

# Modelagem do Descarte de Água Produzida para o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras



E&P

Revisão 00  
Dezembro/2006



**PETROBRAS**

**Modelagem do Descarte de Água  
Produzida para o FPSO Petrojarl  
Cidade de Rio das Ostras**

**Revisão 00**

**Dezembro / 2006**



**E&P**







**ÍNDICE GERAL**

|  |        |
|--|--------|
| RESUMO .....   | 1      |
| I INTRODUÇÃO .....   | I-1    |
| I.1 ÁREA DE ESTUDO .....   | I-2    |
| I.1.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO .....                   | I-3    |
| I.1.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO DA REGIÃO .....                            | I-5    |
| II ANÁLISE DE DADOS .....  | II-1   |
| II.1 VENTOS .....  | II-2   |
| II.2 CORRENTES .....   | II-5   |
| II.3 MARÉS .....   | II-9   |
| II.4 TEMPERATURA E SALINIDADE .....                                    | II-12  |
| III MODELO HIDRODINÂMICO .....   | III-1  |
| III.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL .....                         | III-1  |
| III.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM .....                                  | III-2  |
| III.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS .....                           | III-5  |
| III.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO .....                                   | III-6  |
| III.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....                         | III-7  |
| III.3.1 VALIDAÇÃO PARA A MARÉ .....                                    | III-8  |
| III.3.2 VALIDAÇÃO PARA AS CORRENTES .....                              | III-9  |
| III.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....         | III-11 |
| IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE E COMPOSIÇÃO DA ÁGUA<br>PRODUZIDA ..... | IV-1   |
| V MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO .....                | V-1    |
| V.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CORMIX .....                                   | V-1    |
| V.2 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO .....                    | V-2    |
| VI MODELAGEM DA DISPERSÃO NO CAMPO AFASTADO .....                      | VI-1   |
| VI.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP .....                                 | VI-1   |
| VI.1.1 FORMULAÇÃO DO MODELO .....                                      | VI-4   |
| VI.2 DADOS DE ENTRADA .....  | VI-21  |
| VI.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....                            | VI-22  |
| VI.3.1 CENÁRIOS PROBABILÍSTICOS .....                                  | VI-22  |
| VI.3.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS .....                                  | VI-23  |

---

|         |   |        |
|---------|---|--------|
| VII     | MODELAGEM DO DESCARTE DE ÁGUA PRODUZIDA .....                         | VII-1  |
| VII.1   | RESULTADOS DA DILUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO .....                         | VII-2  |
| VII.2   | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS.....                        | VII-3  |
| VII.2.1 | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS PARÂMETROS<br>INORGÂNICOS .....         | VII-3  |
| VII.2.2 | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS PARÂMETROS<br>ORGÂNICOS.....            | VII-7  |
| VII.3   | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS.....                        | VII-22 |
| VII.3.1 | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS PARÂMETROS<br>INORGÂNICOS .....         | VII-23 |
| VII.3.2 | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS PARÂMETROS<br>ORGÂNICOS.....            | VII-26 |
| VII.4   | RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA MODELAGEM DE ÁGUA<br>PRODUZIDA ..... | VII-40 |
| VIII    | CONCLUSÕES.....   | VIII-1 |
| IX      | BIBLIOGRAFIA.....   | IX-1   |
| X       | EQUIPE TÉCNICA .....  | X-1    |

## TABELAS

| TABELA  | PÁG.   |
|---|--------|
| <b>Tabela I.1-1</b> - Coordenadas e lâmina d'água do ponto de descarte de água produzida (SAD 69).  | I-2    |
| <b>Tabela II.1-1</b> - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento NCEP no período de 1 <sup>o</sup> de janeiro de 1992 a 31 de março de 1992, com intervalo de amostragem dt=1h (convenção meteorológica).                                   | II-4   |
| <b>Tabela II.1-2</b> - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento NCEP no período de 1 <sup>o</sup> de julho de 1992 a 30 de setembro de 1992, com intervalo de amostragem dt=1h (convenção meteorológica).                                  | II-4   |
| <b>Tabela II.2-1</b> - Localização e período de coleta dos dados de corrente.   | II-5   |
| <b>Tabela II.3-1</b> - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica Enchova II (RJ). Fonte: FEMAR (2000).   | II-11  |
| <b>Tabela IV-1</b> - Parâmetros utilizados para a modelagem das plumas de descarte de água produzida.   | IV-1   |
| <b>Tabela IV-2</b> - Composição da água produzida.  | IV-1   |
| <b>Tabela VI.3.1-1</b> - Resultados dos testes de toxicidade com o equinodermo <u>Lytechinus variegatus</u> realizados com amostras de água produzida.  | VI-23  |
| <b>Tabela VII-1</b> - Concentrações dos compostos simulados no ponto de lançamento, valores correspondentes à diluição para o valor do CENO, valores limites de concentração (diluição de 10.000 vezes a concentração inicial) e o valor de salinidade da região de descarte. | VII-1  |
| <b>Tabela VII.1-1</b> - Resultados das simulações do campo próximo.   | VII-2  |
| <b>Tabela VII.1-2</b> - Concentrações dos compostos simulados no ponto de lançamento e valores correspondentes à diluição no campo próximo.   | VII-2  |
| <b>Tabela VII.2.1-1</b> - Máximas concentrações obtidas para os parâmetros inorgânicos à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.  | VII-3  |
| <b>Tabela VII.2.2-1</b> - Máximas concentrações obtidas para os parâmetros orgânicos à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.  | VII-8  |
| <b>Tabela VII.4-1</b> - Concentrações dos parâmetros químicos simulados e diluição da água produzida, no ponto de lançamento, no final do campo próximo e a 100, 250 e 500 m, calculadas para o descarte no FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.                          | VII-41 |

