

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ADRIANO GOMES BATISTA

**CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA BAÍA
DO GUAJARÁ**

BELÉM

2005

ADRIANO GOMES BATISTA

**CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA
BAÍA DO GUAJARÁ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. André Amarante Mesquita

BELÉM

2005

ADRIANO GOMES BATISTA

**CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA
BAÍA DO GUAJARÁ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 19/12/2005

BANCA EXAMINADORA

Prof. ANDRÉ AMARANTE MESQUITA, Dr. (UFPA)
Orientador

Prof. MANOEL JOSÉ DOS SANTOS SENA, Dr. (IESAM)
Co-orientador

Prof. DANIEL ONOFRE CRUZ, Dr. (UFPA)
Membro Interno

Prof.^a ANA ROSA BAGANHA BARP, Dra. (UFPA)
Membro Externo

Prof.^a CARMEN GILDA, Dra.
Coordenadora do CMEM/CT/UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS por ter me dado à possibilidade da realização desse sonho.

Agradeço também aos professores André Luis Amarante Mesquita, Manoel José dos Santos Sena e Alex Sandre Guedes pela orientação, empenho e amizade no decorrer deste trabalho. Como também pela grande contribuição e ajuda dos professores Paulo César Colonna Rosman e Yves Secretan.

Aos meus amigos Fabio Alfaia, Marcio Martins e que me acompanharam durante o período do curso de mestrado. A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e ao Instituto de Estudo Superiores da Amazônia pela infra-estrutura colocada à disposição. Um agradecimento todo especial à minha noiva Elaine Cristina pelo incentivo, paciência e carinho dedicados nesse período.

E claro a minha família, em destaque para os meus pais, pela compreensão que apesar das dificuldades sempre me apoiaram nas minhas decisões.e nas realizações dos meus e meus objetivos profissionais.

Apenas os homens mais sábios e os
mais estúpidos nunca mudam de idéia.

DESCONHECIDO

RESUMO

Os ambientes marinho e costeiro do Brasil vêm sofrendo nos últimos anos um considerável processo de degradação ambiental, gerado pela crescente pressão sobre os recursos naturais marinhos e continentais e pela capacidade limitada desses ecossistemas absorverem os impactos resultantes. No caso específico da Baía do Guajará, situada no Estuário Guajará, na região delimitada pela Baía do Marajó e pelos rios Pará e Guamá, estes riscos estão associados principalmente à poluição oriunda da cidade de Belém e às operações de transporte de derivados de petróleo. No caso da Baía do Guajará, sabe-se que ocorre o despejo de esgoto periodicamente, de acordo com a maré. Desta forma, pouco tem sido feito para amenizar os efeitos do problema. Os modelos numéricos, por considerarem a complexidade dos fenômenos físicos que governam o funcionamento dos ambientes costeiros, vêm sendo utilizados como ferramentas em simulação hidrodinâmica, com reconhecida importância no gerenciamento costeiro. Sua aplicação pode dar suporte a estudos diversos, como no entendimento dos processos dispersivos de poluentes, implantação de sistemas de monitoramento de qualidade de água, planejamento de ações em casos de derrame de óleo, e avaliar as consequências de alterações na geometria de canais e baías e estuários. Este trabalho tem como objetivo esclarecer essas questões e descreve as etapas necessárias para a construção de um modelo numérico de dispersão na Baía do Guajará usando as ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica e o Método de Elementos Finitos.

Palavras chaves: Dispersão de poluentes, elementos finitos, baía, sistema de informações.

ABSTRACT

The sea and coastal environment of Brazil have suffered a process of considerable environmental degradation in the last years. This degradation was caused by the growing environmental pressure on the sea and the continental natural resources that have overwhelmed the limited capacity of the ecosystems to absorb the impacts. In the specific case of the Bay of Guajará, located in the Estuaries Guajará, in the area delimited by the Bay of Marajó and for the rivers Pará and Guamá, these risks are associated mainly to the pollution originating from of the city of Belém and the petroleum derived pollution caused by transport operations. In the case of the Bay of Guajará, it is known that there are sewer spillings periodically caused by the tide. Because this pollution is caused by the tide, there is little that can be done to correct or soften the effects of this problem. The numeric models consider the complexity of the physical phenomena that govern the operation of the coastal environment, and have been used as tools in hydrodynamic simulation with recognized importance in coastal administration. This application can support several studies: the understanding of the dispersing processes of pollutants; the implantation of systems of monitoring of water quality; the plan of action in cases of a oil spillage; and the effects of alterations in the geometry of channels and bays and estuaries. The objective of this work is to explain these subjects and to describe the necessary stages for the construction of a numeric model of dispersion in the Bay of Guajará using the tools of the Systems of Geographical Information and the Method of Finite Elements.

Keywords: Dispersion of pollutant, finite elements, bay, system of information.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização geográfica da região de estudo Baía do Guajará Escala 1:50.000.....	16
Figura 2.1 - Referencias utilizado.....	21
Figura 3.1 - Contornos de terra e água utilizado no SisBAHIA	44
Figura 3.2 - Malha de discretização da Baía do Domínio	46
Figura 3.3 - Detalhe da batimetria existente nas cartas.	48
Figura 3.4 - Detalhe da batimetria do Rio Guamá.	49
Figura 3.5 - Batimetria do fundo do domínio visto pelo SisBAHIA	50
Figura 3.6 - Mapa de distribuição do diâmetro médio dos sedimentos da Baía do Guajará (Fonte: Pinheiro 1987).....	53
Figura 3.7 - Curva de maré utilizada na modelagem, gerada com as constantes harmônicas da Tabela 3.2...	56
Figura 3.8 - mostrando as condições de contornos adotadas.....	58
Figura 3.9 - Mostrando os canais ou igarapés no mapa base.....	60
Figura 4.1 - localizações das estações de medição no mapa base.....	61
Figura 4.2 - Variação do nível da água para Estação P1	62
Figura 4.3 - Variação do nível da água para Estação P3	62
Figura 4.4 - Variação do nível da água para Estação P4	63
Figura 4.5 - Variação do nível da água para Estação P5	63
Figura 4.6 - Variação do nível da água para Estação P6	64
Figura 4.7 - Variação do nível da água para Estação P12	64
Figura 4.8 - Variação do nível da água para Estação P14	65
Figura 4.9 - Gráfico amplitude das estações de medições.....	65
Figura 4.10 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará. Situação de maré vazando	67
Figura 4.11 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará mostrando em detalhe o campo de vetores. Situação de maré secando.....	68
Figura 4.12 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará. Situação de maré enchendo	69
Figura 4.13 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará mostrando em detalhe o campo de vetores. Situação de maré enchendo.	70
Figura 4.14 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 3 hs de lançamento.	72
Figura 4.15 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 6 hs de lançamento.	73
Figura 4.16 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 9 hs de lançamento.	74
Figura 4.17 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 12 hs de lançamento.	75
Figura 4.18 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 15 hs de lançamento.	76
Figura 4.19 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 18 hs de lançamento.	77
Figura 4.20 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 21 hs de lançamento.	78
Figura 4.21 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 24 hs de lançamento.	79
Figura 4.22 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 27 hs de lançamento.	80
Figura 4.23 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 30 hs de lançamento.	81
Figura 4.24 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 33 hs de lançamento.	82
Figura 4.25 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 36 hs de lançamento.	83
Figura 4.26 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 39 hs de lançamento.	84
Figura 4.27 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 42 hs de lançamento.	85
Figura 4.28 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 45 hs de lançamento.	86
Figura 4.29 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 48 hs de lançamento.	87
Figura 4.30 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 51 hs de lançamento.	88
Figura 4.31 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 54 hs de lançamento.	89
Figura 4.32 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 57 hs de lançamento.	90
Figura 4.33 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 60 hs de lançamento.	91
Figura 4.34 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 63 hs de lançamento.	92
Figura 4.35 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 66 hs de lançamento.	93
Figura 4.36 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 69 hs de lançamento.	94
Figura 4.37 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 72 hs de lançamento.	95

Figura 4.38 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 75 hs de lançamento.	96
Figura 4.39 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 78 hs de lançamento.	97
Figura 4.40 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 81 hs de lançamento.	98
Figura 4.41 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 84 hs de lançamento.	99
Figura 4.42 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 87 hs de lançamento.	100
Figura 4.43 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 90 hs de lançamento.	101
Figura 4.44 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 93 hs de lançamento.	102
Figura 4.45 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 96 hs de lançamento.	103
Figura 4.46 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 99 hs de lançamento.	104
Figura 4.47 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 102 hs de lançamento.	105
Figura 4.48 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 105 hs de lançamento.	106
Figura 4.49 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 108 hs de lançamento.	107
Figura 4.50 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 111 hs de lançamento.	108
Figura 4.51 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 114 hs de lançamento.	109
Figura 4.52 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 117 hs de lançamento.	110
Figura 4.53 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 120 hs de lançamento.	111
Figura 4.54 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 123 hs de lançamento.	112
Figura 4.55 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 126 hs de lançamento.	113
Figura 4.56 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 129 hs de lançamento.	114
Figura 4.57 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 132 hs de lançamento.	115
Figura 4.58 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 135 hs de lançamento.	116
Figura 4.59 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 138 hs de lançamento.	117
Figura 4.60 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 141 hs de lançamento.	118
Figura 4.61 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 144 hs de lançamento.	119
Figura 4.62 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 147 hs de lançamento.	120
Figura 4.63 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 150 hs de lançamento.	121
Figura 4.64 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 153 hs de lançamento.	122
Figura 4.65 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 156 hs de lançamento.	123
Figura 4.66 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 159 hs de lançamento.	124
Figura 4.67 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 162 hs de lançamento.	125

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
1.4 REGIÃO DE ESTUDO	15
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	20
2.1 EQUAÇÕES.....	20
2.2 MUDANÇA PARA UM REFERENCIAL SOLIDÁRIO COM A TERRA.....	25
2.3 APROXIMAÇÃO HIDROSTÁTICA	29
2.4 AS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO MÉDIO	31
2.5 EQUAÇÕES PARA O TRANSPORTE DE CONSTITUINTES.....	37
3. ESTRUTURA DO PROGRAMA UTILIZADO.....	41
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	41
3.2 MODELO HIDRODINÂMICO	42
3.3 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO:	42
3.4 ESTUDO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NA BAÍA DO GUAJARÁ	43
3.4.1 <i>Cenário de Simulação</i>	43
3.4.2 <i>Contorno do Domínio</i>	43
3.5 CARACTERÍSTICAS DA MALHA ADOTADA.....	45
3.6 DETERMINAÇÃO DA BATIMETRIA.....	47
3.7 RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO	51
3.8 CONDIÇÕES DE CONTORNO	54
3.8.1 <i>Condição Inicial</i>	59
3.9 ANÁLISE DE TRANSPORTE.....	59
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1 MODELO HIDRODINÂMICO	61
4.2 RESULTADO MODELO DE TRANSPORTE	71
5. CONCLUSÕES	126
6. REFERÊNCIAS	128

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os ambientes marinho e costeiro do Brasil vêm sofrendo nos últimos anos um considerável processo de degradação ambiental, gerado pela crescente pressão sobre os recursos naturais e pela capacidade limitada desses ecossistemas absorverem os impactos resultantes.

A região costeira brasileira apresenta um quadro preocupante em relação à degradação ambiental, especialmente em regiões próximas aos grandes centros urbanos. Muitos estuários estão com seus habitats naturais comprometidos pela poluição e exploração dos recursos.

Podemos destacar alguns exemplos desses problemas ambientais como à urbanização sem planejamento adequado, a degradação da qualidade de águas devido a despejos de efluentes domésticos e industriais, lançados nos corpos d'água.

Outras importantes fontes de impactos relevantes, sobretudo em regiões portuárias, são as ocorrências de acidentes com vazamentos de petróleo e seus derivados e a realização de obras como dragagens e aterros.

No caso específico da Baía do Guajará estes riscos estão associados principalmente à poluição oriunda dos bairros da cidade de Belém e às operações de transporte de derivados de petróleo que utilizam a baía do Guajará como via de acesso.

Tem-se conhecimento que ocorre diariamente o despejo de esgoto *in natura* periodicamente, de acordo com a maré.

Tem sido verificado também nos últimos anos um nível crescente de poluição em balneários situados em ilhas próximas à cidade de Belém, o que tem influenciado negativamente o potencial turístico dos mesmos. Supõe-se que a origem desta poluição seja a cidade de Belém, mas no momento nada pode ser feito para a descoberta da origem dos problemas, pois não se conta com uma ferramenta capaz de responder com exatidão a trajetória seguida pelas massas de poluentes despejadas na Baía do Guajará.

Assim sendo, pouco se conhece sobre os mecanismos e sobre a dinâmica deste fenômeno. Desta forma, pouco pode ser feito para corrigir ou amenizar os efeitos do problema.

Igualmente grave é o fato de não estar disponível uma ferramenta para a elaboração de planos de contingência para o caso de vazamento de poluentes na Baía. Deve-se salientar que esta região está sujeita a um intenso tráfego de embarcações que transportam derivados de petróleo.

Os modelos numéricos vêm sendo utilizados como ferramentas em simulação hidrodinâmica, com uma reconhecida importância no gerenciamento dos mesmos. Sua aplicação pode dar suporte a estudos diversos, como no entendimento dos processos dispersivos de poluentes, implantação de sistemas de monitoramento de qualidade de água, planejamento de ações em casos de derrame de poluentes, e avaliação das consequências das alterações na geometria de canais.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Neste capítulo introdutório procurou-se apresentar o assunto a ser tratado, o objetivo e a finalidade da pesquisa, assim como apresentar a justificativa da escolha do tema.

No capítulo 2 é feito o equacionamento matemático do modelo hidrodinâmico e de transporte.

No capítulo 3 é descrita a construção do modelo aplicado no modelo numérico. Como o domínio adotado, a batimetria elaborada a partir do levantamento de dados na área estudada, a rugosidade do fundo, a característica da malha adotada, as condições de contorno iniciais e análise de transporte.

O capítulo 4 é dedicado aos resultados obtidos na modelagem hidrodinâmica e de transporte de poluentes do sistema estuarino da Baía do Guajará. No capítulo 5 são apresentadas às considerações finais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL:

Construção de um modelo hidrodinâmico preliminar do tipo elementos finitos para estudos com transporte de detritos na Baía do Guajará.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Levantamento de dados batimétricos.
- Integração dos dados batimétricos oriundos de diversas fontes.
- Caracterização dos coeficientes de atrito de fundo no modelo.
- Construção de um modelo hidrodinâmico de escoamento.
- Construção de um modelo de transporte de detritos.
- Simulação de cenários temporários envolvendo despejo de poluentes na Baía do Guajará;
- Implementação das fontes de poluição mais importantes. Os canais de Belém no modelo.

1.3 JUSTIFICATIVA

A Baía do Guajará que é usada é um local com uma clara vocação turística e também como via de comércio e transporte através da navegação fluvial.

Assim sendo, o desenvolvimento de um projeto de estudo da hidrodinâmica da baía é de grande importância no sentido de fornecer valiosas informações sobre o comportamento das águas e prevenção ambiental. Dentre essas informações podemos destacar a distribuição e transporte do material em suspensão determinação de fluxos de poluentes no sentido de identificar áreas com maior risco de serem contaminadas.

Grandes questões associados ao transportes de poluentes na Baía estão aberta. Dentre elas, podemos destacar a capacidade da cidade de Belém de poluir, com esgoto sanitário, os balneários da Ilha de Mosqueiro. A caracterização da dinâmica de poluentes pode ajudar o poder público a decidir melhor sobre os investimentos a serem realizados para tratamento de esgoto.

Além dessas informações, o trabalho também fornece valiosa informação a possíveis obras de engenharia que possam vir a se realizar na região, tais como, manutenção da qualidade ambiental, obras costeiras de apoio ao turismo, obras de contenção, etc.

1.4 REGIÃO DE ESTUDO

A Baía de Guajará margeia a orla fluvial do Município de Belém em toda a sua extensão à oeste, compreendendo as orlas dos distritos de Mosqueiro, Icoaraci e Belém - no sentido norte-sul (BELÉM, 2002). Possui forma alongada e estreita, estando comprimida entre terras continentais e as Ilhas Fluviais das Onças, Arapiranga, Cotijuba, Jararaca, Mirim, Paquetá-Açu e Jutuba. Está situada, aproximadamente, entre os paralelos 1°22'S e 1°30'S e os meridianos 48°25'W e 48°35'W.

Sua distância aproximada para o oceano é de 120 km. Comunica-se com a Baía do Marajó que tem ligação e influência direta das águas do Oceano Atlântico. Apresenta águas barrentas e temporariamente salobras, durante o período de estiagem.

Na figura (1.1), é mostrada uma imagem de satélite da região, onde está situada a Baía do Guajará, que se encontra ao centro da mesma. Nesta figura pode ser notada ainda a falta da cobertura vegetal original, principalmente na cidade de Belém e no litoral da Ilha de Mosqueiro.



Figura 1.1 – Localização geográfica da região de estudo Baía do Guajará Escala Fonte: Embrapa - Brasil Visto do Espaço 1:50.000.

1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estuário é um corpo d'água semi-confinado na costa, que tem ligação direta como o mar, estendendo-se ao longo do rio até o limite da influência da maré, dentro do qual a água do mar entra em contacto com água doce proveniente da drenagem do interior das terras (DYER, 1997)

Estuários são áreas de importância significativa para a humanidade. Principalmente no sentido de serem lugares de desenvolvimento de ocupações populacionais, indústrias, fontes para abastecimento de água e áreas de comunicação. Como consequência, eles são ambientes altamente explorados como sistema para a disposição de efluentes que serão descarregados no oceano, onde sofrem dispersão. Muitas vezes, no entanto, isso não acontece, pois muitos poluentes acabam permanecendo dentro do próprio estuário, transformando-o numa área de acúmulo de poluentes (FRENCH, 1997).

Estuários são habitats extremamente produtivos sob o ponto de vista ecológico. McLUSKY, citado por (FRENCH, 1997) afirma que estuários têm sido considerados como os ecossistemas mais produtivos do mundo, embora sua produtividade sofra interferências humanas, pois fornecem alimento e habitat a uma gama muito grande de organismos com papel determinante na cadeia alimentar marinha. Assim, são reconhecidos como zonas ecologicamente importantes e que devem ser preservadas.

São áreas de reprodução, crescimento, alimentação e refúgio para inúmeras espécies de peixes, crustáceos e moluscos, capturados pela pesca artesanal e industrial. Estudos indicam que 70% das espécies potencialmente comercializadas se utilizam o refúgio dos estuários em algum estágio de seu desenvolvimento. Em síntese, os estuários são ecossistemas extremamente importantes e responsáveis pelo equilíbrio e manutenção dos recursos marinhos.

Dessa maneira os estudos nessas áreas ganham bastante importância para se analisar tanto o comportamento dinâmico como o de transporte de poluentes.

A simulação matemática de sistemas de recursos hídricos apresentava grandes dificuldades de cálculo antes do advento dos computadores, o que impedia seu pleno desenvolvimento. As decisões apoiavam-se, então, em métodos gráficos ou em modelos físicos ou analógicos.

A partir da década de 1960, o cenário dos computadores vem se modificando de forma acelerada, possibilitando a enorme evolução das técnicas matemáticas descritivas (simulação).

Os modelos de simulação matemática, em recursos hídricos, têm hoje aplicação irrestrita em diversas áreas, como na quantificação dos processos do ciclo hidrológico, na análise da qualidade das águas em rios, reservatórios e nos aquíferos subterrâneos, nos processos hidráulicos do escoamento em rios, mares e subsolo e nos modelos ambientais e meteorológicos.

Os modelos de simulação fornecem a resposta de um sistema a um conjunto de informações de entrada, que incluem regras de decisão, que permite examinar as conseqüências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto (LANNA *et al.*, 1997).

A análise por elementos finitos já é consagrada por apresentar boas aproximações de resultados para problemas que envolvem geometrias não convencionais e carregamentos combinados (Batoz, 1995).

Modelos computacionais do tipo Elementos Finitos vêm sendo utilizados há muitos anos para a modelagem de estuários e regiões costeiras (Zienkiewicz e Taylor, 2000). A aplicabilidade do uso de modelos hidrodinâmicos acoplados a modelos de dispersão para a análise de comparação quantitativa de diferentes possibilidades de ação frente à dispersão de poluentes é estudada por Reed *et al* (1995 e 1999).

Al-Rabeh *et al* (2000), desenvolveram um programa que acopla um modelo hidrodinâmico com um modelo de dispersão de óleo para aplicação no Golfo Árabe. Foi verificado que, quando o modelo de dispersão é calibrado através de experimentos realizados no local de aplicação, a exatidão da simulação é bastante favorecida.

Galt e Payton (1999) desenvolveram um procedimento que usa resultados de simulação de escoamento e de transporte em conjunto com um detalhado mapeamento da área de estudo no que se refere aos riscos de impacto ambiental, associados a vazamentos e despejo de poluentes (conseqüência e custos associados com o poluente alcançando um local delicado em concentrações acima do máximo suportado), com a intenção de planejar as atividades e para a maximização do retorno de operações de contingência no caso de acidentes ou situações graves.

Dentro desta mesma tendência de planejamento otimizado do processo decisório estão os trabalhos de Srinivasa e Wilhelm (1997) e Bruzzone *et al* (2000). É interessante

notar que, no que se refere ao combate aos vazamentos uma vez que os mesmos aconteceram, novos equipamentos e técnicas também são desenvolvidos, tais como o Circo Hidrodinâmico descrito por Blomberg e Claeson (1997).

Para o planejamento correto de ações de contingência também é importante considerar as mudanças nas propriedades físicas do poluente com o passar do tempo (Nordvik *et al*, 1996).

Convém salientar que a maioria das aplicações desta técnica são para regiões em mar aberto, que têm características sensivelmente diversas das verificadas na Baía do Guajará, que se constitui de um ambiente fluvial com marés e chuvas tropicais. Estas características peculiares aumentam a complexidade da modelagem e tornam o trabalho muito significativo do ponto de vista científico.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 EQUAÇÕES

A modelagem utilizada na descrição das equações de águas rasas em duas dimensões, também denominada de modelagem baseada na média vertical (modelo 2DH), é obtida a partir da integração vertical das equações tridimensionais de *Navier-Stokes* para escoamentos incompressíveis com condições de contorno, de fundo e de superfície, incluídas. A principal limitação da modelagem 2DH é que ela não considera os efeitos da variação da velocidade e densidade na direção vertical. Contudo, o modelo 2DH pode ser adequado, uma vez que o escoamento da camada compreendida entre o fundo e a superfície livre comporta-se de forma homogênea, com suas velocidades horizontais sendo predominantes. Assim sendo, o escoamento pode ser razoavelmente aproximado em duas dimensões. Desta maneira a modelagem hidrodinâmica e de dispersão de poluentes de um estuário também podem ser representadas por esse conjunto de equações diferenciais.

A equação (2.1) expressa a conservação de massa para um escoamento tridimensional, incompressível, e em regime permanente.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q \quad (2.1)$$

Sendo:

u, v, w são as componentes das velocidades nas direções x, y, z , respectivamente;

q , é o termo fonte ou sumidouro (podendo ser normalmente uma precipitação, evaporação, infiltração, tempestade).

Consideremos a notação da figura 2.1 para representar o sistema de coordenadas adotado nas direções x, y e z.

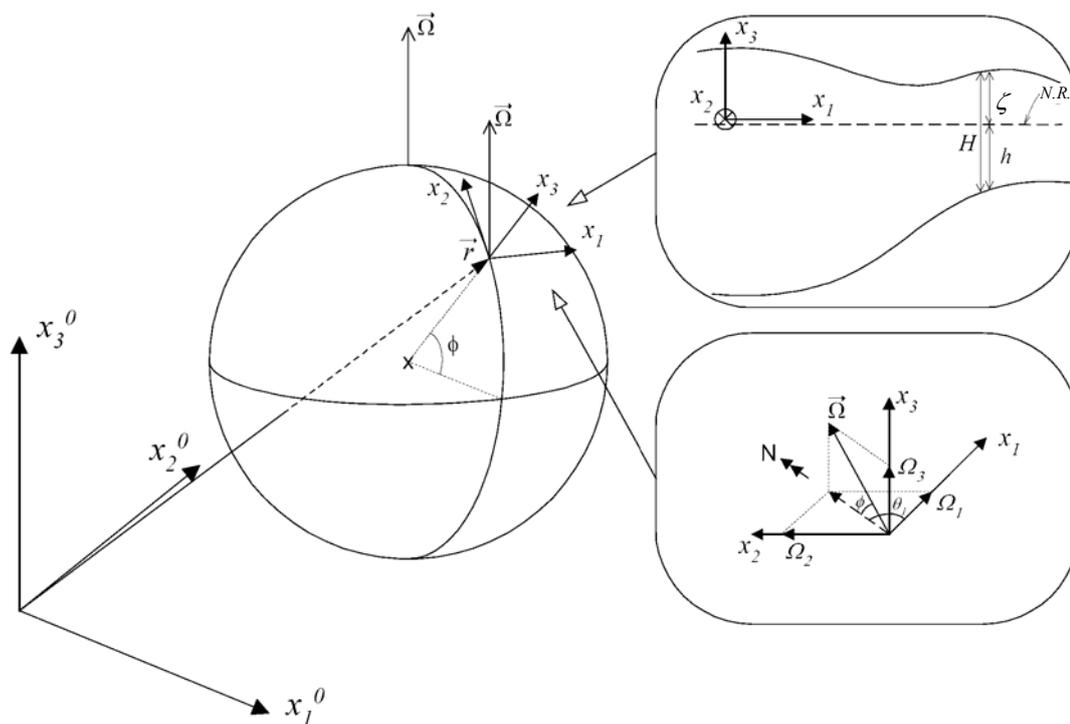


Figura 2.1 - Referenciais utilizados

Sendo:

ξ , é elevação do nível d'água acima do nível de referência (NR);

h é a altura negativa do fundo.

θ_1 é o ângulo do eixo x_2 com a direção norte

$\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ e \mathbf{x}_3 são os eixos coordenados.

ϕ é a latitude

Ω velocidade de rotação da terra

\vec{r} é a origem

x_1^0, x_2^0 e x_3^0 são os referenciais cartesianos fixo no espaço.

Integrando-se a equação da continuidade ao longo da profundidade teremos;

$$\int_{-h}^{\zeta} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q \right] dz = \int_{-h}^{\zeta} q dz \quad (2.2)$$

Utilizando-se a regra de Leibnitz, a equação (2.2) é rescrita do seguinte modo;

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz - u_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + u_{-h} \frac{\partial(-h)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz - v_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + v_{-h} \frac{\partial(-h)}{\partial y} + w_{\zeta} - w_{-h} = q(\zeta + h) \quad (2.3)$$

Considerando a condição de não deslizamento no fundo, as velocidades no fundo são nulas. Assim a equação (2.3) pode ser rescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz - u_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz - v_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w_{\zeta} = q(\zeta + h) \quad (2.4)$$

As condições de contorno cinemáticas na superfície livre e no fundo impõem que qualquer variação do fluxo de massa na direção horizontal deve corresponder a uma variação na superfície, aonde:

$$\left[\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right]_{\zeta} = w_{\zeta} \quad (2.5)$$

Substituindo a equação (2.5) na equação (2.4), tem-se:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = q(\zeta + h) \quad (2.6)$$

E definindo as componentes médias verticais das velocidades (u e v) para;

$$\langle u \rangle = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad (2.7)$$

$$\langle v \rangle = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad (2.8)$$

Sendo:

H é a profundidade total da coluna d'água dada por $H = \zeta + h$;

$\langle u \rangle$ e $\langle v \rangle$ são as componentes médias verticais das velocidades u e v respectivamente.

Agora pode-se escrever a equação da continuidade integrada na vertical. Introduzindo na equação (2.6), as equações (2.7) e (2.8), obtém-se a equação (2.9).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(H\langle u \rangle)}{\partial x} + \frac{\partial(H\langle v \rangle)}{\partial y} = Hq \quad (2.9)$$

Para as equações da conservação da quantidade de movimento, vamos considerar um fluido newtoniano.

A conservação da quantidade de movimento é expressa pelas equações de Navier-Stokes. Para escoamento 2 D e fluido do tipo incompressível, tem-se:

Direção X;

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + f_v \end{aligned} \quad (2.10)$$

Direção Y;

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y - f_u \end{aligned} \quad (2.11)$$

Sendo:

μ , é a viscosidade absoluta ou viscosidade molecular, sendo também igual $(\rho \nu)$ é a densidade;

g_x, g_y, g_z são as projeções do vetor aceleração gravitacional nas direções x, y e z respectivamente. Sendo g_x e g_y , nulos e considera-se $g_z = g$.

u, v e w, são as velocidades instantâneas nas direções x, y e z respectivamente.

2.2 MUDANÇA PARA UM REFERENCIAL SOLIDÁRIO COM A TERRA

Do ponto de vista prático é de maior utilidade usarem-se variáveis relativas a um referencial solidário com a terra, como é o caso do referencial x, y e z mostrado na figura (2.1). Este referencial é não inercial, pois, possui velocidade de rotação $\vec{\Omega}$ em relação ao referencial fixo e a sua origem desloca-se com movimento devido à sua translação.

A equação da continuidade não sofre alteração na passagem para este referencial uma vez que não envolve grandezas vetoriais, mas apenas escalares.

Já a passagem da equação de conservação da quantidade de movimento para um referencial acelerado faz aparecer explicitamente às forças de inércia. Para o caso geral de um referencial acelerado A com origem \vec{r} e velocidade de rotação $\vec{\Omega}$, relativamente ao referencial de inércia I a aceleração de um ponto material nos dois referenciais está relacionada por:

$$\left[\frac{D\vec{u}^0}{Dt} \right]_I = \left[\frac{D\vec{u}}{Dt} \right]_A + 2\vec{\Omega} \times \vec{u} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{x}) + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{x} + \left[\frac{D}{Dt} \left(\frac{D\vec{r}}{Dt} \right) \right]_I \quad (2.13)$$

Sendo \vec{u}^0 o vetor velocidade do ponto material no referencial de inércia. Os últimos quatro termos representam acelerações aparentes que surgem quando se utiliza o referencial acelerado. O último termo contabiliza a aceleração linear do referencial A , que no caso do referencial x, y e z é devida apenas à translação da Terra. O penúltimo termo é nulo devido à velocidade de rotação da terra ser constante. O antepenúltimo termo representa a aceleração centrípeta.

Este termo pode ser escrito na forma de um potencial sendo usualmente englobado na aceleração da gravidade (Pedlosky, 1987). O valor da aceleração da gravidade g sofre assim uma alteração máxima no equador da ordem dos 0.3% passando a estar dirigido perpendicularmente à geóide. Em termos práticos, para a modelagem hidrodinâmica, pode considerar-se o valor de g constante. O termo $2\vec{\Omega} \times \vec{u}$ é a aceleração de Coriolis, que deve ser incluída explicitamente nas equações de balanço de quantidade de movimento quando escritas no referencial x, y e z , onde atua como uma força mássica.

Em escoamentos estuarinos, para além da força aparente devida à aceleração de Coriolis, as únicas forças mássicas que influenciam o escoamento de forma significativa

são a força gravitacional terrestre e o potencial de maré. A gravidade produz a aceleração $\mathbf{g}_i = -g\delta_{3i}$ apenas com componente na direção vertical. O potencial de maré é na realidade a resultante de um equilíbrio entre as forças mássicas de atração da Terra, da Lua e do Sol e da força centrífuga aparente produzida pela rotação dos pares Terra-Lua e Terra-Sol em torno dos seus centros de massa. A resultante destas forças produz acelerações da ordem de 10^{-7} m/s^2 podendo-se por isso desprezar a componente vertical face à aceleração da gravidade. As componentes horizontais devem ser consideradas para a simulação da maré em escalas globais, as quais originam as principais forças motrizes no sistema fluido, mas podem-se desprezar quando a dimensão do domínio é muito inferior ao comprimento de onda do forçante que é aproximadamente metade do perímetro da Terra.

Com estas hipóteses, a equação (2.13). Torna-se;

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - 2\rho \varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k \quad (2.14)$$

Sendo: ε_{ijk} , é o tensor alternante.

Denominando ϕ a latitude e θ_1 o ângulo do versor \vec{e}_1 com a direção Norte como esquematizado na figura (2.1), as componentes do vetor velocidade de rotação $\vec{\Omega}$ são.

$$\vec{\Omega} = (\Omega \cos \phi \cos \theta_1) \vec{e}_1 + (\Omega \cos \phi \sin \theta_1) \vec{e}_2 + (\Omega \sin \phi) \vec{e}_3 \quad (2.15)$$

Admitindo que o eixo \vec{e}_2 se encontra alinhado com a direção Norte ($\theta_1 = \pi/2$) o último termo da equação (2.14) assume a forma:

$$2\varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k = 2(\Omega \cos \phi \cdot u_3 - \Omega \sin \phi \cdot u_2) \vec{e}_1 + 2(\Omega \sin \phi \cdot u_1) \vec{e}_2 + 2(-\Omega \cos \phi \cdot u_1) \vec{e}_3 \quad (2.16)$$

Sendo $\Omega = |\vec{\Omega}|$

Nos estuários a componente vertical da velocidade é usualmente três ordens de grandeza inferior às componentes horizontais, podendo-se por esse motivo desprezar o primeiro termo da equação (2.16) relativamente aos restantes. A Terra efetua uma revolução em 86164 segundos (um dia sideral) pelo que se tem $|\vec{\Omega}| = 2\pi/86164 = 7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Considerando as componentes horizontais da velocidade da ordem de 1 m/s a aceleração de Coriolis tem, para latitudes médias, uma ordem de grandeza de 10^{-5} m/s^2 . Este valor é seis ordens de grandeza inferior à aceleração da gravidade, pelo que se despreza usualmente o último termo da equação (2.16). As acelerações horizontais são, no entanto desta ordem de grandeza, justificando-se a permanência das componentes horizontais. Introduzindo o parâmetro de Coriolis $f=2\Omega \sin \Phi$, a equação (2.16) se torna:

$$2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k = -fu_2\vec{e}_1 + fu_1\vec{e}_2 \quad (2.17)$$

f , são as frequências de Coriolis (força aparente). E pode ser expressa da seguinte maneira).

$$f = 2\Omega\sin(\phi) \quad (2.18)$$

2.3 APROXIMAÇÃO HIDROSTÁTICA

Admitindo-se que, nos escoamentos em corpos d'água rasos os gradientes de velocidade na direção vertical são pequenos quando comparados à aceleração da gravidade, o balanço de forças na direção z pode ser aproximado por um equilíbrio entre as forças gravitacionais e o gradiente de pressão. Desta forma, a equação de conservação da quantidade de movimento na direção z é escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.19)$$

Integrando-se a equação acima, para uma altura qualquer em z . Até o ponto de elevação do nível d'água, acima nível de referencia (ζ), obtemos uma distribuição linear da pressão com a profundidade apresentada a seguir;

$$\int_z^\zeta \frac{\partial p}{\partial z} dz = \int_z^\zeta -\rho g dz \quad (2.20)$$

Logo:

$$P(z) = P(\zeta) + \rho g(\zeta - z) \quad (2.21)$$

Dessa maneira, os gradientes da pressão nas direções horizontais (x, y) podem ser expressos em termos da elevação da coluna d'água.

