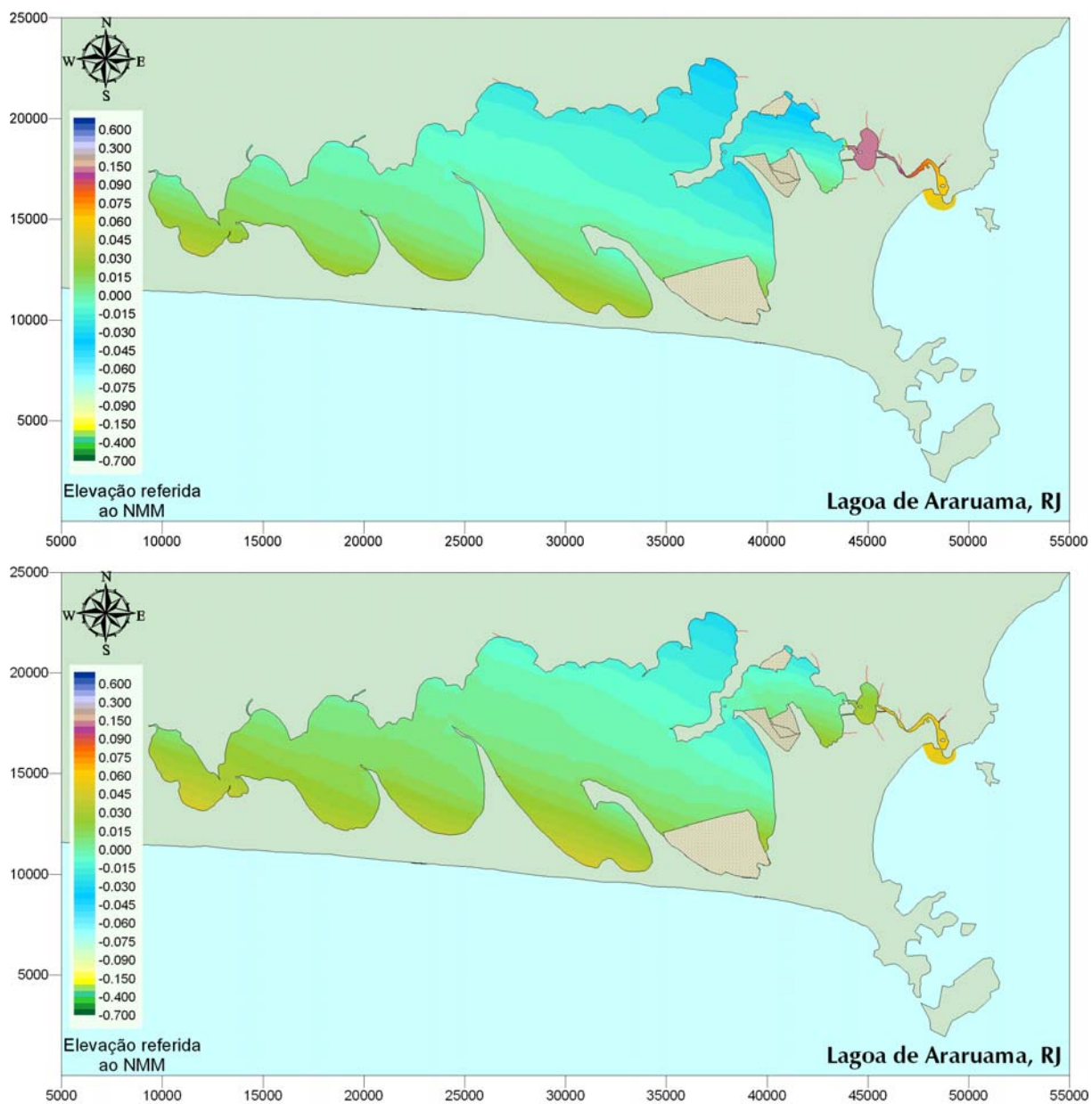


Figura 82 - Elevação da superfície livre em meia maré, 3h após a preamar na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Verifica-se um desnível significativo entre as extremidades oeste e leste da lagoa em decorrência dos fortes ventos de NE, com velocidades da ordem de 10 m/s, conforme Figura 17.

Na Lagoa das Palmeiras, verifica-se que o nível desceu mais rapidamente em função da desobstrução do canal de 3,0 m. Este efeito é melhor observado na Figura 83.

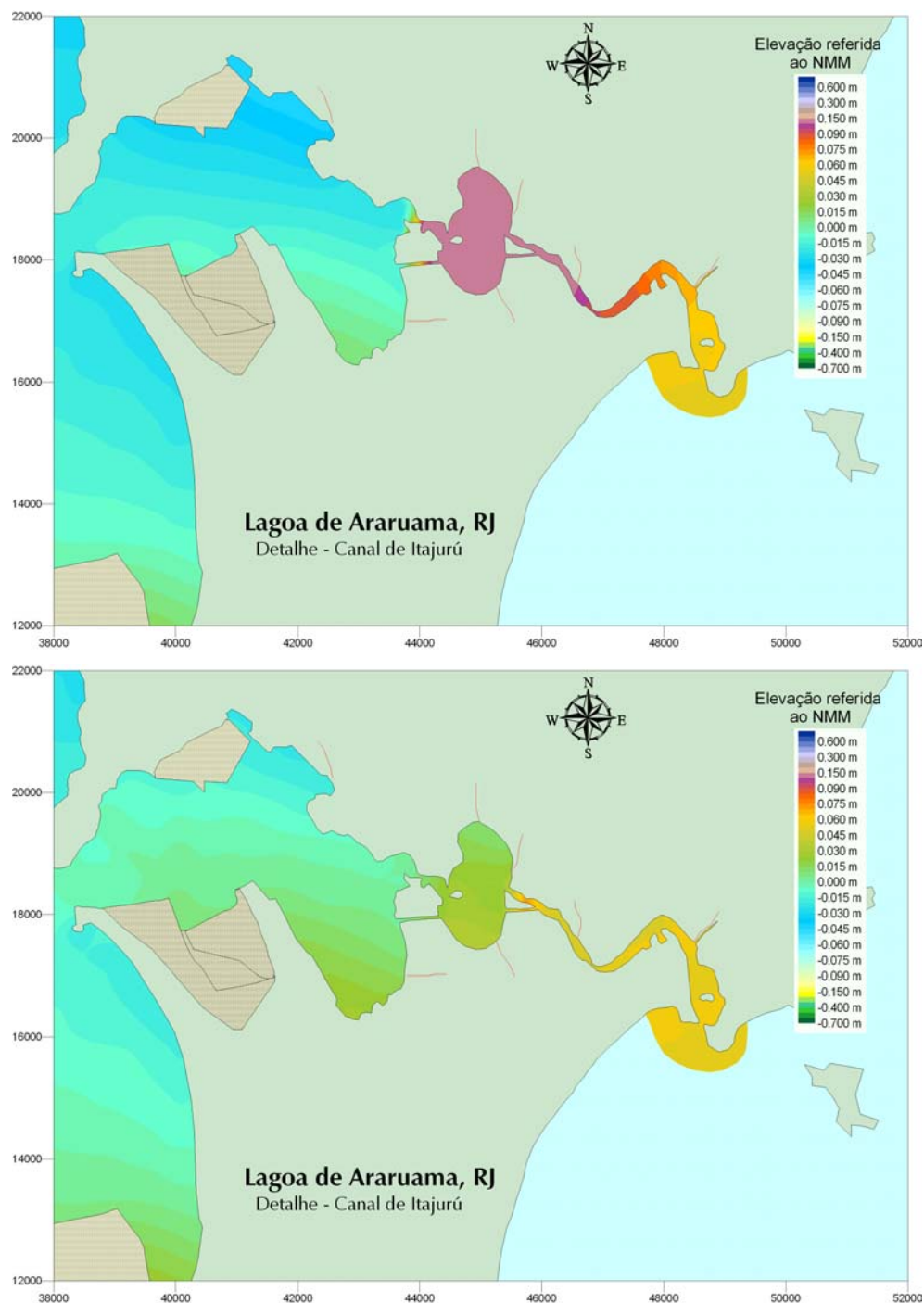


Figura 83 - Elevação da superfície livre em meia maré, 3h após a preamar na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e na inferior, com canal dragado de 3 m.

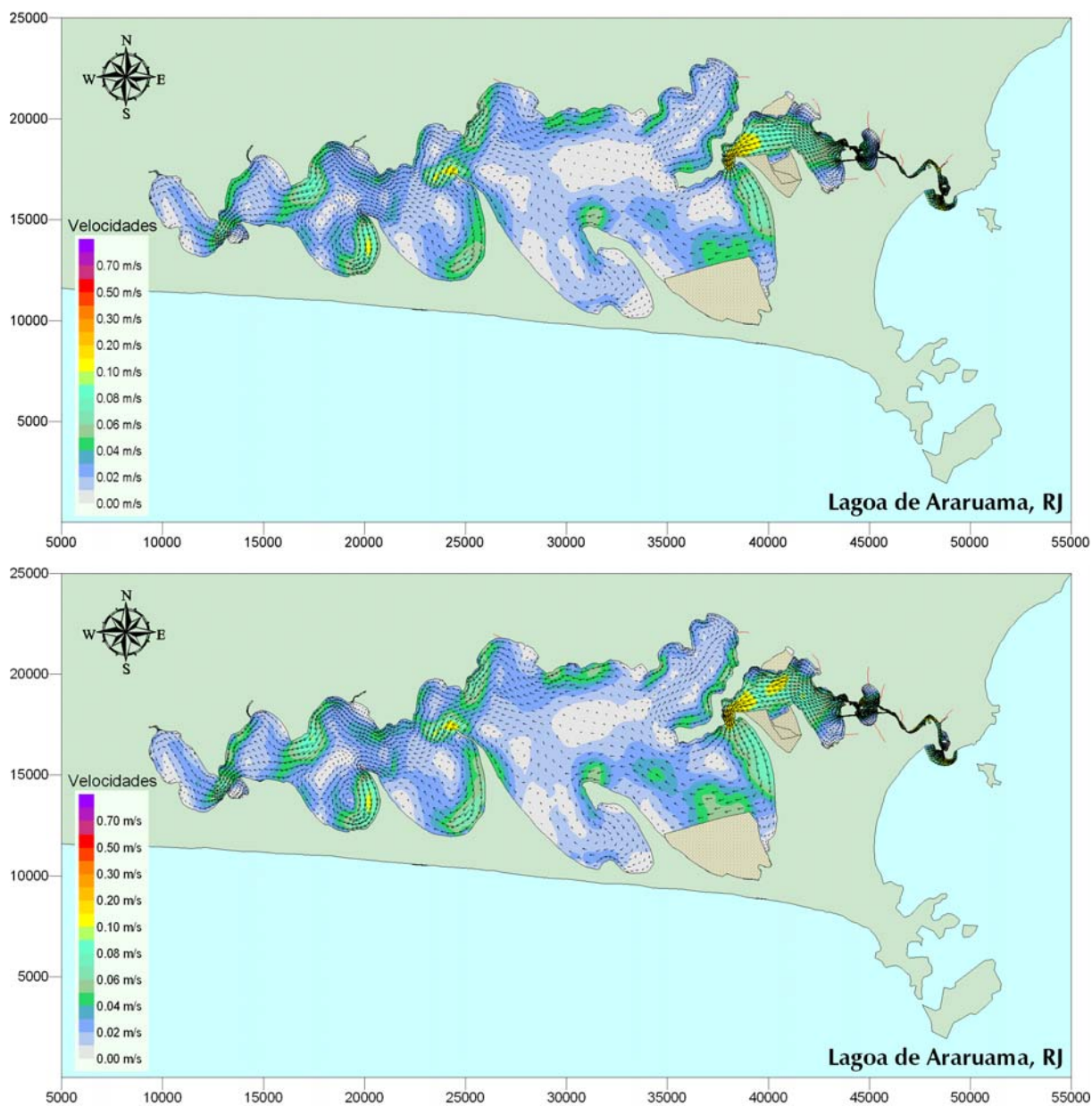


Figura 84 - Padrão de correntes em meia maré, 3h após a preamar na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Como a circulação hidrodinâmica no interior da lagoa é dominada pela ação dos ventos, são poucas as diferenças que se verificam nos padrões de correntes nas duas situações. Entretanto, na região do canal, mais sujeita à ação das marés, as diferenças de padrões de correntes após a dragagem do canal de 3,0 m são notáveis. Tais diferenças podem ser vistas na Figura 85. Nessa figura, nota-se que a inversão de correntes ocorre em meia maré, por se tratar de maré progressiva.