## FIGURAS

| FIGURA  | PÁG. |
|---|------|
| <b>Figura I.1-1</b> - Localização do ponto de descarte - FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.   | I-2  |
| <b>Figura I.1.1-1</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento a 10 m no período de verão (Reanálises do NCEP).   | I-3  |
| <b>Figura I.1.1-2</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento a 10 m no período de inverno (Reanálises do NCEP).   | I-4  |
| <b>Figura I.1.2-1</b> - Representação da circulação no oceano Atlântico Sul, indicando as seguintes correntes oceânicas: Corrente Circumpolar (CC), Corrente do Atlântico Sul (CAS), Corrente de Benguela (BE), Corrente de Angola (CA), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente do Brasil (CB) e Corrente das Malvinas (CM). Adaptado de Tomczak & Godfrey (1994). | I-5  |
| <b>Figura I.1.2-2</b> - Esquema da circulação oceânica na costa brasileira.   | I-6  |
| <b>Figura I.1.2-3</b> - Representação esquemática do campo de fluxo geostrófico nos primeiros 500 m, com base em dados hidrográficos históricos, coletados na região demarcada. As linhas cheias correspondem a transporte de 2 Sv e a linha tracejada de 1 Sv. (Adaptado de Stramma et al., 1990).   | I-7  |
| <b>Figura I.1.2-4</b> - Média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM.   | I-8  |
| <b>Figura II-1</b> - Mapa com a localização das estações de medição de correntes, vento e nível do mar.   | II-1 |
| <b>Figura II.1-1</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos valores médios diários de dados de vento (NCEP) para o período de 1º de janeiro de 1992 a 31 de dezembro de 1992 (convenção vetorial).  | II-2 |
| <b>Figura II.1-2</b> - Histograma direcional dos vetores de vento (NCEP) para os períodos de (a) janeiro a março e (b) julho a setembro.  | II-3 |
| <b>Figura II.2-1</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de corrente no Ponto PC medidos a 15 m de profundidade, na região da Bacia de Campos, entre 10 de novembro e 25 de dezembro de 1992, dt=1h.   | II-5 |
| <b>Figura II.2-2</b> - Espectro de amplitudes (m/s) da corrente no Ponto PC, coletada a 15 m de profundidade, na região da Bacia de Campos, para os meses de novembro e dezembro de 1992.   | II-6 |
| <b>Figura II.2-3</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente no ponto PC (PETROBRAS), coletada a 15 m de profundidade, na região da Bacia de Campos, em novembro e dezembro de 1992.  | II-7 |
| <b>Figura II.2-4</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de corrente no ponto P12, medidos a 1 m de profundidade, entre 24 de novembro e 5 de dezembro de 2004.  | II-7 |

| FIGURA  | PÁG.   |
|---|--------|
| <b>Figura II.2-5</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de corrente no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medidos a 230 m de profundidade, entre 10 e 26 de novembro de 1992, dt=2h.                      | II-8   |
| <b>Figura II.2-6</b> - Espectro de amplitudes (m/s) da corrente registrada no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade, entre 10 e 26 de novembro de 1992, dt=2h.                      | II-8   |
| <b>Figura II.2-7</b> - Histograma direcional dos vetores de corrente no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade em novembro de 1992, dt=2h.   | II-9   |
| <b>Figura II.3-1</b> - Previsão harmônica de maré para o período de 1º de janeiro a 30 de dezembro de 1992, na estação Enchova II.  | II-10  |
| <b>Figura II.3-2</b> - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente M <sub>2</sub> .   | II-11  |
| <b>Figura II.4-1</b> - Seção vertical de densidade (kg/m <sup>3</sup> ) ao longo de 22,8°S para o período de janeiro a março, na região do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.                                       | II-12  |
| <b>Figura II.4-2</b> - Seção vertical de densidade (kg/m <sup>3</sup> ) ao longo de 22,8°S para o período de julho a setembro, na região do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.                                      | II-12  |
| <b>Figura III.2-1</b> - Grade computacional do modelo hidrodinâmico e projeção da batimetria, com foco na região da Bacia de Campos.  | III-7  |
| <b>Figura III.3.1-1</b> - Série temporal da previsão de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 24 de fevereiro a 27 de março de 1992.  | III-9  |
| <b>Figura III.3.2-1</b> - Série temporal medida das componentes <i>u</i> e <i>v</i> da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1º de fevereiro e 15 de abril de 1992 para o ponto PC. | III-10 |
| <b>Figura III.3.2-2</b> - Série temporal medida das componentes <i>u</i> e <i>v</i> da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 5 de agosto a 29 de setembro de 1992 para o ponto PC.  | III-10 |
| <b>Figura III.3.2-3</b> - Série temporal medida das componentes <i>u</i> e <i>v</i> da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1º e 30 de janeiro de 1992 para o ponto BM333.         | III-11 |
| <b>Figura III.3.2-4</b> - Série temporal medida das componentes <i>u</i> e <i>v</i> da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1º a 30 de junho de 1992 para o ponto BM333.           | III-11 |
| <b>Figura VII.2.1-1</b> - Concentrações máximas esperadas (µg/L) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de verão, após 24 horas.   | VII-4  |