Direção X

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_a}{\partial x} + g\rho_{ws} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz = \frac{\partial P_a}{\partial x} + g\rho_{avg} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (2.22)$$

Direção Y

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial P_a}{\partial y} + g\rho_{ws} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz = \frac{\partial P_a}{\partial y} + g\rho_{avg} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad (2.23)$$

Onde;

ρ_{ws} , é a densidade d'água na superfície, que pode ser assumida para ser igual à densidade de referência ou densidade média ρ_{avg} , de acordo com a suposição de Boussinesq.

$\frac{\partial \zeta}{\partial x}$ e $\frac{\partial \zeta}{\partial y}$, são os declives de superfície d'água.

Geralmente admite-se que os gradientes de pressão atmosférica sobre a superfície de um estuário constituem uma parcela insignificante do gradiente de pressão hidrodinâmica, podendo ser negligenciado nas equações acima. Desta forma, as equações (2.22) e (2.23), podem ser escritas da seguinte maneira:

Direção X

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + f_v \end{aligned} \quad (2.24)$$

Direção Y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + f_u \end{aligned} \quad (2.25)$$

2.4 AS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO MÉDIO

Devido à natureza do escoamento turbulento não parece sensato resolver numericamente as velocidades associadas a este escoamento. Reynolds sugeriu aproximação, onde as variáveis u , v e w , são divididas em uma parte média e uma parte flutuante, ou seja:

Para u :

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (2.26)$$

Para v :

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}' \quad (2.27)$$

Para w :

$$\mathbf{w} = \bar{\mathbf{w}} + \mathbf{w}' \quad (2.28)$$

Sendo:

\bar{u} , \bar{v} e \bar{w} , são as velocidades médias;

u' , v' e w' , são as flutuações em torno da média. Por definição $\bar{u}' = 0$.

Agora iremos aplicar essa aproximação às equações da conservação da quantidade de movimento nas equações (2.24) e (2.25) respectivamente.

Direção X

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{u}')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{w}')}{\partial z} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \right) - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + f_v \end{aligned} \quad (2.29)$$

Direção Y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho \bar{v}' \bar{u}')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v}' \bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{v}' \bar{w}')}{\partial z} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} \right) - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + f_u \end{aligned} \quad (2.30)$$

O resultado das equações escritas acima em termos do valor médio, é conhecido como equações de Reynolds ou equações médias de Reynolds.

A equação de Reynolds para $\langle u \rangle$, componente média vertical da velocidade, é idêntica à equação do movimento para as quantidades totais, substituindo estas por quantidades médias e mais três novos termos que envolvem as flutuações da velocidade. Estes novos termos devem representar o efeito das flutuações da velocidade, (ou seja, da turbulência), no movimento médio.

Com a aproximação de “Reynolds” mostramos como os termos não lineares originam turbulência no movimento médio. Então, torna-se necessário modelizar (modelar) a influência dos termos de velocidade flutuante sobre o campo de velocidades médias. Ou seja, é necessário modelizar a turbulência.

Existem vários modelos para descrever os efeitos da turbulência, os quais podem ser classificados quanto ao número de equações adicionais que empregam. A seguir, descreveremos um modelo baseado no conceito de viscosidade turbulenta por analogia ao atrito molecular.

O primeiro método usado para modelar a tensão cisalhante turbulenta foi introduzido em 1877 por Boussinesq, que propoz que a tensão turbulenta poderia ser proporcional ao gradiente do campo médio de velocidades por um termo de viscosidade aparente. Boussinesq idealizou o termo de viscosidade turbulenta baseada numa analogia com a lei de Newton da viscosidade. Como mostrado abaixo.

$$\tau = -\mu \frac{\partial u}{\partial x_j} = \rho \nu \quad (2.31)$$

Sendo a constante de proporcionalidade μ é o coeficiente de viscosidade molecular. Como proposto por Boussinesq, então podemos escrever as equações abaixo.

Direção X

$$\tau_{xx} = -\rho \bar{u}'u' = N_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yy} = -\rho \bar{v}'v' = N_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.32)$$

Direção Y

$$\tau_{xy} = -\rho \bar{u}'v' = N_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \quad \tau_{yx} = -\rho \bar{u}'v' = N_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.33)$$

Direção Z

$$\tau_{xz} = -\rho \overline{u'w'} = N_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \quad \tau_{yz} = -\rho \overline{v'w'} = N_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.34)$$

Onde:

$N_{i,j}$, são os coeficientes de viscosidades turbulentas nas direções x, y e z, respectivamente.

Retomando as equações (2.29) e (3.30) e escrevendo agora em função de $N_{i,j}$, teremos as seguintes equações:

Direção X

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + N_{xx}) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + N_{xy}) \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + N_{xz}) \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + fv \end{aligned} \quad (2.35)$$

Direção Y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + N_{yx}) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + N_{yy}) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + N_{yz}) \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + fv \end{aligned} \quad (2.36)$$

Onde:

F_v e F_u dependem do campo de velocidades, e das propriedades de fundo.

É interessante observar nas equações acima os termos que adicionam os coeficientes de viscosidade turbulentos $N_{i,j}$, com os coeficientes de viscosidades moleculares (μ). Como se trata de propriedades de mesma grandeza. Normalmente é admitido como um coeficiente de viscosidade aparente $N_{i,j}$. Considerando a hipótese para o modelo adotado 2DH de que as propriedades são isotrópicas, elas não variam nas direções (x , y). Assim sendo, na equação final, consideraremos os coeficientes de viscosidades turbulentas nas direções (x , y), como um coeficiente geral N_H . De maneira análoga a equação da continuidade, integrando-se todos os componentes na direção Z no intervalo de $[-h, \zeta]$, aplicando a regra de Leibnitz e as equações (2.7) e (2.8). Chegaremos ao seguinte resultado:

Direção X

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H\langle u \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(H\langle u \rangle^2)}{\partial x} + \frac{\partial(H\langle u \rangle\langle v \rangle)}{\partial y} - Hf\langle v \rangle = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH^2}{2\rho_{avg}} \left(\frac{\partial \rho_{avg}}{\partial x} \right) \\ + \frac{N_H}{\rho_{avg}} \left[\frac{\partial^2(H\langle u \rangle)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(H\langle u \rangle)}{\partial y^2} \right] + \frac{\rho_a}{\rho_{avg}} C_D u_w^2 \sin \phi_w - \frac{g}{C_z^2} u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Direção Y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H\langle v \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(H\langle v \rangle^2)}{\partial y} + \frac{\partial(H\langle u \rangle\langle v \rangle)}{\partial x} - Hf\langle u \rangle = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH^2}{2\rho_{avg}} \left(\frac{\partial \rho_{avg}}{\partial y} \right) \\ + \frac{N_H}{\rho_{avg}} \left[\frac{\partial^2(H\langle v \rangle)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(H\langle v \rangle)}{\partial y^2} \right] + \frac{\rho_a}{\rho_{avg}} C_D u_w^2 \sin \phi_w - \frac{g}{C_z^2} v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Sendo:

$\frac{g}{C_z^2} v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$, pode ser definida com a parcela de tensão no fundo de ventos

Observar-se que as equações acima os últimos dois termos. Levam em consideração as forças devido à tensão do vento na superfície e a tensão no fundo respectivamente.

Onde:

ρ_a , é a densidade do ar que é aproximadamente 1.2 kg m^3 ,

C_D , é o coeficiente empírico de arrasto unidimensional,

u_w , é a velocidade do vento,

Φ_w , é o ângulo entre a direção do vento e a direção positiva de y medida no sentido horário.

2.5 EQUAÇÕES PARA O TRANSPORTE DE CONSTITUINTES

Quando uma nuvem de material dissolvido é lançada em um copo d'água receptor, esta se propaga, dilui-se e espalha-se à medida que se move com o escoamento. Isto acontece em função da associação de vários processos de natureza física, tais como advecção, difusão, dispersão e mistura.

A advecção se refere ao transporte do constituinte devido aos efeitos da corrente líquida, tal como as correntes geradas em função do efeito das marés em regiões costeiras e estuarinas.

A difusão inclui o espalhamento do constituinte pelo movimento molecular e turbulento das partículas do fluido receptor. A dispersão, distintas da difusão, é o processo de espalhamento devido à ação conjunta da advecção e da difusão.

Por fim, a mistura é a distribuição do constituinte no corpo d'água receptor e resulta da ação conjunta de todos os processos de espalhamento.

Na modelagem de transporte de constituintes em escoamentos horizontais, a equação de conservação da massa pode ser escrita em termos gerais para qualquer substância introduzida em um meio fluido. Para um escoamento tridimensional turbulento, a equação de transporte de soluto, ou equação de advecção difusão para um constituinte (C) pode ser definida como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_m \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_m \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_m \frac{\partial C}{\partial z}\right) \pm \phi_o \quad (2.39)$$

C é a concentração de um constituinte qualquer;

Φ_o , é o termo fonte ou sumidouro;

D_m ; coeficiente de difusão.

Podemos aplicar nesta equação os conceitos de média temporal.

$$C = \bar{C} + C' \quad (2.40)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} C dt \quad (2.41)$$

$$\bar{C}' = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} C' dt = 0 \quad (2.42)$$

Assim a equação de transporte de constituinte, torna-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'C'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v'C'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w'C'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_m \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_m \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_m \frac{\partial C}{\partial z}\right) \pm \phi_o \end{aligned} \quad (2.43)$$

Os termos cruzados $\overline{u'C'}$, $\overline{v'C'}$ e $\overline{w'C'}$ representam o fluxo de massa do constituinte devido a efeitos da turbulência. Por analogia à lei de Fick da difusão assume-se que este fluxo é proporcional ao gradiente da concentração do constituinte, na direção em que o constituinte decresce. Deste modo, os termos podem ser escritos como:

$$\overline{u'C'} = -D_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \quad (2.44)$$

$$\overline{v'C'} = -D_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \quad (2.45)$$

$$\overline{w'C'} = -D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad (2.46)$$

Sendo:

D_x , D_y e D_z são coeficientes de difusões turbulentas.

Substituindo-se as equações (2.44), (2.45) e (2.46) na equação (2.39), integrando o resultado ao longo da vertical e levando-se em consideração as condições de constituinte e de contorno cinemática, para superfície e para o fundo, obtém-se:

$$\frac{\partial CH}{\partial t} + \frac{\partial C\langle u \rangle H}{\partial x} + \frac{\partial C\langle v \rangle H}{\partial y} = + \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \Sigma H\phi_0 \quad (2.47)$$

Em que C é a concentração de soluto média na profundidade.

Os termos de dispersão são definidos como:

$$D_{xx} = \frac{(k_1 U^2 + k_t V^2) H \sqrt{g}}{C \sqrt{U^2 + V^2}} \quad (2.48)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(k_1 - k_t) UVH \sqrt{g}}{C \sqrt{U^2 + V^2}} \quad (2.49)$$

$$D_{yy} = \frac{(k_1 V^2 - k_t U^2) H \sqrt{g}}{C \sqrt{U^2 + V^2}} \quad (2.50)$$

Sendo:

k_1 e k_t são os termos de dispersão longitudinal e de difusão turbulenta, médios na vertical,

U e V = componentes da velocidade, média na vertical, para as direções x e y, respectivamente.

H = profundidade de coluna d'água

g = Aceleração da gravidade

O termo ϕ_0 , quando representando uma fonte de contribuição (emissário), possui a seguinte configuração:

$$\phi_0 = \frac{Q_0}{A_0 H} C_0 \quad (2.51)$$

Sendo:

Q_0 = vazão de descarga do emissário (m^3 / s)

A_0 = área de descarga do emissário (m^2)

C_0 = concentração do constituinte lançado

Fontes e sumidouros também são conhecidos como funções forçantes, desde que elas sejam as causas das mudanças hidrodinâmica e da qualidade d'água. Algumas das fontes e sumidouros para água incluem massa, momento e energia. Porém, é quase impossível incluir todas as possíveis fontes e sumidouros em um determinado modelo. Assim, os modelos só incluem as condições que são consideradas importantes nas aplicações dos mesmos.

3. ESTRUTURA DO PROGRAMA UTILIZADO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A grande dificuldade quando da modelagem de sistemas tipicamente estuarinos, como no caso da Baía do Guajará, é a grande quantidade de dados que devem ser processados simultaneamente. Estes dados são de natureza física bastante diversa.

Dentre eles, podemos citar:

- Descrição da topografia do fundo, ou seja, da batimetria;
- Padrões de georreferenciamento utilizados;
- Dados sobre as variações de amplitudes de maré em regiões específicas;
- Informações sobre o regime de ventos local;
- Características físicas da água;
- Parâmetros físicos e matemáticos associados ao método de solução

usado.

Grande parte destas informações são dinâmicas, o que dita a necessidade de programas de computador que possam fazer de forma eficiente o gerenciamento de todos estes dados e seu uso efetivo, para a construção de um modelo do tipo elementos finitos.

A ferramenta computacional utilizada neste trabalho foi o SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), um sistema de modelos elaborado na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ (Rosman, 2001).

Trata-se de um programa para modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de escalares passivos em corpos de água naturais. Ele oferece recursos para modelagem de corpos de água com superfície livre sem estratificação vertical significativa.

Nesta classe de corpos de água podem-se encontrar rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras.

O SisBAHIA disponibiliza vários modelos que podem ser consultados em seu manual de instruções. A seguir estão sendo explicados resumidamente os modelos que foram usados no caso em estudo.

3.2 MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico representa a circulação hidrodinâmica, ou seja, o escoamento do fluido em domínios naturais de geometrias complexas. O modelo hidrodinâmico permite um mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetria complexa, campos de vento e atrito do fundo. Estes dados podem variar dinamicamente no tempo e no espaço.

Esse modelo pode ser definido em dimensões 3D ou 2DH. As forças que dominam esse modelo são do tipo barotrópicas, de maneira que os efeitos da densidade variáveis sejam desprezíveis.

Os resultados podem ser visualizados tanto em 3D como em 2DH dependendo claro dos dados de entrada.

Os resultados da análise hidrodinâmica servem como dados de entradas do modelo lagrangeano, pelo fato do modelo hidrodinâmico determinar o direcionamento do escoamento.

3.3 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO:

O modelo lagrangeano é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos podendo ser definido nas dimensões 3D ou 2DH. Este tipo de modelo é ideal para simular o transporte de escalares que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna d'água. Esse tipo de modelo é mais adequado para simular o transporte de manchas ou plumas contaminantes que sejam pequenas em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico.

O acoplamento do modelo de transporte com o modelo hidrodinâmico pode ser condicionado por valores mínimos de velocidade ou de tensão exercida no fundo por correntes ou ondas.

3.4 ESTUDO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NA BAÍA DO GUAJARÁ

3.4.1 Cenário de Simulação

Para este trabalho o cenário considerado para estudo foi à simulação do domínio com a influência das correntes de mar e sem ação dos ventos. Esses dados são usados para a execução do Modelo Hidrodinâmico.

3.4.2 Contorno do Domínio

O primeiro passo da construção do modelo é a definição dos contornos do corpo d'água a ser modelado. O detalhamento dos mesmos deve estar de acordo com os objetivos do projeto.

As definições desses contornos podem ser obtidas através de diversas bases, como imagem de satélite, cartas náuticas, cartas topográficas e fotos aéreas.

Para os contornos da Baía do Guajará foram utilizadas imagens de satélite e cartas náuticas digitalizadas como base. Esses contornos foram tratados no programa surfer no qual o SisBAHIA utiliza como software de pré-processamento.

O SisBAHIA nomeia dois tipos de contornos fechados e abertos para formar o mapa base do domínio. Os contornos fechados, chamados de contornos de terra, e os contornos abertos, chamados de contornos de água.

O contorno chamado de terra representa as margens do domínio da modelagem. Nele são representadas as margens, estuários, as desembocaduras de rios de interesse e ilhas. Já o contorno de água representa um limite de conveniência demarcando o domínio em água. Ou seja, o encontro da massa d'água a ser modelada com a massa d'água exterior.

A adição desses dois contornos forma o mapa base utilizado pelo SisBAHIA na simulação. É importante ressaltar que ambos os contornos já devem estar georeferenciados antes da união dos mesmos. O mapa base do modelo da Baía do Guajará pode ser visto na figura (3.1)

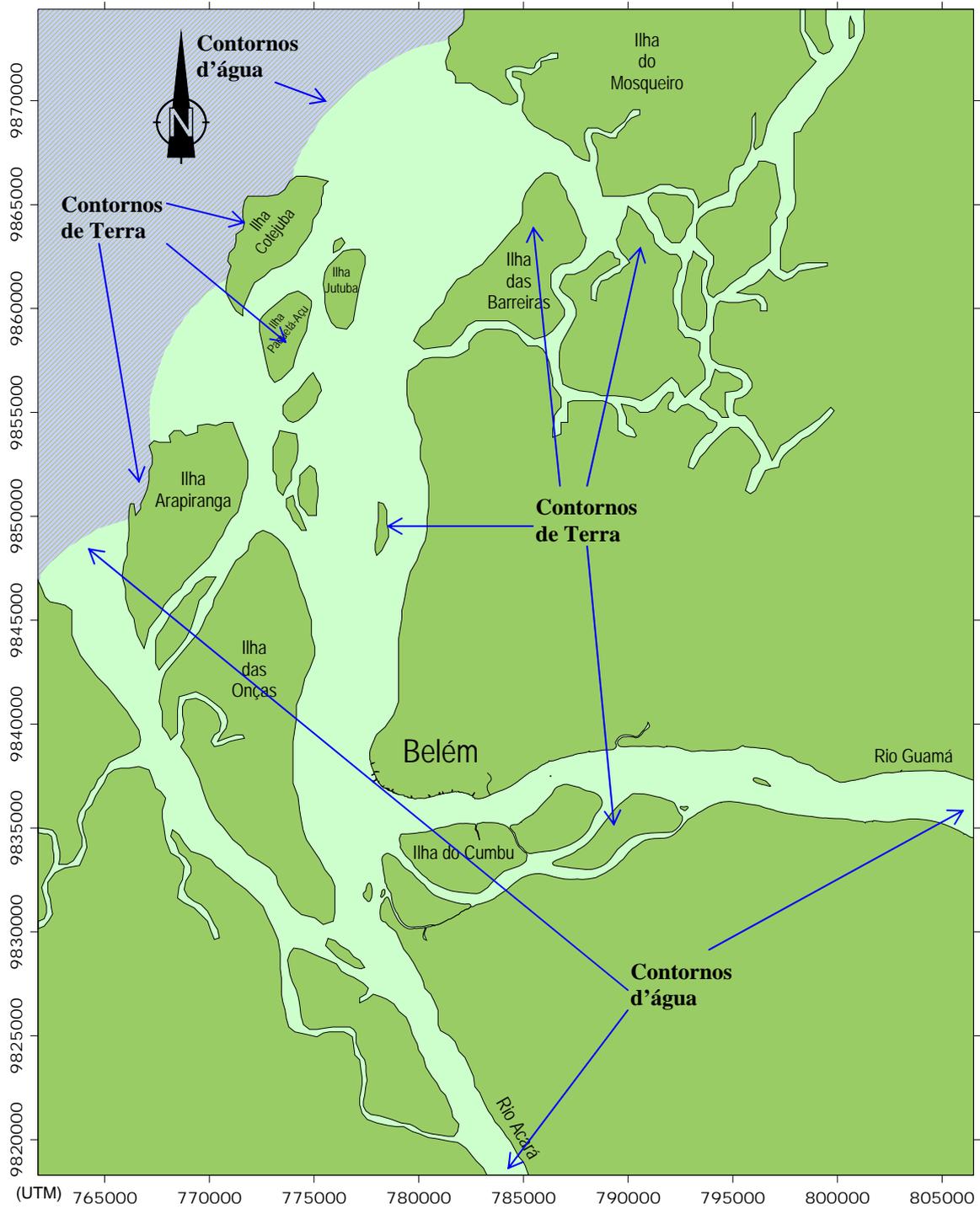


Figura 3.1 - Contornos de terra e água utilizado no SisBAHIA

3.5 CARACTERÍSTICAS DA MALHA ADOTADA

O método dos elementos finitos é baseado no método de Rayleigh - Ritz (Assan, 1999). O método prevê a divisão do domínio de integração, contínuo, em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos. Dessa forma o meio que era contínuo torna-se discreto.

A malha utilizada para a modelagem do estuário da baía do Guajará respeita todos os contornos limites do domínio a ser estudado. Essa etapa foi construída computacionalmente mediante o programa gerador de malhas Argus ONE que é o programa malhador utilizado pelo SisBAHIA. Essa etapa é denominada de pré-processamento. As malhas geradas pelo Argus One são do tipo linear. A discretização espacial do domínio pode ser feita através de dois tipos de elementos no SisBAHIA tipos triangulares e quadrangulares.

A malha adotada tem 1411 elementos e 6707 nós construída com elementos do tipo quadrangulares. A discretização do modelo é representada na figura (3.2).

Quanto maior a densidade de elementos na malha, menor a escala dos fenômenos detectados pelo cálculo. Dessa maneira a malha foi refinada principalmente próxima das regiões fontes de modo a viabilizar o cálculo das concentrações com a acurácia devida.

Na definição da malha foi buscado um equilíbrio entre a captura dos fenômenos de interesse e o tempo de computação.

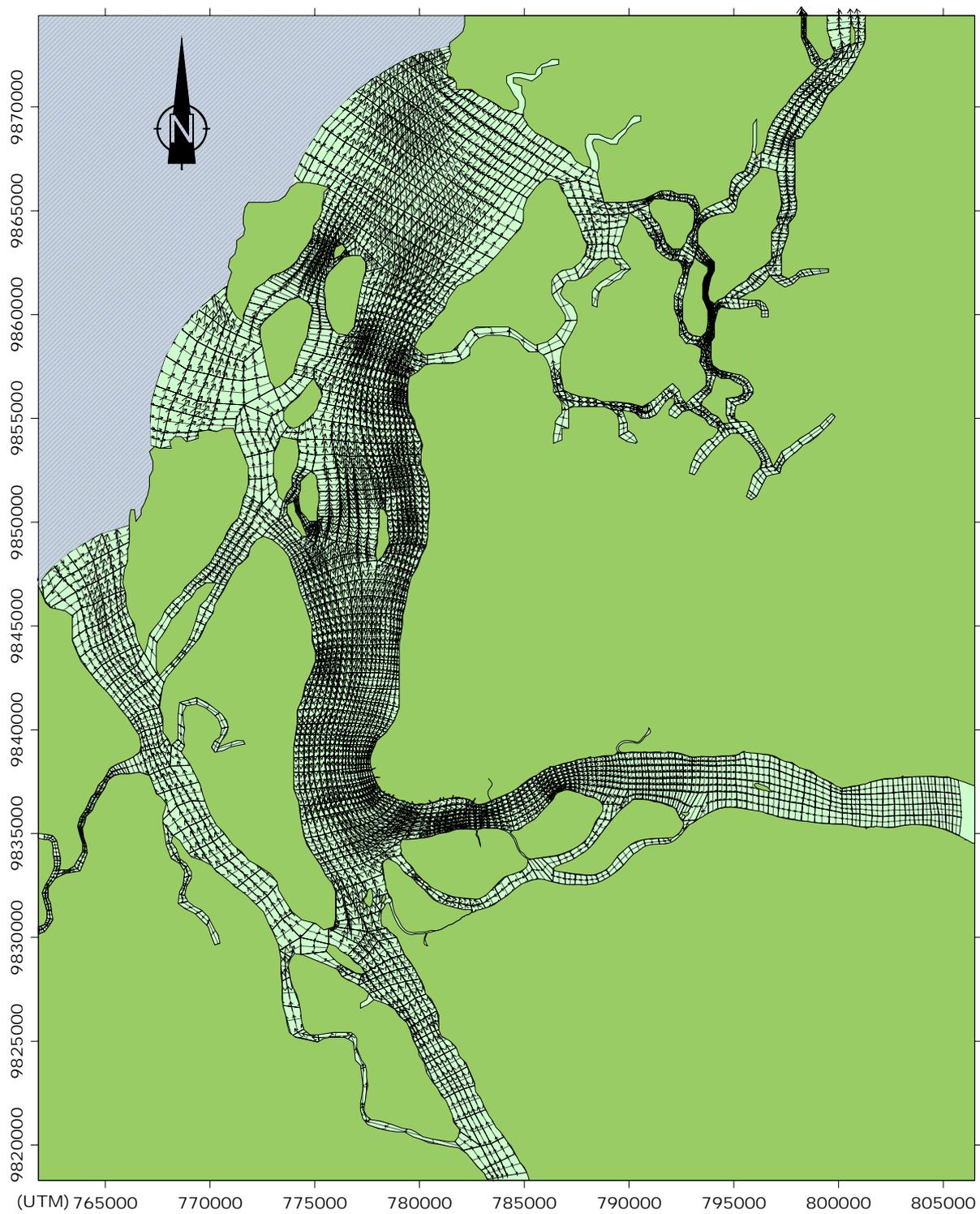


Figura 3.2 - Malha de discretização da Baía do Domínio

3.6 DETERMINAÇÃO DA BATIMETRIA

Um dos principais requisitos para que se possam obter resultados satisfatórios nos modelos hidrodinâmicos consiste na qualidade dos dados batimétricos. Eles devem ser capazes de reproduzir um bom detalhamento do relevo submarino da área estudada (Odd e Murphy, 1992). As informações da batimetria da região usadas neste trabalho foram obtidas através da junção dos dados das cartas náuticas e croqui de navegação do rio Guamá. As cartas náuticas e o croqui são fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – DHN. A tabela 3.1 mostra as características das fontes adotadas.

Tabela 3.1 Características das fontes.

Carta Náutica Nº	Nome	Escala	Projeção	Datum Horizontal
310 (1984) 3º Ed.	Brasil - Costa Norte De Salinópolis a Belém	1: 200000 na lat 0° 50'	Mercator	Córrego Alegre Minas Gerais
316 (2003) 5º Ed.	Brasil - Rio Pará De Belém a Mosqueiro	1: 49990 Na lat 01° 17', 75	Mercator	Córrego Alegre Minas Gerais
320 (2001) 5º Ed.	Brasil - Rio Pará Porto de Belém	1: 15000 Na lat 01° 26'	Mercator	WGS – 84

A obtenção das cartas náuticas no formato digital foi de grande importância para o detalhamento e precisão da batimetria. Para isso, bastou sobrepor o mapa base feito no programa Surfer sobre as cartas náuticas georeferenciadas no sistema UTM (Projeção Universal Transversal de Mercator). A figura (3.3) mostra o detalhe de uma determinada parte do domínio.

Para o rio Guamá os dados de batimetria foram obtidos através do croqui já citado acima. Primeiramente foram digitalizadas as folhas referentes ao trecho de interesse. Em seguida, sobrepôs as mesmas em cima do mapa base. A figura (3.4) mostra esse detalhe.

É importante ressaltar que, para alguns braços de rios, mais precisamente os da ilhas das Onças e Ilha do Mosqueiro, adotou-se uma batimetria arbitrária. Isso ocorreu devido ao fato de não existir dados batimétricos para esses braços nem em cartas ou croquis. O resultado final é mostrado através das isolinhas de profundidades médias na figura (3.5).

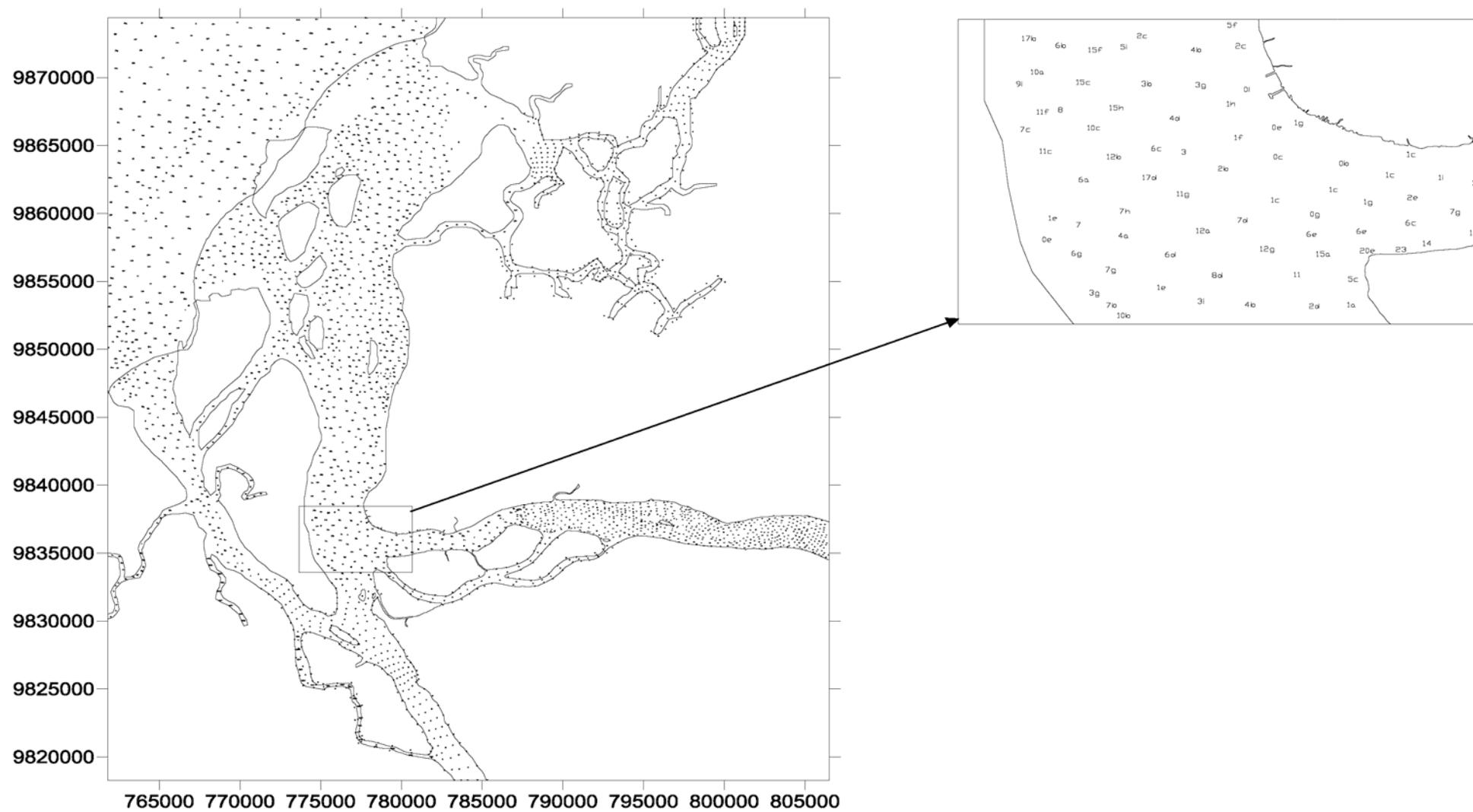


Figura 3.3 - Detalhe da batimetria existente nas cartas.

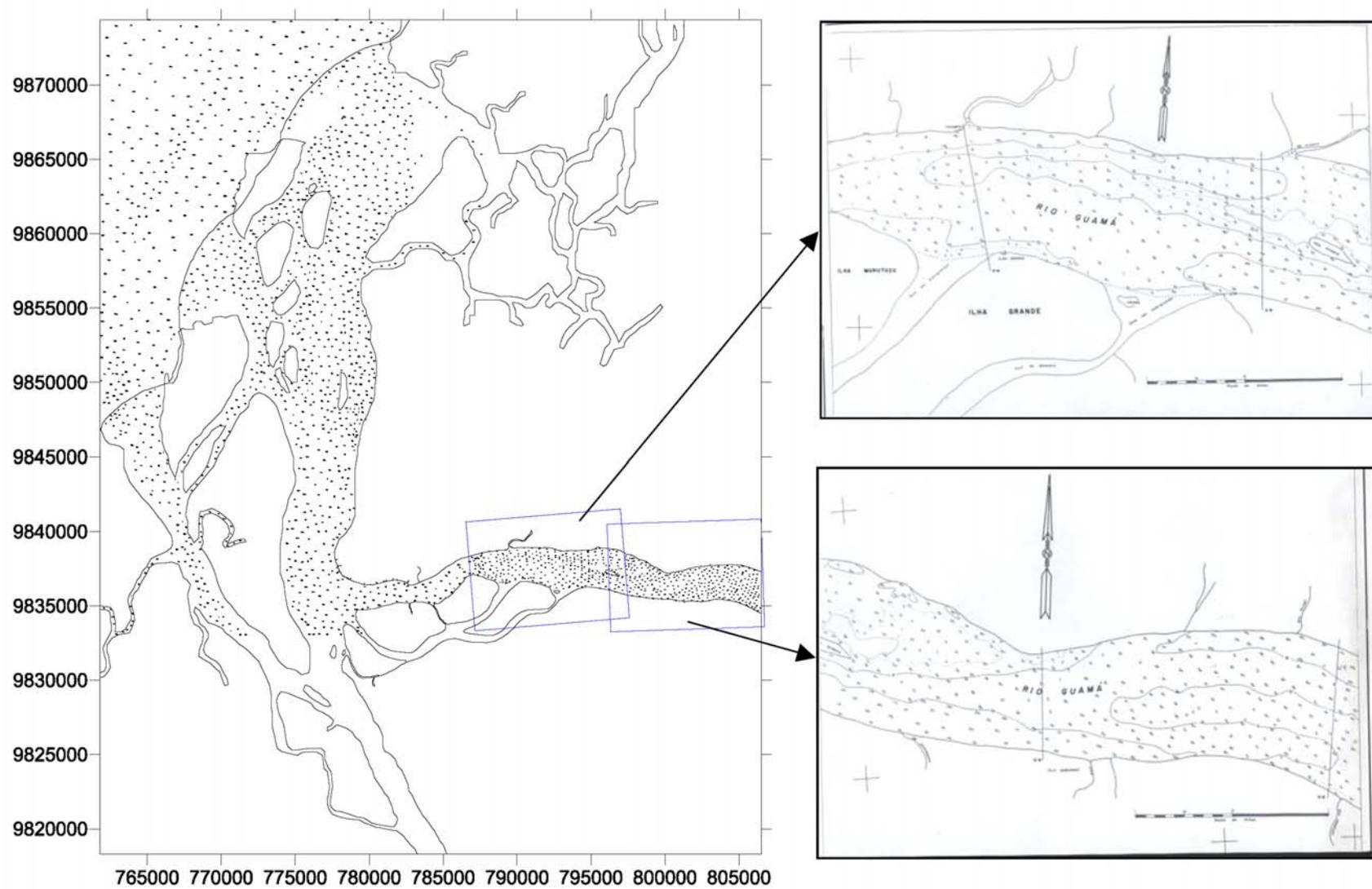


Figura 3.4 - Detalhe da batimetria do Rio Guamá.