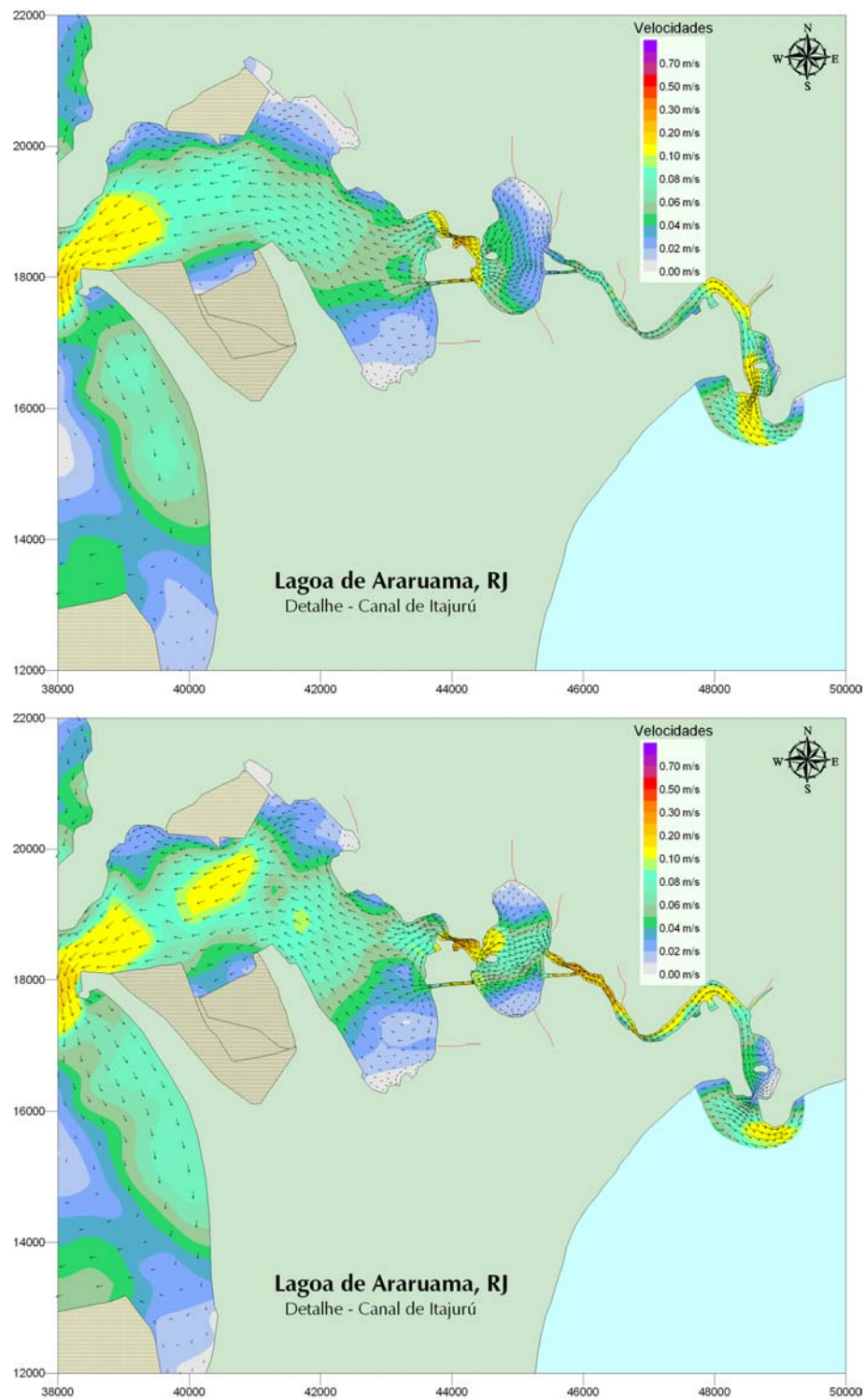


Figura 85 - Padrão de correntes em meia maré, 3h após a preamar na embocadura, conforme hora 28 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

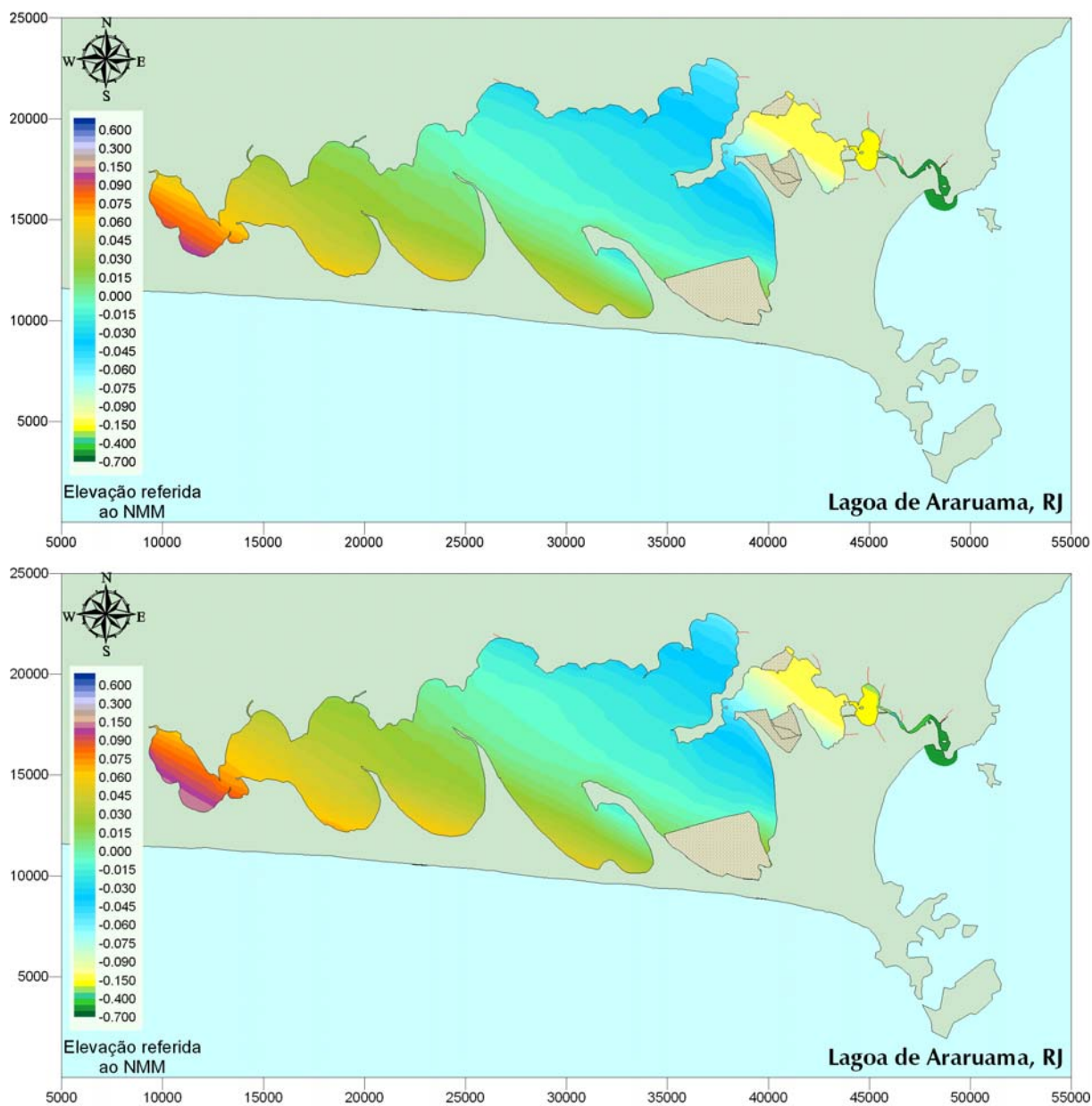


Figura 86 – Elevação da superfície livre em baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Verifica-se um grande desnível entre as extremidades oeste e leste da lagoa em decorrência dos fortes ventos de NE, com velocidades da ordem de 10 m/s. Os ventos nesta situação são por volta do meio dia do dia 05/01/96 ilustrados na Figura 17.

Na região enseada das Palmeiras, verifica-se a ocorrência de diferenças significativas nos níveis de água nas duas situações. Essas diferenças decorrem da desobstrução do canal para 3,0m, podendo ser vistas em destaque na Figura 87.