| <b>FIGURA</b>   | <b>PÁG.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura VII.2.1-2</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de inverno, após 24 horas.        | VII-5       |
| <b>Figura VII.2.1-3</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.            | VII-6       |
| <b>Figura VII.2.1-4</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas.          | VII-7       |
| <b>Figura VII.2.2-1</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.                   | VII-9       |
| <b>Figura VII.2.2-2</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.                 | VII-10      |
| <b>Figura VII.2.2-3</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de verão, após 24 horas.                   | VII-11      |
| <b>Figura VII.2.2-4</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.                 | VII-12      |
| <b>Figura VII.2.2-5</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.               | VII-13      |
| <b>Figura VII.2.2-6</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.             | VII-14      |
| <b>Figura VII.2.2-7</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de verão, após 24 horas.             | VII-15      |
| <b>Figura VII.2.2-8</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de inverno, após 24 horas.           | VII-16      |
| <b>Figura VII.2.2-9</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTRACENO, simulada no período de verão, após 24 horas.         | VII-17      |
| <b>Figura VII.2.2-10</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTRACENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.      | VII-18      |
| <b>Figura VII.2.2-11</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de verão, após 24 horas.               | VII-19      |
| <b>Figura VII.2.2-12</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de inverno, após 24 horas.             | VII-20      |
| <b>Figura VII.2.2-13</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.   | VII-21      |
| <b>Figura VII.2.2-14</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas. | VII-22      |
| <b>Figura VII.3.1-1</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de verão, após 24 horas.          | VII-23      |
| <b>Figura VII.3.1-2</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de inverno, após 24 horas.        | VII-24      |

| <b>FIGURA</b>   | <b>PÁG.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura VII.3.1-3</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.            | VII-25      |
| <b>Figura VII.3.1-4</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas.          | VII-26      |
| <b>Figura VII.3.2-1</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.                   | VII-27      |
| <b>Figura VII.3.2-2</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.                 | VII-28      |
| <b>Figura VII.3.2-3</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de verão, após 24 horas.                   | VII-29      |
| <b>Figura VII.3.2-4</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.                 | VII-30      |
| <b>Figura VII.3.2-5</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.               | VII-31      |
| <b>Figura VII.3.2-6</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.             | VII-32      |
| <b>Figura VII.3.2-7</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de verão, após 24 horas.             | VII-33      |
| <b>Figura VII.3.2-8</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de inverno, após 24 horas.           | VII-34      |
| <b>Figura VII.3.2-9</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTRACENO, simulada no período de verão, após 24 horas.         | VII-35      |
| <b>Figura VII.3.2-10</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTRACENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.      | VII-36      |
| <b>Figura VII.3.2-11</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de verão, após 24 horas.               | VII-37      |
| <b>Figura VII.3.2-12</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de inverno, após 24 horas.             | VII-38      |
| <b>Figura VII.3.2-13</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.   | VII-39      |
| <b>Figura VII.3.2-14</b> - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas. | VII-40      |



## RESUMO

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do processo de diluição e dispersão das plumas provenientes do descarte de água produzida a partir do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras, localizado na Concessão de Badejo, Bacia de Campos.

O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir de um modelo numérico de mesoescala, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), adaptado e implementado pela **ASA SOUTH AMERICA**.

No estudo do comportamento da pluma o processo foi dividido entre campo próximo (zona de diluição inicial, onde prevalecem os efeitos oriundos da velocidade inicial de ejeção e a diferença de densidade entre o efluente e o meio) e campo afastado (região onde passam a predominar os efeitos da dinâmica local no transporte e dispersão da pluma). O campo próximo foi simulado utilizando-se o modelo CORMIX da *Cornell University*. Para simular a diluição e dispersão da pluma do efluente no campo afastado, foi utilizado o modelo CHEMMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc**. Este modelo simula a dispersão e a distribuição de produtos químicos na superfície e coluna d'água, nos sedimentos e na costa. Com os resultados das simulações é possível determinar a probabilidade de ocorrência e a concentração dos compostos químicos considerados.

Foram conduzidas simulações considerando a variação sazonal das forçantes meteorológicas e oceanográficas, sendo selecionados para isso os períodos de verão e inverno. Para esses períodos, foram realizadas simulações com duração de 24 horas, utilizando a vazão de descarte da água produzida desse FPSO. As características (composição) do efluente utilizadas nas simulações numéricas são oriundas da UEP PPM-1, uma vez que o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras ainda não entrou em operação.