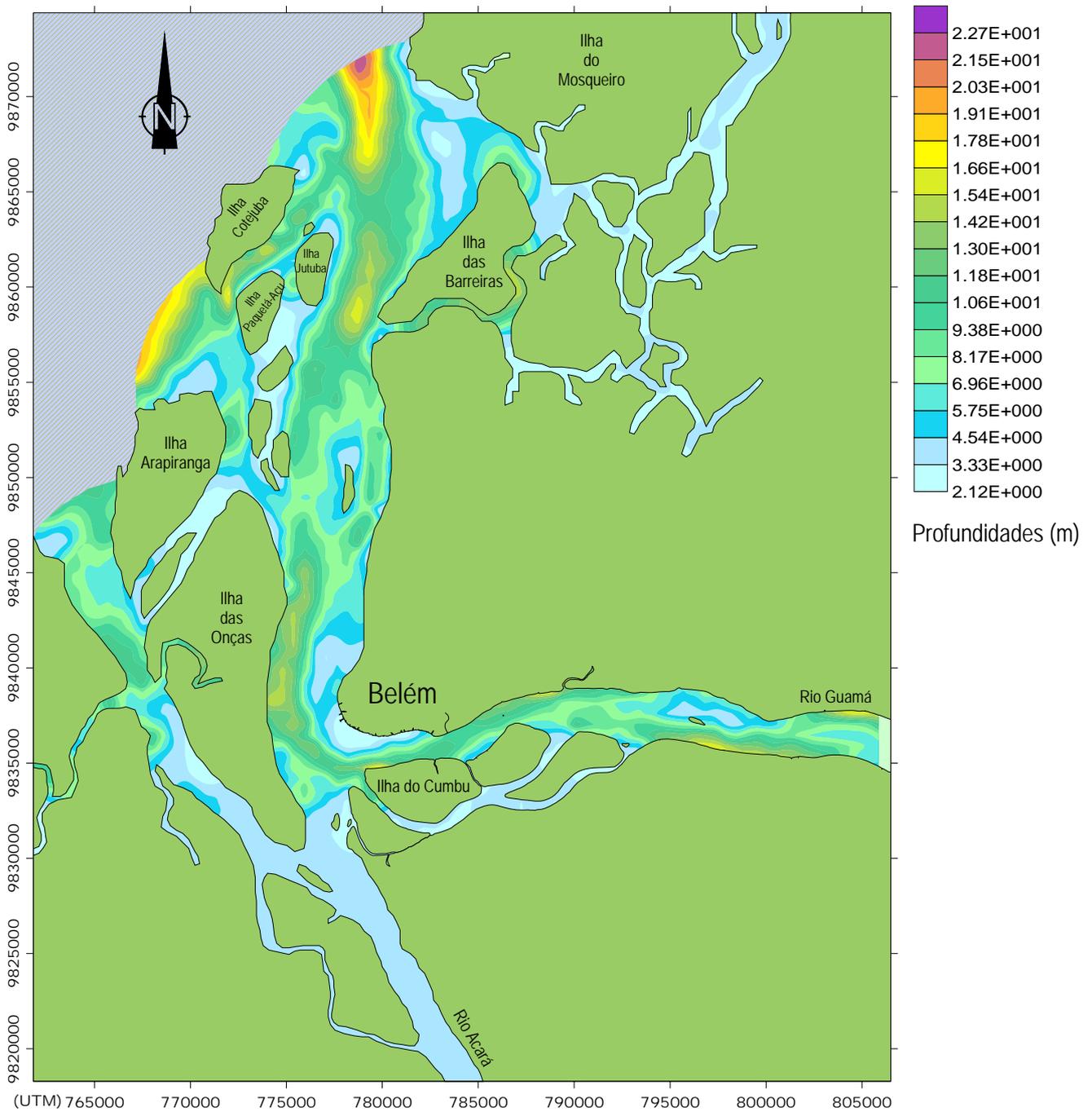


Figura 3. 5 - Batimetria do fundo do domínio visto pelo SisBAHIA

3.7 RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO

Para a determinação da rugosidade equivalente de fundo é necessário ter conhecimento dos sedimentos presentes no leito do corpo d'água. A amplitude da rugosidade equivalente do fundo (ϵ) é função direta do material componente do leito e é empregada no cálculo do coeficiente de Chézy, que, por sua vez, é utilizado na equação da tensão de atrito no fundo (τ_i).

$$\tau_i = \rho\beta U_i$$

Onde:

τ_i = Vetor tensão de atrito no fundo;

ρ = Massa específica;

U_i = Vetor velocidade nas direções (x, y);

O parâmetro β depende da maneira em que o módulo 2DH seja empregado. Como para esse trabalho o módulo utilizado foi a 2DH não acoplada ao módulo 3D, a lei quadrática usual é empregada da maneira satisfatória.

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2}$$

Sendo:

C_h : É o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\epsilon} \right)$$

e,

H: é a altura da coluna d'água

Os valores para a rugosidade equivalente de fundo (ϵ) dados na Tabela 3.2. São recomendados por ABBOT & BASCO (1989).

Tabela 3.2 - Valores de Rugosidades

Terreno ou leito de terra	
Leito com transporte de sedimentos	$0.007\text{m} < \varepsilon < 0.0500\text{m}$
Leito com vegetação	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1500\text{m}$
Leito com Obstáculos	$0.1500\text{m} < \varepsilon < 0.400\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \varepsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo de pedregulho	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Fundos de pedras médias	$0.0150\text{m} < \varepsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.1000\text{m}$
Fundos com rochas	$0.1000\text{m} < \varepsilon < 0.2000\text{m}$
Fundo de Concreto	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$

Em um estudo dos sedimentos do fundo da Baía do Guajará realizado por Pinheiro (1987), verificou-se que o diâmetro médio dos sedimentos varia entre 0,07 e 0,48 mm nessa região. Esses sedimentos podem ser incluídos na classe entre areia fina a média. Observando-se o mapa de distribuição do diâmetro médio na figura (3.6).

Pode ser verificada certa predominância de areia nessa região. Principalmente em frente à cidade de Belém.

Dessa maneira, podemos considerar que existe de certa forma uma predominância de areia fina na sedimentação do fundo do terreno. Dessa forma o valor de 0,03m foi adotado para a rugosidade equivalente de fundo como sugerido na Tabela 3.2, para leito arenoso com transporte de sedimentos.

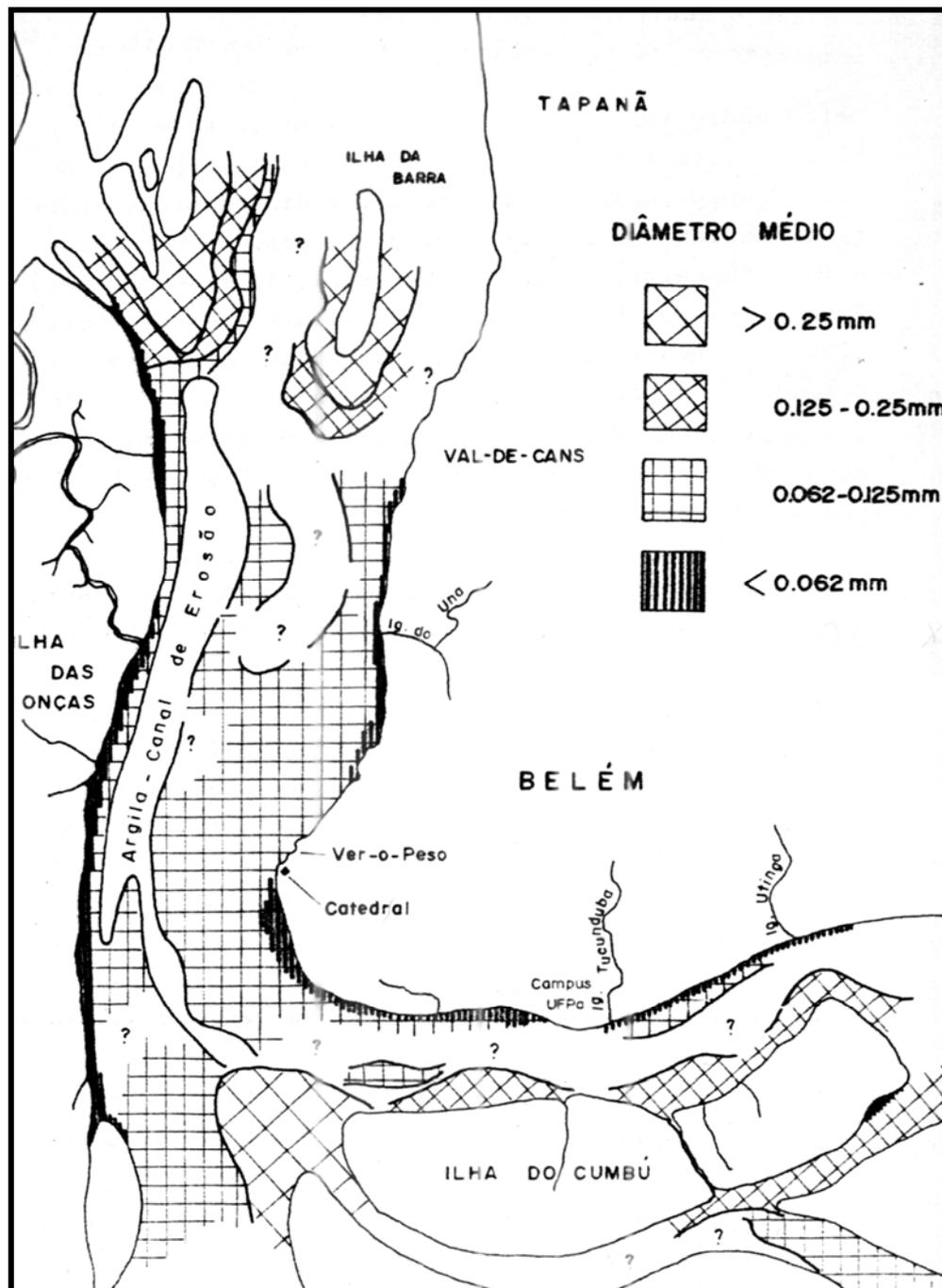


Figura 3.6 - Mapa de distribuição do diâmetro médio dos sedimentos da Baía do Guajará (Fonte: Pinheiro 1987).

3.8 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições adotadas nesse trabalho foram todas estimadas, pois, para o domínio estudado não foi possível à obtenção das mesmas. Claro que seria de fundamental importância ter as medições de altura de maré, velocidade e número mais provável de coliformes fecais lançados pelos principais canais. Principalmente no sentido de calibrar o modelo. Entretanto, a inexistência destes dados tornou necessária a realização desta estimativa.

Segundo Rosman (2001) para as condições de contorno para fronteiras terrestres, prescrevem-se como condição típica à especificação da componente da velocidade ou de fluxo normal ao contorno. Para fronteiras abertas é apresentada a elevação da superfície livre ao longo do contorno aberto

Na modelagem da circulação hidrodinâmica inseriu-se a maré como um forçante, principalmente porque o estudo é focado mais para a região estuarina, na qual a maré exerce grande influência.

A série temporal de elevação do nível d'água devido à maré astronômica adotada neste estudo corresponde a registros obtidos no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), para o Porto de Belém. Disponível no *site* da própria FEMAR (<http://www.femar.com.br>).

Os registros compreendem 29 componentes harmônicas, que estão apresentadas na Tabela 3.3. O gráfico gerado por essas constantes é apresentado na figura (3.11).

Tabelas 3.3 - Componentes harmônicas obtidas a partir dos dados de maré no
Porto de Belém.

Nº	Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
1	M2	44714,164	1,1630	5,8294
2	S2	43200,000	0,3330	0,2094
3	N2	45570,053	0,2230	5,5676
4	M4	22357,082	0,1220	4,4157
5	K1	86164,090	0,0950	5,5327
6	K2	43082,0452	0,0910	0,1920
7	O1	92949,629	0,0900	5,1138
8	Msf	1275721,387	0,0830	0,6807
9	MS4	21972,0214	0,0760	4,8695
10	Ssa	15778458,751	0,0670	0,1047
11	L2	43889,832	0,0650	5,7596
12	MU2	46338,327	0,0590	0,8901
13	MN4	22569,026	0,0510	4,1364
14	NU2	45453,615	0,0480	5,1662
15	MO3	30190,690	0,0440	3,0543
16	2N2	46459,348	0,0430	4,9742
17	Mm	2380713,137	0,0420	0,2618
18	MK3	29437,703	0,0380	3,5779
19	Sa	31556955,922	0,0360	5,6025
20	Mf	1180292,288	0,0260	1,1868
21	T2	43259,217	0,0260	6,0563
22	P1	86637,204	0,0240	5,6723
23	Q1	96726,084	0,0070	1,7977
24	M3	29809,442	0,0130	3,1591
25	M1	89399,694	0,0090	2,5482
26	SN4	22176,694	0,0080	4,6775
27	MNS2	42430,07141	0,0060	1,5533
28	OO1	80301,867	0,0030	0,6981
29	J1	83154,516	0,0010	3,4558

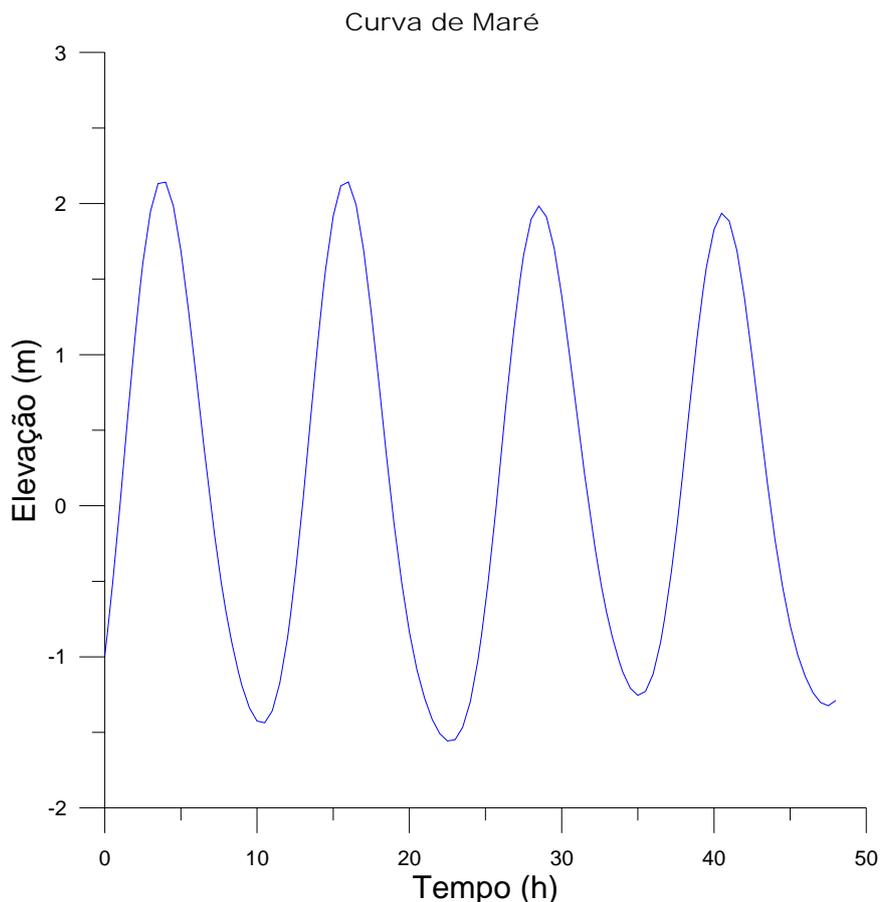


Figura 3. 7 - Curva de maré utilizada na modelagem, gerada com as constantes harmônicas da Tabela 3.3.

Neste estudo foi considerado a diferença de fase entre cada fronteira aberta. Tomou-se como base de cálculo a distância e o tempo entre as fronteiras abertas do domínio.

Primeiramente adotou-se um ponto de referência na fronteira F2 como mostra a figura (3.8). Estimou-se que a diferença de fase entre as fronteiras abertas (F2, F3 e F4) era em torno de 54 minutos aproximadamente. Em seguida, mediu-se a distância entre o ponto de referência (P.R), de coordenadas ($x = 781406,46\text{m}$ e $y = 9872946,70\text{m}$), adotado e as fronteiras F4, F5 e F6. Com essas informações e utilizando uma regra de três simples entre as distâncias das fronteiras, e a altura da maré em F2, calculou-se o tempo entre as mesmas. O resultado obtido é mostrado na tabela 3.4.

É importante deixar bem claro que todas essas condições de contorno são estimadas, pois, não foi realizada nenhuma medição para obter as mesmas.

A tabela 3.4 abaixo mostra o resultado obtido.

Tabela 3.4 – Condições de contorno

Fronteira	Distancia entre P.R e as Fronteiras(m)	Tempo (min)
F2 – F4	d1 = 32252	54
F2 – F5	d2 = 54395	91
F2 – F6	d3 = 42729	71

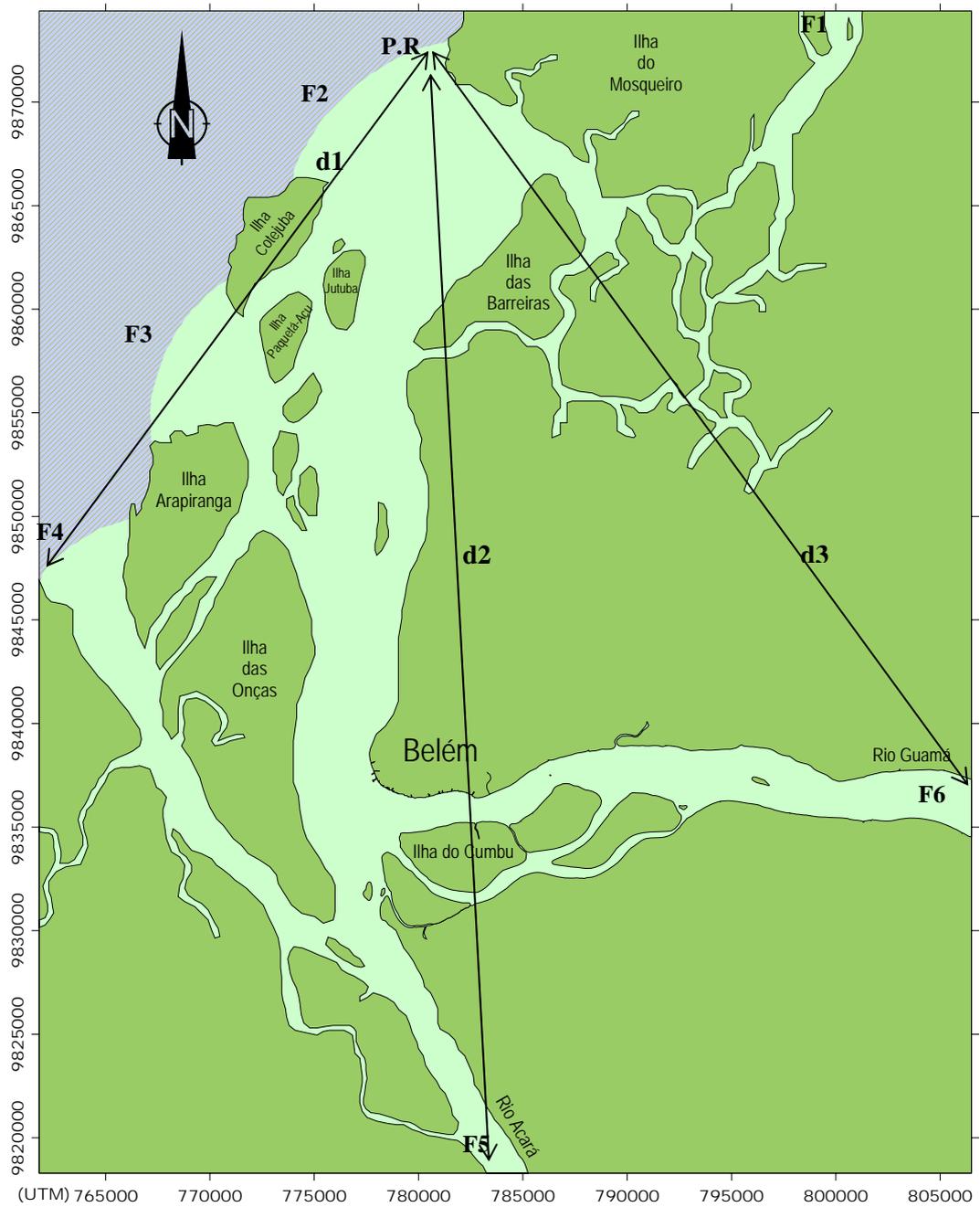


Figura 3.8 - mostrando as condições de contornos adotadas

3.8.1 Condição Inicial

Para a simulação da circulação hidrodinâmica através do SisBAHIA é necessário fornecer somente as condições iniciais 2DH, que são os valores da elevação da superfície livre ζ e as componentes de velocidade U e V, para o instante inicial t_0 , em todos os nós do domínio.

Para o caso em estudo, foi necessário apenas colocar o valor da elevação da superfície no instante 0. Este valor é fornecido pelo próprio SisBAHIA na curva da harmônica.

3.9 ANÁLISE DE TRANSPORTE

O objetivo dessa análise é mostrar o mais direcionamento da mancha ou pluma dos contaminantes que são lançados diariamente em natura pelos principais canais ou igarapés de Belém que desembocam na baía do Guajará. Os canais ou igarapés analisados foram (Mata fome, Val-de-cans, Uma, Tamandaré, Reduto e Armas).

Apesar dessa escassez de informações, segundo Ramos (2004), estima-se que para todos os canais da região metropolitana de Belém a vazão diária de esgoto esteja em torno de 60.000 (m³/dia). Dessa forma foi adotado o valor de 0,42 m³/s para todos os canais e igarapés. Foi também estimado o valor da concentração de 10⁸ NMP/ m³ de (CLF) para os mesmos

Como no período aproximado de 24 horas acontecem 2 cheias e vazantes da maré, programou-se que no momento inicial das 2 vazantes os canais iniciam a liberação das concentrações e param no instante que a maré começa a encher novamente. Foi também considerado nesse modelo o decaimento de primeira ordem. Para o caso típico dos coliformes fecais, o decaimento é determinado a partir dos designados T₉₀ (tempo necessário para a redução em 90% da população microbiana inicialmente presente). Foi adotado o valor de 21600 s. O SisBAHIA considera o tempo de vida de 3 vezes o tempo do decaimento. Nesse caso, o tempo de vida total dessas substâncias está em torno de 18 horas. As localizações dos canais estão mostradas na figura (5.3).

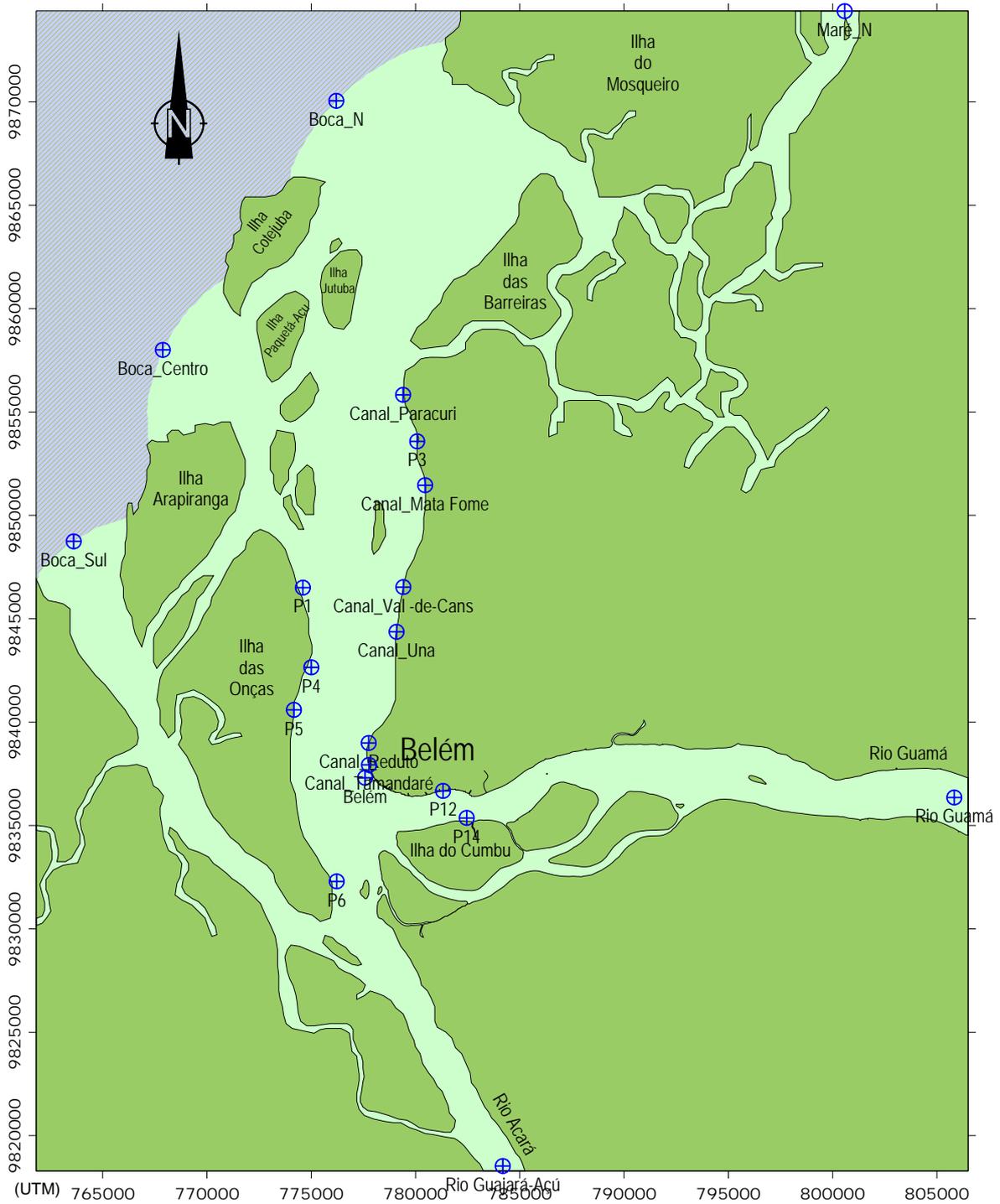


Figura 3. 9 - Mostrando os canais ou igarapés no mapa base.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 MODELO HIDRODINÂMICO

A determinação dos padrões das correntes é feita utilizando-se os resultados fornecidos pelo modelo 2DH, através de campos de vetores representativos da velocidade. Estes vetores são resultantes das componentes em x e y , promediada ao longo da coluna d'água, e têm como intensidade o módulo destas componentes. Desta forma, a observação dos campos de vetores permite avaliar o escoamento médio das águas no interior do estuário.

Para efeito de comparação foram utilizadas as medições de altura da maré utilizada por Lurdes (2005) em seu trabalho de dissertação. As estações foram colocadas dentro do mapa base. Como pode ser visto na figura (4.1) abaixo.

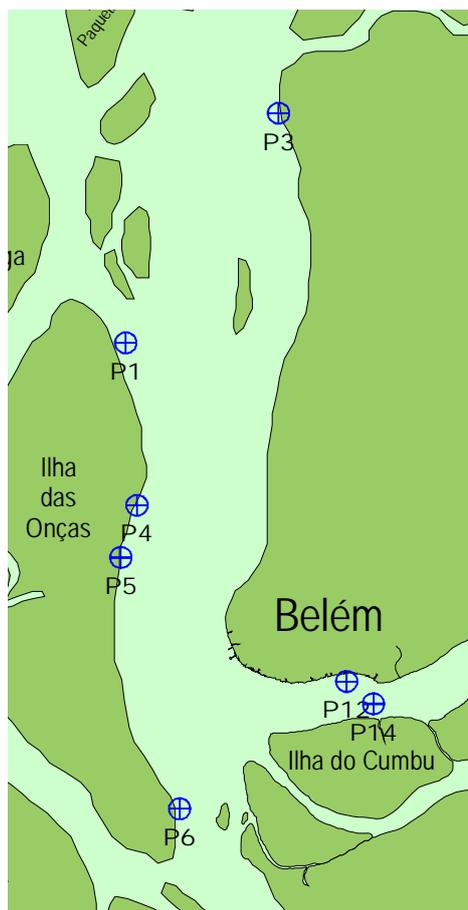


Figura 4. 1 - localizações das estações de medição no mapa base.

Para cálculo da simulação hidrodinâmica o passo de tempo utilizado foi de 50 s. No SisBAHIA o operador é capaz de programar o mesmo para que sejam salvos os dados provenientes da simulação. Nesse trabalho os resultados foram salvos no intervalo de 900s.

Os gráficos que seguem representam os instantes em que foi realizada a análise hidrodinâmica.