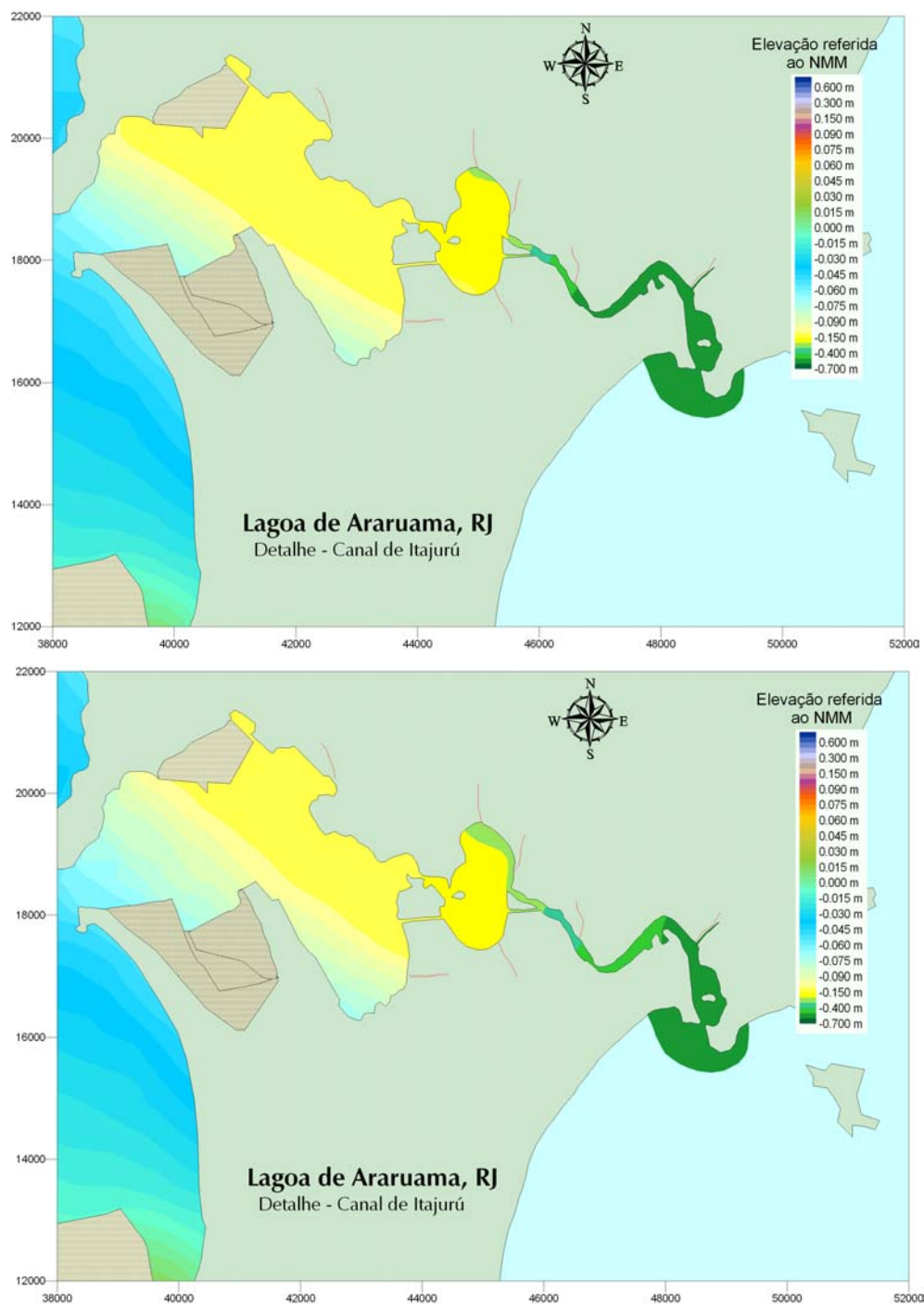


Figura 87 - Elevação da superfície livre em baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

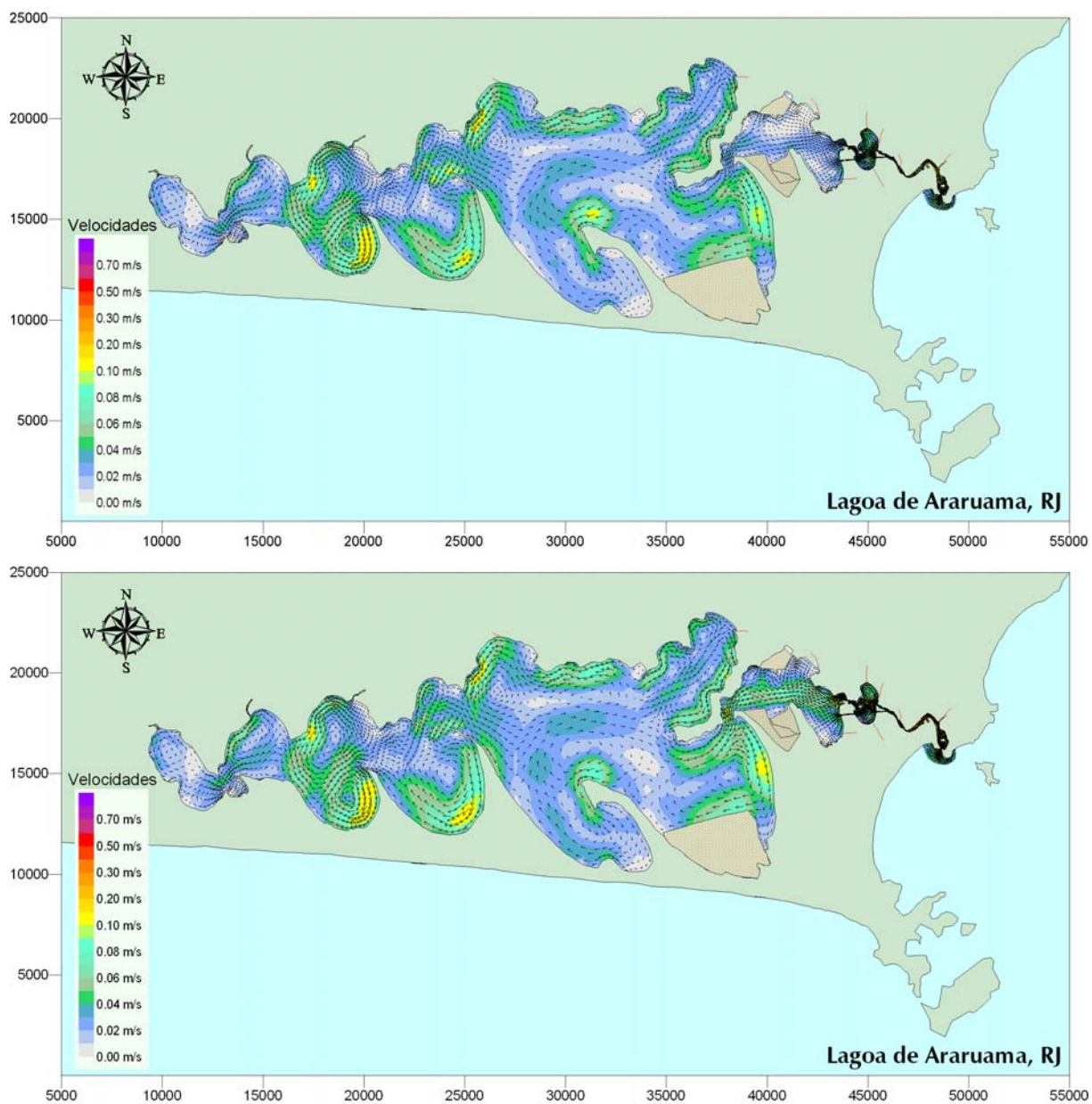


Figura 88 – Padrão de correntes em baixamar na embocadura, conforme. hora 31 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Como a circulação hidrodinâmica no interior da lagoa é dominada pela ação dos ventos, as diferenças nos padrões de correntes das duas situações são menos significativas. Entretanto, na região do canal, mais sujeita à ação das marés, as diferenças de padrões de correntes após a dragagem do canal de 3,0 m são notáveis. Tais diferenças podem ser vistas na Figura 89.

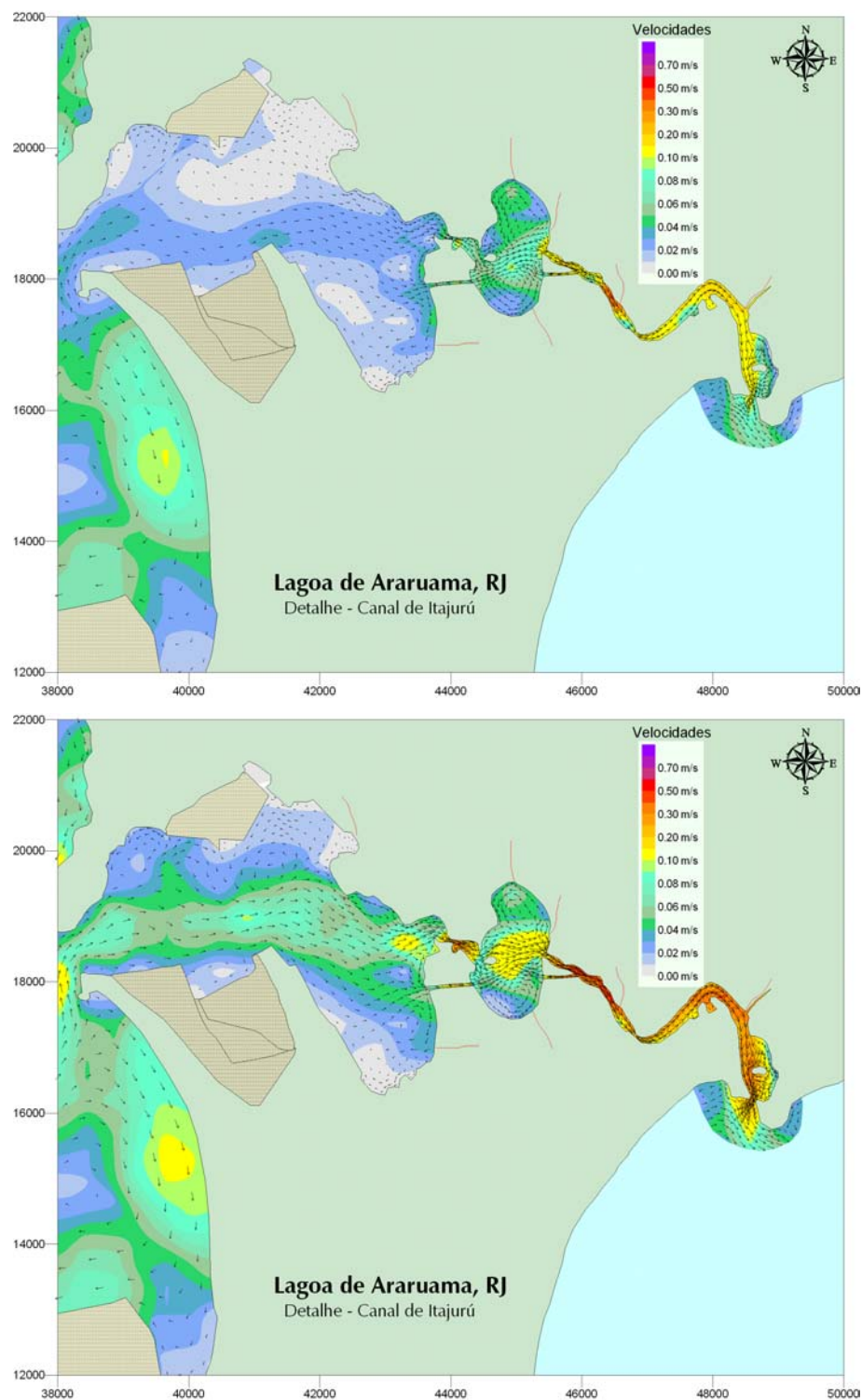


Figura 89 - Padrão de correntes em baixamar na embocadura, conforme hora 31 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