Como critério ambiental, foram utilizadas as concentrações correspondentes à Concentração de Efeito Não Observado (CENO). São apresentados neste relatório os resultados das simulações da pluma proveniente do descarte de água produzida com concentrações até 10.000 vezes inferiores a concentração inicial de lançamento.

Os resultados deste trabalho mostram que, nas condições de descarte simuladas, o corpo receptor apresenta concentrações inferiores à 10.000 vezes a concentração inicial a uma distância de, aproximadamente, 500 m do ponto de lançamento somente para o benzeno, tolueno, fenóis totais, cobre dissolvido e carbono orgânico total. Entretanto, todos os compostos simulados atingem a concentração referente ao critério ambiental já no campo próximo.

## I INTRODUÇÃO

Neste relatório é apresentada a modelagem computacional da diluição e dispersão de água produzida para o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras, localizado na Concenssão de Badejo, Bacia de Campos.

Essa avaliação foi conduzida dividindo o processo em campo próximo e campo afastado. O campo próximo foi simulado utilizando-se o modelo CORMIX da *Cornell University*. O campo afastado foi simulado utilizando o sistema de modelos computacionais conhecido como CHEMMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** dos EUA.

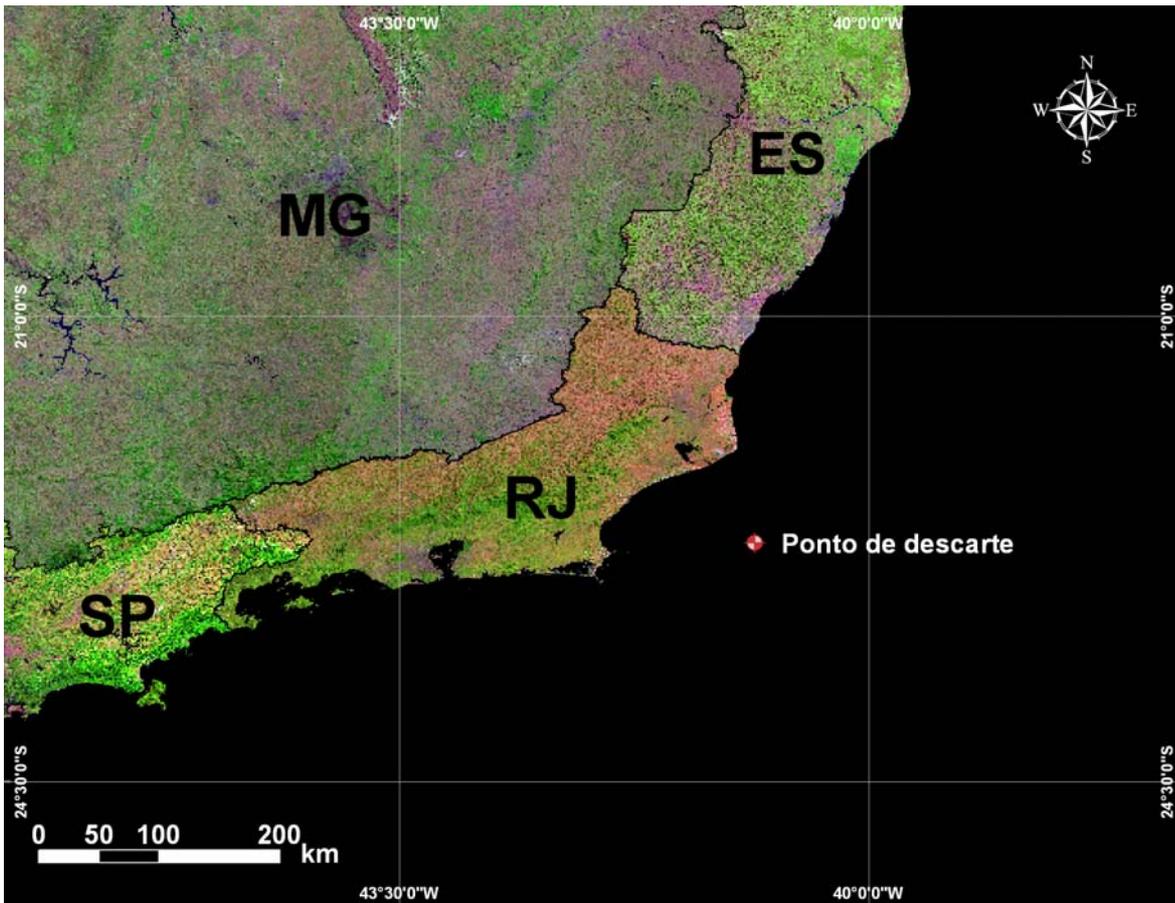
Para estudos de modelagem, como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em larga escala, (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira), e (d) características físico-químicas dos constituintes presentes no efluente simulado.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a partir de resultados de um modelo desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM).

A seguir, o Capítulo I apresenta os objetivos desse estudo e fornece informações sobre a área em questão. O levantamento e a análise dos dados meteorológicos e oceanográficos nas imediações da região são apresentados no Capítulo II. O Capítulo III descreve o modelo hidrodinâmico e sua calibração. O Capítulo IV apresenta as características dos descartes da água produzida. O Capítulo V descreve a modelagem do fator de diluição do campo próximo. O Capítulo VI descreve o modelo CHEMMAP utilizado na modelagem do campo afastado. Os resultados das simulações no campo próximo e no campo afastado são apresentados no Capítulo VII. Por fim, o Capítulo VIII discute os resultados obtidos neste estudo.