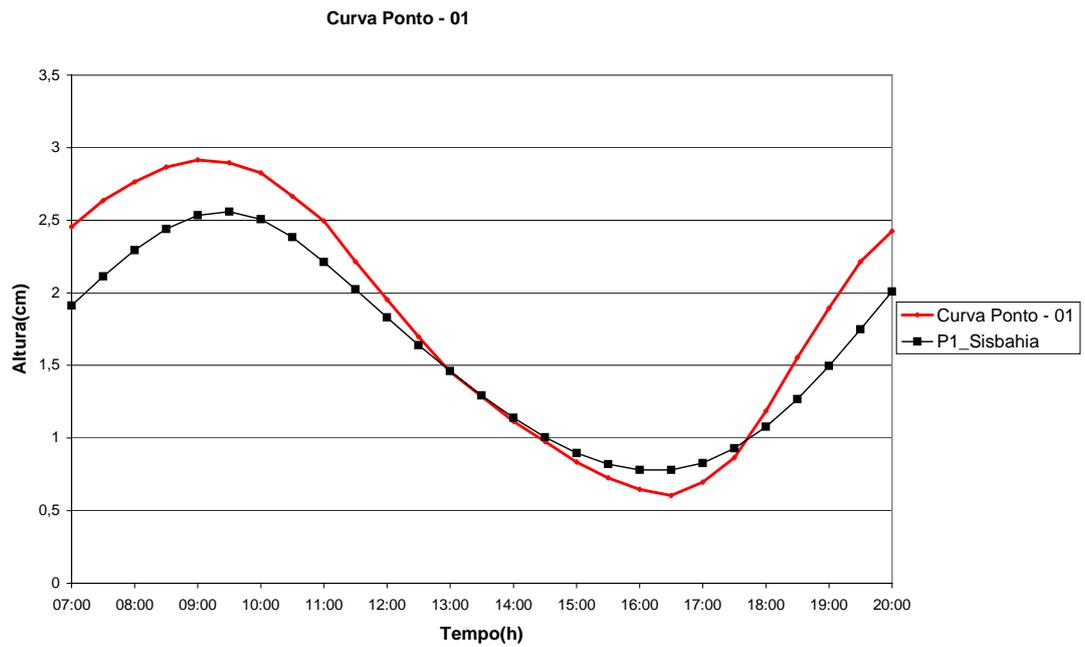


Figura 4.2 - Variação do nível da água para Estação P1

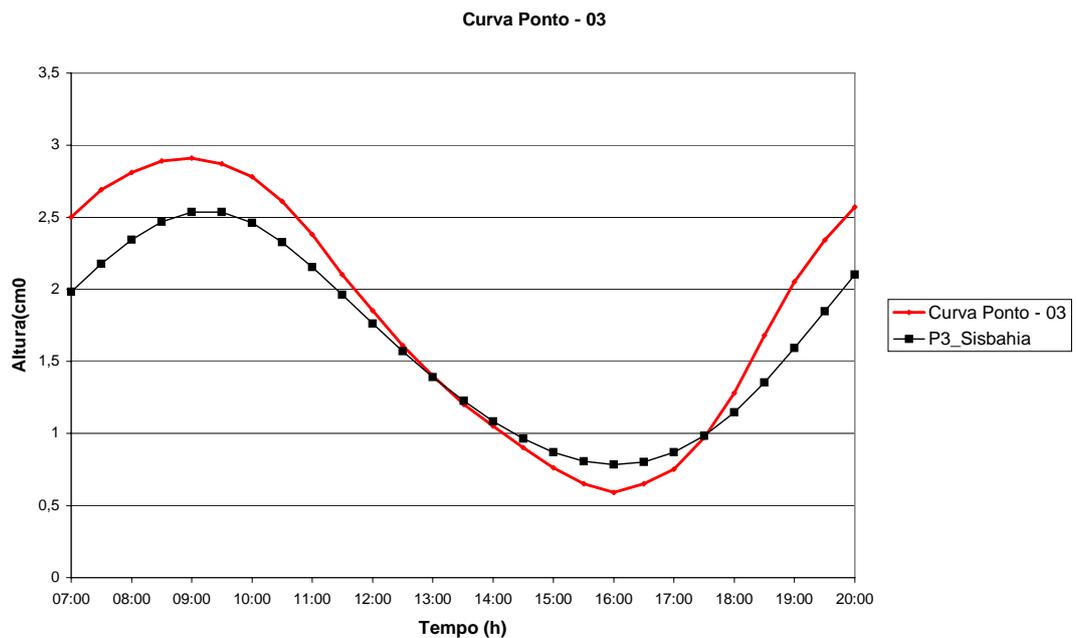


Figura 4.3 - Variação do nível da água para Estação P3

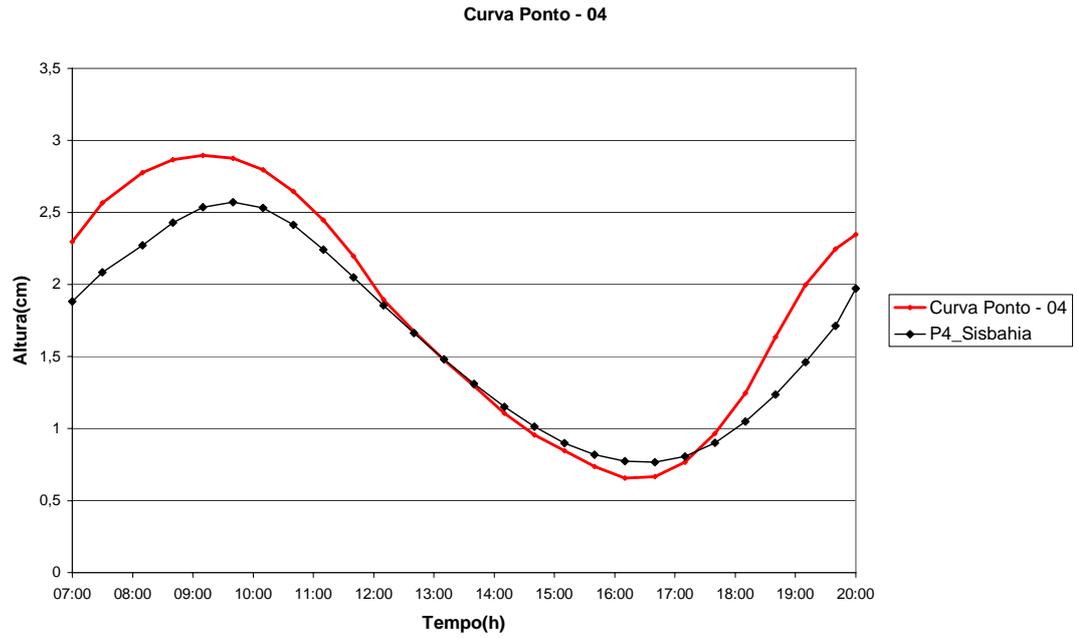


Figura 4.4 - Variação do nível da água para Estação P4

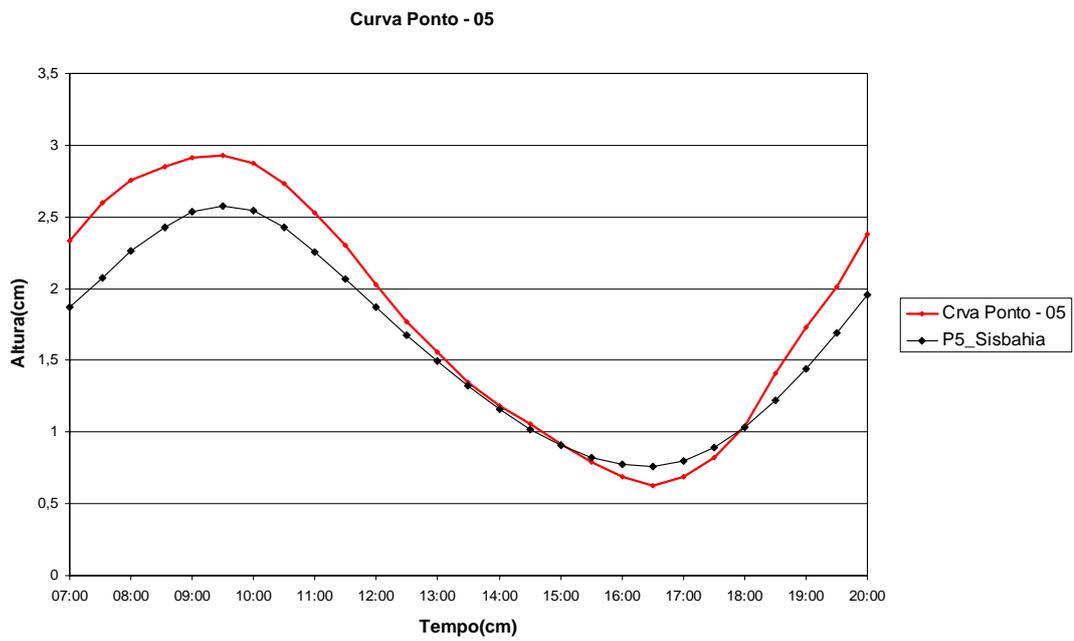


Figura 4.5 - Variação do nível da água para Estação P5

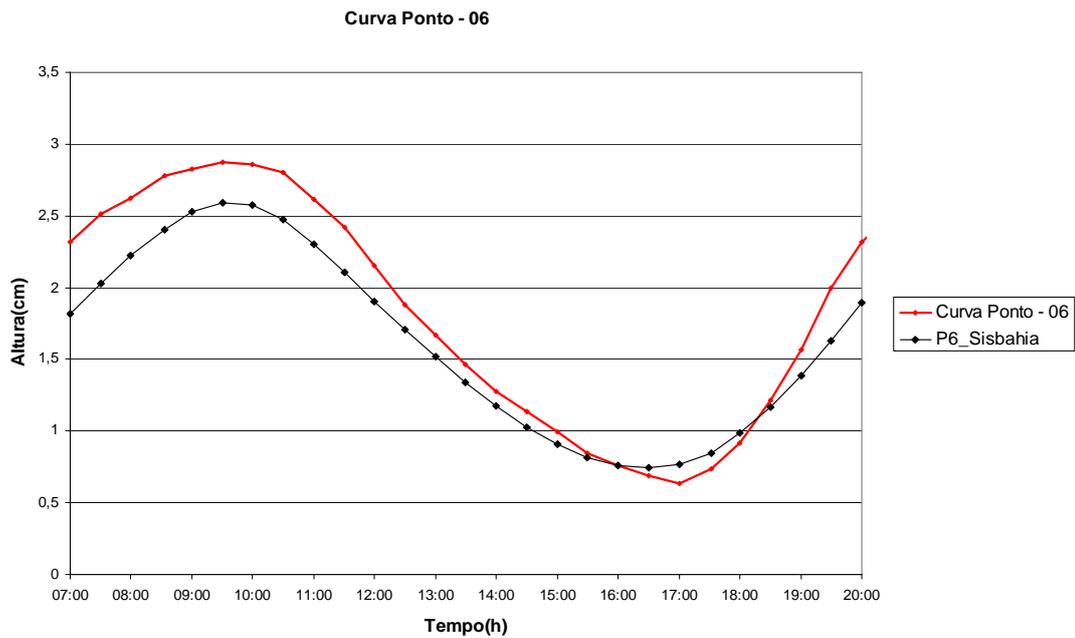


Figura 4.6 - Variação do nível da água para Estação P6

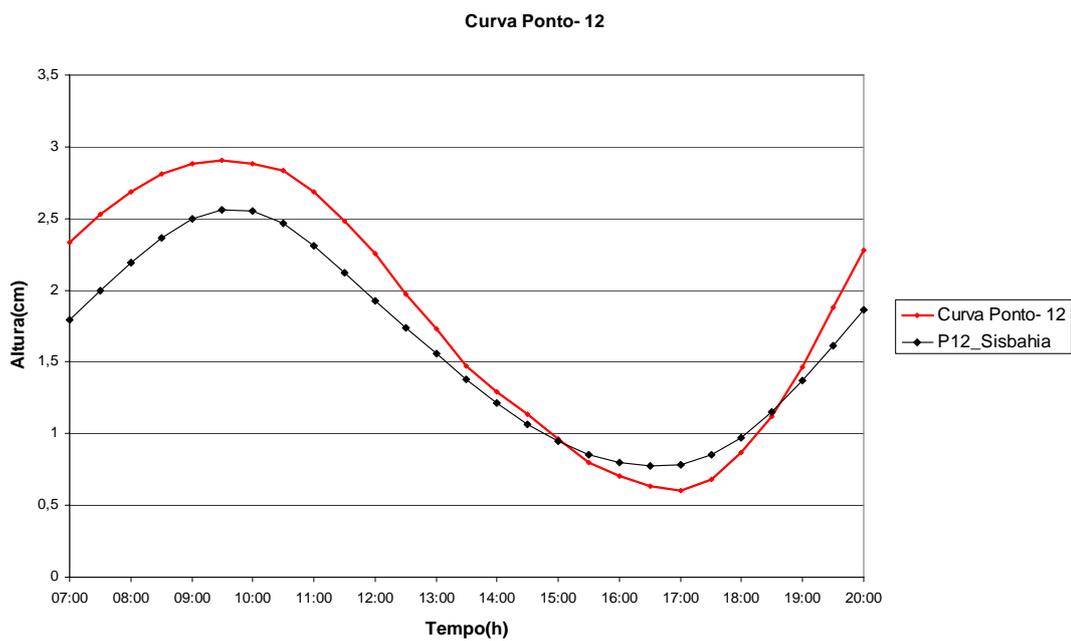


Figura 4.7 - Variação do nível da água para Estação P12

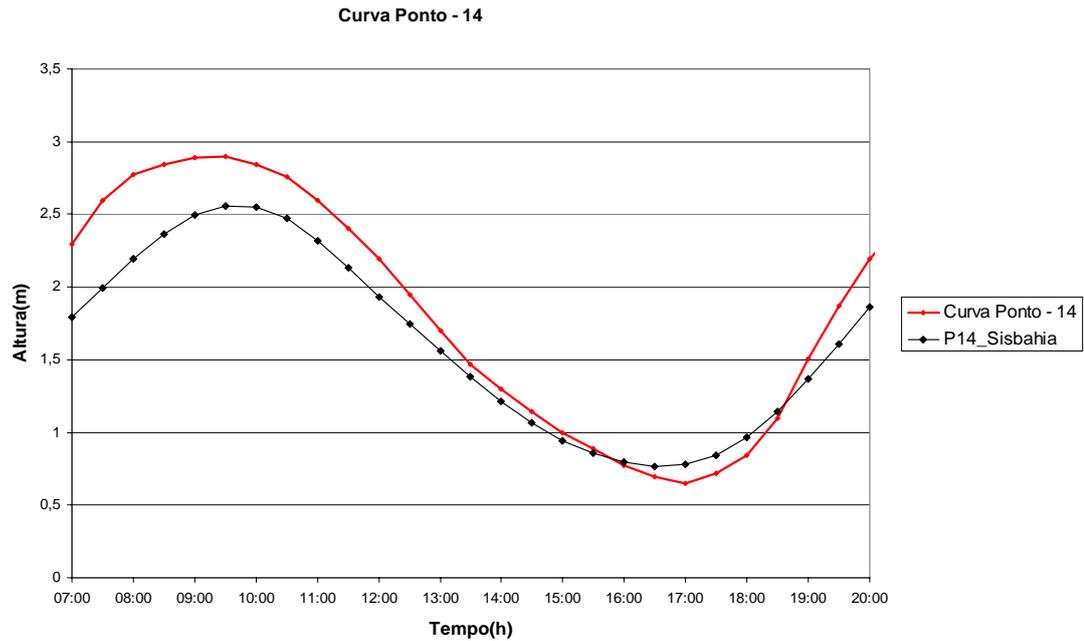


Figura 4.8 - Variação do nível da água para Estação P14

O modelo hidrodinâmico rodou durante um período de 30 dias com o objetivo de excluir as flutuações numéricas. Apesar de todas as condições de contorno serem estimadas fica evidente que as curvas de altura de maré do modelo numérico estão sempre tendendo para curvas medidas. Como mostra a figura (4.9).

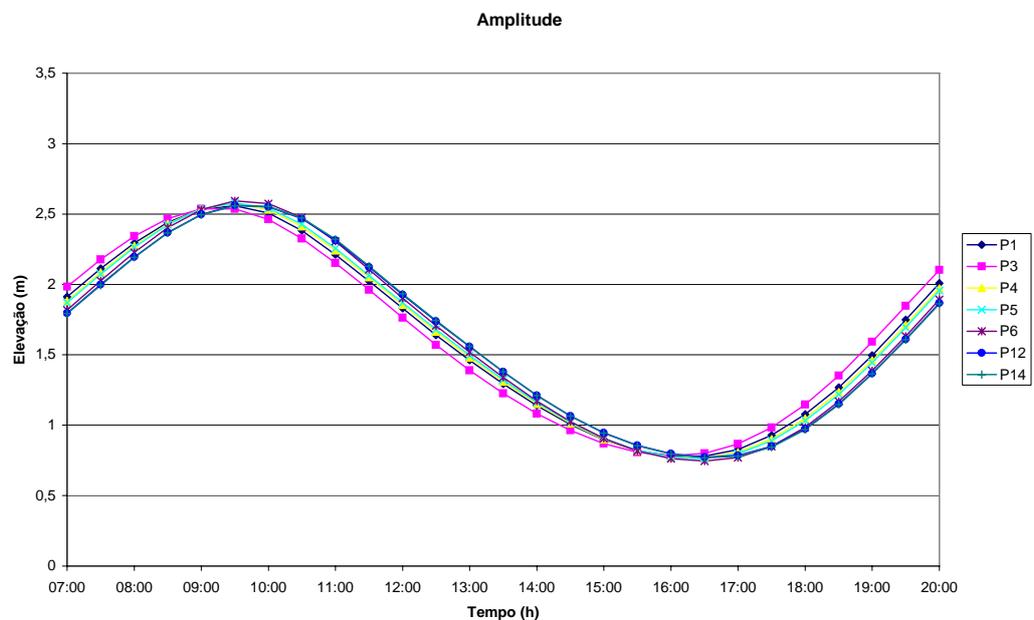


Figura 4.9 - Gráfico amplitude das estações de medições

Nas figuras de 4.2 a 4.8 comparam o sinal obtido através das medições com os sintetizados através das constantes harmônicas. De uma forma geral, as fases estão bem reproduzidas, mas as amplitudes são maiores nos sinais sintetizados.

Um trabalho de calibração do modelo pode ser realizado para tornar os sinais mais próximos. Entretanto, como a forma das curvas não é a mesma, as constantes harmônicas não parecem reaperresentar bem as condições de contorno. Isto pode se explicado pelo fato das mesmas estarem sendo aplicadas a condições de um estuário de água rasas, onde os efeitos locais na onda de maré são fortes, diferentemente de que ocorre em um mar aberto.

Assim sendo, a situação ideal, neste caso, é medir os sinais de maré para que seja usado como condição de contorno ou pontos de calibração do modelo.

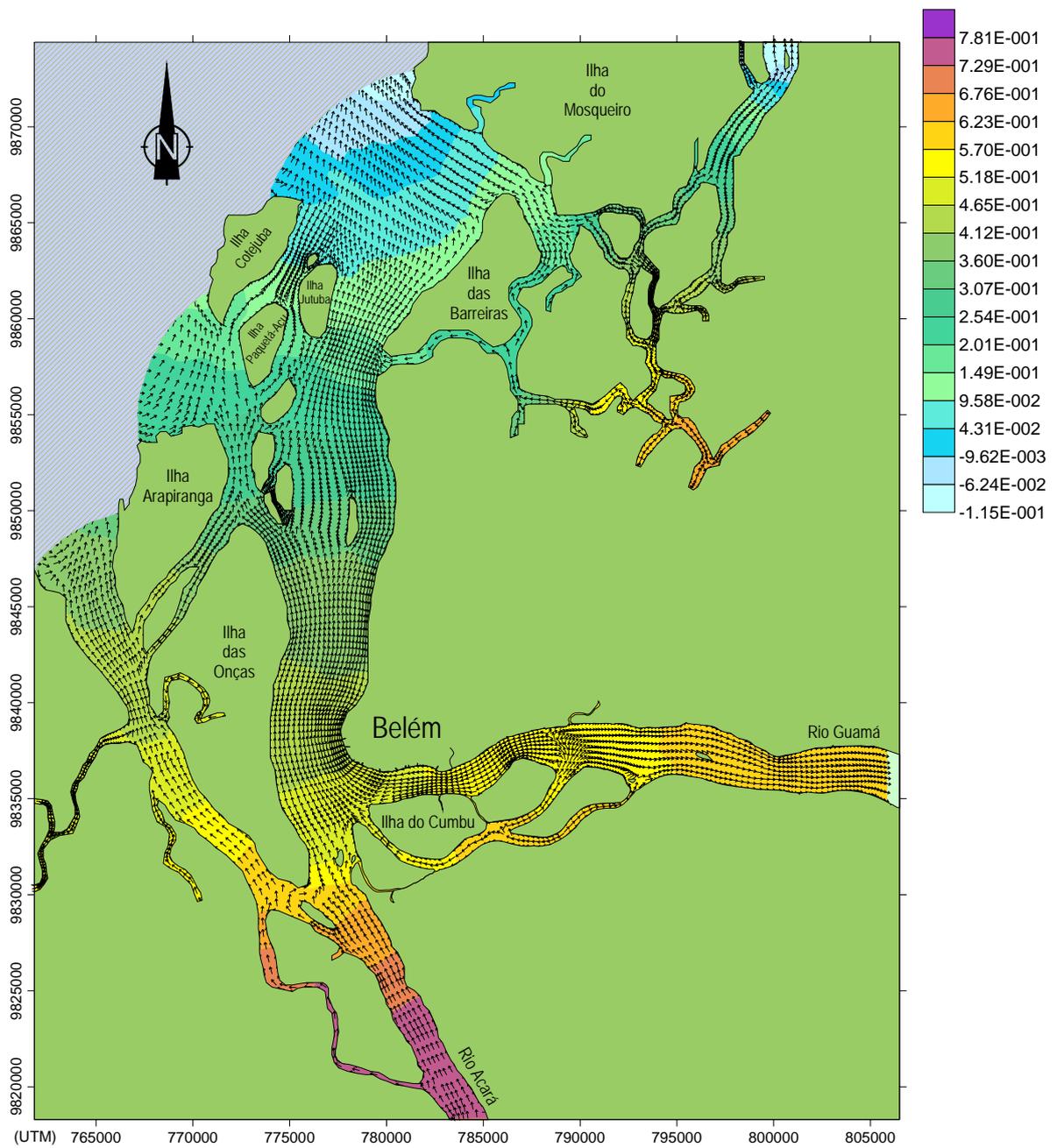


Figura 4.10 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará. Situação de maré vazando

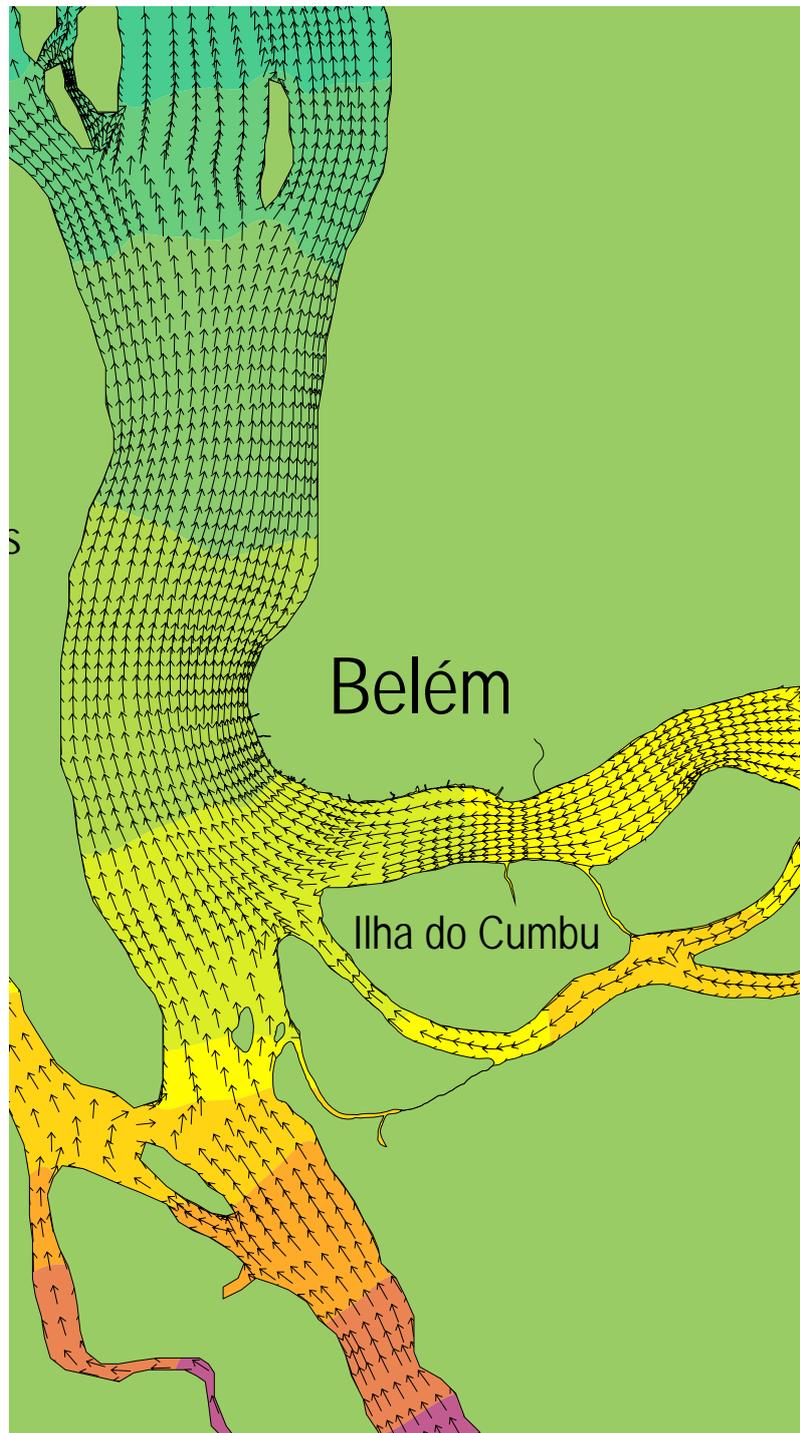


Figura 4.11 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará mostrando em detalhe o campo de vetores. Situação de maré secando.

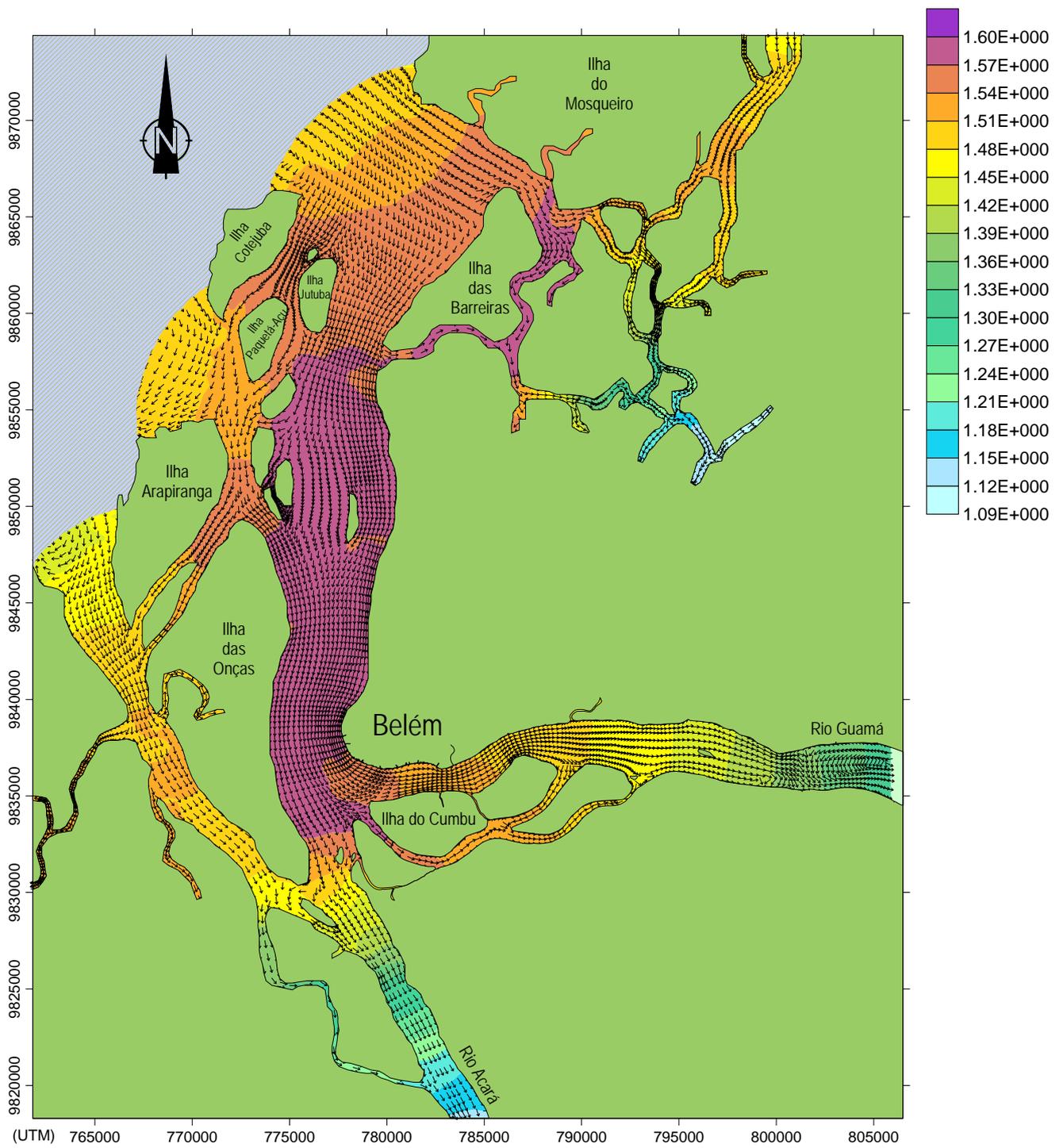


Figura 4.12 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará. Situação de maré enchendo

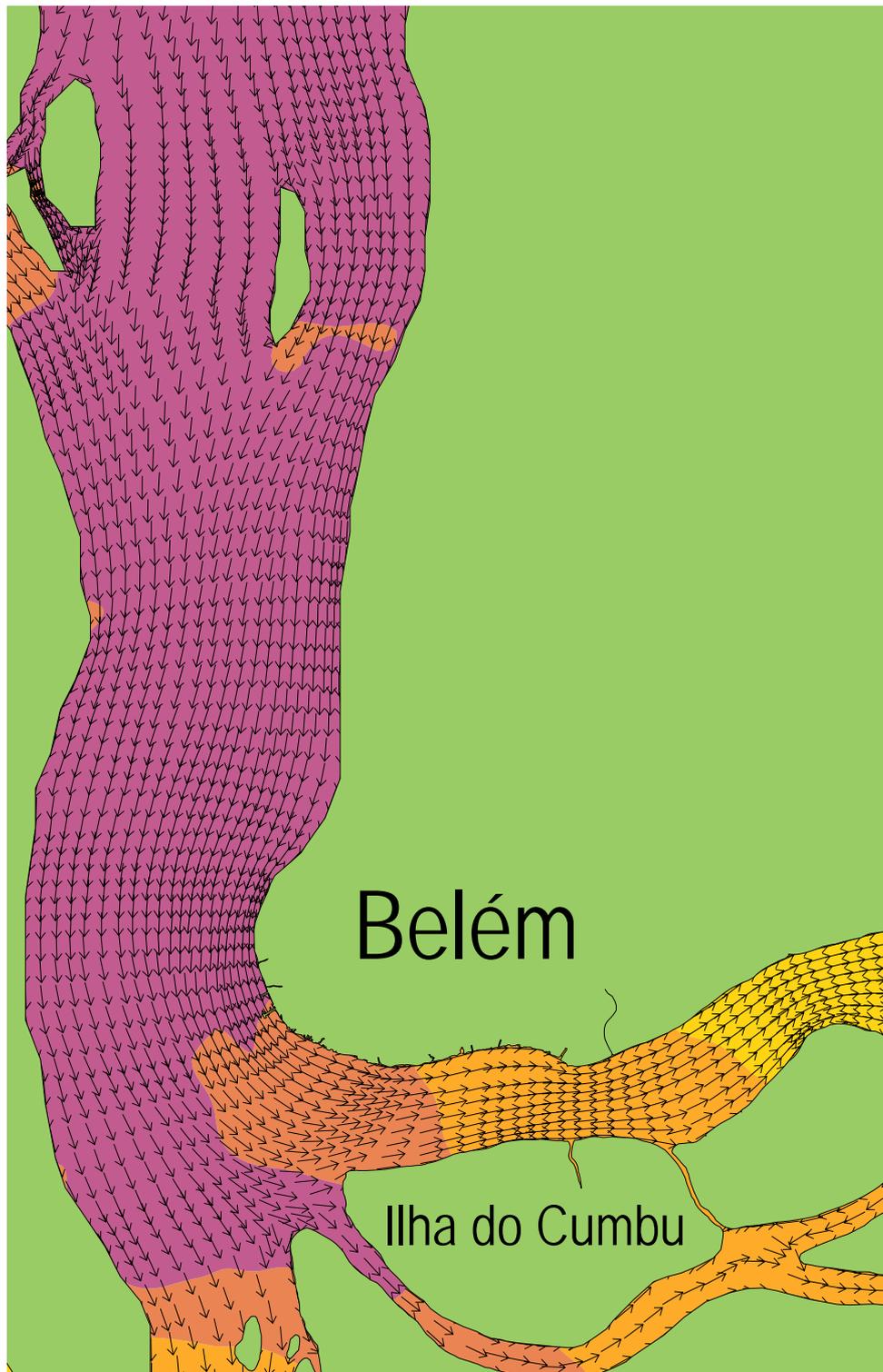


Figura 4.13 - Mapa de correntes mostrando a Baía de Guajará mostrando em detalhe o campo de vetores. Situação de maré enchendo.

Na figuras 4.10 a 4.13 é mostrado o campo de correntes 2DH obtido com o modelo hidrodinâmico com as situações de maré enchendo e vazando. É interessante perceber que o campo vetorial das mesmas está bem definido em ambas as situações. Dessa forma pode-se dizer que o modelo já está num estado estável.

Somente depois que o modelo hidrodinâmico estiver adequadamente calibrado, pode-se pensar em calibrar um modelo de transporte. Principalmente se o campo de velocidades estiver bem representado.

5.2 RESULTADO MODELO DE TRANSPORTE

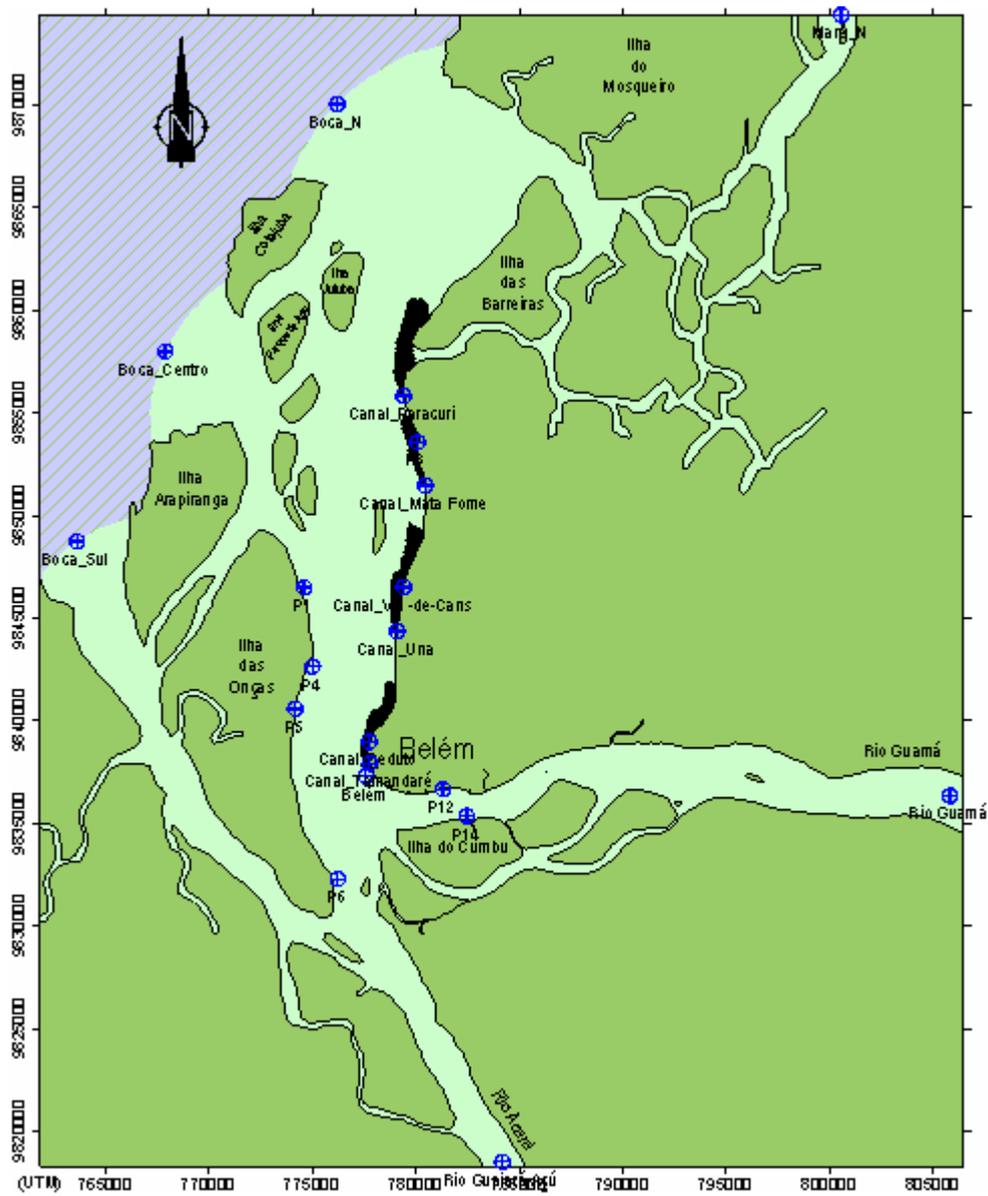
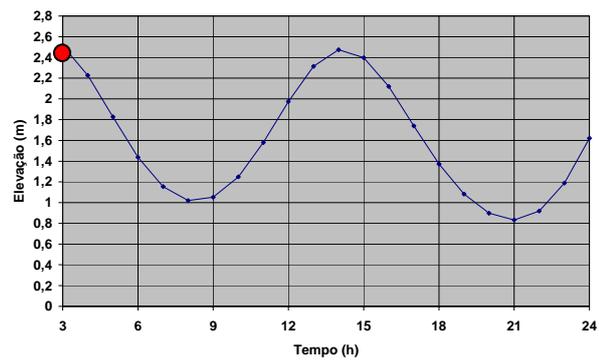
O modelo apresentado retrata uma situação hipotética do espalhamento de uma mancha ou pluma de contaminante lançada através dos principais canais da região metropolitana de Belém na baía do Guajará. Os canais considerados são mostrados na figura 3.9. Interessante ressaltar que o cálculo hidrodinâmico tem influência direta no resultado do cálculo de dispersão, pois, o resultado do campo de velocidade do mesmo serve como condições de entrada para o modelo de transporte. É importante destacar que no modelo hidrodinâmico cada canal foi colocado como uma estação de medição no qual foram registrados os intervalos de tempo que ocorriam os momentos das enchentes e vazantes do mesmo. Esses intervalos de tempo são importantes para construção de um arquivo que contém os intervalos dos tempos inicial e final de cada lançamento que cada fonte libera por dia de contaminantes no período de aproximadamente 7 dias. Essas informações são carregadas como condições de contorno no modelo de dispersão. O SisBAHIA considera que cada partícula representa o centro de massa de uma pequena mancha contaminante com uma dada distribuição de concentrações. A soma das manchas de todas as partículas reproduz a distribuição de concentrações do escalar no meio.

O número de partículas representa o número de divisões da massa total de contaminantes, especificada pelo valor de concentração. Em princípio, quanto maior o número de partículas, mais precisão terá o cálculo. Entretanto, um número muito elevado pode tornar o tempo de cálculo proibitivo.

Para o processo, considerou-se um número de 1000 partículas sendo lançadas em cada passo de tempo por cada fonte. As figuras abaixo mostra o resultado obtido.

Primeiro dia de lançamento.

Boca Norte



60

Figura 4. 14 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 3 hs de lançamento.