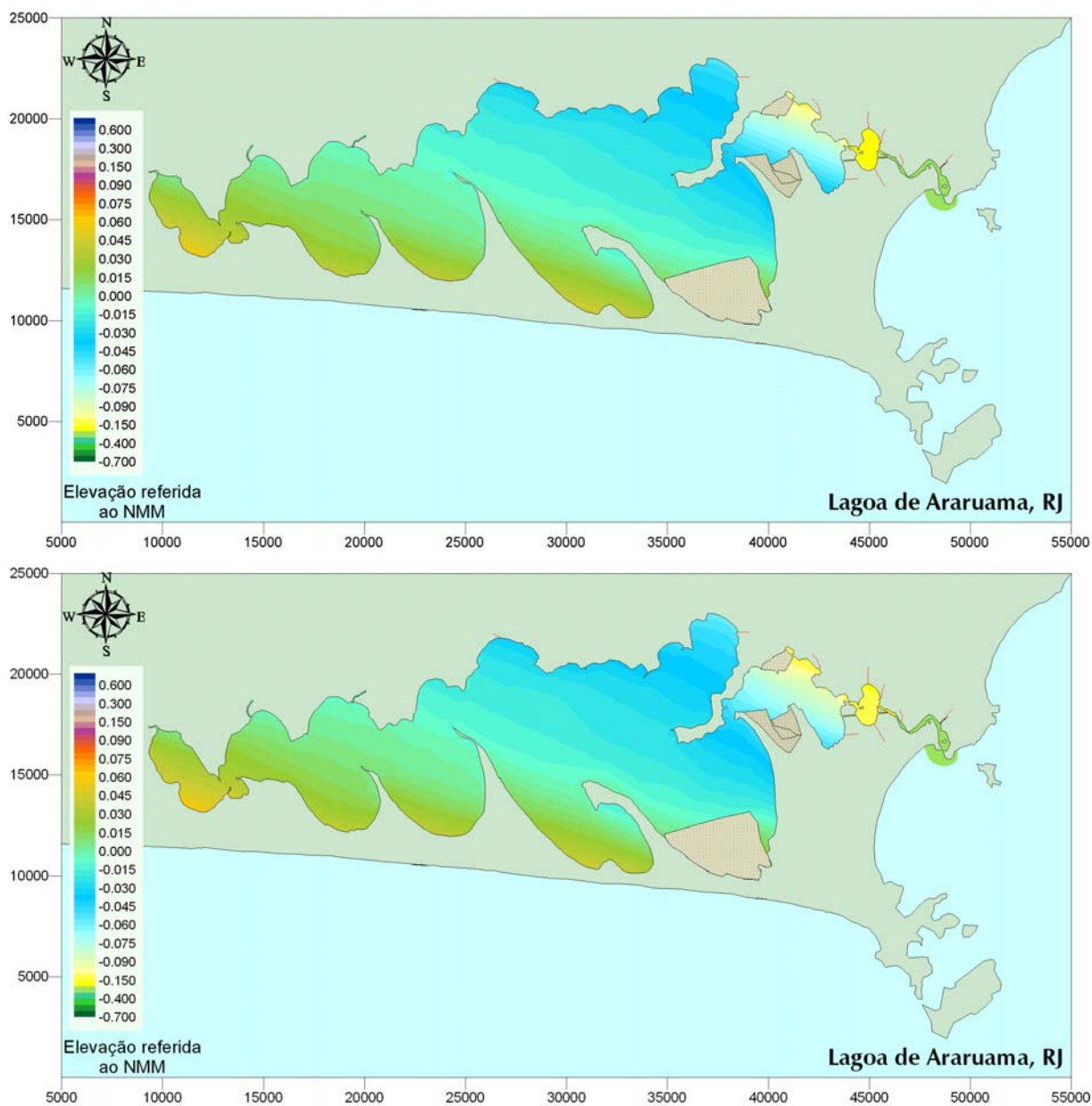


Figura 90– Elevação da superfície livre em meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Nota-se forte desnível entre as extremidades oeste e leste da lagoa em decorrência dos fortes ventos de NE, com velocidades da ordem de 10 m/s. Os ventos nesta situação são por volta do meio dia do dia 05/01/96 ilustrados na Figura 17.

Observa-se na região conhecida como enseada das Palmeiras, diferenças significativas nos níveis de água, em função da desobstrução feita pela dragagem de um canal de 3,0m. Tais diferenças são destacadas na Figura 91.

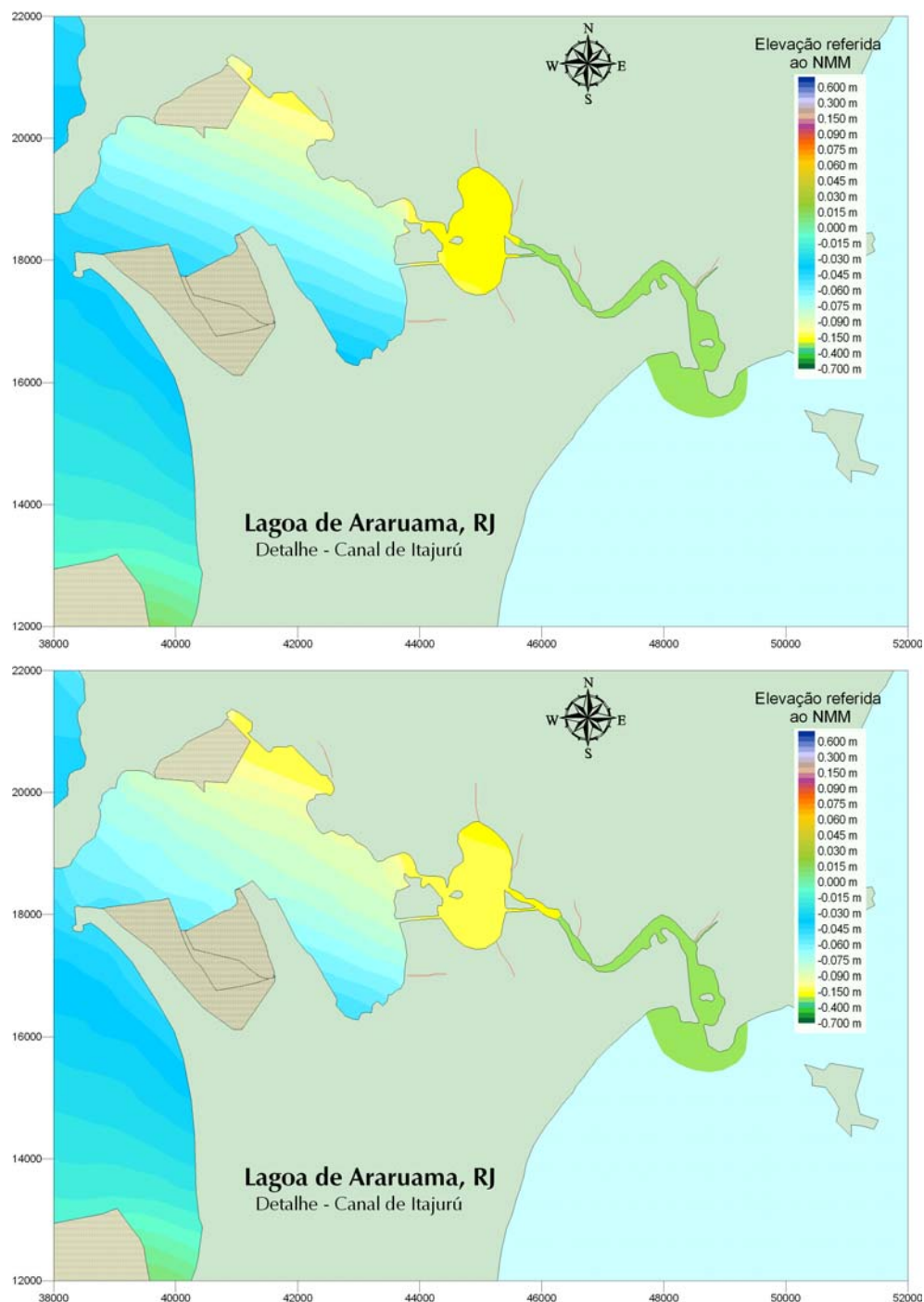


Figura 91 - Elevação da superfície livre em meia maré enchente na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; na estampa superior, resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado para 3 m.

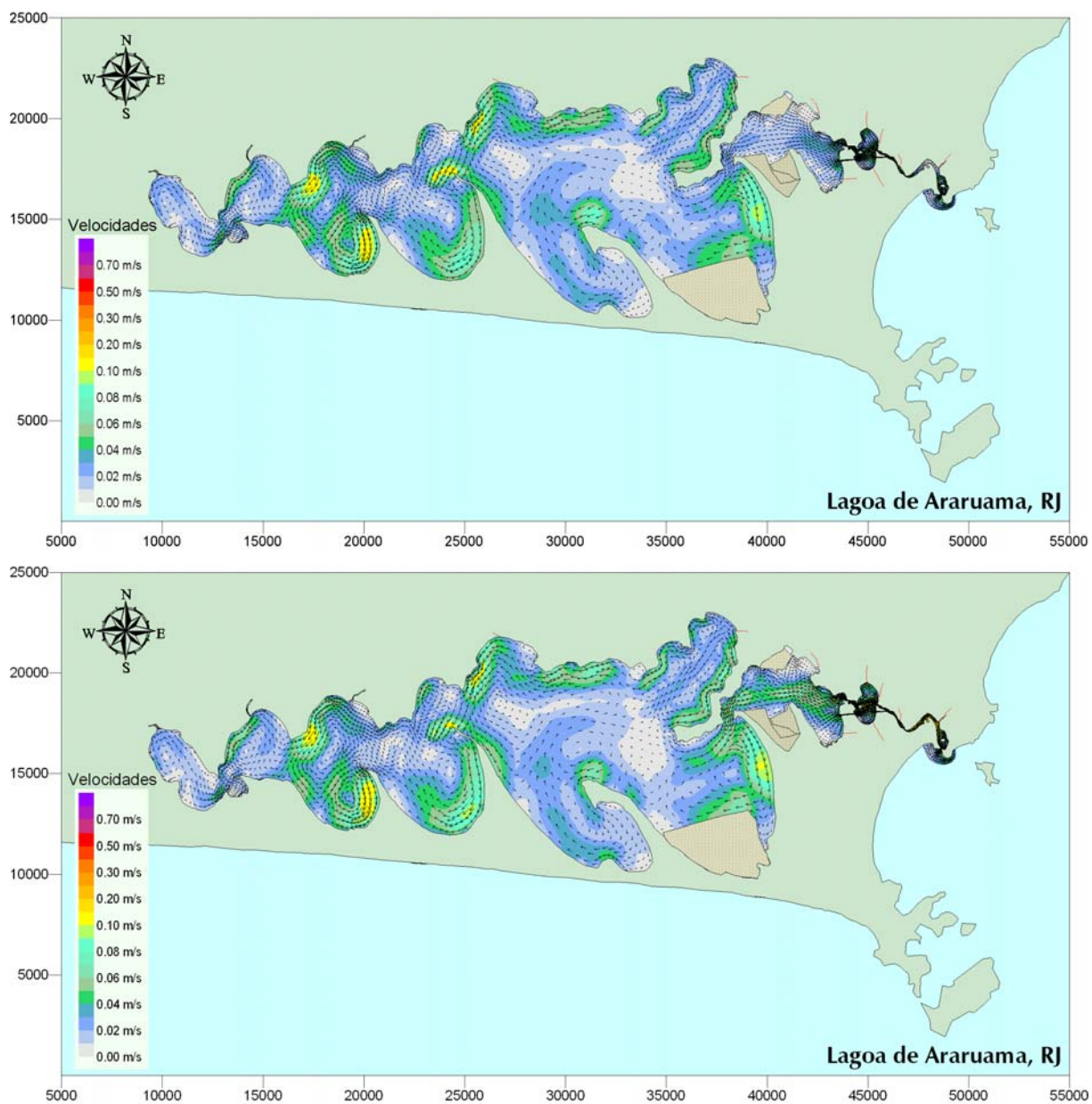


Figura 92 - Padrão de correntes em meia maré vazante na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; vista geral da lagoa: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Como a circulação hidrodinâmica no interior da lagoa é dominada pela ação dos ventos, as diferenças nos padrões de correntes das duas situações são menos significativas. Entretanto, na região do canal, mais sujeita à ação das marés, as diferenças de padrões de correntes após a dragagem do canal de 3,0 m são notáveis. Tais diferenças podem ser vistas na Figura 93.