## I.1 ÁREA DE ESTUDO

As simulações da dispersão de água produzida foram realizadas a partir do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras, localizado na Região de Produção Oceânica na Bacia de Campos, litoral do Estado do Rio de Janeiro, conforme mostra a figura I.1-1.



**Figura I.1-1** - Localização do ponto de descarte - FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.

As coordenadas do ponto de descarte foram especificadas pela PETROBRAS e se encontram listadas na tabela I.1-1.

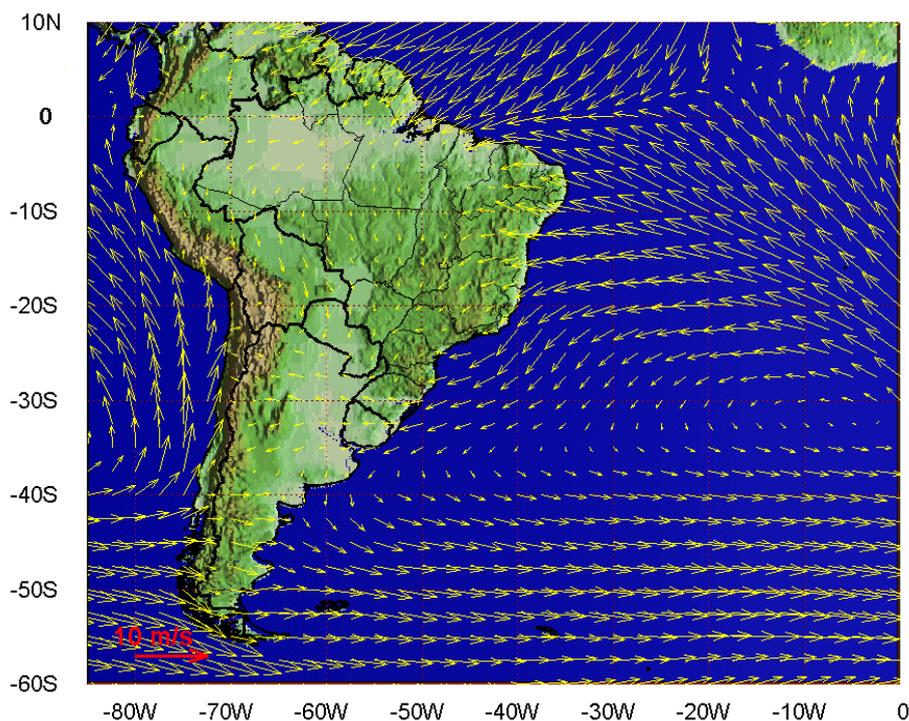
**Tabela I.1-1** - Coordenadas e lâmina d'água do ponto de descarte de água produzida (SAD 69).

| PONTO DESCARTE                          | LATITUDE      | LONGITUDE      | LÂMINA D'ÁGUA (m) |
|---|---------------|----------------|-------------------|
| FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras | 22°42'07,32"S | 40°51'04,86" W | 91                |

### I.1.1 Características Meteorológicas da Região

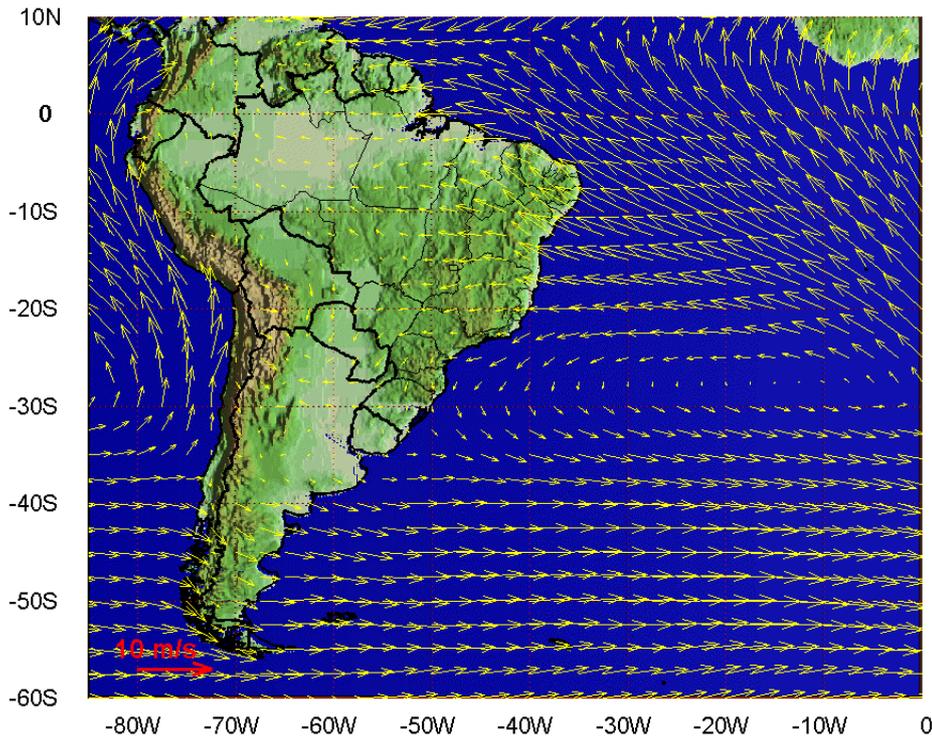
A circulação atmosférica de baixos níveis na região sudeste do Brasil é dominada pela ação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pela passagem de sistemas frontais sobre a região e por circulações locais.