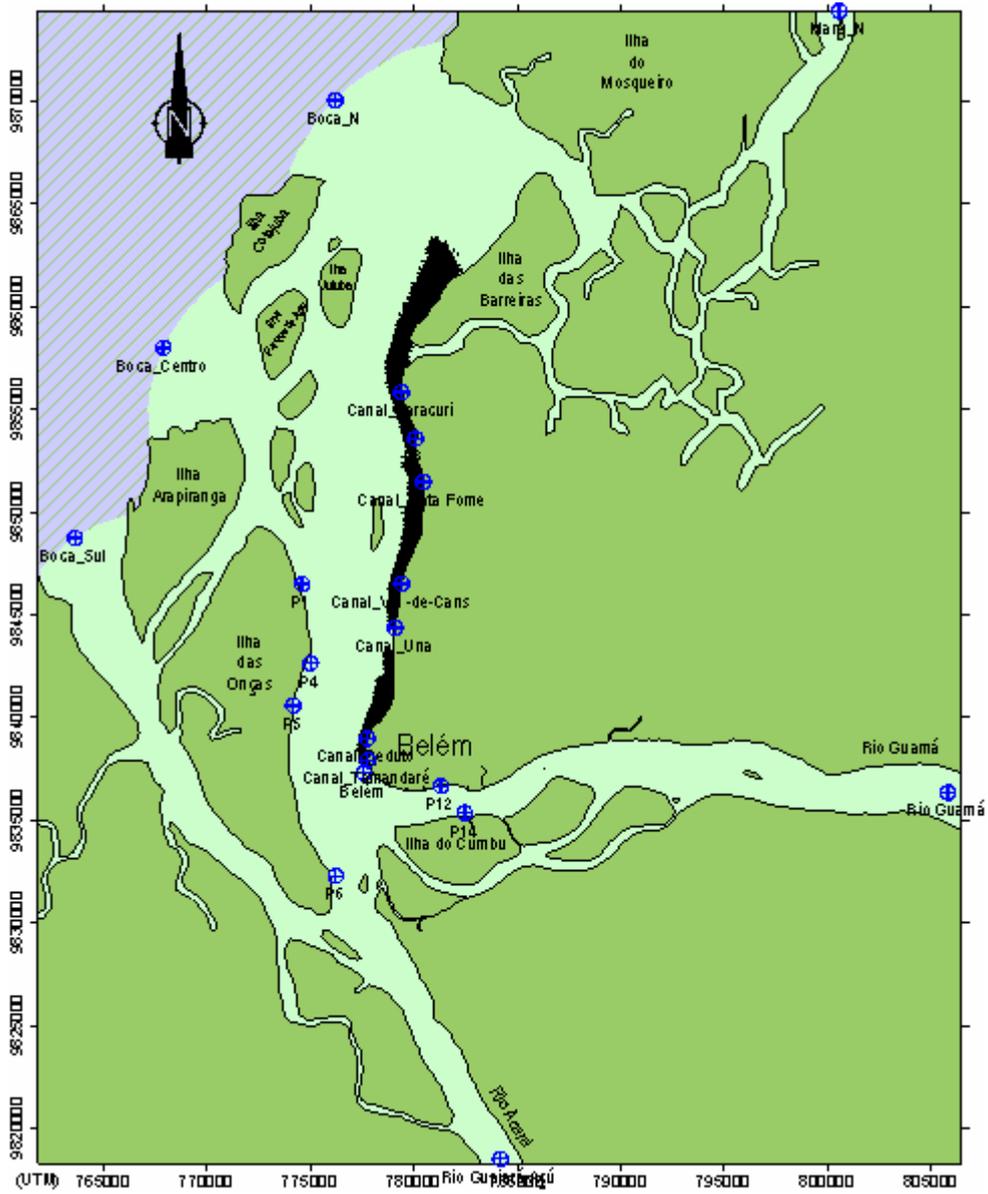
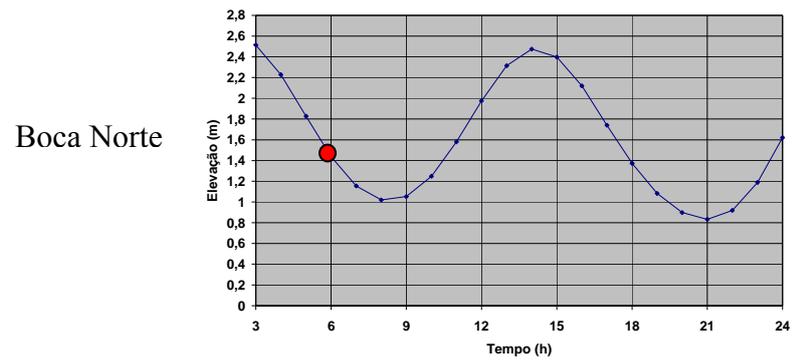


Figura 4.15 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 6 hs de lançamento.

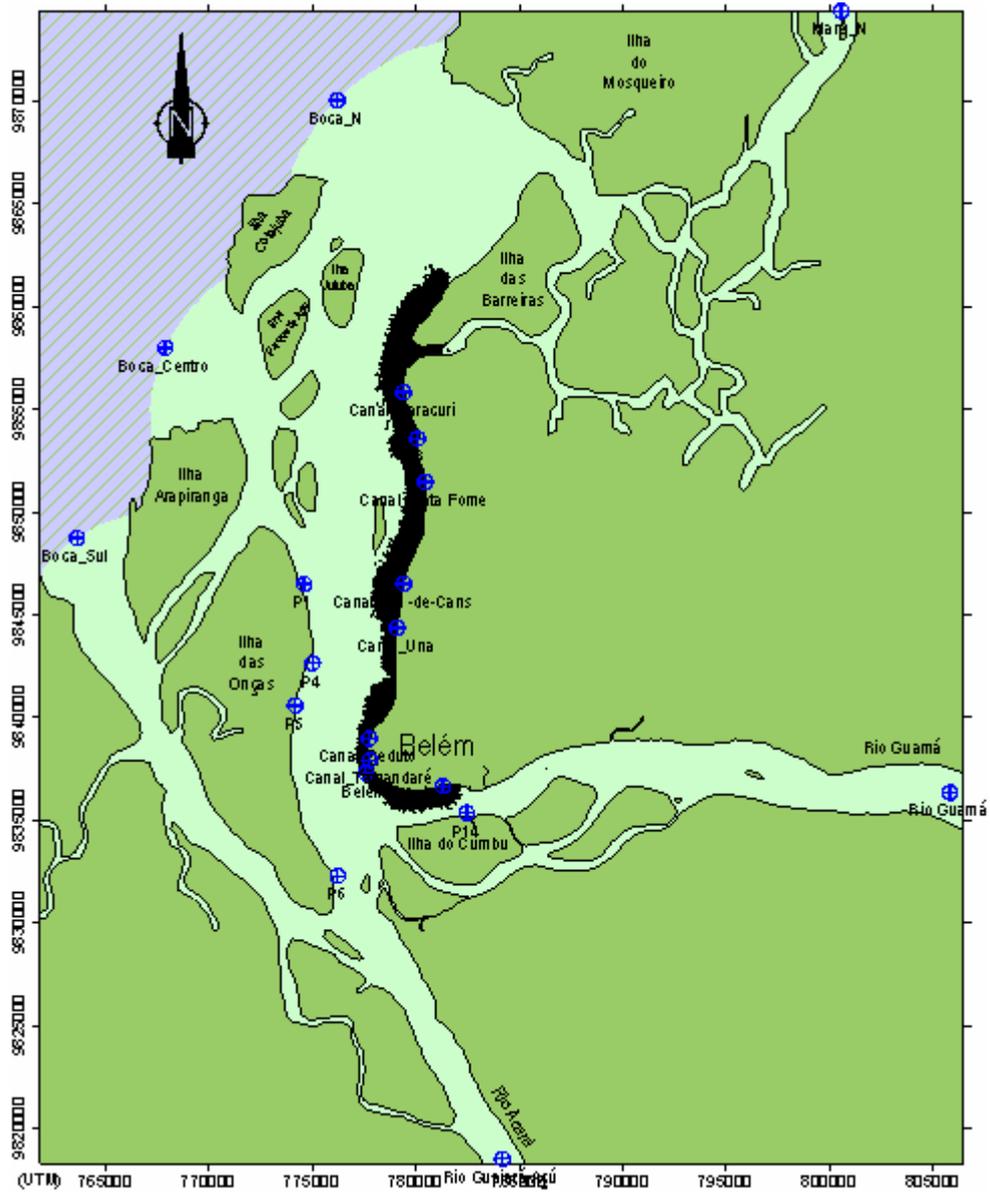
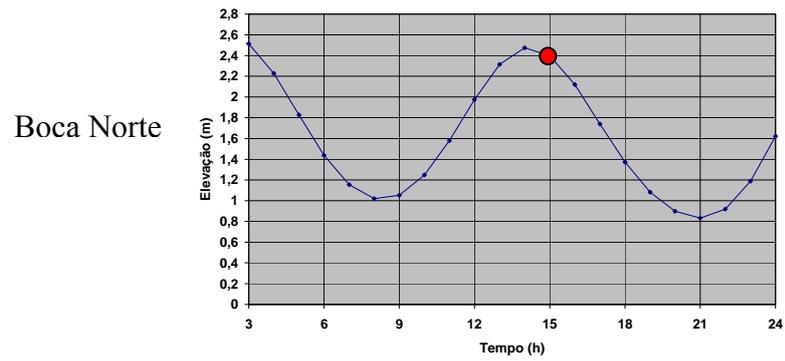


Figura 4.18 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 15 hs de lançamento.

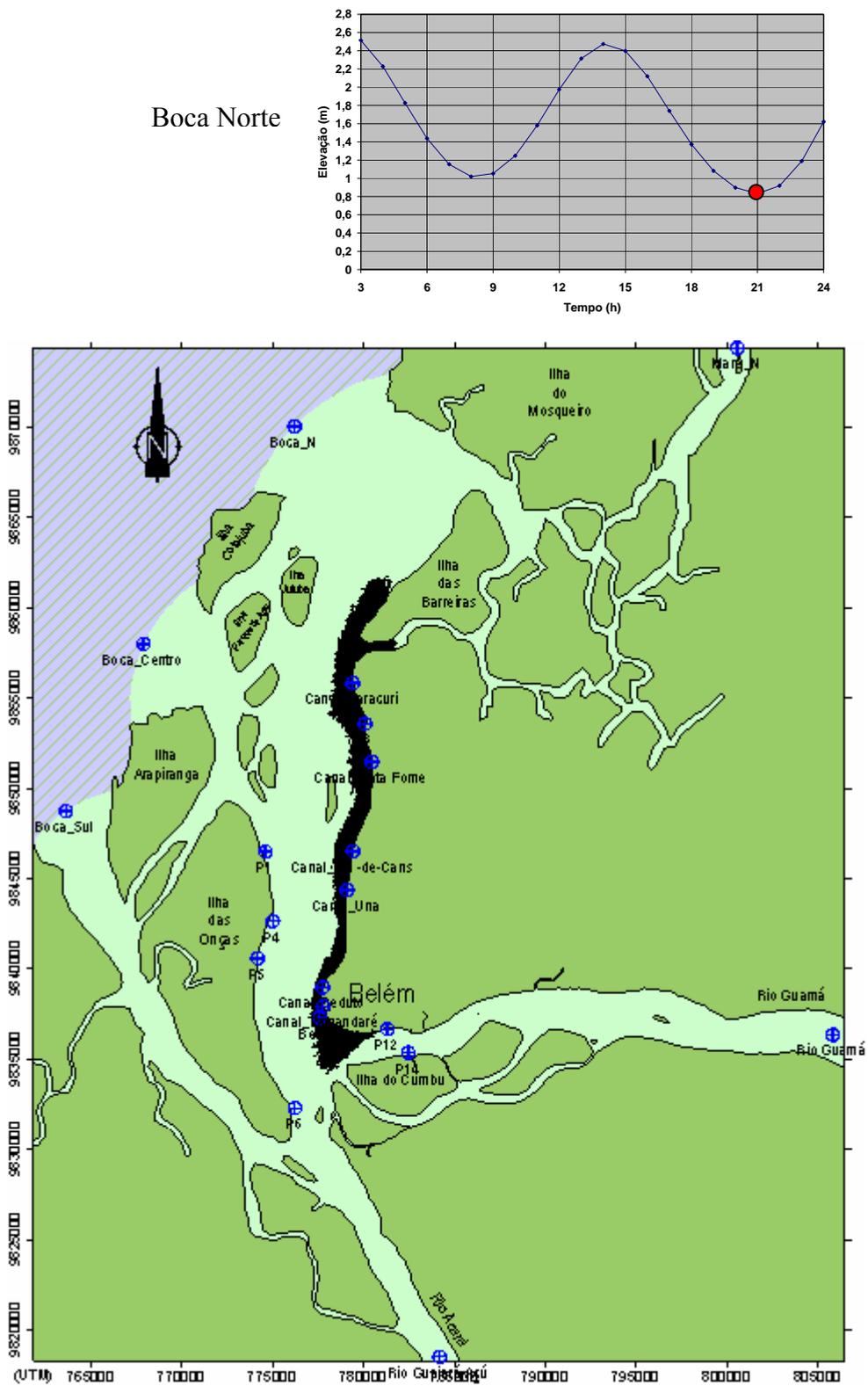


Figura 4.20 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 21 hs de lançamento.

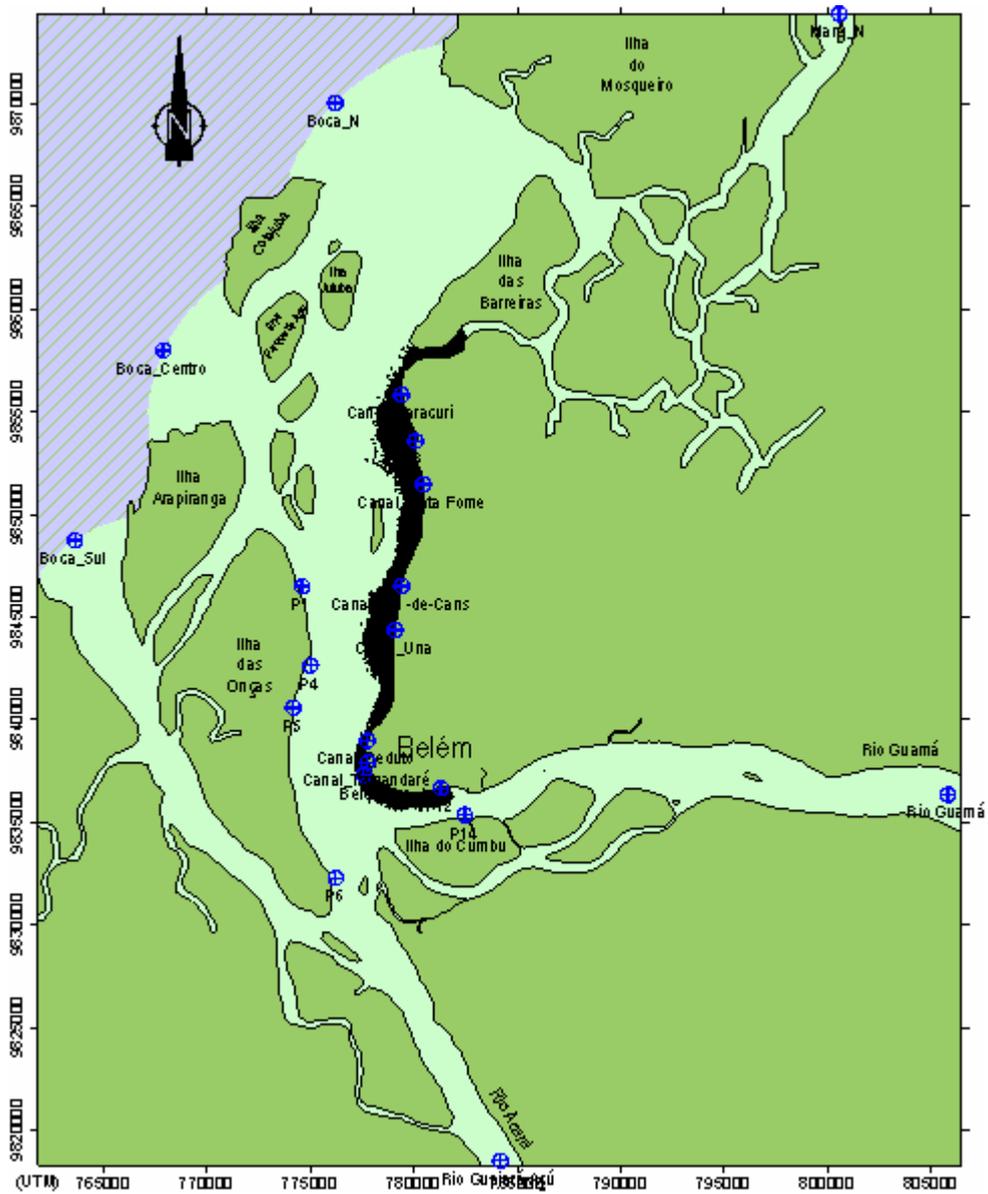
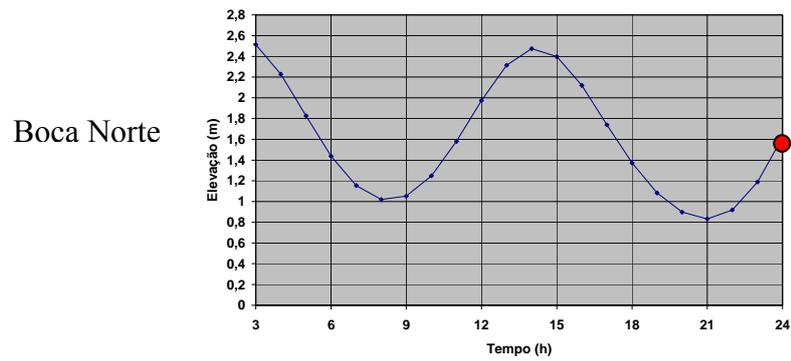


Figura 4.21 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 24 hs de lançamento.

Segundo dia de lançamento.

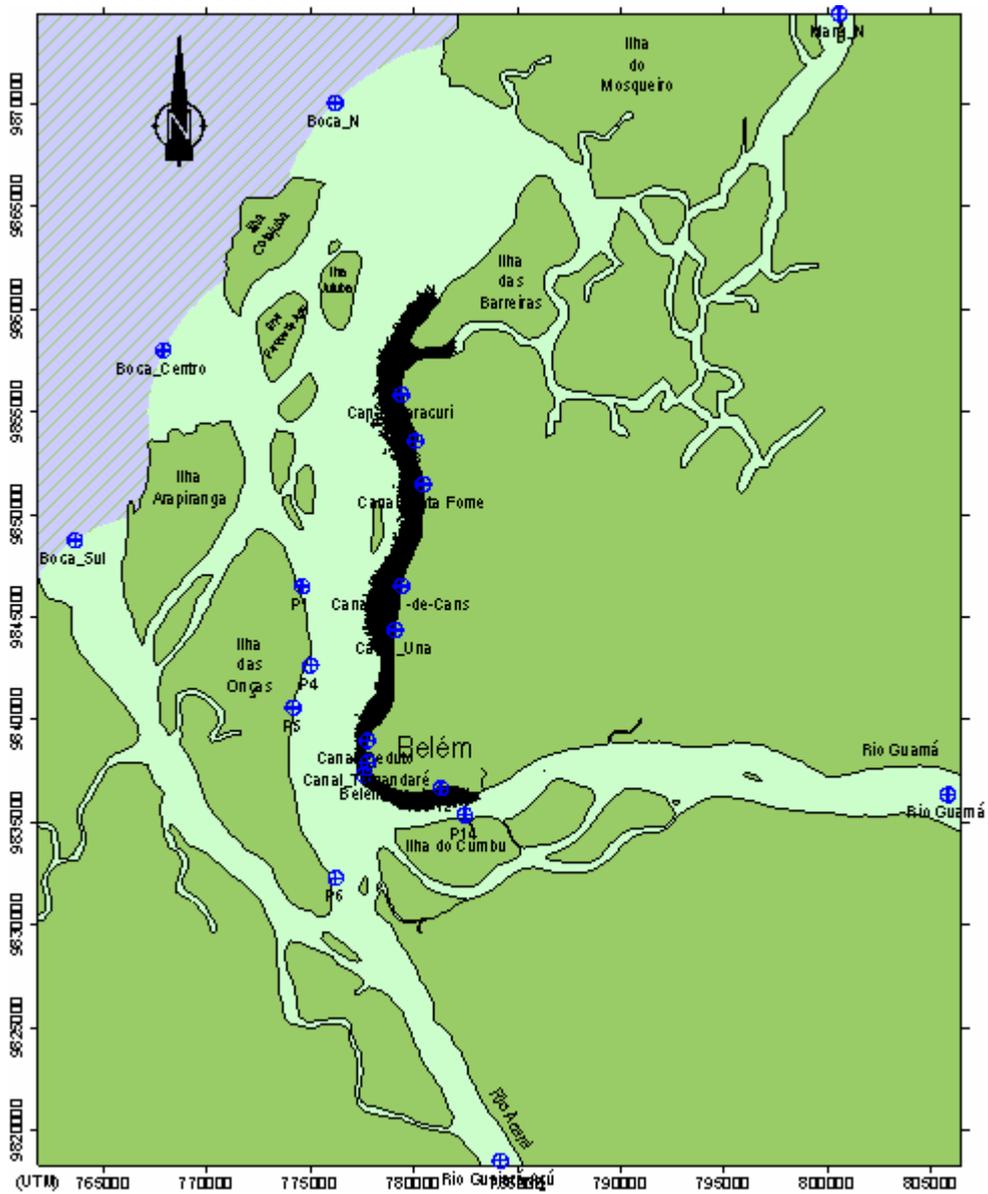
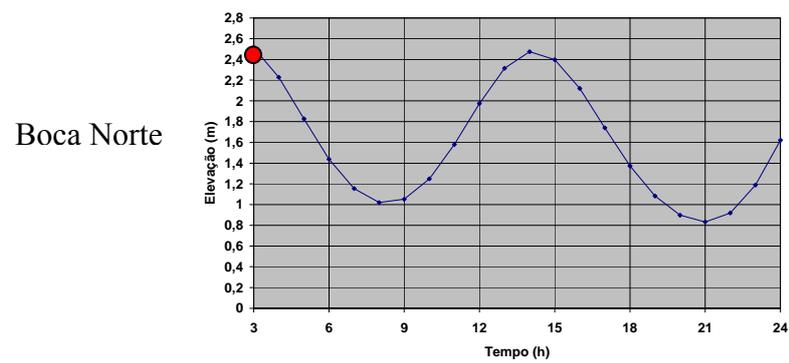


Figura 4.22 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 27 hs de lançamento.

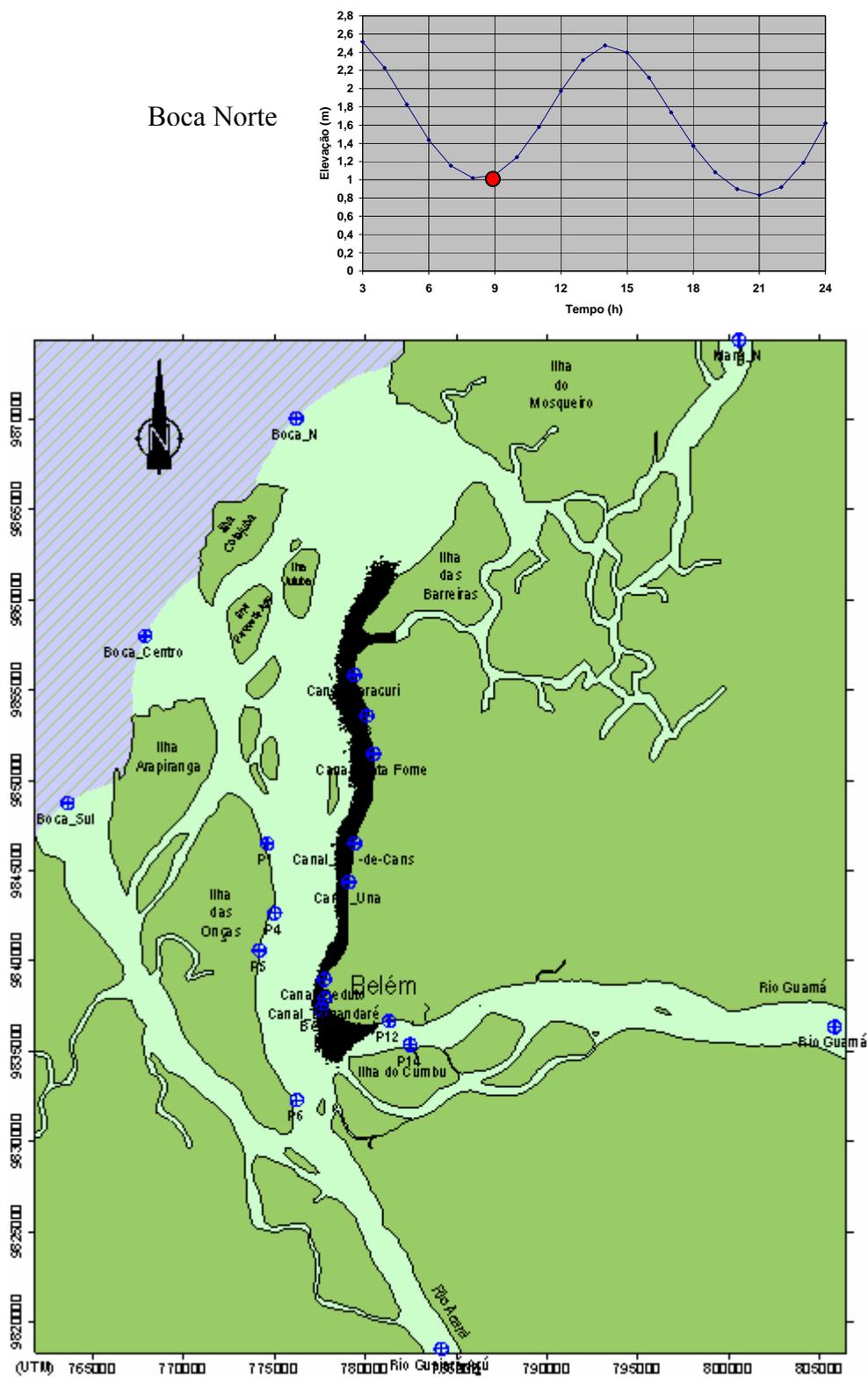


Figura 4.24 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 33 hs de lançamento.

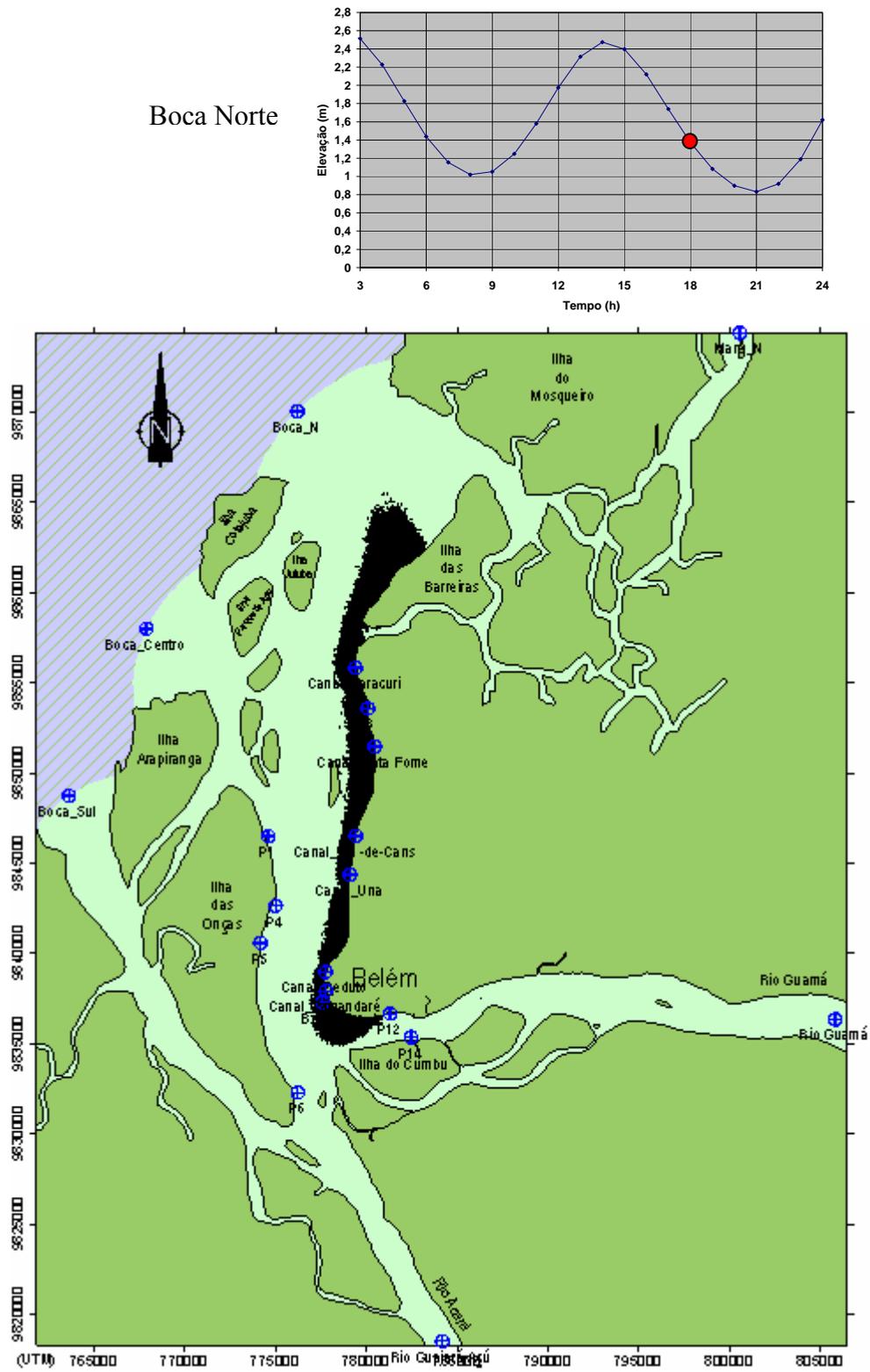


Figura 4.27 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 42 hs de lançamento.

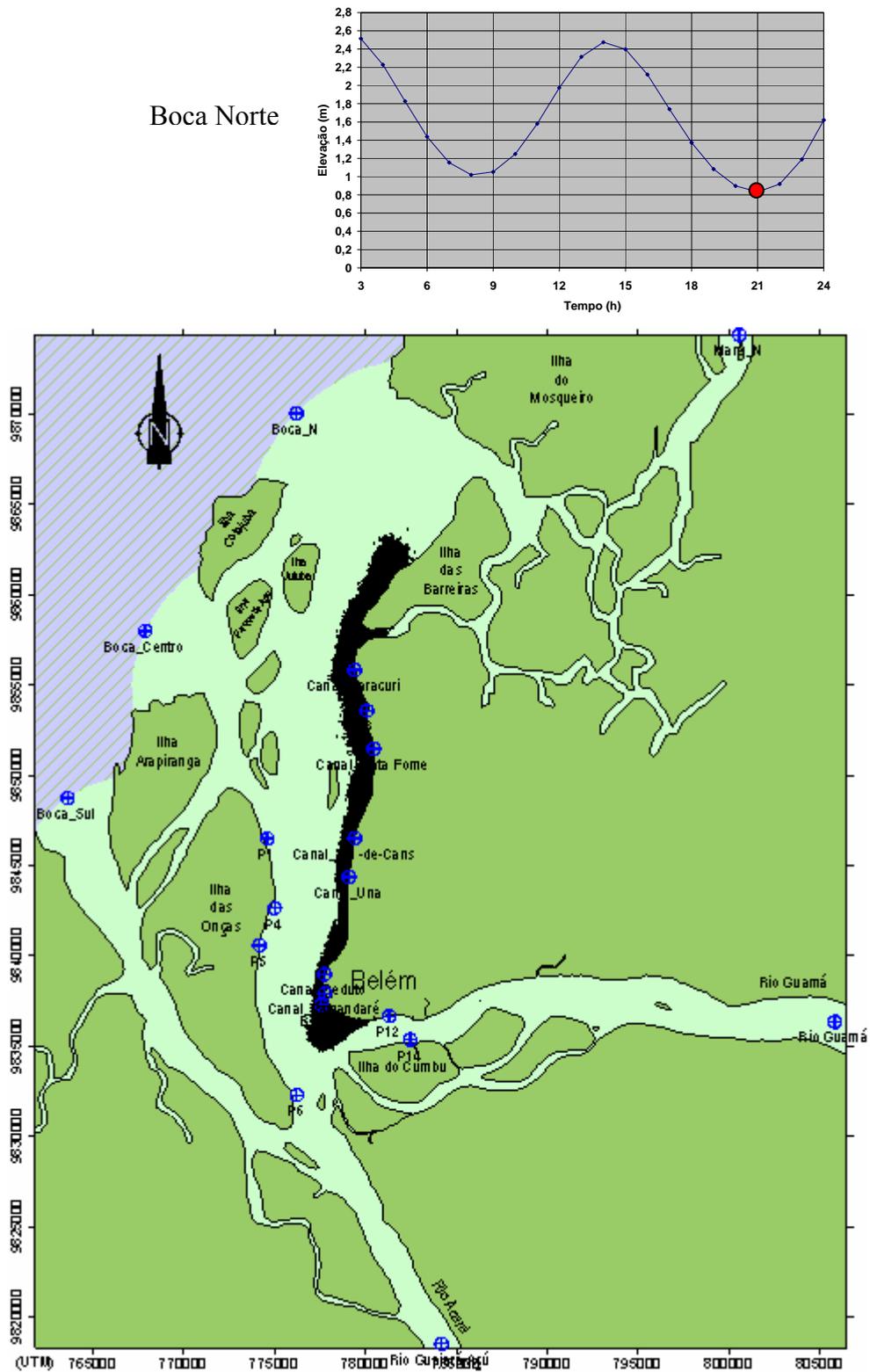


Figura 4.28 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 45 hs de lançamento.

Terceiro dia de lançamento.