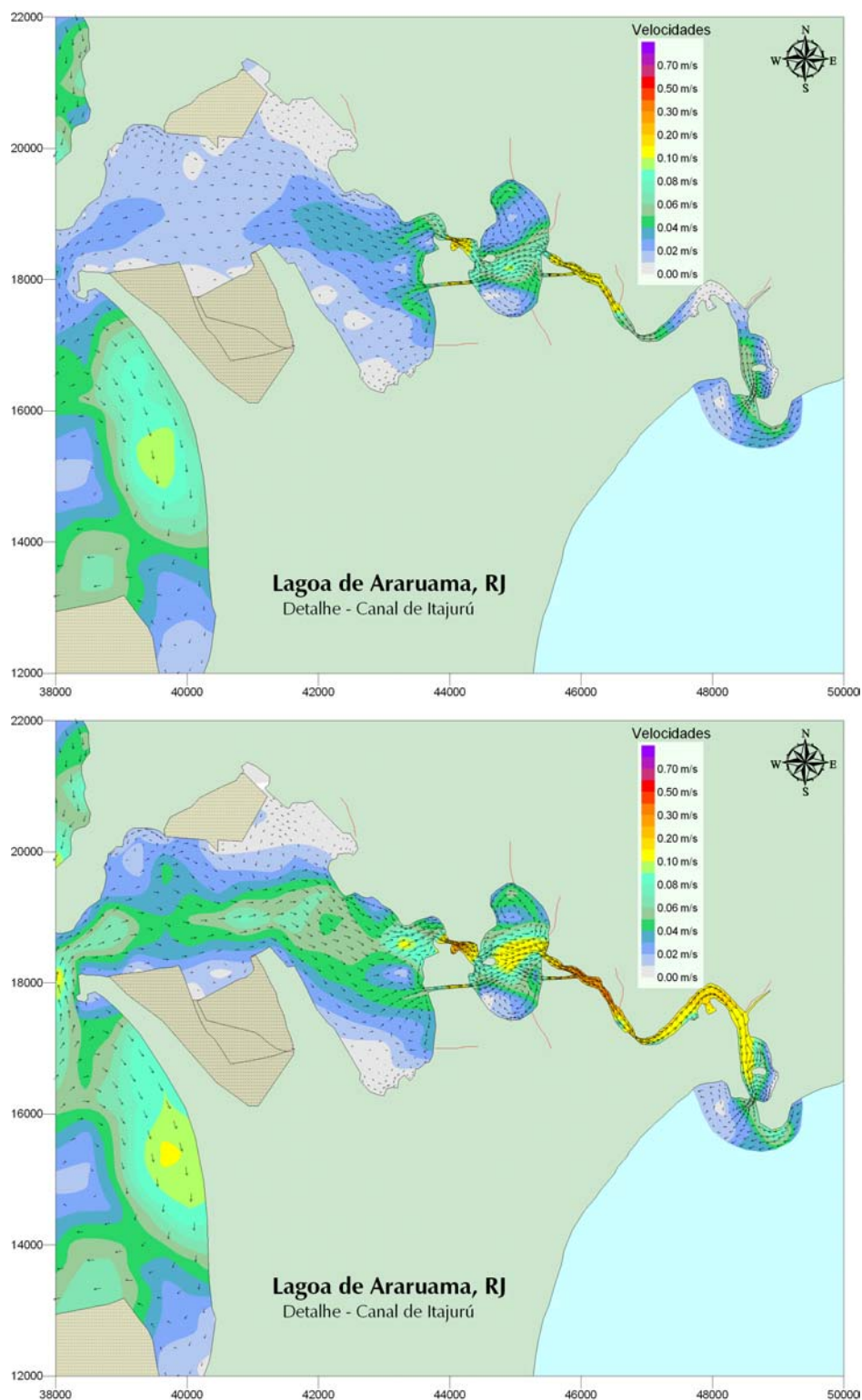


Figura 93 - Padrão de correntes em meia maré vazante na embocadura, conforme hora 34 na Figura 25; detalhe da região do canal: na estampa superior, o resultado com batimetria atual, e, na inferior, com canal dragado de 3 m.

Finalmente, antes de apresentar as conclusões e recomendações deste trabalho, faz-se necessário tecer algumas considerações sobre as diferenças encontradas entre os resultados das simulações efetuadas neste trabalho e os dados apresentados por Hansen (1993).

No item 4.7.1 deste trabalho, são apresentados os resultados obtidos pelo INPH, citados por Hansen (1993), que indicam as variações de níveis, supostamente pertinentes a marés de sizígia e quadratura, nos marégrafos M1, M2, M3, M4 e M5, ilustrados na Figura 19.

Com base nos resultados das simulações computacionais apresentadas nos Capítulos 5 e 6, foram detectadas inconsistências nos resultados citados por Hansen (1993). Os seguintes aspectos devem ser ressaltados:

- quanto ao marégrafo M1, em tal localidade, definitivamente, não ocorre variação de 12 cm apenas por efeitos de marés astronômicas; provavelmente, efeitos meteorológicos, como empilhamento por vento, estão inclusos nos valores apresentados;
- quanto aos marégrafos M2, M3 e M6, não é possível haver uma diferença de 30 cm entre os níveis registrados nos marégrafos M2 e M6 comparados aos do M3; é provável que haja erros de nivelamento entre os diferentes marégrafos.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo mais amplo desta pesquisa constituiu-se em avaliar o comportamento hidrodinâmico do sistema lagunar de Araruama. Mais especificamente, este trabalho contemplou a comparação do sistema na situação atual com o sistema em situação projetada, com enfoque na análise dos benefícios hidrodinâmicos, incluindo a circulação hidrodinâmica e troca de massas de água, decorrentes da dragagem do canal de ligação desse sistema com o mar.

Este estudo foi motivado, inicialmente, pelo projeto de “Desobstrução do Canal de Itajuru”, realizado pelo autor e pelo engenheiro Augusto César Cunha Muller (Cunha e Muller, 1997) e apresentado ao FECAM pela prefeitura de Cabo Frio em nome das demais prefeituras do entorno da lagoa.

Mais recentemente, houve a oportunidade de se realizar um aprofundamento do trabalho inicial, através de um ajustamento de conduta feito pela Companhia Nacional de Álcalis, resultando no trabalho realizado pela COPPE (COPPETEC, 2002), onde o autor foi parte integrante da equipe. Em paralelo, gerou-se a possibilidade do autor fazer uma reflexão científica sobre o tema, permitindo a elaboração da presente dissertação.

Os tópicos abordados exigiram levantar e consolidar várias plantas batimétricas a partir de diversas fontes, bem como dados ambientais diversos. Adicionalmente, foi necessária a obtenção de uma imagem de satélite, que possibilitou traçar o contorno do sistema lagunar e da zona costeira da região de entorno.

Destaca-se ainda que o presente estudo buscou apreender a integração do sistema lagunar de Araruama com as bacias hidrográficas contribuintes e zona costeira, dentro de uma visão de gestão estratégica ambiental. Nesse sentido, o referencial metodológico adotado incluiu o uso do modelo SisBahia e uma resenha histórica. Essa resenha procurou resgatar a evolução natural das lagoas costeiras e a evolução do sistema lagunar em estudo para propor alternativas para sua recuperação.

Sinteticamente, o estudo contemplou dois cenários. O primeiro foi estabelecido com a lagoa na situação atual, enquanto o segundo consistiu na proposição de uma dragagem de recuperação do canal de ligação com o mar. Procurou-se apresentar os benefícios que poderiam ser conseguidos com a intervenção em termos da circulação hidrodinâmica através da análise de velocidade de correntes e de variações de nível da água, além da troca de massas de água.

Feita essa breve retrospectiva, apresenta-se, a seguir, as conclusões e recomendações do presente trabalho.

6.3. CONCLUSÕES

A caracterização dos padrões gerais de circulação na lagoa permite análises futuras e um melhor entendimento da dinâmica do sistema. Em uma análise preliminar, para uma mesma condição de maré na embocadura e vazão de rios afluentes, merecem destaque, no que concerne aos padrões de circulação, as observações descritas a seguir.

Em situação de calmaria:

- praticamente não há variação de nível de água no interior da lagoa durante o ciclo da maré;
- a lagoa permanece praticamente estagnada na sua maior parte; é verificado que as marés causam uma dinâmica significativa apenas entre as regiões da embocadura do canal de Itajuru e da península de São Pedro da Aldeia, fato que pode ser visto em detalhes nas Figuras 31, 34, 37 e 40.

Sob ação de ventos usuais de NE:

- devido à ação dos ventos de NE, é verificada a subida de nível a SO da lagoa em decorrência de empilhamento de água, tendo, conseqüentemente, um abaixamento de nível a NE; tais desníveis podem chegar a mais de 0,2m; vale ressaltar que, apesar das diferenças de níveis causadas pelo vento, praticamente não há variação de nível de água no centro da lagoa decorrente da ação das marés;

- ainda devido à ação dos ventos de NE, a lagoa ganha significativa circulação hidrodinâmica em contraste com a estagnação na situação de calmaria; é possível verificar que a circulação entre a extremidade oeste da lagoa e a península de São Pedro da Aldeia é dominada pela ação dos ventos; em contrapartida, da península de São Pedro da Aldeia até a embocadura do canal de Itajuru, a circulação torna-se dominada crescentemente pela ação das marés, como detalhado nas Figuras 47, 50, 53 e 56; na região da Lagoa das Palmeiras, verifica-se que as diferenças de nível e a magnitude e direção das correntes afetadas pelo vento de NE são pouco significantes em relação às causadas pela ação das marés;
- na circulação causada pelos ventos de NE, ocorrem grandes vórtices girando no sentido horário na área sul da lagoa, e no sentido anti-horário na área norte; é notável a constância dos padrões gerais de tais vórtices ao longo do ciclo de maré, o que indica a plena predominância dos ventos em sua dinâmica.