A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região sudeste associada ao deslocamento da ASAS, é caracterizada pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste-nordeste no inverno, como observado nas análises das séries temporais de vento. Este padrão é ilustrado nas figuras I.1.1-1 e I.1.1-2, que apresentam o comportamento sazonal da circulação atmosférica, obtido através da média de 12 anos (1990 - 2001) dos resultados das Reanálises do modelo de circulação geral do NCEP e NCAR<sup>1</sup>. Observa-se a mudança do posicionamento sazonal da alta subtropical e do padrão de ventos gerados por esse sistema.



**Figura I.1.1-1** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento a 10 m no período de verão (Reanálises do NCEP).

<sup>1</sup> National Centers for Environmental Prediction e National Center for Atmospheric Research, disponibilizados pelo Climate Diagnostics Center (CDC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).



**Figura I.1.1-2** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento a 10 m no período de inverno (Reanálises do NCEP).

As alterações neste padrão climatológico médio da atmosfera têm relação causal com deslocamentos de sistemas atmosféricos transientes (*i.e.* sistemas frontais e ciclones extratropicais), que atuam durante o ano todo sobre todo o Atlântico sul, com freqüências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas. As perturbações geradas, bastante estabelecidas na literatura (*e.g.* Oliveira, 1986), são essenciais para a determinação das variabilidades intra-anuais na superfície oceânica.

De acordo com a estatística de sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil entre os anos de 1975 a 1984 e 1987 a 1995, apresentada pelo Boletim de Monitoramento e Análise Climática (Climanálise, 1996), a média mensal desses sistemas atuando sobre a costa sudeste brasileira é de quatro sistemas nos meses de verão e sete sistemas nos meses de inverno.

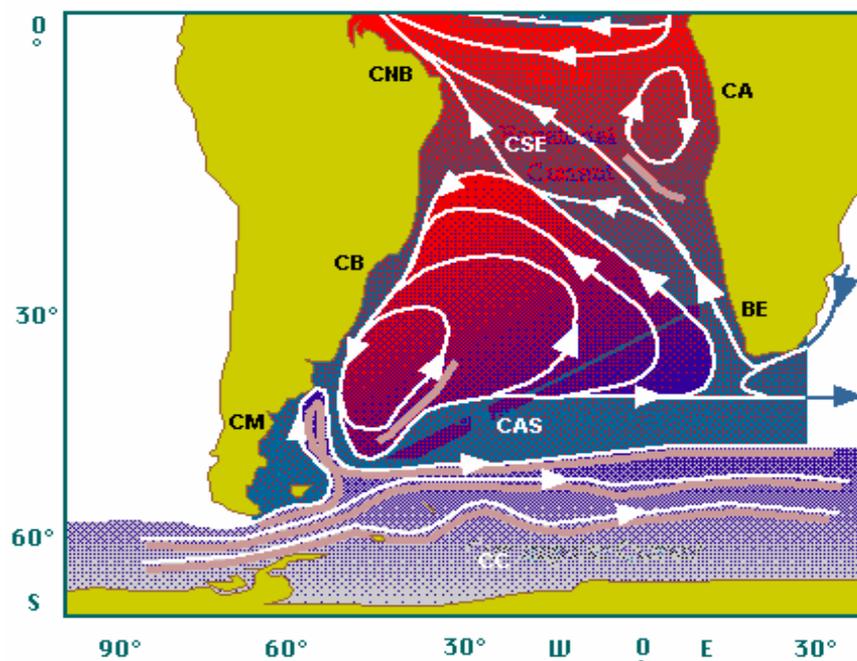
O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala. A intensificação ou dissipação dos mesmos está relacionada com as características atmosféricas sobre o continente. Algumas regiões do Brasil, tais como as Regiões Sul e Sudeste são regiões frontogênicas, *i.e.* as

frentes podem se formar ou se intensificar nessas regiões (Satyamurty & Mattos, 1989).

Em meso e micro escalas, a variabilidade meteorológica induzida pelas brisas marinhas e terrestres também é significativa, principalmente nos padrões dinâmicos da circulação observada sobre a plataforma continental.