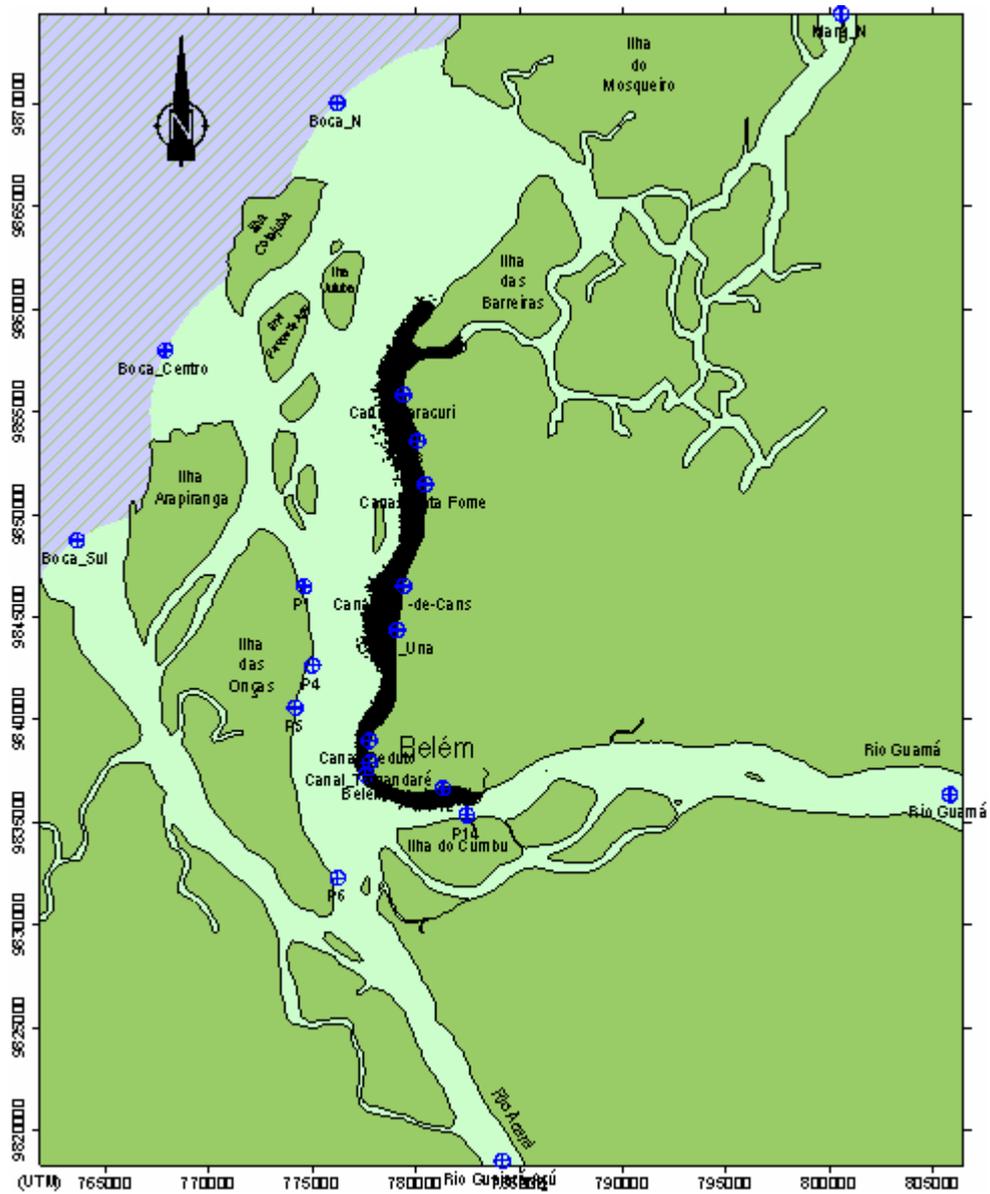
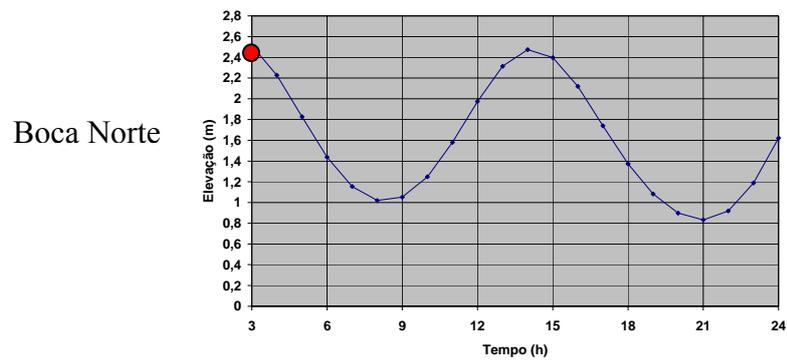


Figura 4.30 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 51 hs de lançamento.

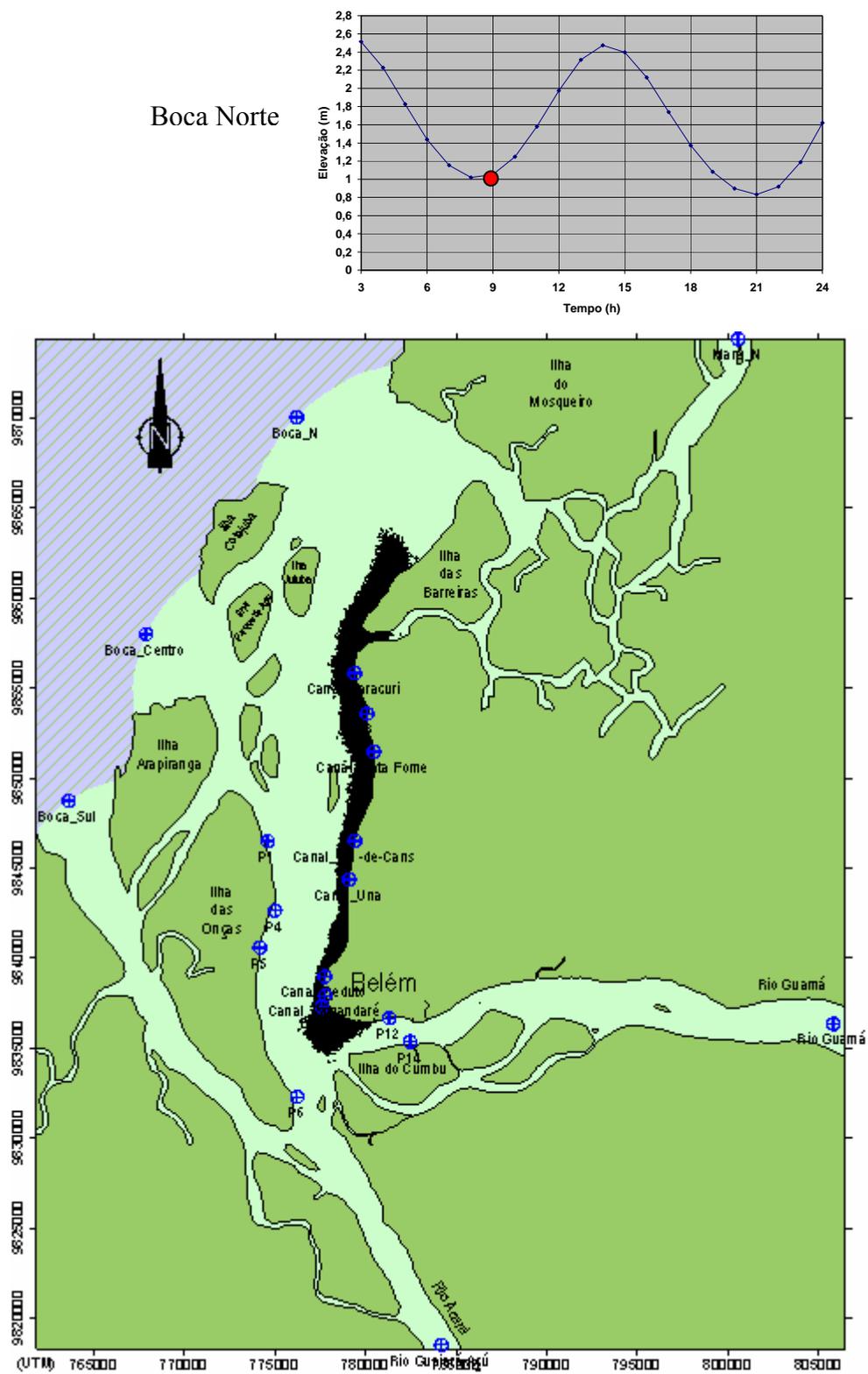


Figura 4.32 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 57 hs de lançamento.

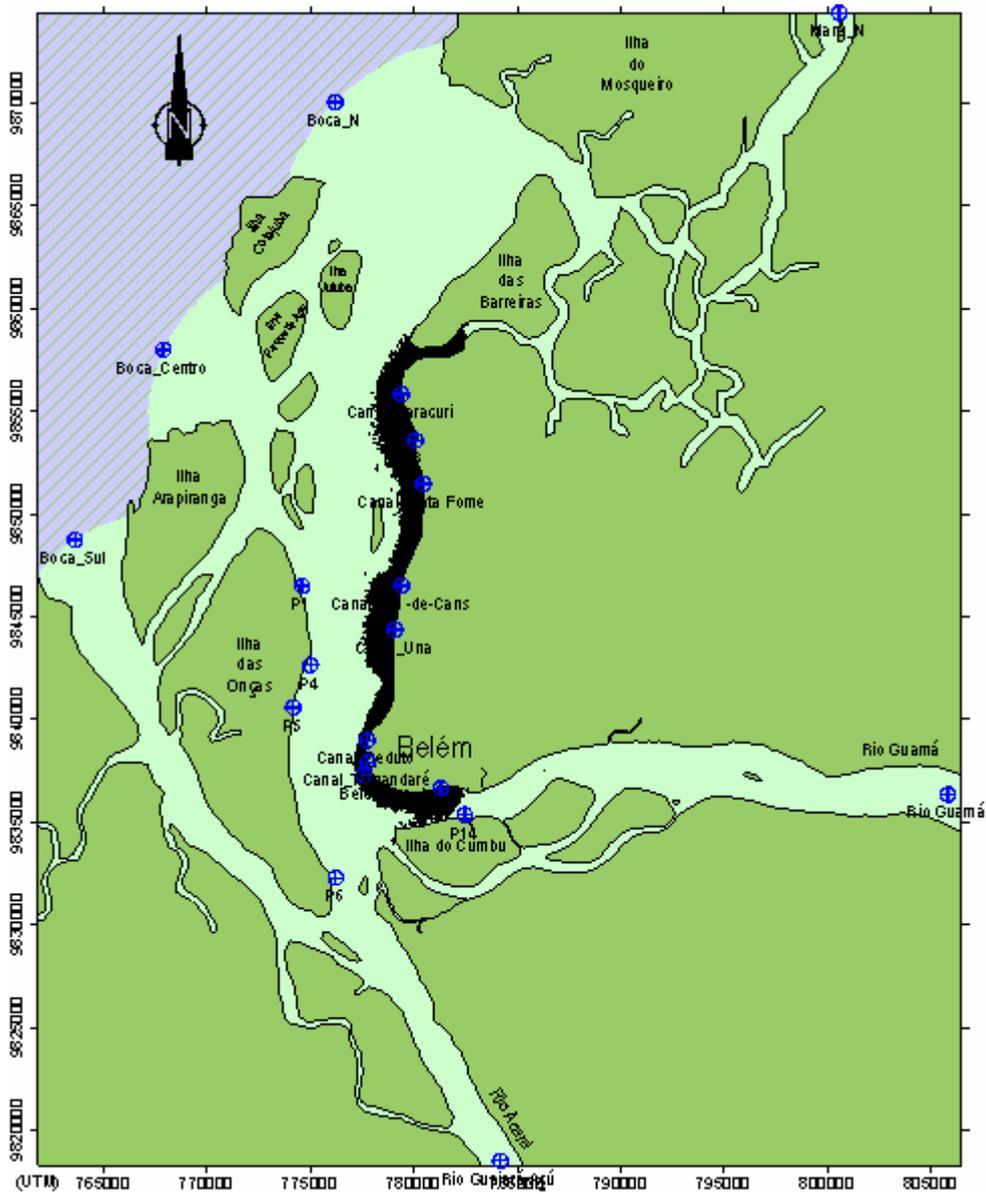
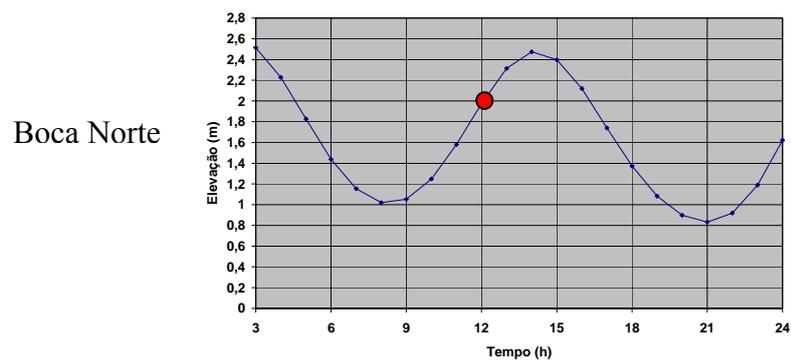


Figura 4.33 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 60 hs de lançamento.

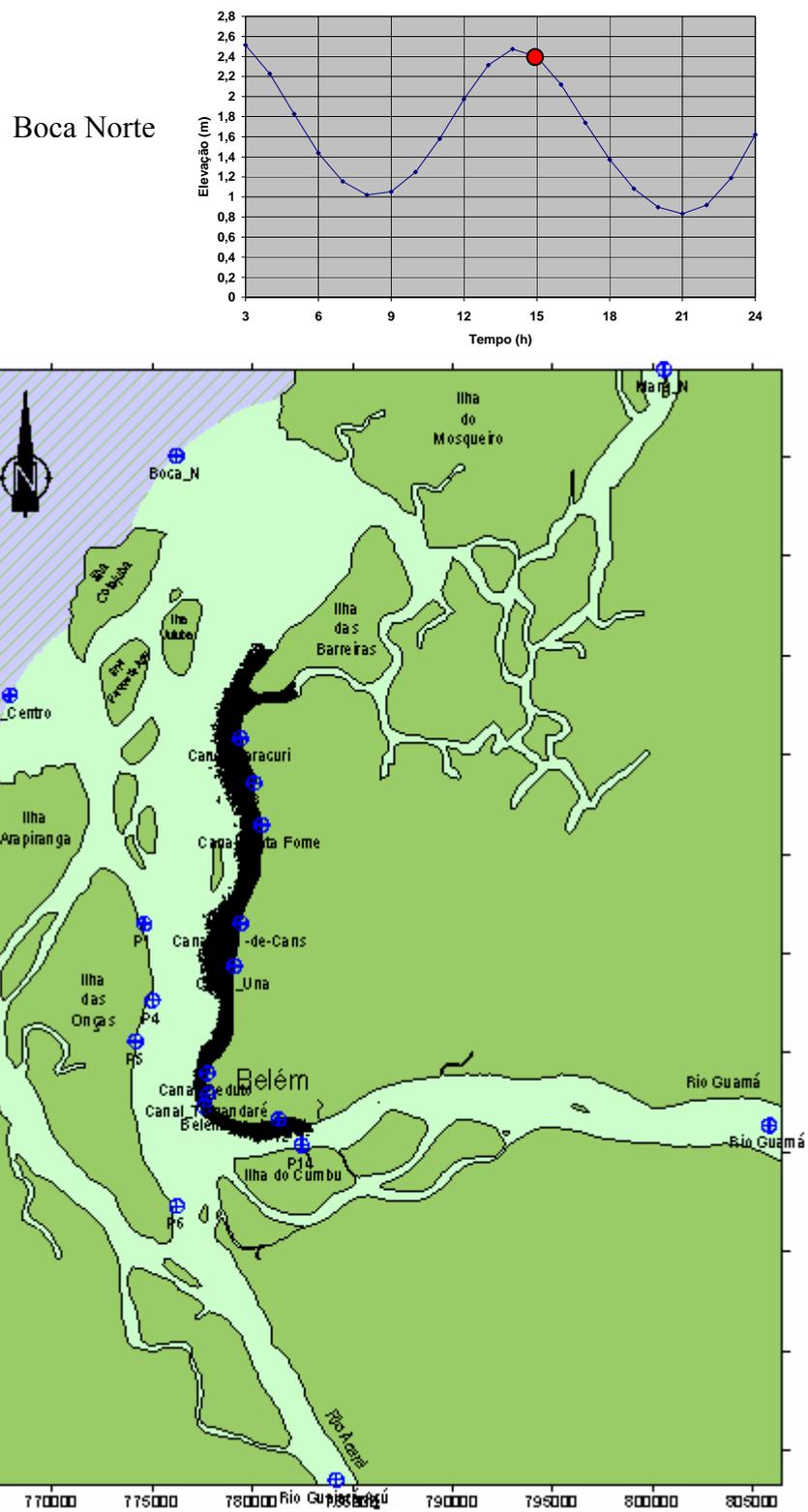


Figura 4.34 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 63 hs de lançamento.

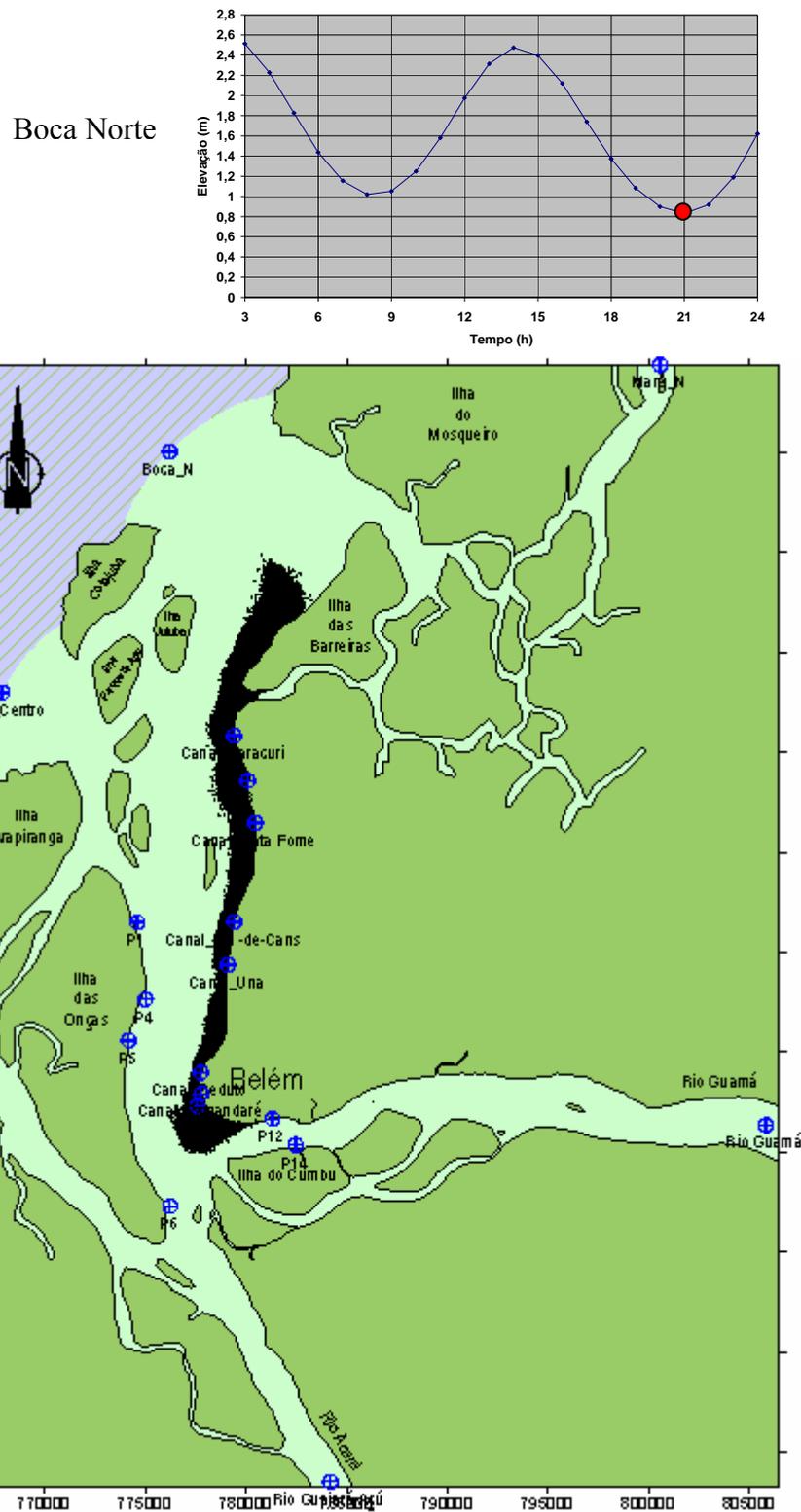


Figura 4.36 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 69 hs de lançamento.

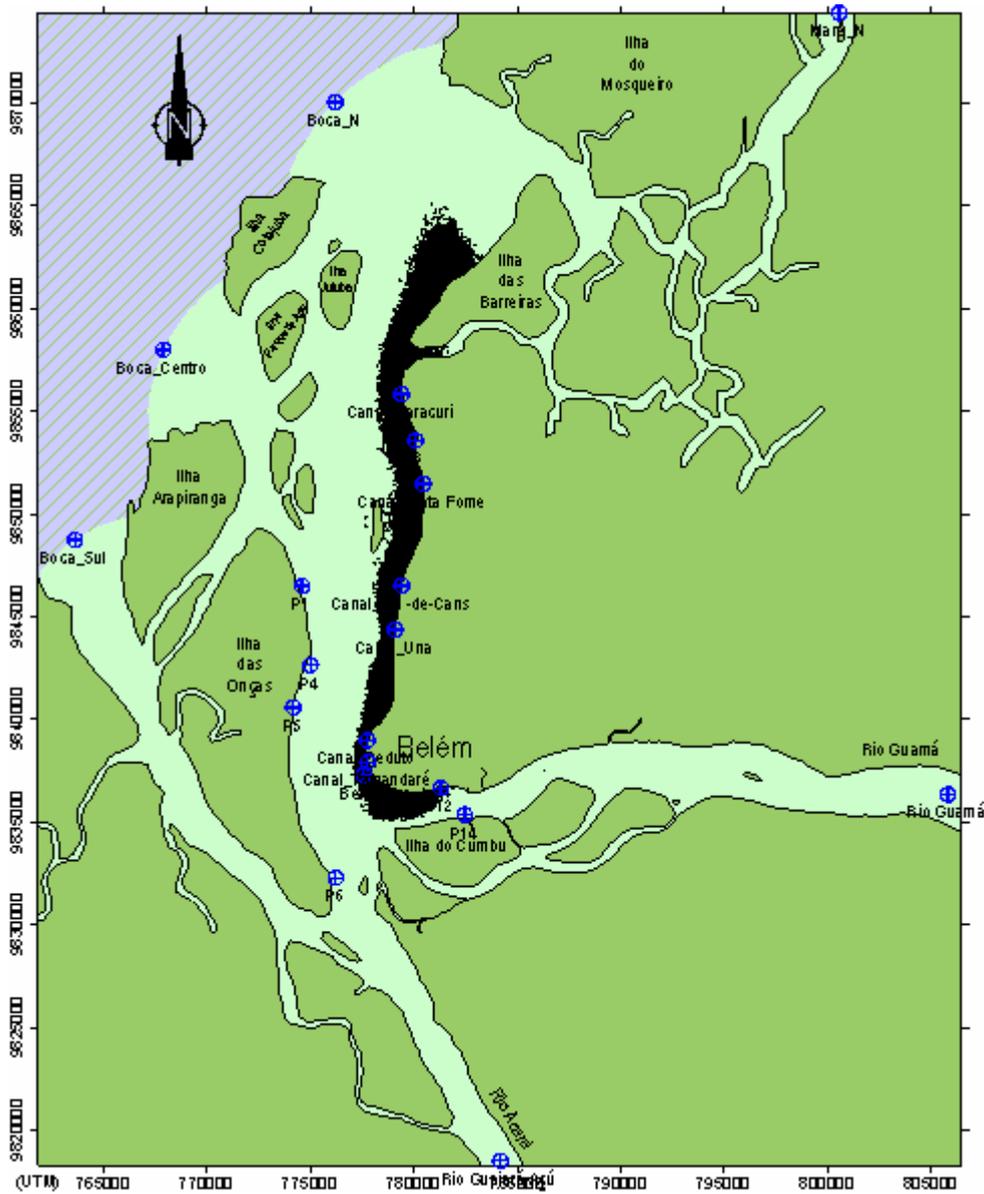
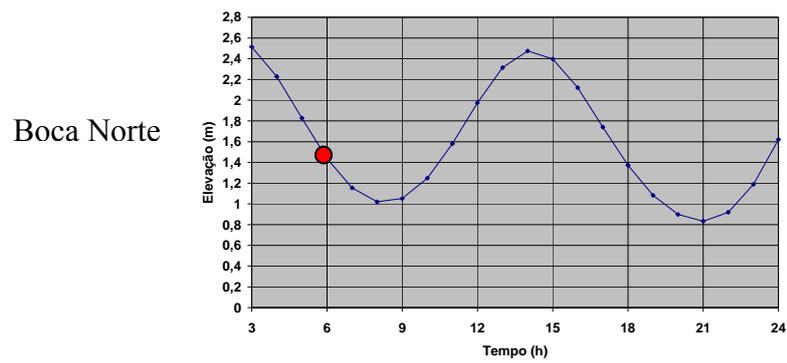


Figura 4.39 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 78 hs de lançamento.

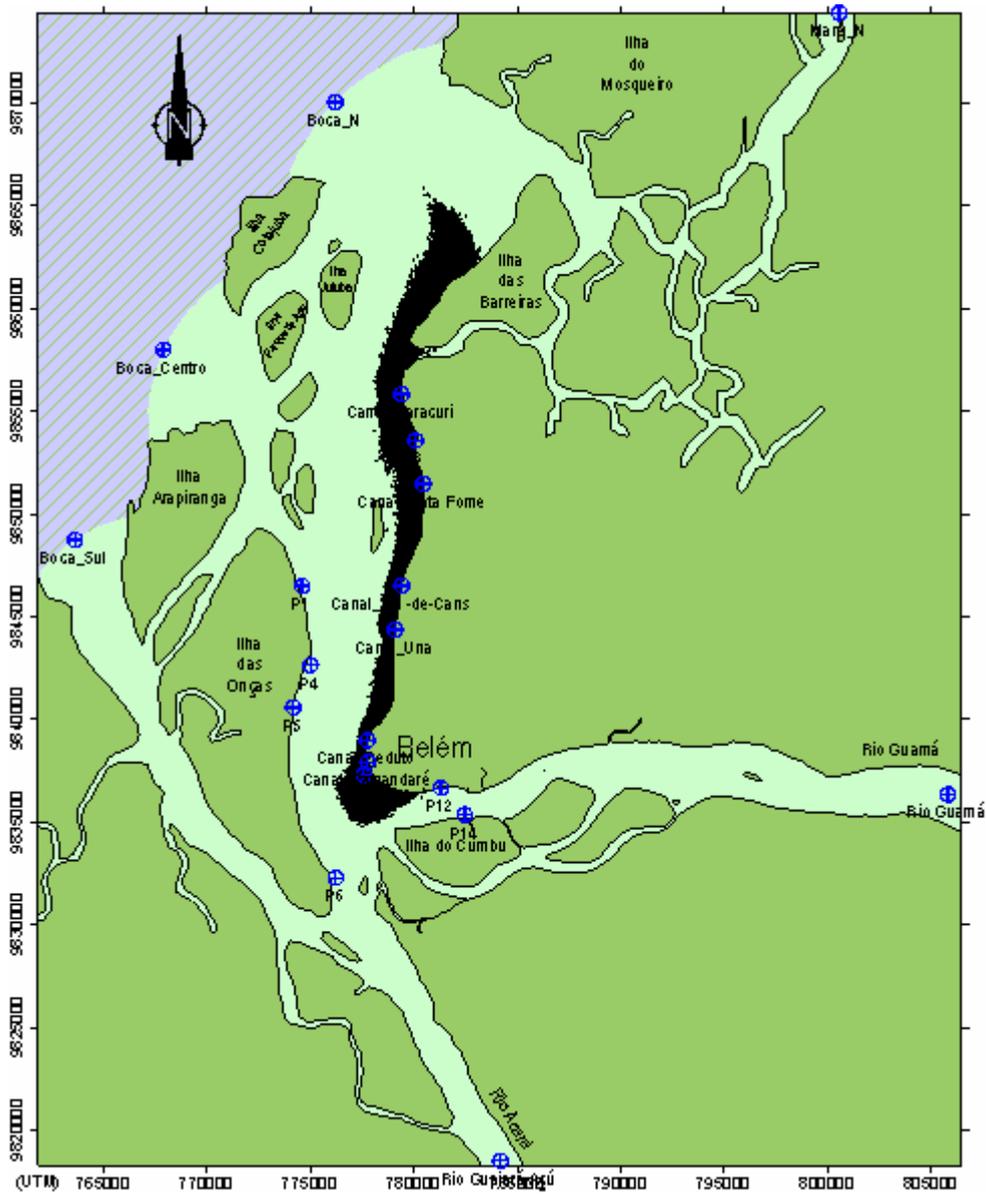
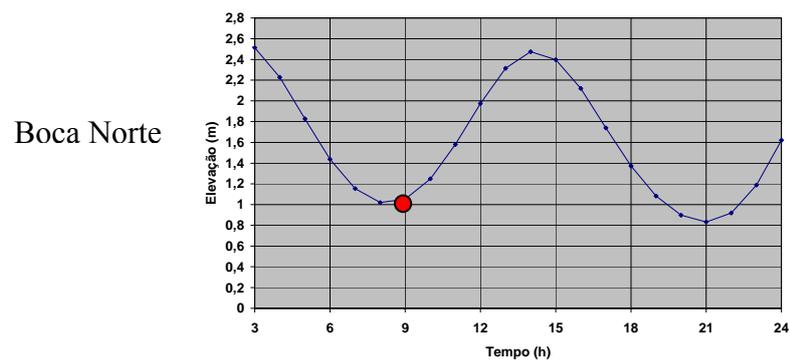


Figura 4.40 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 81 hs de lançamento.

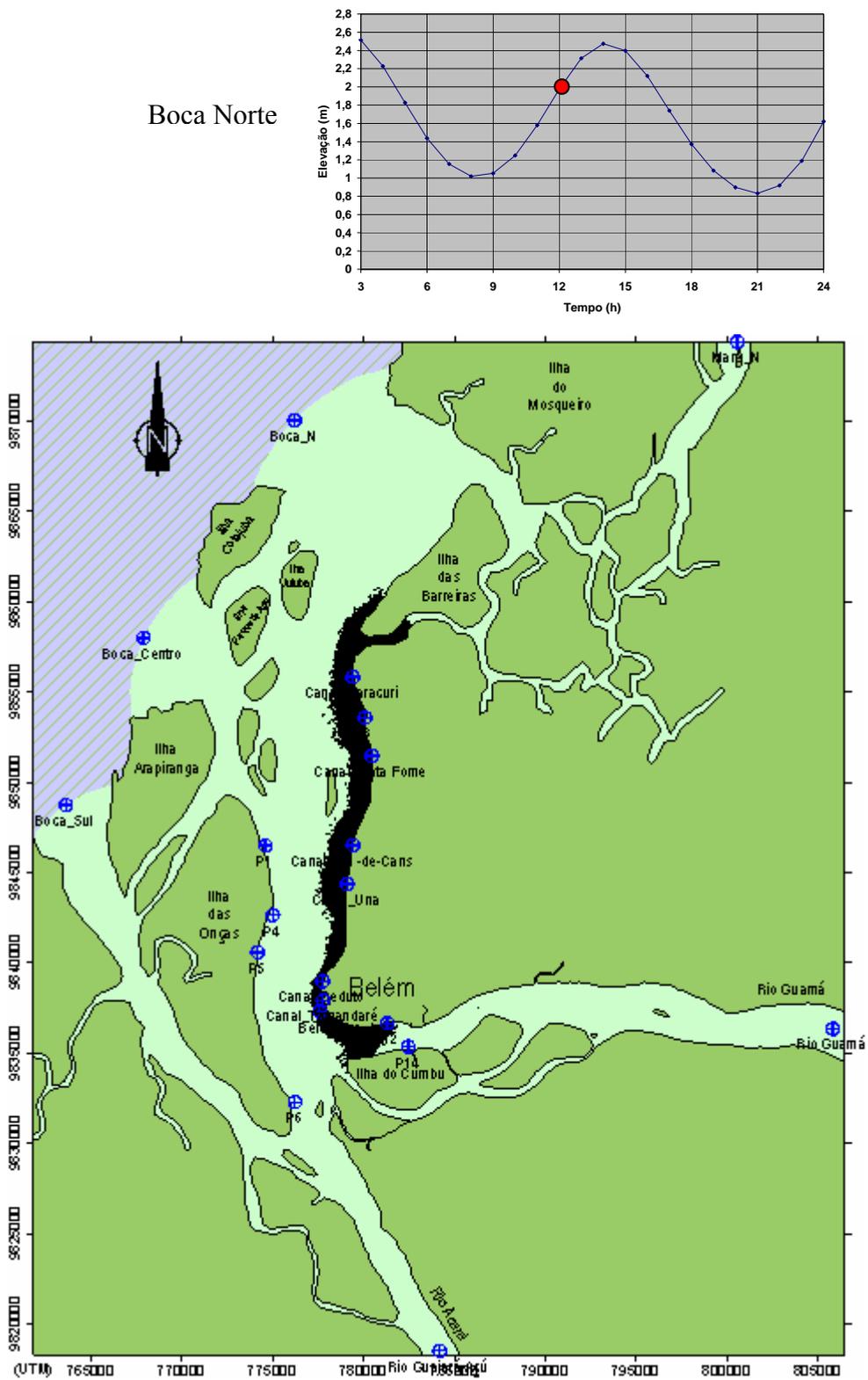


Figura 4.41 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 84 hs de lançamento.

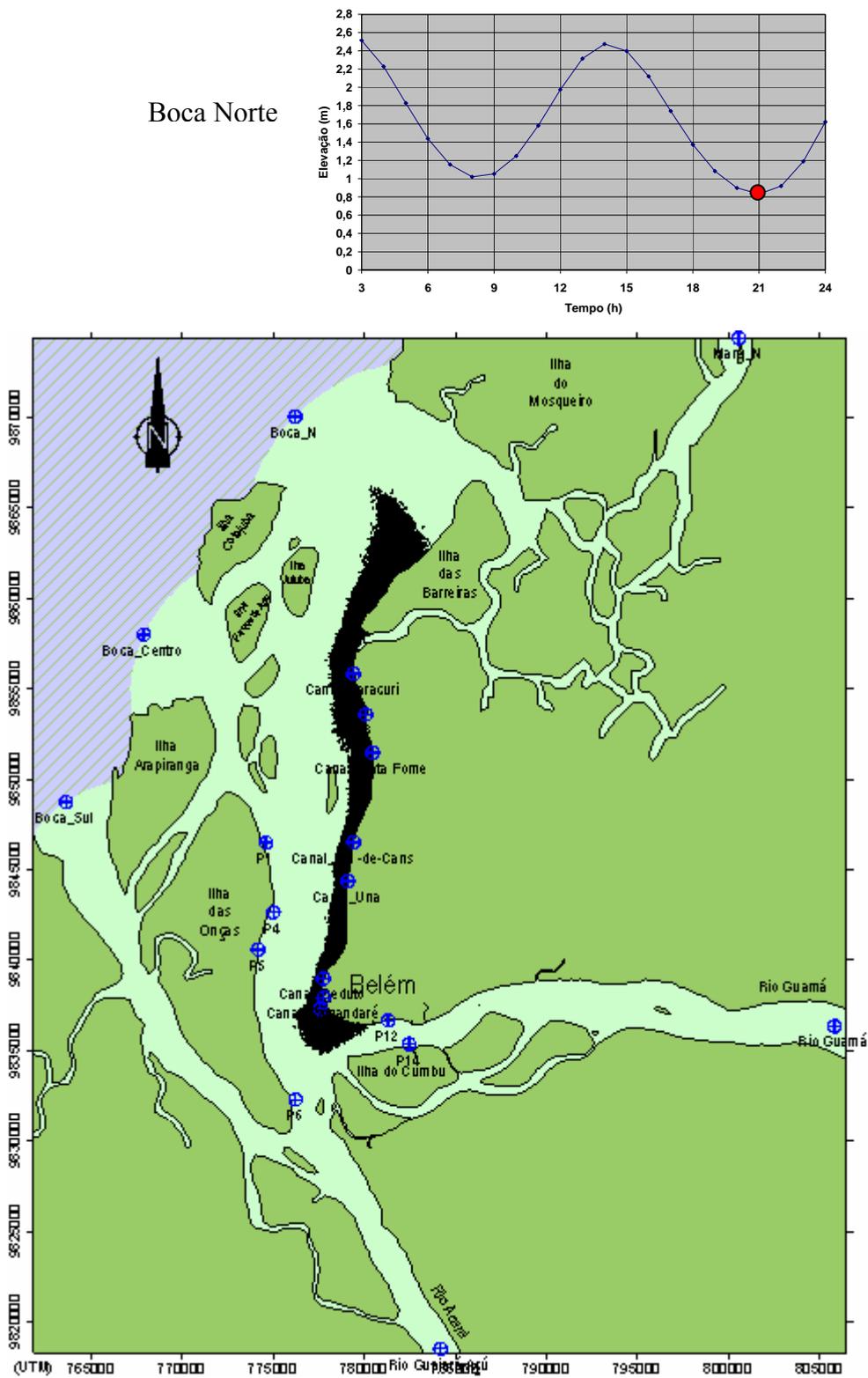


Figura 4.44 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 93 hs de lançamento.