Sob ação de ventos de frente fria de SO:

- é verificada significativa diferença no nível da água entre as extremidades leste e oeste; ao contrário dos ventos NE e em resposta à ação dos ventos SO, o empilhamento de água e conseqüente subida de nível ocorre na região NE da lagoa e o conseqüente abaixamento de níveis na região SO; mesmo com as diferenças de níveis causadas pelo vento, praticamente não há variação de nível de água no centro da lagoa decorrente da ação das marés;
- sob ação dos ventos de SO, a lagoa ganha significativa circulação hidrodinâmica, diferentemente da estagnação verificada na situação de calmaria; como no caso dos ventos de NE, verifica-se claramente que a circulação entre a extremidade oeste e a península de São Pedro da Aldeia é amplamente dominada pela ação dos ventos; em contrapartida, indo da península de São Pedro da Aldeia para a embocadura do canal de Itajuru, nota-se que a circulação vai tornando-se crescentemente dominada pela ação das marés, conforme é verificado em detalhes nas Figuras 60, 63, 66 e 69; principalmente na Lagoa das Palmeiras, as diferenças de nível, a magnitude e a direção das correntes afetadas pelo vento de SO são pouco significativas em relação às causadas pela ação das marés;

- ao contrário do que ocorre com ventos de NE, a circulação causada pelos ventos de SO na Lagoa de Araruama gera grandes vórtices girando no sentido anti-horário na área sul, e no sentido horário na área norte; é notável a constância dos padrões gerais de tais vórtices ao longo do ciclo de maré, indicando a plena dominância dos ventos na sua dinâmica.

Concernente aos efeitos da dragagem, mantendo-se um canal com largura variável, com profundidade mínima de 3,0 m entre a península de São Pedro da Aldeia e a embocadura do canal de Itajuru, ressalta-se:

- o efeito da dragagem na variação dos níveis de maré no corpo principal da lagoa seria muito pequeno, conforme pode-se observar nas Figuras 75 e 76;
- entretanto, especialmente pelos resultados apresentados na Figura 75, verifica-se que os níveis no meio da lagoa passariam a apresentar uma amplitude um pouco maior; em compensação, ocorre uma ligeira diminuição nas amplitudes da Lagoa das Palmeiras, porque, com a dragagem, um volume de água consideravelmente maior passa a fluir da Lagoa das Palmeiras para o corpo principal da lagoa; como a área do espelho de água do corpo principal da lagoa é muito grande, mesmo um pequeno aumento na amplitude nos níveis representa um enorme volume de água, oriundo dos fluxos nas marés enchentes e vazantes.

6.4. RECOMENDAÇÕES

No texto que segue, abordam-se recomendações diretamente relacionadas com o trabalho desenvolvido e destacam-se temas que, na visão do autor, devem ser aprofundados a partir de uma visão hídrica e ambiental.

Inicialmente, é recomendável fazer campanhas de campo para calibrar e validar os modelos desenvolvidos e apresentados neste trabalho. A potencialidade da utilização de modelos efetivamente se materializa quando estão calibrados. Modelos calibrados são ferramentas importantes à gestão e ao gerenciamento de sistemas ambientais como a Lagoa

de Araruama, pois permitem integrar informações, estendendo o conhecimento para regiões nas quais não há medições.

É importante fazer outras simulações para testar novas soluções em busca da recuperação do corpo lagunar. Como exemplo, poderia ser testado a abertura de um outro canal. Esse canal poderia ser fechado com diâmetro de tubulação da ordem de 1 metro a 2 metros. Essa alternativa não implicaria custos elevados e auxiliaria o canal de Itajuru na circulação e renovação das águas da lagoa.

Seria interessante, ainda, que essa abertura fosse na enseada de Figueira (Figura 8), onde antigamente o mar, às vezes, rompia a restinga. A importância de conhecer o histórico da região é que as soluções que viessem a ser propostas permitiriam resgatar o funcionamento anterior do sistema em estudo. O impacto que viesse ser produzido seria mínimo, tendo em vista que não seria fornecida uma solução nova, mas, sim, restabelecida uma situação que anteriormente existia. Por essa razão, a primeira proposta desse trabalho foi no sentido de avaliar a circulação hidrodinâmica através do estabelecimento de um canal com 4 metros de profundidade. No entanto, essa alternativa não se mostrou viável tendo em vista o estreitamento das margens. Ressalta-se que, mesmo para a dragagem proposta nesta dissertação, são indispensáveis estudos que avaliem a necessidade de obras de contenção.

É conveniente lembrar que o interior da lagoa precisa ser recuperado, sendo restabelecida a profundidade, para que a variação de maré atinja também o município de Araruama, como na década de 40. A retirada de conchas poderia ser de grande auxílio nesse aspecto, desde que seja orientada para manter a profundidade da lagoa.

No contexto de gestão hídrica e ambiental, é necessário um planejamento geral da Lagoa de Araruama e das bacias hidrográficas contribuintes, identificando as ocorrências e gerenciando soluções abrangentes. Destaca-se que, no caso da Lagoa de Araruama, a bacia da Lagoa de Juturnaíba pode ser considerada como contribuinte também, devido à retirada

de suas águas para abastecimento da região e do lançamento dessas na forma de esgoto e efluentes.

Os problemas antrópicos mais comuns observados no sistema lagunar são:

- ocupação desordenada, aliada a aterro e construções irregulares;
- extração de conchas sem controle;
- lançamento de resíduos provenientes da lavagem das conchas sem controle;
- falta de tratamento de esgoto;
- contaminação do lençol freático pelo esgoto, aterros sanitários e lixo;
- lançamento de água doce;
- contaminação das águas subterrâneas;
- falta de plano diretor de toda bacia;
- falta de recuperação ambiental;
- extração ilegal de areia de fixação de dunas;
- pesca predatória;
- falta de circulação de água salgada, devido, em especial, a assoreamentos, aterros e dragagens sem planejamento, que levaram ao impedimento do antigo regime de marés.

A busca de soluções apropriadas necessita de um gerenciamento que avalie os impactos e oriente as ações. Como salientado anteriormente, é importante fazer um plano para toda a área, incluindo o gerenciamento costeiro, visando harmonizar e organizar o uso da costa brasileira com suas vocações naturais. A implementação do programa de monitoramento levará, provavelmente, à instalação de um centro que coordene, processe e controle as atividades acima descritas.

As obras de engenharia de proteção, dragagem, acostagem, drenagem, saneamento e aterros no entorno da lagoa, no canal de acesso, nas áreas próximas aos rios e canais e nas bacias correspondentes deverão estar dentro do planejamento da gestão ambiental, inclusive para proteção contra futuras inundações. No interior da lagoa e no canal de acesso, deveriam ser incentivados o turismo, o lazer, os esportes náuticos e as marinas, mas sempre observando a ordenação e preservação do corpo hídrico.

Finalmente, espera-se que esta tese contribua para o desenvolvimento integrado e sustentável da região que envolve o sistema lagunar de Araruama

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M. B. & Basco, D. R. – “Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers”, Logan Group, UK Limited, 1989.
- AD-RIO, Agência de Desenvolvimento Econômico do Estado do Rio de Janeiro - “Plano Indutor de Investimentos Turísticos - Região dos Lagos, Rio de Janeiro” - Síntese, 1989.
- Almeida, J. Ribeiro; Orsolon, Ana; Medeiros, Ary; Marcondes, Dalton; Amaral, Francisco do; Pereira, Sonia R. B.; Marques, Telma - “Planejamento Ambiental” – Thex Editora Ltda, 1993.
- Amador, E. da S. - “Lagunas Fluminenses: Classificação com base na origem, idade e processos de evolução” - Academia Brasileira de Ciência, 1986.
- André, D.L. et al. - “Estudo preliminar sobre as condições hidrológicas da Lagoa de Araruama, Rio de Janeiro” – Instituto de Pesquisa Marítima, 1981.
- Anônimo – “Memória Histórica da Cidade de Cabo Frio e de todo o seu distrito compreendido no termo de sua jurisdição – Ano de 1797” - Rev. IHGB, vol 66, tomo 46, Parte I, 1883.
- Barbieri, E. B. – “Ritmo Climático e Extração de Sal em Cabo Frio” - São Paulo, Dissertação de Mestrado, USP, Departamento de Geografia, 1974. Publicado na Revista Brasileira de Geografia, 1975.
- Barbieri, E.B. – “Condições Climáticas Dominantes na Porção Oriental da Lagoa de Araruama (RJ) e suas Implicações na Diversidade do Teor de Salinidade” - Caderno de Ciências da Terra nº 59:35, São Paulo, USP, 1985.
- Barbosa, R.L. – “Perfil Analítico do Sal” - Brasília, Ministério das Minas e Energia, DNPM (Boletim 21), 1973.
- Barroso, L.V. e Bernardes, M.C. – “Um patrimônio natural ameaçado: poluição, invasões e turismo sem controle ameaçam lagoas fluminenses” - Ciência Hoje, 1995.
- Barroso, L.V. – “Diagnóstico Ambiental da Lagoa de Araruama – RJ” - Boletim FBCN, 1987.
- Beranger, A. E. – “Dados Históricos de Cabo Frio” - Rio de Janeiro, Ed. Borsoi, 1962.

- Castro, D.N.N. – “A situação atual do sistema lagunar de Araruama” - Rio de Janeiro, SERLA, sem data.
- Castro, D. M. M. e Santos, M.S. – “Extração de Conchas Calcárias na Lagoa de Araruama, Relatório Preliminar” - Rio de Janeiro, SERLA/DOC/DR-2, 1987.
- Castro, D.M.M. e Santos, M.S. – “Proposta para a recuperação da Faixa Marginal de Proteção das Lagoas de Araruama e Saquarema” - Rio de Janeiro, SERLA, 1988.
- Castro, D.M.M. – “Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas – A Experiência da Região dos Lagos – RJ” - Anais do I Encontro Brasileiro de Ciências Ambientais Coordenação de Programas de Pós-graduação de engenharia - COPPE/UFRJ. RJ, 1994.
- Castro, D.M.M. – “Gestão Ambiental: Aspectos Técnicos-Científicos e Político-Institucionais: Caso Região dos Lagos - Rio de Janeiro”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, 1995.
- CENTRAB – “Programa de Monitoramento da Lagoa de Araruama” - Arraial do Cabo, RJ. Diversos Relatórios entre 1998 e 2.001.
- CENTRAB - “Avaliação do Relatório de Impacto Ambiental do Projeto Perynas” - Arraial do Cabo, 1994.
- CIDE - Centro de Informações de Dados do Rio de Janeiro
- CNA – “Manual de Informações da Companhia Nacional de Álcalis” - Arraial do Cabo, sem data.
- CNA - Companhia Nacional de Álcalis - “Estudo de Impacto Ambiental, Extração de Calcário Conchífero na Lagoa de Araruama” - Rio de Janeiro, E.M.S – Empresa de Mineração e Serviços, 1992.
- CNA - Companhia Nacional de Álcalis - “Relatório de Complementação das Informações do EIA /RIMA, Extração de Calcário Conchífero na Lagoa de Araruama, Operação com Dredge de Corte e Sucção” - Rio de Janeiro, Contecom, 1994.
- Coe Neto, R. - “Algumas Considerações sobre a Origem do Sistema Lagunar de Araruama” - Niterói, CEUFF, 1984.
- Coimbra, Mônica M. – “Evolução E Dinâmica Dos Esporões Da Lagoa De Araruama” – Dissertação de Mestrado Depto Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