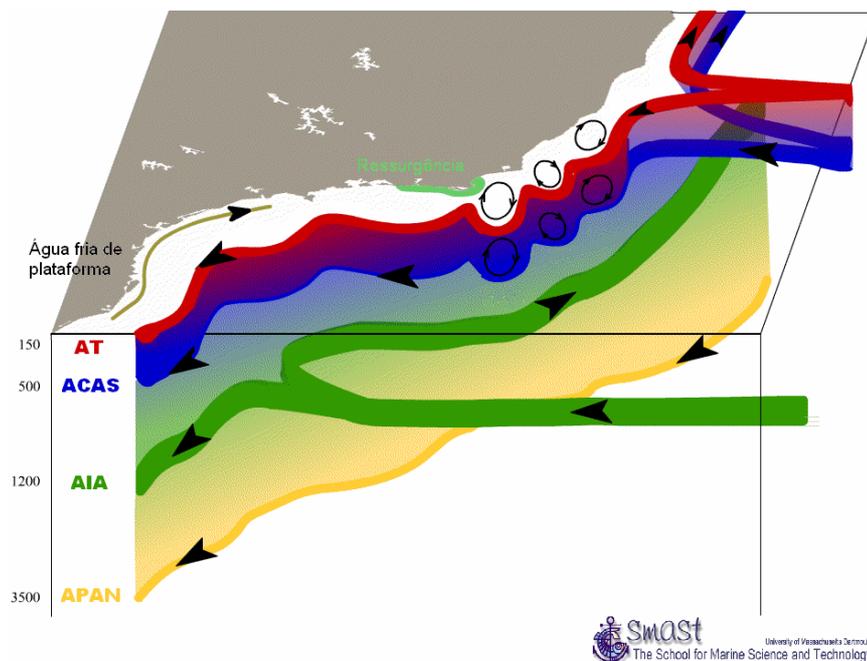
### 1.1.2 Padrões de Circulação da Região

A figura I.1.2-1 ilustra o Giro Sub-Tropical do Atlântico Sul, que possui uma corrente de contorno oeste para sul, a Corrente do Brasil (CB), a qual se separa da costa na região da confluência com a Corrente das Malvinas (CM). A partir deste ponto, a Corrente do Brasil composta com a Corrente das Malvinas se afasta da costa e flui para leste como Corrente do Atlântico Sul (CAS). O giro no Atlântico é complementado pela Corrente de Benguela (BE), Corrente Sul Equatorial (CSE), fechando o circuito com a Corrente do Brasil para sul e a Corrente Norte do Brasil (CNB).



**Figura I.1.2-1** - Representação da circulação no oceano Atlântico Sul, indicando as seguintes correntes oceânicas: Corrente Circumpolar (CC), Corrente do Atlântico Sul (CAS), Corrente de Benguela (BE), Corrente de Angola (CA), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente do Brasil (CB) e Corrente das Malvinas (CM). Adaptado de Tomczak & Godfrey (1994).

As primeiras medições diretas da CB foram feitas por Evans & Signorini (1985), nas latitudes de 20°30'S e 23°S, as quais apresentaram um fluxo confinado aos primeiros 400 m de profundidade, com uma contra-corrente no sentido norte, abaixo destes 400 m iniciais. Na parte norte da área, acima do Cabo de São Tomé, a direção da corrente é para 180°, variando para 220° na região de Cabo Frio. Esta mudança afeta significativamente a CB, induzindo à formação de vórtices e meandros, como indicado na figura I.1.2-2. Este meandramento da CB foi capturado por Signorini (1978), em sua análise de topografia dinâmica, e por Miranda & Castro (1979) em suas observações hidrográficas na região adjacente à Cabo Frio (23° S), ao longo de duas secções meridionais.

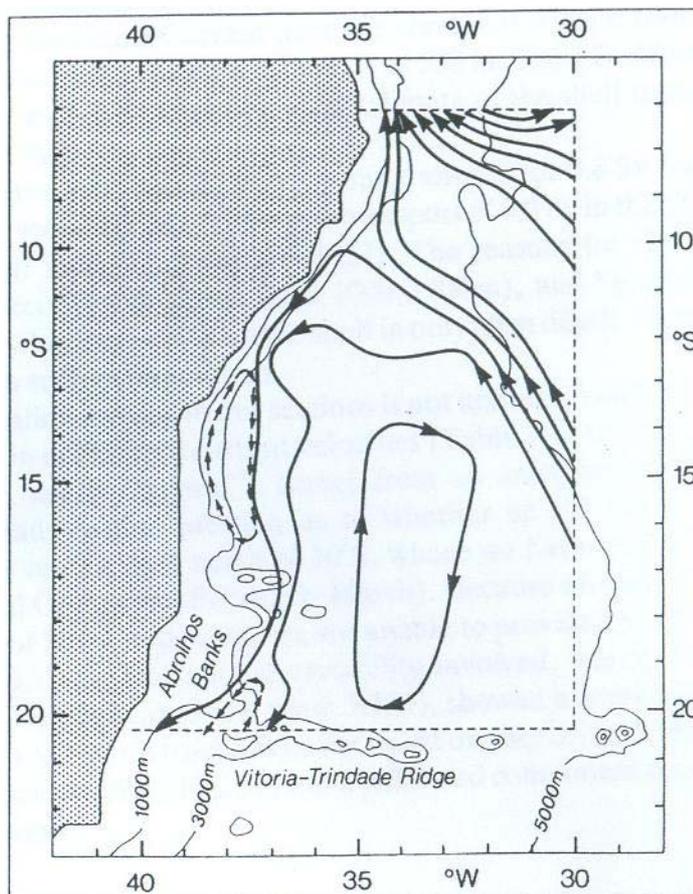


**Figura I.1.2-2 - Esquema da circulação oceânica na costa brasileira.<sup>2</sup>**

O volume estimado transportado pela CB na região da quebra da plataforma e do talude na latitude de 22°S é de  $5,5 \pm 2,6$  Sv (Lima, 1997). Algumas regiões sobre o talude continental podem apresentar velocidades de correntes maiores que 1,0 m/s (Castro & Miranda, 1998).