Quinto dia de lançamento.

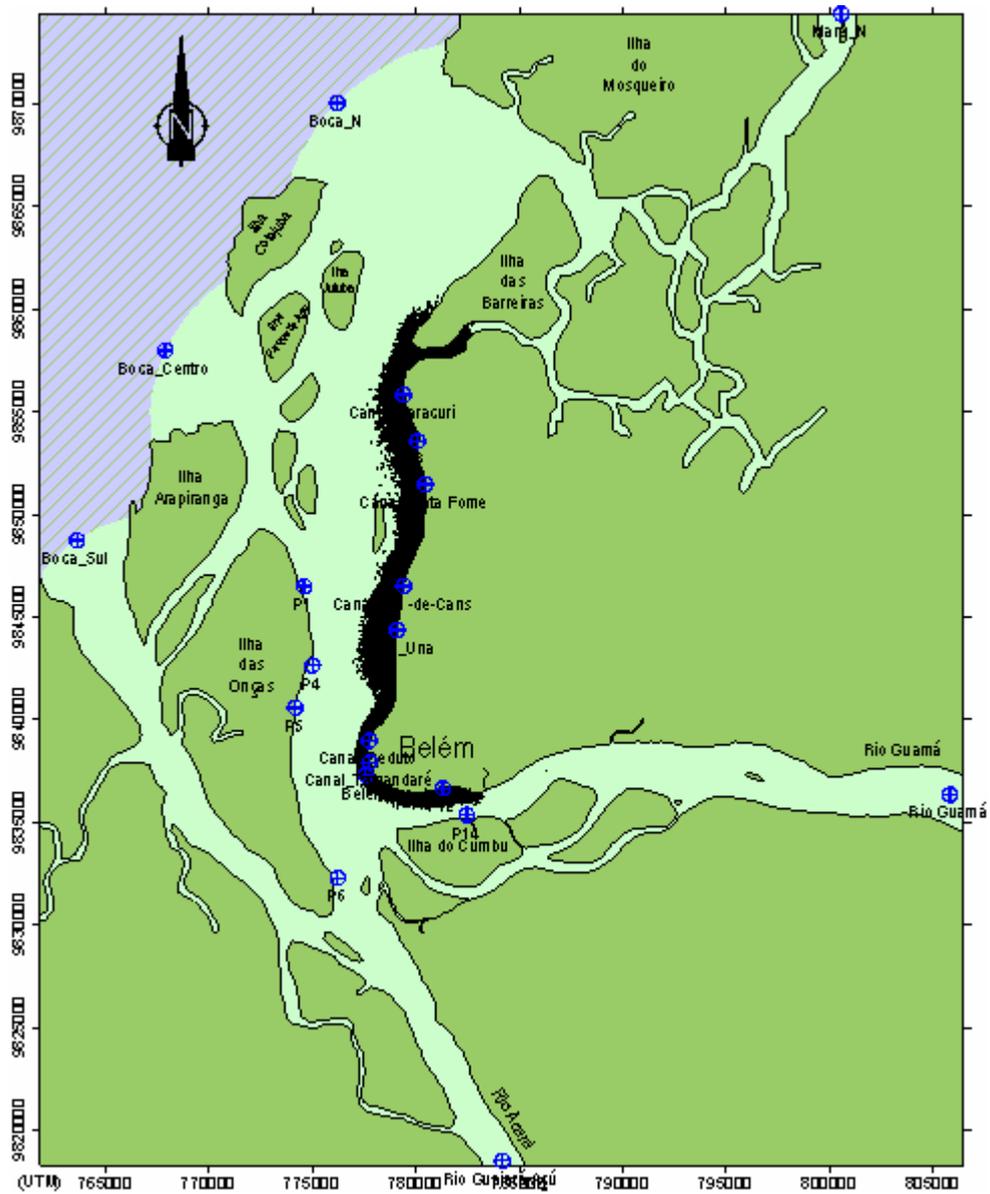
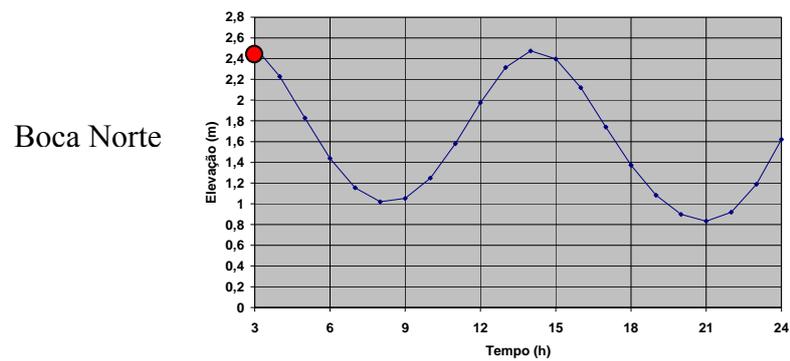


Figura 4.46 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 99 hs de lançamento.

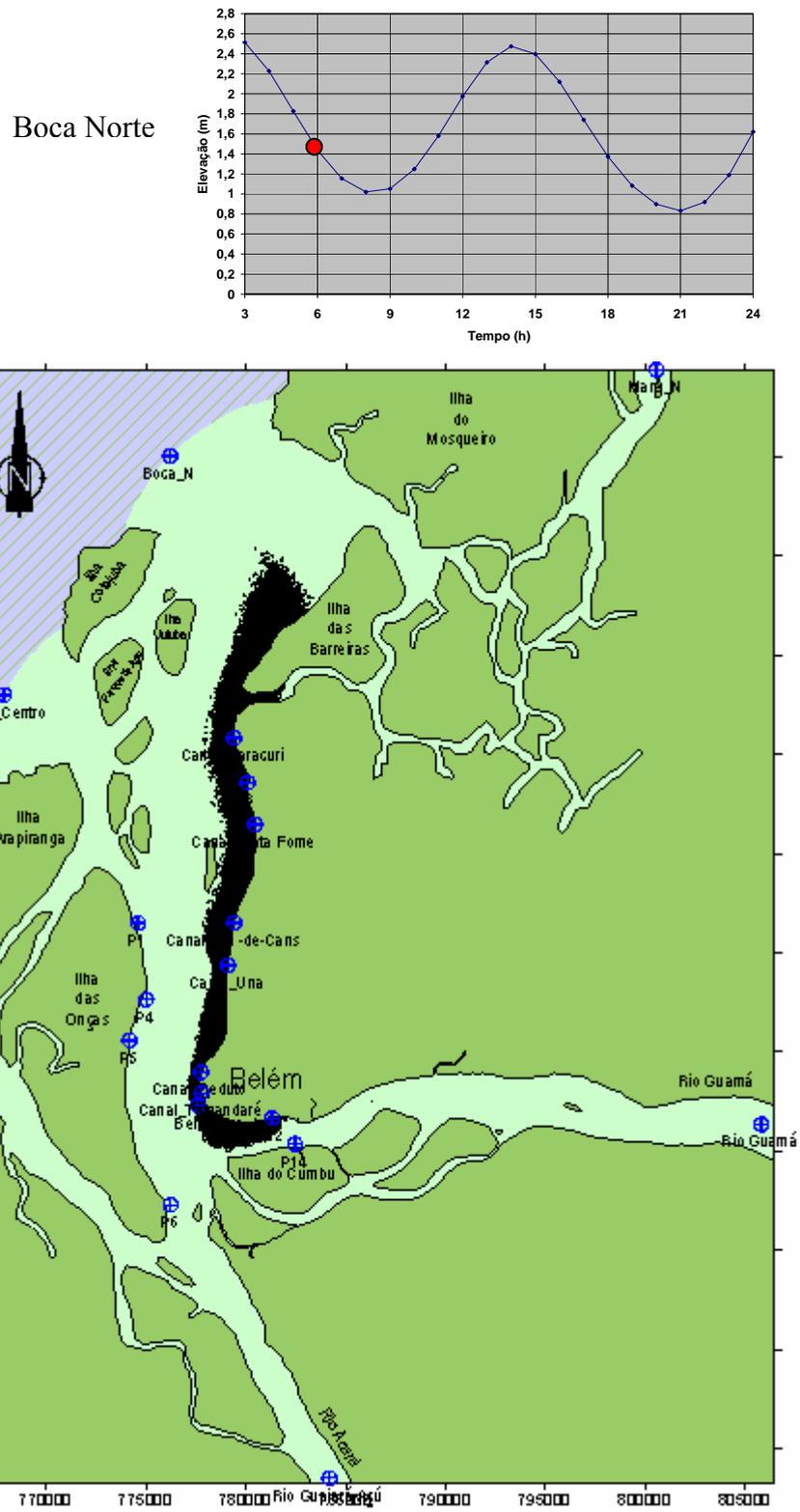


Figura 4.47 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 102 hs de lançamento.

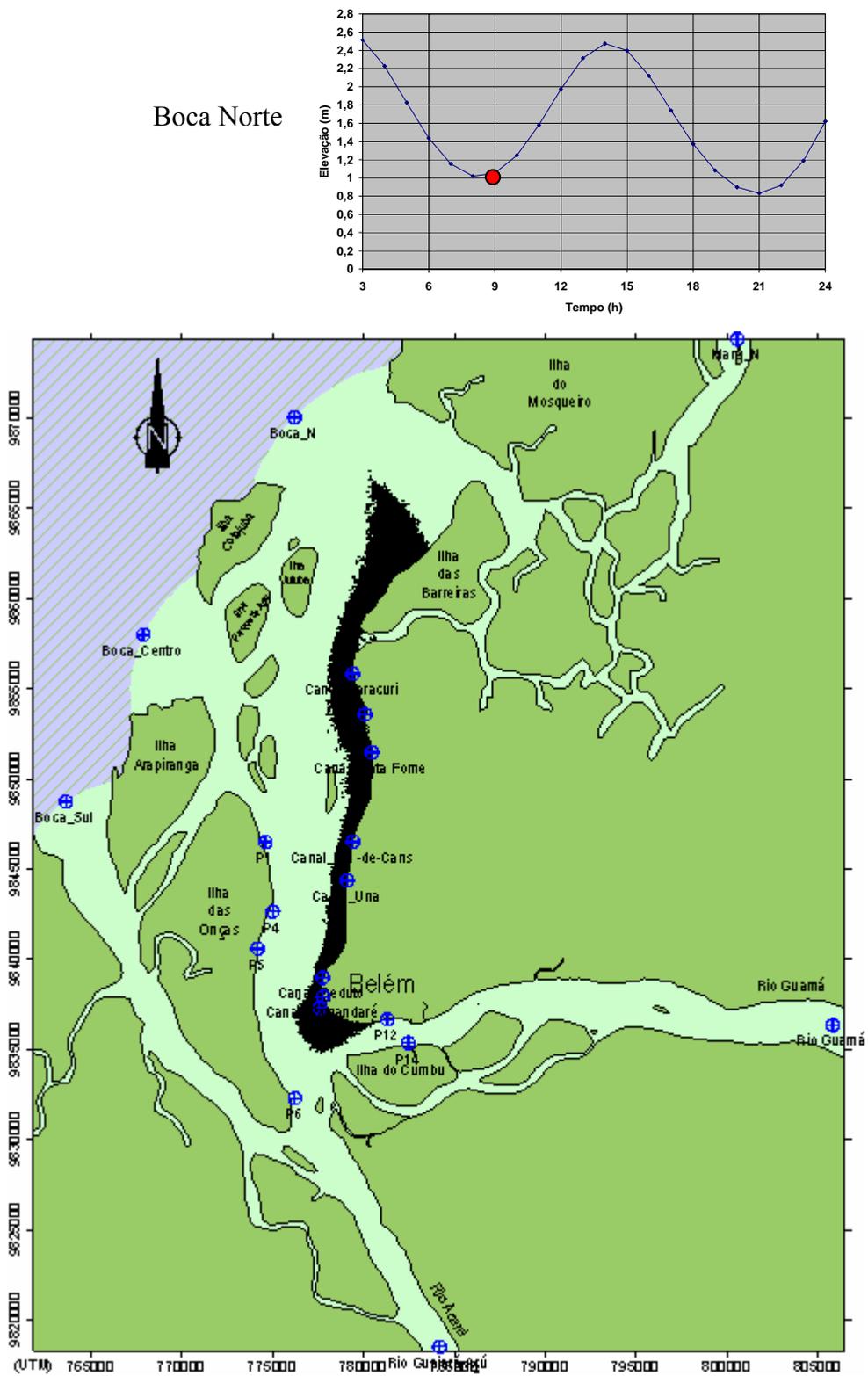


Figura 4.48 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 105 hs de lançamento.

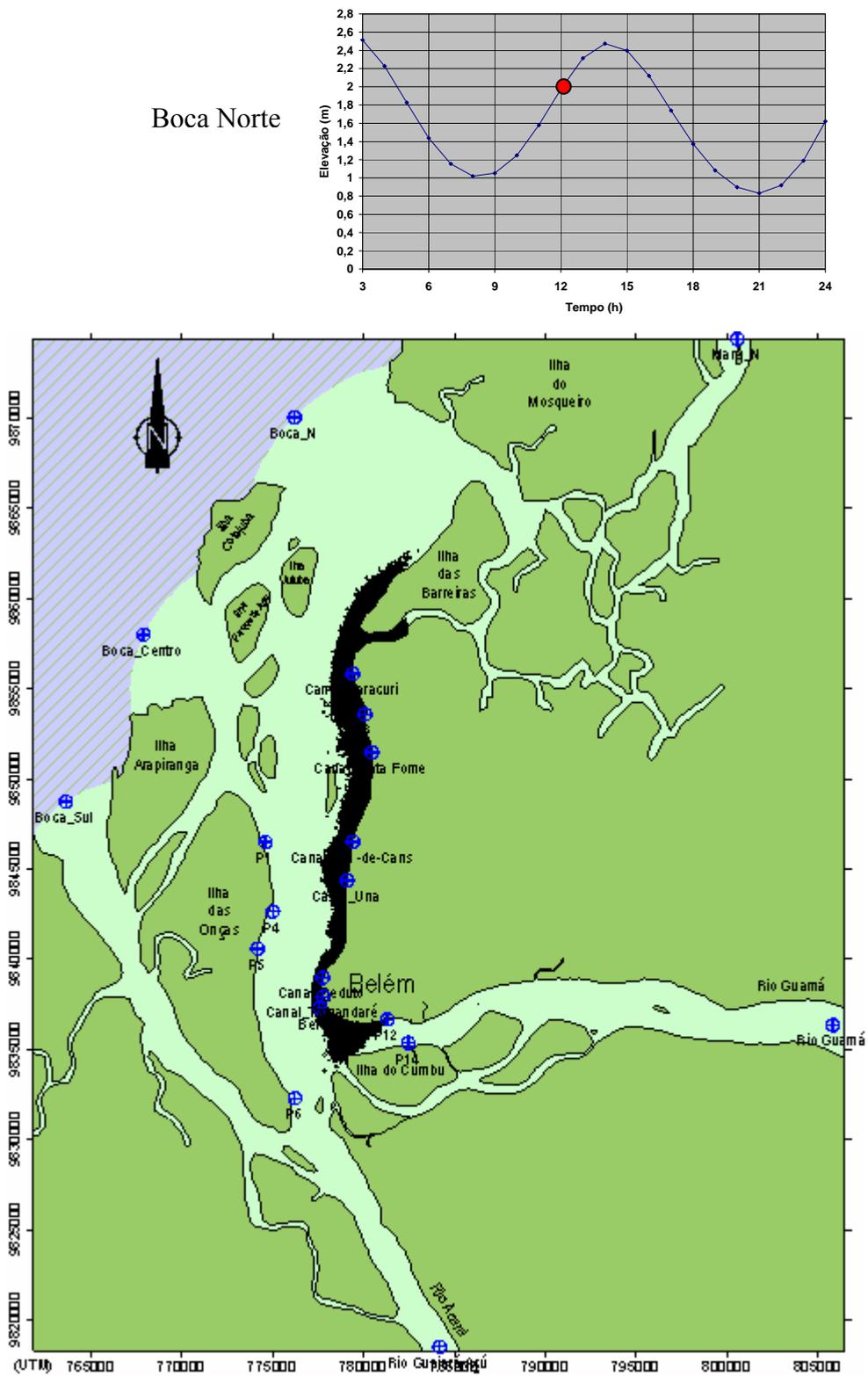


Figura 4.49 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 108 hs de lançamento.

Boca Norte

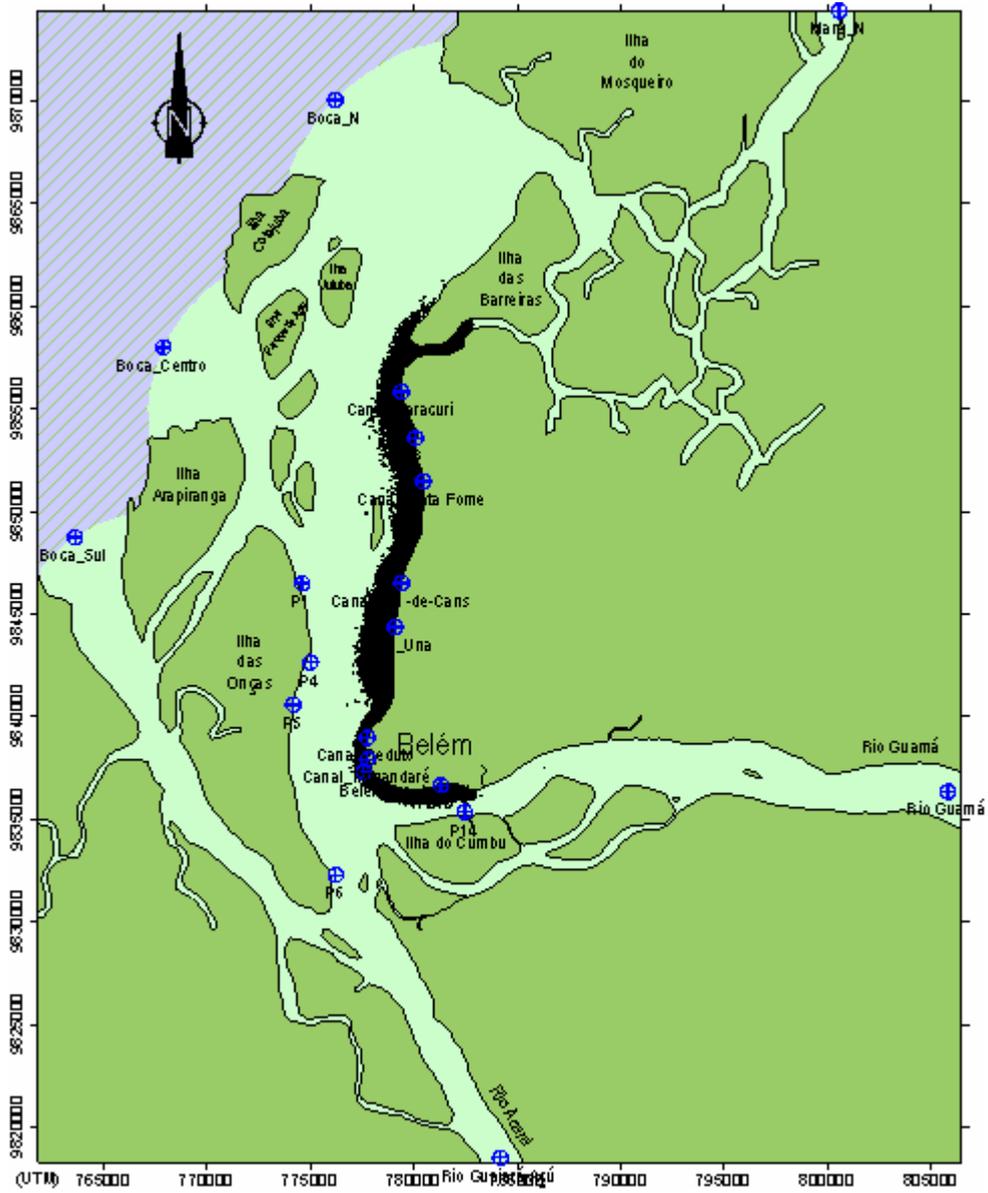
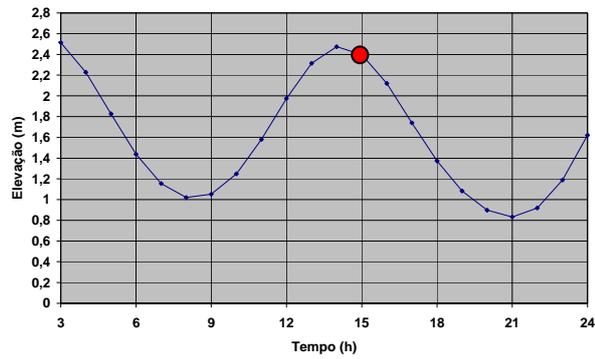


Figura 4.50 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 111 hs de lançamento.

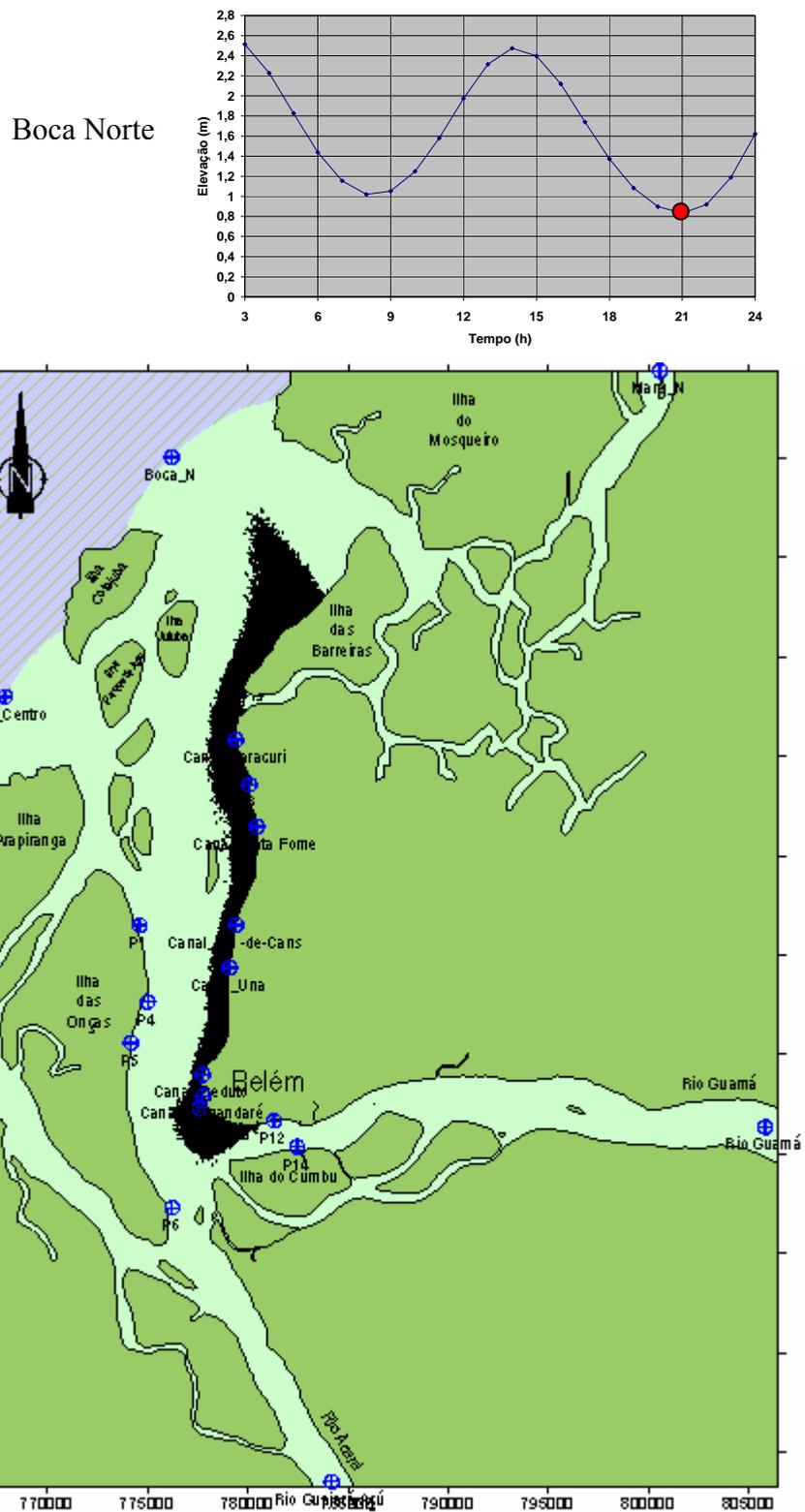


Figura 4.52 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 117 hs de lançamento.

Boca Norte

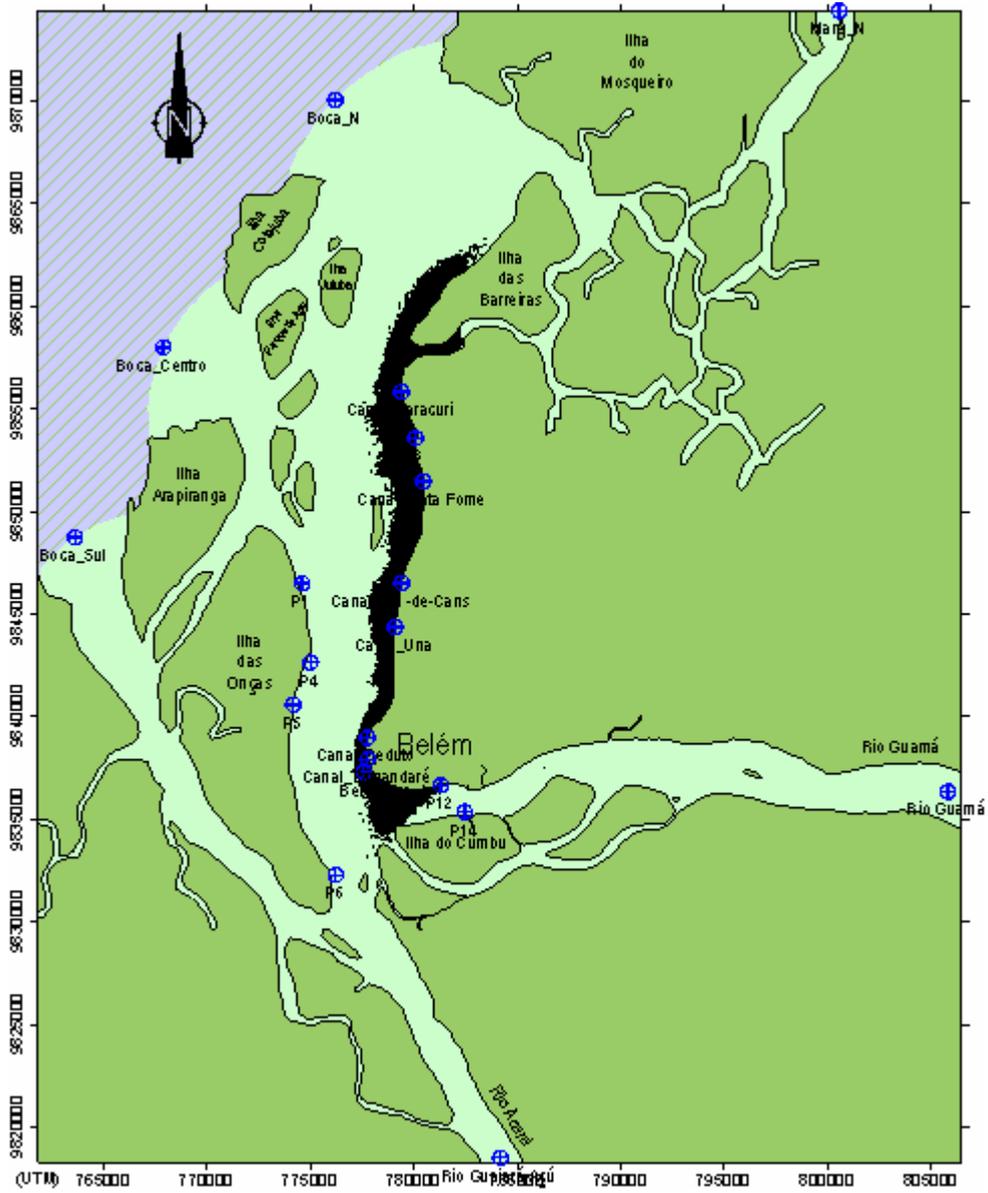
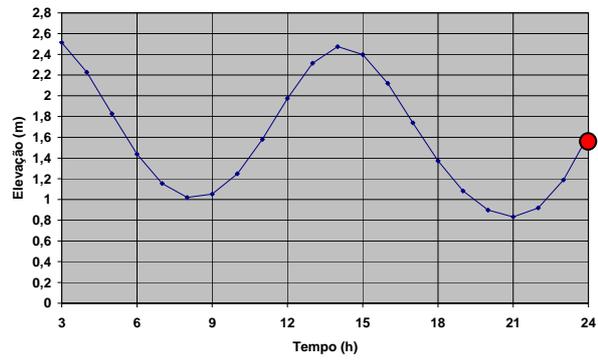


Figura 4.53 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 120 hs de lançamento.

Sexto dia de lançamento.

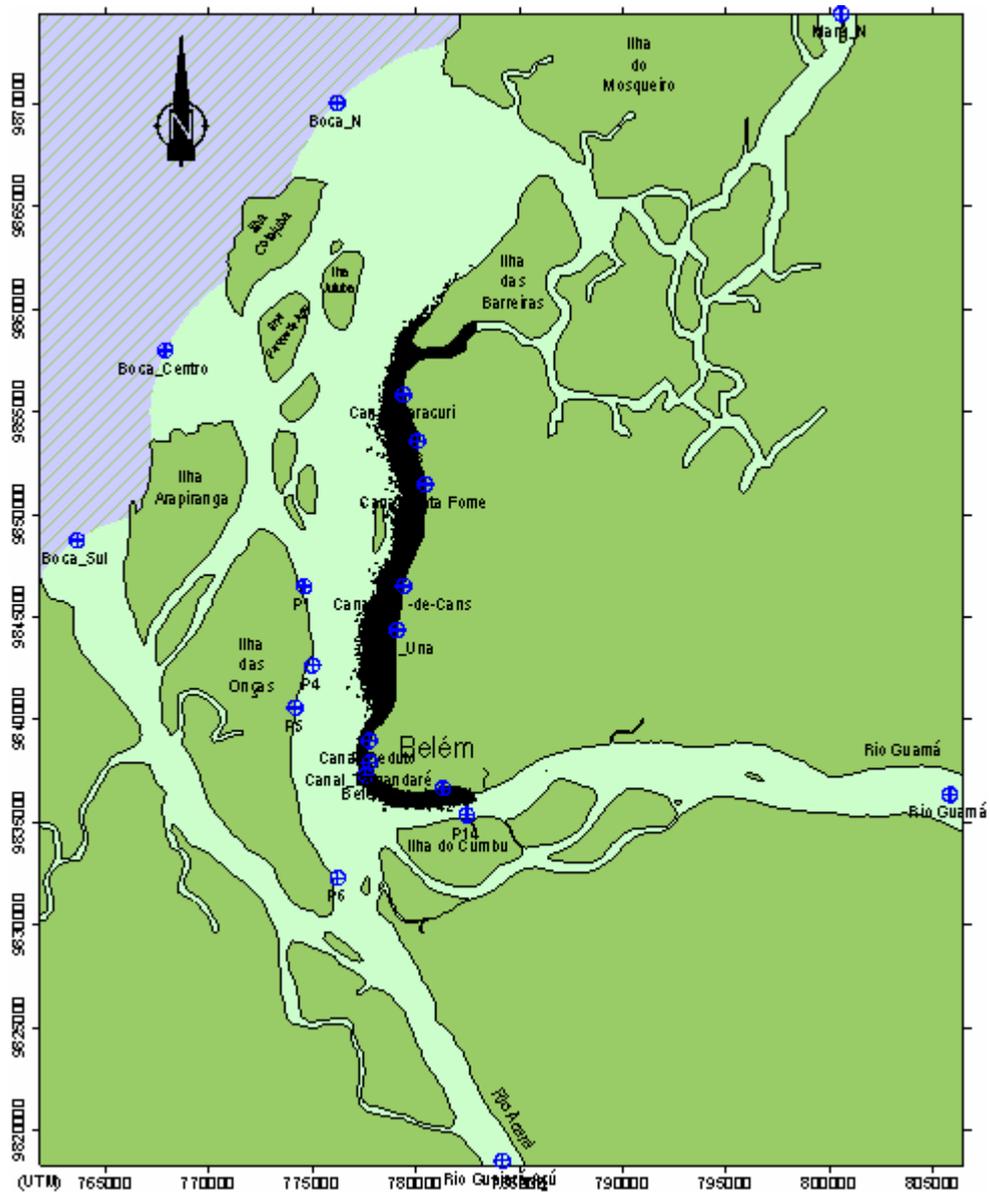
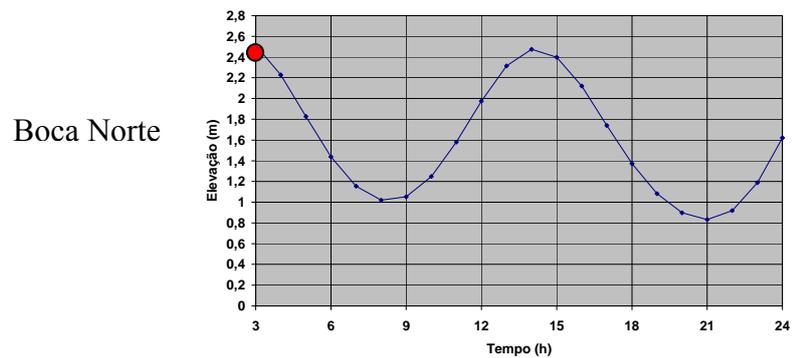


Figura 4.54 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 123 hs de lançamento.