- Coimbra, M.M. e Argento, M. S. F. - “Perspectivas do Tratamento Digital para Delimitação de Esporões Lagunares” - Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, UFRJ. Simpósio de Geografia Física Aplicada, Nova Friburgo, 1989.
- CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA DOS LAGOS S.A. - “Estudo de Impacto Ambiental da Ampliação da Rodovia RJ – 124 e da Variante a RJ 106” - Rio de Janeiro, Kohan – Saagoyen Consultoria e Sistemas, 1997.
- Coutinho, R., Baeta-Neves, M.H.C., Romano, R.C., Figueiredo, F.S, Vianna, D., Martins, S.S. e Pessanha, S.M.G. – “Programa de Monitoramento ambiental da Lagoa de Araruama” - II Encontro de Monitoramento Ambiental do IEAPM, Arraial do Cabo, RJ, 1998.
- Coutinho, S.M. – “Lagoa de Araruama: uma trajetória de exploração” - Rio de Janeiro, Fiocruz, Escola Nacional de Saúde Pública, 1990.
- Coutinho, R. – “Situação atual do ecossistema lagunar de Araruama” - Trabalho apresentado no I Seminário sobre fluxo migratório do camarão na Lagoa de Araruama - Cabo Frio, RJ, 1994.
- Coutinho, R. et al. – “Araruama: uma lagoa ameaçada” - Ciência Hoje, 1999.
- Cunha, Antonio Carlos B. – “Análise Da Evolução Sócio-Econômica Dos Municípios Da Região Das Baixadas Litorâneas” – matéria: Economia e Planejamento Regional e Urbano, Professor Henrique Fonseca Netto, 2000.
- Cunha, Antonio Carlos B. – “Planejamento e gestão ambiental da Lagoa de Araruama e bacias hidrográficas contribuintes com o auxílio do Sensoriamento Remoto” – matéria: Sensoriamento Remoto, Professor Otto Corrêa Rotunno Filho, 1999.
- Cunha, Antonio Carlos B. e Muller, Augusto César Cunha – “Desobstrução do Canal de Itajuru” – 10ª Agência Regional da SERLA, 1997.
- DNPM – “A Indústria de Álcalis no Brasil: Projeto de Cabo Frio” - Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, Laboratório de Produção Mineral (Boletim 28), 1947.
- FEEMA – “Condições Ambientais na Bacia da Laguna de Araruama - Relatório Parcial” - Rio de Janeiro, 1984.
- FUNDAÇÃO COPPETEC - “Modelagem da Lagoa de Araruama, RJ” - Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2.001.

- Hansen, C.M. – “Metodologia de Engenharia Oceânica Aplicada à Lagoa de Araruama” - Rio de Janeiro, dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1993.
- Hanssen, G. – “Cabo Frio: dos Tamoios a Álcalis” - Ed. Achimé, 1988.
- IBGE, 1999.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Modelo matemático da Lagoa de Araruama: Coleta e Análise Preliminar dos Dados Existentes” - Rio de Janeiro, 1982.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Nivelamento da Rede Maregráfica Implantada na Lagoa de Araruama” - Rio de Janeiro, 1987.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Metodologia para as medições Hidráulico-Sedimentológicas na Lagoa de Araruama” - Rio de Janeiro, 1986.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Primeira Campanha de Medições Hidráulico-Sedimentológicas na Lagoa de Araruama. RJ. Campanha de Verão” - Rio de Janeiro, 1987.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Segunda Campanha de Medições Hidráulico-Sedimentológicas na Lagoa de Araruama. RJ. Campanha de Verão” - Rio de Janeiro, 1988.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Terceira Campanha de Medições Hidráulico-Sedimentológicas na Lagoa de Araruama. RJ. Campanha de Verão” - Rio de Janeiro, 1988.
- INPH, Instituto de Pesquisas Hidroviárias - “Estudo Granulométrico dos Sedimentos do Fundo da Lagoa de Araruama” - Rio de Janeiro, 1988.
- EIA RIMA da Companhia Nacional de Álcalis, 1985.
- EIA RIMA do Aeroporto de Cabo Frio, 1998;
- Júnior, Dirceu S. R.; Figueroa Fernán E. V.; Neves, Cláudio F. – “Dimensionamento De Um Canal Artificial Estável Para A Lagoa De Araruama” - XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH vol.4 – pg 333 a 339, 1995.
- Kjerfve, B., Schettini, C.A.F., Knoppers, B. e Ferreira, H.O. – “Salt balance in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil” - 12th Biennial International Estuarine Research Conference, Hilton Head Island, SC, 1993.

- Kjerfve, B. e Schettini, C.A.F. - "Water and salt balance in a hypersaline coastal lagoon" - Proceeding of a Symposium on Perspectives for Environmental Geochemistry in Tropical Countries. Universidade Federal Fluminense, 1994.
- Kjerfve, B. e Oliveira, A. - "Modeling of water and salt transports in a hypersaline coastal lagoon in Brazil" - Estuarine Research Federation 13th Biennial International Conference, Estuaries: Bridges from Watersheds to Coastal Seas, 1995.
- Kjerfve, B., Schettini, C.A., Knoppers, B., Lessa, G., Ferreira, H.O. - "Hydrology and salt balance in a large hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil" - Estuarine Coastal and Shelf Science, 1996.
- Lamago, A. - "Ciclo Evolutivo das Lagunas Fluminenses" - Boletim Geográfico, 1938.
- Marinha do Brasil - "Relatório de Consolidação de Dados Meteorológicos" - período de 1976 a 1997, 1997.
- MOC EMPREENDIMENTOS SALINEIROS S.A. - "Estudo de Impacto Ambiental, Projeto de Desenvolvimento Turístico Perynas" - Cabo Frio, Rio de Janeiro, 1991.
- Motta, Victor Freire - "Processos Sedimentológicos em Estuários" - 1978.
- Muehe, D. e Corrêa, C.H.T. - "Dinâmica de praia e transporte de sedimentos na restinga de Massambaba" - Revista Brasileira de Geociências, 1989.
- Muehe, D. e Carvalho, V.G. - "Geomorfologia, cobertura sedimentar e transporte de sedimentos na plataforma continental interna entre ponta de Saquarema e o Cabo Frio (RJ)" - Boletim Instituto de Oceanográfico, 1993.
- Muehe, D. - "Lagoa de Araruama: Geomorfologia e Sedimentação" - Caderno de Geociências, 1994.
- Neto, A. C. de S. - "O sítio do Hospício, Araruama - RJ: Resultados Iniciais" - Rio de Janeiro, 1990.
- Neves, C. F. e Hansen, C. M. P. - "Management and Engineering at Araruama Lagoon, Brazil. Coastal Zone '93. Proceedings, (ASCE)" - New Orleans, 1993.
- Oliveira, Lejeune de; Nascimento, Rubem; Krau, Luiza; Miranda, Arnaldo - "Observações Biogeográficas e Hidrobiológicas sobre a Lagoa de Maricá" - Separata de Memórias da Fundação Oswaldo Cruz, tomo 53, fascículos 2, 3 e 4, 1953.
- Oliveira, I. M. - "Sistemas Lagunares no Estado do Rio de Janeiro" - Rio de Janeiro, SERLA, 1978.

- Pritchard, D. H.; “Estuaries” – editora G. H. Lauff, 1967.
- Portellada, Antonio; Marques, Lineu; Soares, Ubiratan Pereira – “Projeto de Dragagem e Aterro Hidráulico para a Construção do Aeroporto de Cabo Frio”, 1998;
- Primo, Paulo Bidegain da S. e Bizerril, Carlos R. S. F. – “Lagoa de Araruama” – Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002.
- Rosman, P. C. C. - “Modelos de Circulação em Corpos de Águas Rasas” – Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, capítulo 3, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.
- Schettini, C.A.F. e Kjerfve, B. - “Avaliação do grau de sufocamento de lagoas costeiras através de atenuação do prisma de maré, caso da Lagoa de Araruama” - Congresso Latinamericano de Ciência del Mar, Mar del Plata, Argentina, 1995.
- SECTRAN - Secretaria de Transporte do Estado do Rio de Janeiro – “Aeroporto de Cabo Frio, Estudo de Impacto Ambiental” - Rio de Janeiro, M.R.H. Consultoria e Engenharia Ltda, 1998.

ANEXO 1 - RECUPERAÇÃO DAS LAGOAS COSTEIRAS

No Brasil os órgãos, que se destacaram através de ações para recuperar as lagoas costeiras, são apresentados a seguir, com as principais intervenções realizadas.

DNOS:

Até o início do século 20, a engenharia oficial no Brasil era pulsativa, ou seja, o Governo só requisitava engenheiros para determinadas obras, como por exemplo: a construção da Estrada de Ferro Central do Brasil, a construção da Avenida Central, entre outras, não havendo programas continuados de engenharia.

Em 1910, o Governo Federal, querendo sanear a Baixada Fluminense, área em que havia grandes focos de doenças ocasionadas por causa dos alagamentos, criou o Serviço de Saneamento da Baixada Fluminense, que, mais tarde, transformou-se no Departamento Nacional de Obras de Saneamento – DNOS, com atuação em todo o país.

Com o DNOS, surgiu a engenharia sistemática, com o estabelecimento de serviços rotineiros de controle de chuvas, níveis de rios, lagos e lagoas, acompanhamento de assoreamento, levantamento topográfico das bacias hidrográficas, além de outros serviços. O órgão foi, também, pioneiro em profissões correlatas à engenharia, formando e desenvolvendo auxiliares de engenheiro, topógrafos, niveladores, seccionistas, sondadores e laboratoristas. Na época não existiam escolas técnicas profissionais, sendo o aprendizado feito no campo com os profissionais mais experimentados, com a supervisão de engenheiros.

O DNOS, durante décadas, permaneceu como o único órgão de governo que praticava a engenharia sistemática, acompanhando rotineiramente o setor de saneamento básico, para poder orientar os projetos e programar as obras necessárias. Dentro de sua área

de atuação, o órgão promoveu a recuperação de lagoas costeiras, principalmente no Estado do Rio de Janeiro.

No país, as maiores obras foram:

- reconstrução do lago da Pampulha, em Belo Horizonte – MG;
- recuperação da bacia hidrográfica e do sistema lagunar dos rios Capibaribe e Beberibe, em Recife – PE, inclusive barragem de controle de cheias;
- recuperação de áreas alagáveis na lagoa de Mundaú, em Maceió – AL;
- recuperação da bacia hidrográfica e sistema lagunar de laguna – SC, inclusive a dragagem do rio Tubarão;
- recuperação do sistema lagunar da lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul, inclusive recuperação das áreas alagáveis de porto alegre e a dragagem do canal de São Gonçalo de acesso à lagoa Mirim.