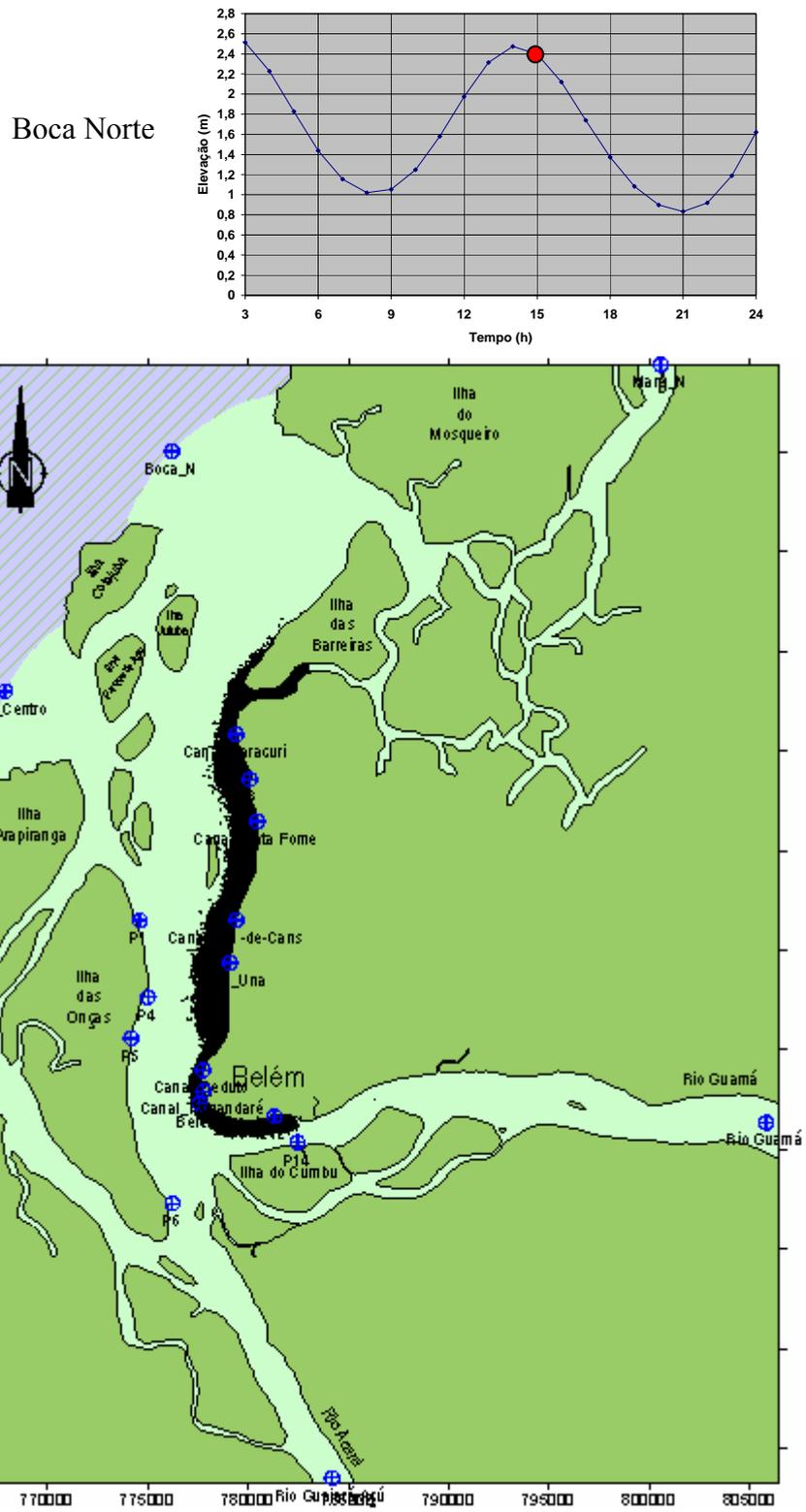


Figura 4.58 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 135 hs de lançamento.

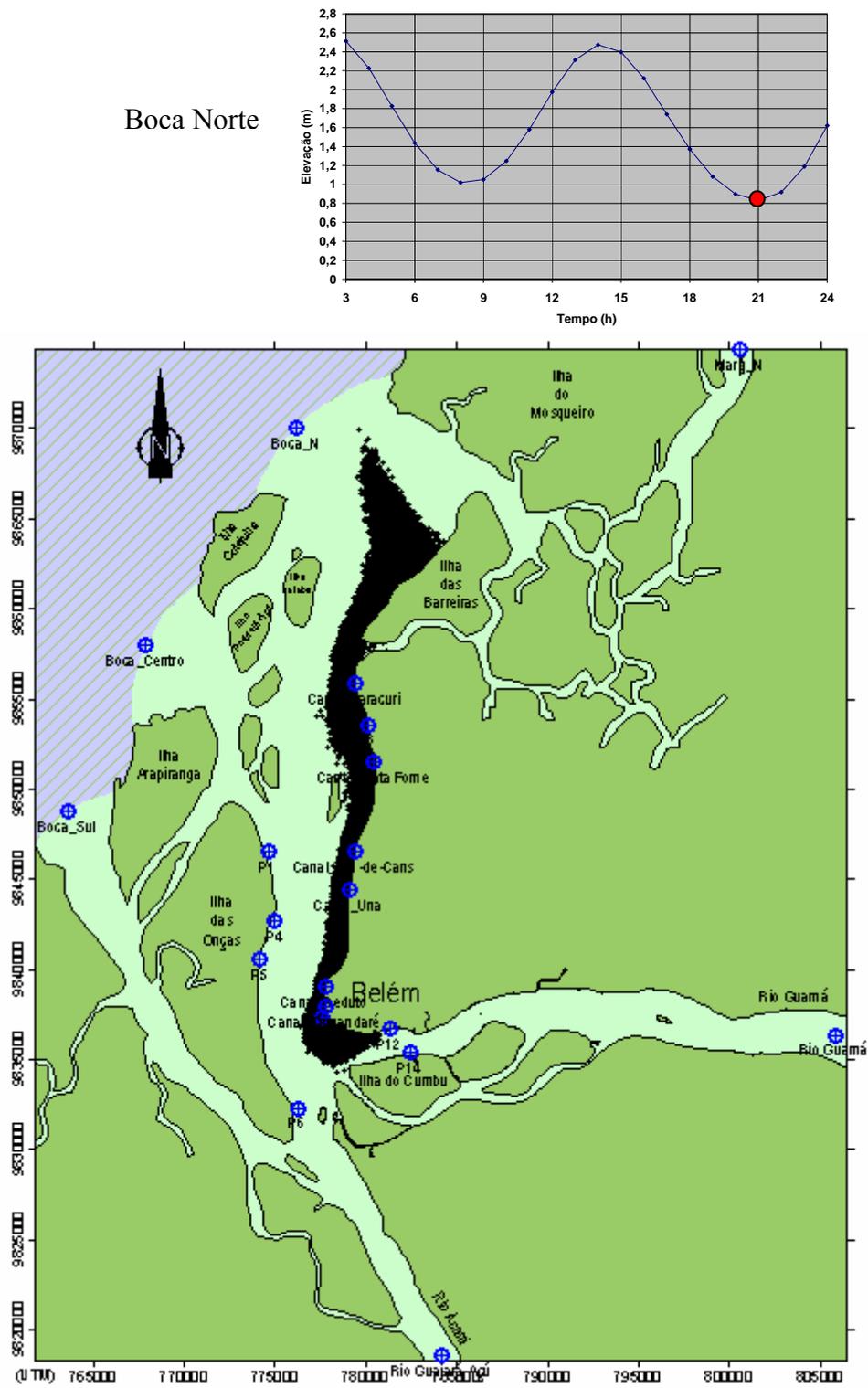


Figura 4.60 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 141 hs de lançamento.

Boca Norte

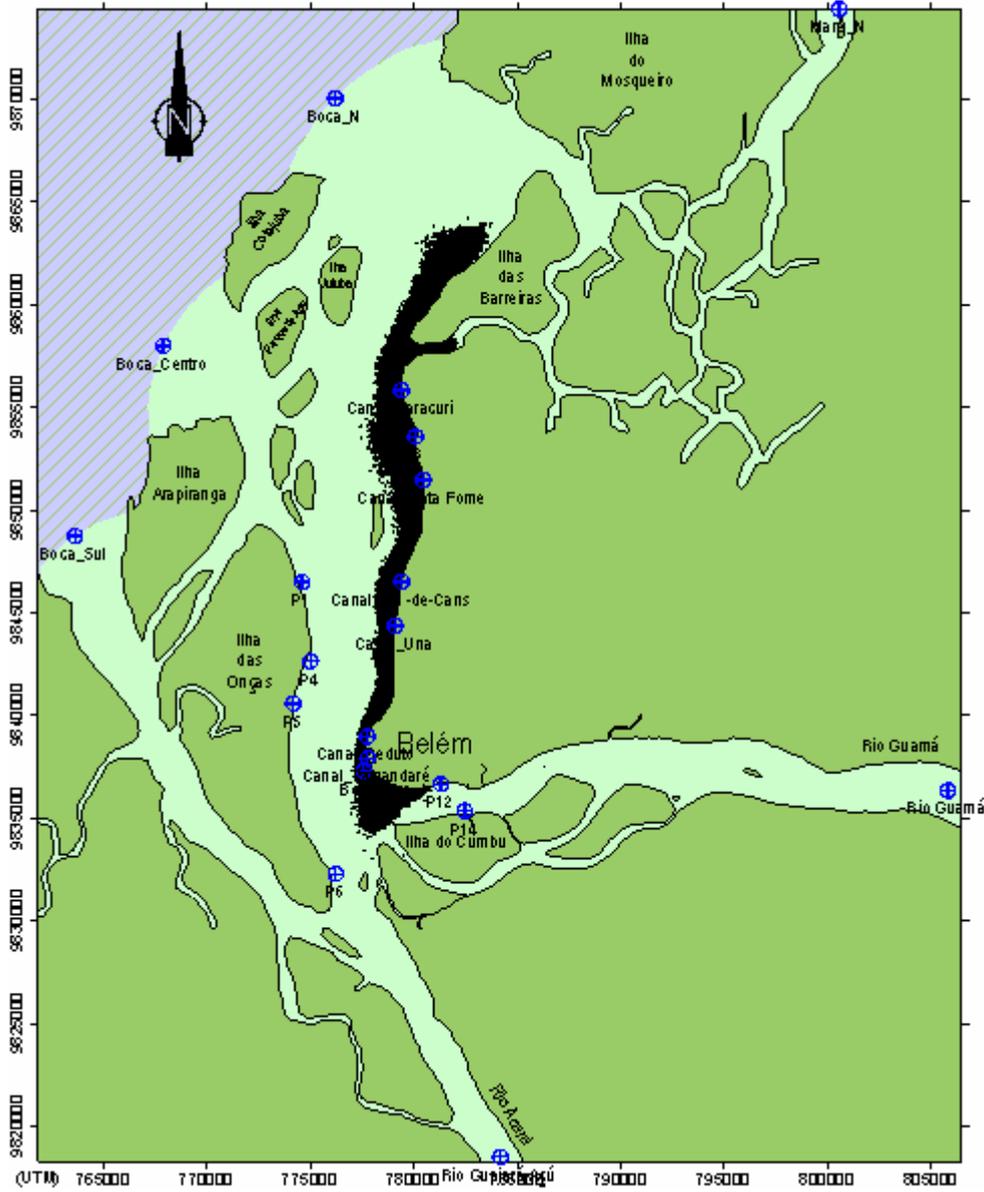
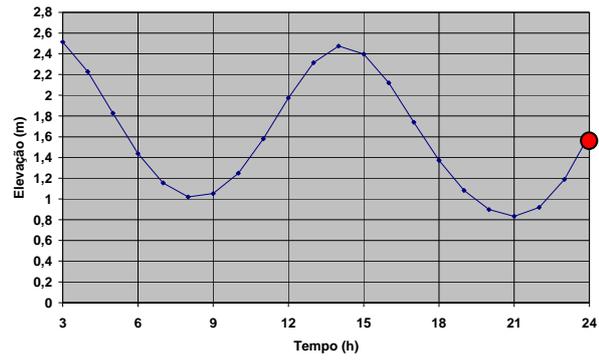


Figura 4.61 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 144 hs de lançamento.

Sétimo dia de lançamento.

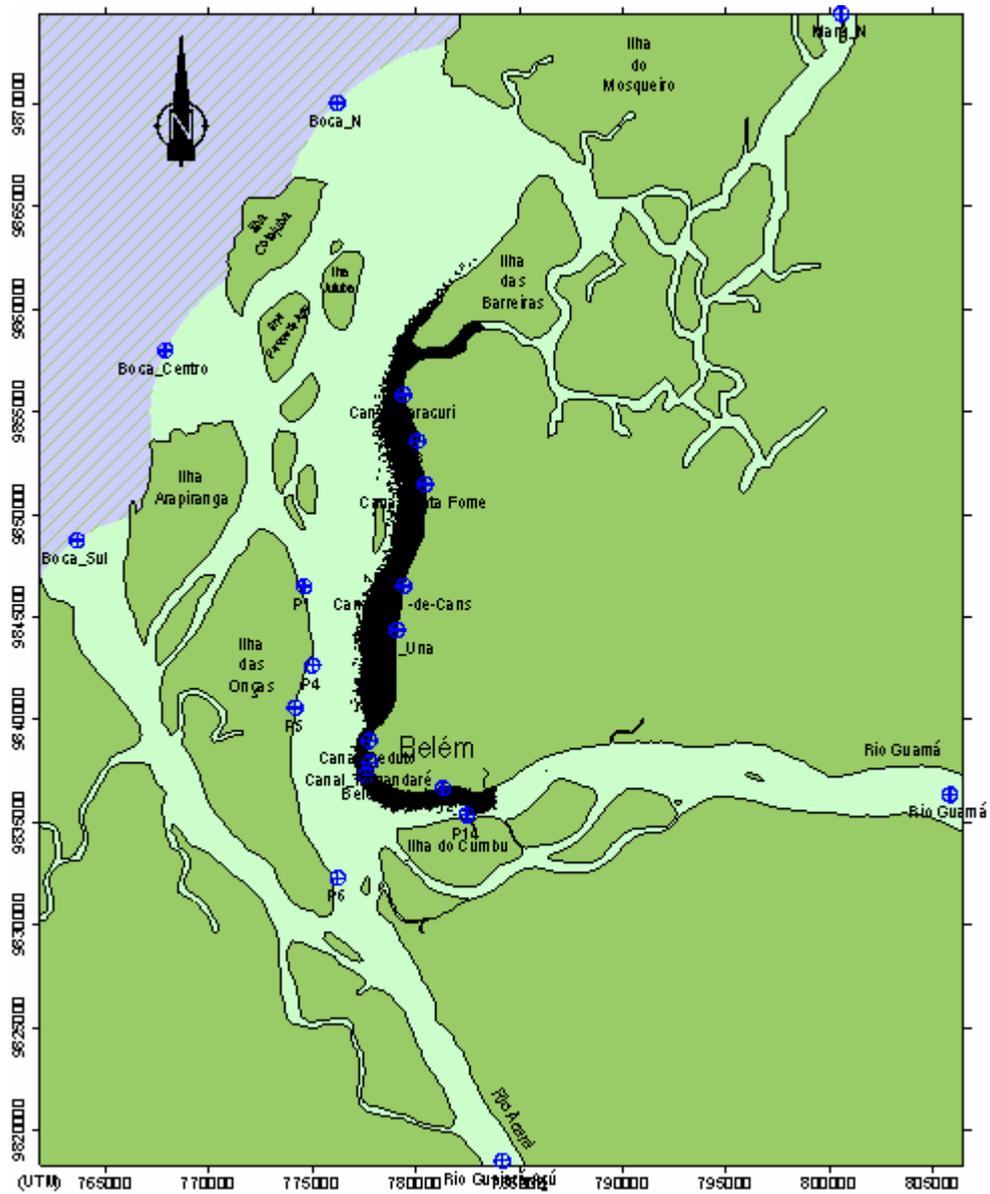
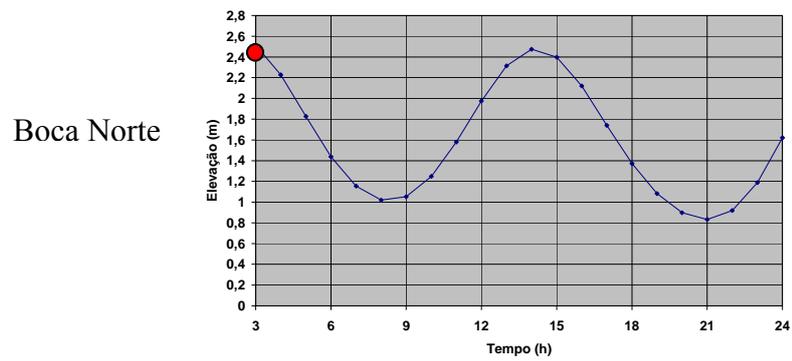


Figura 4.62 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 147 hs de lançamento.

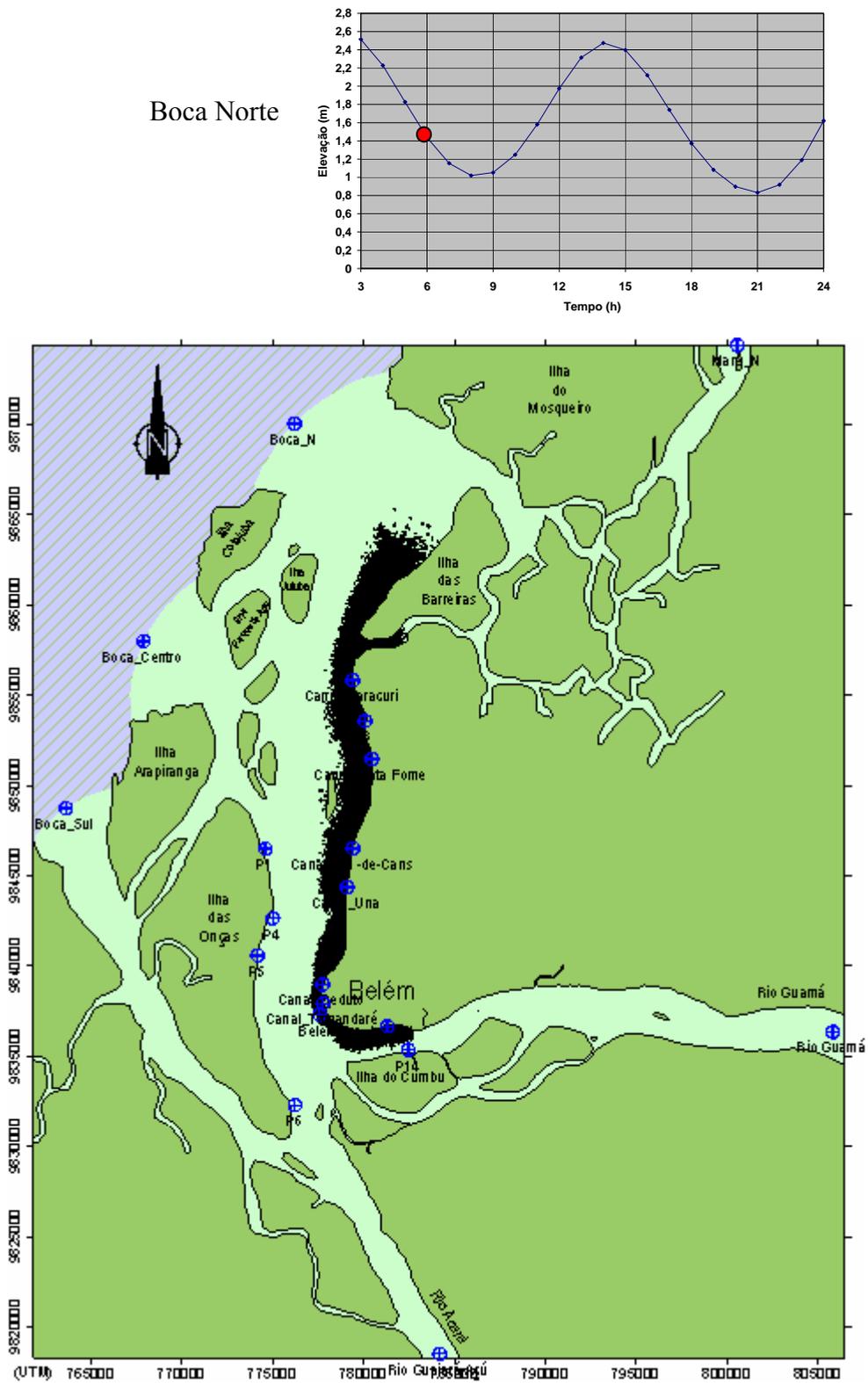


Figura 4.63 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 150 hs de lançamento.

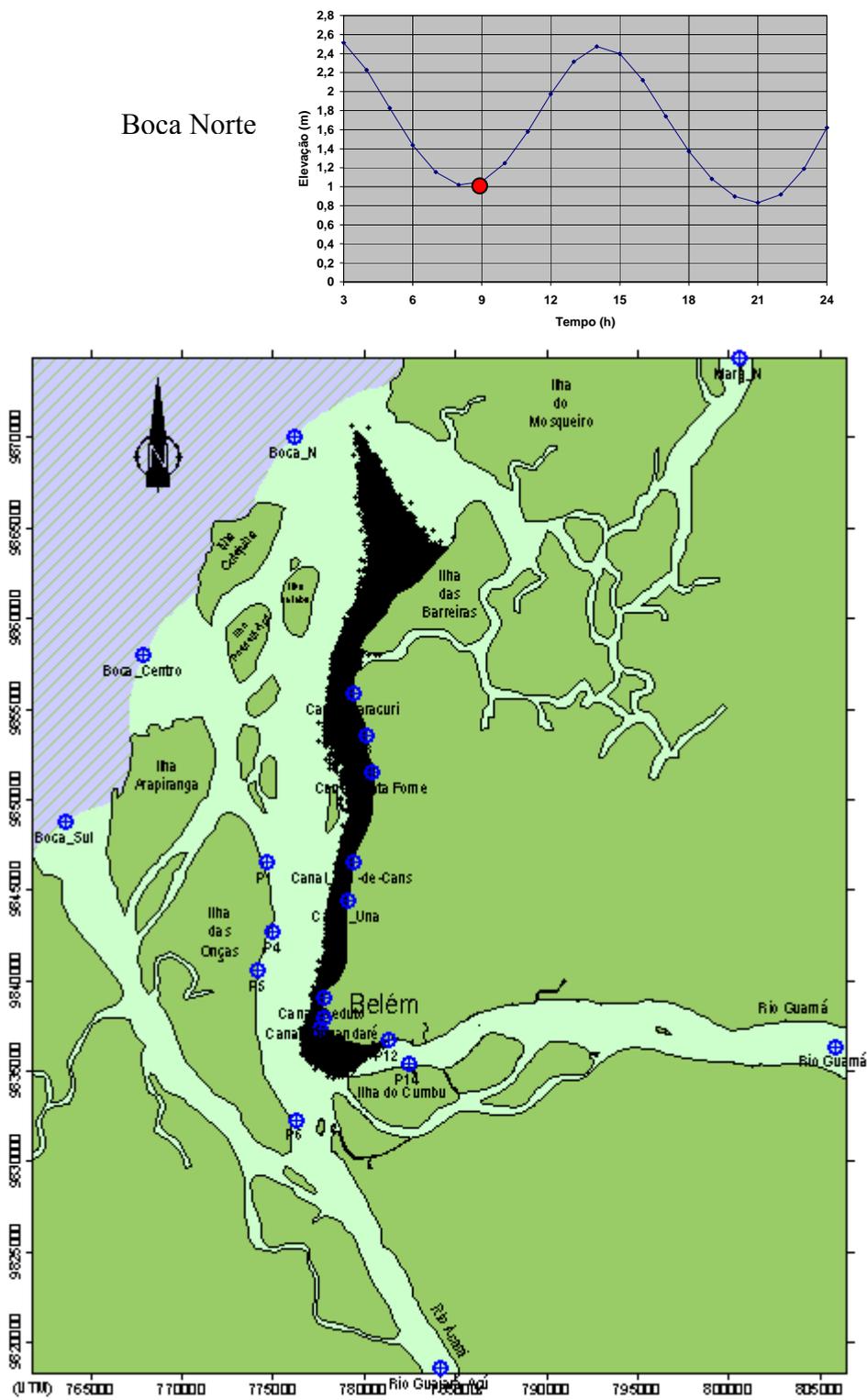


Figura 4.64 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 153 hs de lançamento.

Boca Norte

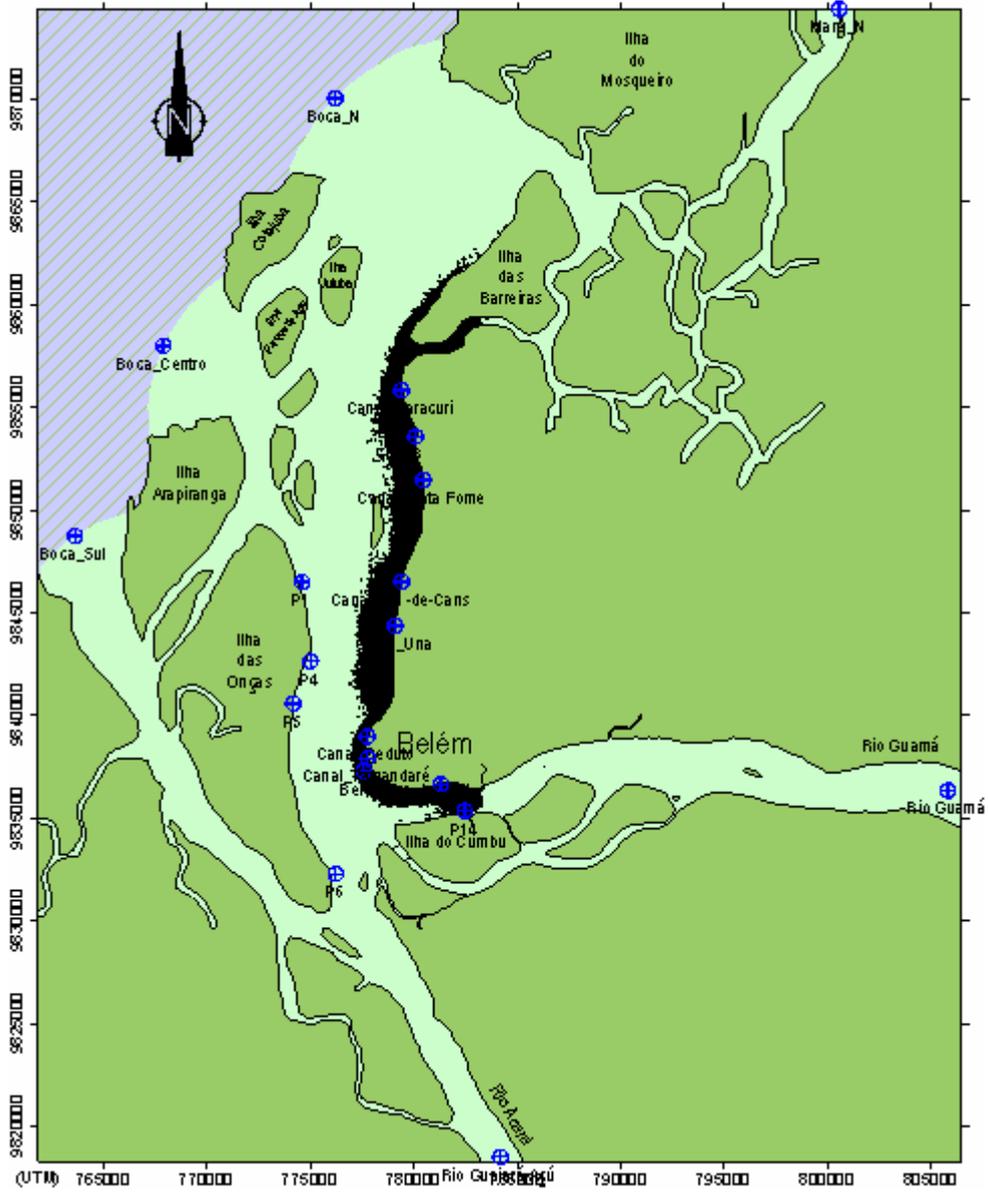
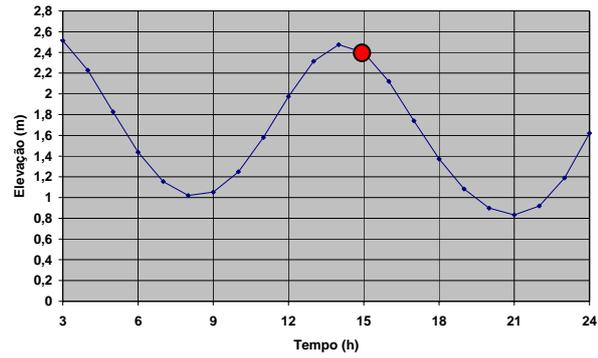


Figura 4.66 - Espalhamento da pluma de contaminantes na Baía de Guajará, após 159 hs de lançamento.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu na implementação de um modelo hidrodinâmico e de transporte de poluentes na baía do Guajará.

Os modelos de qualidade da água podem constituir um auxílio valioso para a elaboração de programas de monitoração e para a avaliação de cenários alternativos relativamente a estratégias de descarga de poluentes.

Optou-se assim, por desenvolver o modelo hidrodinâmico e de transporte que seja capaz de receber as condições de contorno medidas para se realizar a calibração do mesmo.

Foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico e de transporte de contaminantes para a Baía do Guajará. A construção deste modelo envolveu a consideração de dados como batimetria, contornos de terra, características do fundo e constantes harmônicas de maré.

O modelo não encontra-se calibrado e validado, devido á escassez de dados sobre marés, velocidades e concentração de poluentes na região de estudos. Desta forma, resultados definitivos não pode ainda ser obtidos a partir do mesmo. Entretanto, análises qualitativas ou preliminares tanto de escoamento quanto de da dispersão de poluentes, podem ser realizadas.

Dentro deste contexto, é possível verificar que a pluma de poluentes contaminantes não se dispersa para regiões afastadas das margens. A pluma é transladada seguindo as correntes de maré, mas continua restrita às zonas próximas da costa.

É importante notar que, com o passar do tempo, a pluma se desloca para o norte e para o sul. Isto indica que a dinâmica do estuário pode levar os poluentes de Belém na direção de Icoaraci e Mosqueiro. Entretanto, estes cálculos são dependentes das constantes de difusão usados. Logo, um estudo específico sobre estas constantes para o local, juntamente com o processo de calibração, permitiria respostas mais precisas.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser destacadas:

Medição de altura de maré para especificação de condições de contorno e calibração do modelo hidrodinâmico.

Medição de velocidades em alguns locais, para calibração do modelo hidrodinâmico.

Medição de velocidades dos ventos em alguns locais, para calibração do modelo hidrodinâmico.

Determinação das concentrações de coliformes fecais nos canais da região metropolitana de Belém. De preferência, sua variação ao longo de um ciclo de maré.

Modelagem de um domínio maior da região, que englobe a Ilha de Mosqueiro inteira.

Simulação da construção de emissários de despejo de esgoto.

6. REFERÊNCIAS

Abbot, M.B., Price, W.A. (editors) – Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book." E & FN Spon, 1994.

Al-Rabeh, A.H., Lardner, R.W., Gunay, N. Gulspill Version 2.0 : a software package for oil spills in the Arabian Gulf. Environmental Modelling and Software 15, pp 425-442, 2000

Assan, Aloísio Ernesto. *Método dos Elementos Finitos: Primeiros Passos*, São Paulo (Campinas): Editora da Unicamp, 1999.

Batoz, J.L., Dhatt, G. *Modélisation des structures par éléments finis*. Volume 1: Solides Elastiques. Paris: Hermes, 1995

Blomberg, E., Claeson, C.M. Oil Spill Clean-up Technologies for Rivers, Ports and Sheltered Waters, Part I – The Hydrodynamic Circus. Spill Science and Technology Bulletin, Vol.4, No.1, pp 45-53, 1997

Bruzzone, A.G. et al. Risk Analysis in harbor environments using simulation. Safety Science, 35, pp 75-86, 2000 FRENCH, P. W., 1997, *Coastal and Estuarine Management*, London, Routledge.

Galt, J.A., Payton, D.L. Development of Quantitative Methods for Spill Response Planning: A Trajectory Analysis Planner. Spill Science and Technology Bulletin, Vol.5, No.1, pp 17-28, 1999

Heniche, M. A New 2D Finite Element Drying-Wetting Model for Rivers and Estuaries. Submetido ao Int. Jour. for Num. Meth. in Fluids, agosto de 1997

Martin, J.L., McCutcheon, S.C. Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling, Lewis Publishers, Florida, 2000

Morin, J. et al. Integrated two-dimensional macrophytes-hydrodynamic modeling. Submetido ao Journal of Hydraulic Research (IAHR), maio de 1998

Nordvik, A.B. Oil and Water Separation in Marine Oil Spill Clean-up Operations. Spill Science and Technology Bulletin, Vol.3, No.3, pp 107-122, 1996

Padilla, F. et al. On open boundaries in the finite element approximation of two dimensional advection-diffusion flows. Int. Jour. for Num. Meth. in Eng. 40 (13), 1997

Pedlosky, J. 1987. *Geophysical fluid dynamics*. Springer Verlag, 2. Ed. New York.

DYER, K. R., 1997, *Estuaries - A Physical Introduction*, 2 ed. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd.

LANNA, R. L., 1995, *Gerenciamento de bacia hidrográfica: Aspectos conceituais e metodológicos*, Brasília, IBAMA.

LANNA, R. L., et al., 1997, *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Editora da Universidade/UFRG, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

ROSMAN, P. C. C., 1997, “Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos”. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., CAMPOS, R. O. G., EIGER, S., *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3*, 1 ed., capítulo 3, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

ROSMAN, P. C. C., 2001, “Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental”. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5*, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Pinheiro, R.V.L. Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará. Belém-PA. Dissertação de Mestrado. Belém: Universidade Federal do Pará, 1987.

Reed, M. et al. Quantitative Analysis of Alternate Oil Spill Response Strategies using OSCAR, Spill Science and Technology Bulletin, Vol.2, No.1, pp 67-74, 1995

Reed, M. et al. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science and Technology Bulletin, Vol.5, No.1, pp 3-16, 1999

Reed, M. et al. Oil Spill Contingency and Response Analysis in Support of Environmental Impact Assessment Offshore Namibia, Spill Science and Technology Bulletin, Vol.5, No.1, pp 29-38, 1999

Secretan, Y., Leclerc, M., Modeleur: a 2D hydrodynamic GIS and simulation software, Hydroinformatics-98, Copenhagen, 1998

Srinivasa, A.V., Wilhelm, W.E. A procedure for optimizing tactical response in oil spill clean up operations. European Journal of Operational Research, 102, pp 554 - 574, 1997

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. The Finite Element Method Volume 3: Fluid Dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

Dyer, K., 1973. Estuaries: a physical introduction. John Wiley & Sons, London.

FEMAR - Tabelas das Estações Maregráficas Brasileiras - Consulta On-Line <http://www.femar.com.br>, 2005.

EMBRAPA, <http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br> , 2005.

RAMOS, J. F. F.. Poluição e Contaminação na Orla de Belém – PA. A questão da água na grande Belém, 2004.

_____. Dossiê de candidatura. Belém, 2002.

Pedlosky, J. 1987. Geophysical fluid dynamics. Springer Verlag, 2 Ed. New York

ODD, N. V. M., MURPHY, D. G. *Experience and Recommended practice for the Construction and objective calibration of Coastal Pollution Models*. Proc. Of the Sec. International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coast estuarine and River Waters. Great Britain, v.1, n. 19, p. 229-239, 1992.

Abbot, M.B. & Basco, D.R. (1989). *Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*, Longan Group, UK Limited.