No Estado do Rio de Janeiro, destacam-se as seguintes obras:

- recuperação do sistema hidrográfico e lagunar da Baixada Fluminense, com inúmeras obras de dragagem, barragens e controle de cheias;
- recuperação do sistema lagunar da lagoa Feia, em Campos dos Goytacazes, inclusive com a dragagem do canal das Flexas, sendo executada a abertura de um canal de acesso ao mar, o que tornou a antes lagoa costeira em regime de cheias em uma laguna. Foram recuperados os canais de drenagem, provenientes das zonas urbanas e das usinas de açúcar. Com o controle das cheias da Lagoa Feia conseguiu-se a recuperação de uma enorme área fértil, que muito contribuiu para a economia da região;
- recuperação do sistema do rio Macaé, inclusive desobstrução da barra;
- recuperação do sistema hidrográfico do rio São João, inclusive com a construção da barragem da Lagoa de Juturnaíba, que serviu para o controle das cheias e para o abastecimento de água para a região dos Lagos;
- dragagem do canal de Itajuru, para a melhoria do fluxo da maré, essencial para o sistema ecológico da Lagoa de Araruama;

- recuperação do sistema lagunar de Maricá, inclusive com a construção do canal de acesso ao mar, junto ao contraforte do lado de Ponta Negra, o que acabou com as cheias e regularizou a lagoa de Marica;
- dragagem de lodo na lagoa Rodrigo de Freitas, na cidade do Rio de Janeiro;
- dragagem da lagoa Tijuca na Barra da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro;
- recuperação do sistema lagunar da Barra da Tijuca, inclusive com a construção dos canais de acesso ao mar, junto ao contraforte da Joatinga e no Recreio dos Bandeirantes, na cidade do Rio de Janeiro.

O Departamento Nacional de Obras de Saneamento – DNOS foi extinto no Governo Collor, ficando todo o seu acervo perdido.

SERLA:

No âmbito da Secretaria de Obras, o antigo estado da Guanabara criou a Superintendência de Urbanismo e Saneamento - SURSAN, que possuía na sua estrutura o Departamento de Rios e Canais - DRC, que tratava inclusive das lagoas.

Com a fusão em 1975, o novo Estado do Rio de Janeiro criou a Superintendência Estadual de Rios e Lagoas - SERLA, mais tarde transformada em fundação, que ficou com todo o acervo do DRC.

Com a extinção do DNOS, a SERLA passou a ocupar parte de suas funções no Estado do Rio de Janeiro, inclusive gerenciando as lagoas costeiras.

DEPREC:

No Rio Grande do Sul, existe o Departamento de Portos, Rios e Canais do Estado do Rio Grande do Sul - DEPREC, que gerencia as lagoas dos Patos, Mirim e Manguiera, inclusive os portos e a navegação, com excelente atuação.

ANEXO 2 – TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM O SisBAHIA

Teses desenvolvidas com o auxílio do SisBAHIA:

Em julho de 1987, o engenheiro Paulo Cesar Colonna Rosman defendeu a tese para obtenção do título de Ph. D., intitulada “Modeling shallow water bodies via filtering techniques”, no Departamento de Engenharia Civil da Massachusetts Institute of Technology, USA, dando assim o início ao desenvolvimento do modelo SisBAHIA.

Em maio de 1991, a engenheira Susana Beatriz Vinzón Meichtry, aluna do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, defendeu a tese para obtenção do título de M. Sc, desenvolvendo um modelo de transporte de substâncias passivas em corpos de água rasos.

Em junho de 1991, o engenheiro Eduardo Felga Gobbi, aluno do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, defendeu a tese para obtenção do título de M. Sc desenvolvendo um modelo auto-ajustável para turbulência na escala sub-malha.

Em dezembro de 1991, o engenheiro Fernando M. Cabral de Vasconcelos Filho, aluno do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, defendeu a tese para obtenção do título de M.Sc desenvolvendo trabalho sobre investigações sobre um esquema numérico desacoplado para modelos de circulação, em sua em sua tese para a obtenção do título de M.Sc..

Em abril de 1992, o oceanógrafo Afonso de Moraes Paiva, aluno do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, defendeu a tese para obtenção do título de M. Sc, desenvolvendo um modelo Bidimensional em Perfil para Estuários Estratificados.

Em maio de 1992, a oceanógrafa Carla Villela de Xavier, aluna do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, defendeu a tese para obtenção do título de M. Sc, desenvolvendo trabalho para investigar o efeito do vento na circulação da Baía de Guanabara.

Em agosto de 1992, o engenheiro Renato Parkinson Martins, aluno do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu um modelo com o objetivo de verificar a circulação 2DH para corpos de água com áreas alagáveis, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em dezembro de 1993, o engenheiro Alex Maurício Araújo, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um sistema computacional para simulação do escoamento e transporte de fluídos turbulentos em corpos de água rasos usando técnicas de filtragem, em sua tese para a obtenção do título de D. Sc.

Em abril de 1995, a engenheira Maria do Carmo Dias Bueno, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu trabalho sobre o uso de interfaces dissipativas em modelos de circulação para corpos de água rasos, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em abril de 1995, a engenheira Mônica Miranda Falcão, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um estudo da circulação hidrodinâmica no sistema lagunar de Jacarepaguá, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em abril de 1995, a engenheira Leila Heizer Santos, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um trabalho para verificar a trajetória de partículas em corpos de água rasos, tendo como estudo de caso o emissário de Icaraí - Baía de Guanabara, RJ, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em novembro de 1995, a engenheira Cynara da Nóbrega Cunha, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um trabalho sobre implementação de um mecanismo de inundação em um modelo de elementos finitos para hidrodinâmica de corpos de água rasos, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em abril de 1996, a oceanógrafa Andrea Gallo Xavier, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu um estudo sobre a circulação hidrodinâmica e do transporte de contaminante no estuário do rio Iguaçu - Baía de Guanabara, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em março de 1997, a engenheira Ada Cristina Scudelari, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um método de elemento móvel aplicado às equações de águas rasas, em sua tese para a obtenção do título de D. Sc.

Em março de 1997, a engenheira Thereza Christina de Almeida Rosso, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu um modelo hidrodinâmico para transporte de manchas de óleo em regiões costeiras, em sua tese para a obtenção do título de D. Sc.

Em novembro de 1997, a engenheira Cristina Ono Horita, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu estudos para validação e aplicação de um modelo Lagrangeano para transporte de contaminantes em corpos de água rasos, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em março de 1998, o engenheiro Fábio Costa Tenório de Oliveira, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu estudos sobre as correntes de maré no complexo estuarino da Baía de Paranaguá, Paraná, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em julho de 1998, o Capitão Tenente Luís Augusto de Oliveira, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu estudos para a Geração de Cartas de Correntes em Recintos Portuários através de Modelagem Computacional, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em abril de 1999, o engenheiro Carlos Frederico Enriquez, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu estudo comparativo entre modelos de circulação em

lementos finitos (Y-Fist–COPPE/UFRJ) e em diferenças finitas (MIKE 21 / Danish Hydraulic Institute), em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em maio de 1999, o engenheiro Renato Parkinson Martins, do programa de Engenharia Oceânica - COPPE/UFRJ, desenvolveu um modelo numérico de circulação tridimensional para corpos de águas naturais com densidade variável, em sua tese para a obtenção do título de D. Sc.

Em agosto de 2000, a engenheira Cynara da Nóbrega Cunha, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um modelo hidrodinâmico tridimensional sem aproximação hidrostática, em sua tese para a obtenção do título de D. Sc.

Em abril de 2001, a geóloga Mariza Ramalho Franklin, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu o trabalho sobre modelagem da circulação hidrodinâmica e da dispersão de radionuclídeos na Baía de Ilha Grande, RJ, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

Em abril de 2001, a engenheira Valéria Nunes Oliveira, do programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, desenvolveu um trabalho sobre o impacto da estabilização do canal da barra na hidrodinâmica e na qualidade da água do sistema lagunar de Saquarema, RJ, em sua tese para a obtenção do título de M. Sc.

APLICAÇÕES PRÁTICAS COM O SISBAHIA:

- Município de Joinville (SC): aplicação do modelo hidrodinâmico 2DH do FIST3D, para o estudo de possíveis ações a fim de diminuir as inundações na cidade de Joinville causadas por marés e tempestades na Baía da Babitonga /São Francisco do Sul-SC.
- HABTEC, companhia responsável pela elaboração do EIA/RIMA: aplicação do modelo FIST3D e dos modelos de transporte para o estudo do impacto ambiental associado à construção de um poliduto da Petrobrás para o transporte de álcool, diesel e gasolina, na Baía da Guanabara.

- CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos): aplicação do modelo FIST3D e dos modelos de transporte para avaliar a eficiência do emissário submarino e as condições de balneabilidade da praia de Ipanema.
- ETEP, companhia responsável pelo desenvolvimento do Plano Diretor para o governo do Estado do Rio de Janeiro: aplicação do módulo 2DH do FIST3D e dos modelos de transporte para um estudo da hidrodinâmica geral e dos padrões de transporte na baía de Sepetiba - RJ, para auxiliar na elaboração do Plano Diretor Econômico e Ecológico da bacia da Baía de Sepetiba.
- Governo do Estado do Rio de Janeiro: aplicação do módulo 2DH do FIST3D para estudar possíveis ações para restabelecer a circulação em torno da Ilha do Fundão, obstruída devido ao assoreamento do canal do Fundão na Baía da Guanabara - RJ.
- Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro: aplicação do módulo 2DH do FIST3D para estudar a dragagem e disposição de sedimentos no sistema Lagunar da Tijuca.
- Marinha do Brasil: convênio de cooperação técnica e científica com Fundação Coppetec – COPPE/UFRJ, com o objetivo de usar o sistema de modelagem FIST3D para a geração de cartas náuticas de correntes de maré para os portos brasileiros.
- Consórcio Hydros-CH2Mhill de acordo com contrato com a Fundação Coppetec, desde março de 1999, o SisBAHIA vem sendo aplicado à região da Baía de Todos os Santos, para auxiliar nos estudos do diagnóstico e do prognóstico ambientais, estando instalado no Centro de Recursos Ambientais (CRA), órgão do Governo da Bahia, para ser usado como ferramenta de gestão ambiental da baía.
- Companhia Docas do Rio de Janeiro: aplicação do FIST3D completo e dos modelos de transporte para um estudo da hidrodinâmica geral e dos padrões de transporte na baía de Sepetiba - RJ, com objetivo de avaliar os impactos da dragagem do canal de acesso e bacia de evolução ao porto de Sepetiba.
- Petrobrás S. A.: aplicação do FIST3D completo e dos modelos de transporte para um estudo da hidrodinâmica geral e dos padrões de transporte de manchas de óleo na Baía de Guanabara - RJ.
- Globaltech: aplicação do FIST3D completo e dos modelos de transporte para um estudo da hidrodinâmica geral e dos padrões de transporte de contaminantes e sedimentos na

baía de Sepetiba - RJ, com objetivo de avaliar os impactos de implantação de unidade industrial/portuária da Companhia Siderúrgica Nacional.

- Companhia Nacional de Álcalis: aplicação do FIST3D completo e dos modelos de transporte para um estudo da hidrodinâmica geral e dos padrões de transporte de contaminantes na Lagoa de Araruama, RJ.