<sup>2</sup> <http://www.smast.umassd.edu/modeling>.

Parte significativa do fluxo da CB passa através dos canais dos Bancos de Abrolhos e divide-se em dois ramos. Um deles flui afastado da costa, além da isóbata de 3.000 m (Stramma *et al.*, 1990), como indicado na Figura I.1.2-3, enquanto o outro flui seguindo a linha de quebra da plataforma (Signorini, 1978).

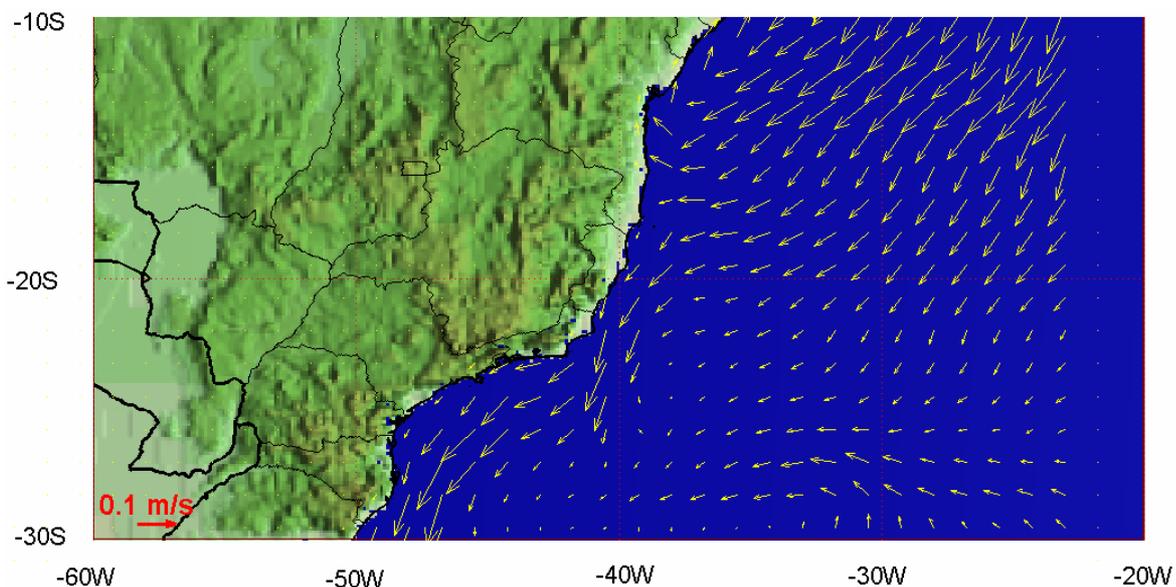


**Figura I.1.2-3** - Representação esquemática do campo de fluxo geostrofico nos primeiros 500 m, com base em dados hidrográficos históricos, coletados na região demarcada. As linhas cheias correspondem a transporte de 2 Sv e a linha tracejada de 1 Sv. (Adaptado de Stramma *et al.*, 1990).

A corrente que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos que provêm principalmente de nordeste nessa estação devido à influência da ASAS. Outra consequência do predomínio dos ventos de NE é a ressurgência de águas frias (Água Central do Atlântico Sul – ACAS) em regiões costeiras. Esses eventos são muito comuns na região de Cabo Frio. No inverno, entretanto, a alta incidência de sistemas frontais induz a ocorrência de correntes com direção nordeste nas porções interna e média da plataforma (Castro & Miranda, 1998).

Vários modelos numéricos globais reproduzem o sistema de correntes em larga escala nesta região. O processo de *warm up* do modelo aqui apresentado foi baseado nos resultados de uma simulação de 14 anos do modelo OCCAM<sup>3</sup>, disponibilizados pela Universidade de Southampton. O OCCAM foi elaborado com base no GFDL MOM<sup>4</sup>, incluindo uma superfície livre e esquemas de advecção melhorados. A grade, para o Oceano Atlântico Sul, é regular (1/4 de grau), com 36 níveis (20 m de espessura próximo à superfície e 255 m em 5.500 m de profundidade). Este modelo foi inicializado com médias anuais de temperatura e salinidade do LEVITUS<sup>5</sup>, forçado na superfície com dados de vento do ECMWF<sup>6</sup> (médias mensais) e relaxado para os campos sazonais de temperatura e salinidade do LEVITUS.

A figura I.1.2-4 ilustra uma média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM. Nota-se o ramo Sul da CSE atingindo a costa do Brasil em torno de 15°S, bifurcando-se e originando a CNB, fluindo para Norte, e a CB, fluindo para Sul.



**Figura I.1.2-4** - Média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM.

<sup>3</sup> Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project - Southampton Oceanography Centre.

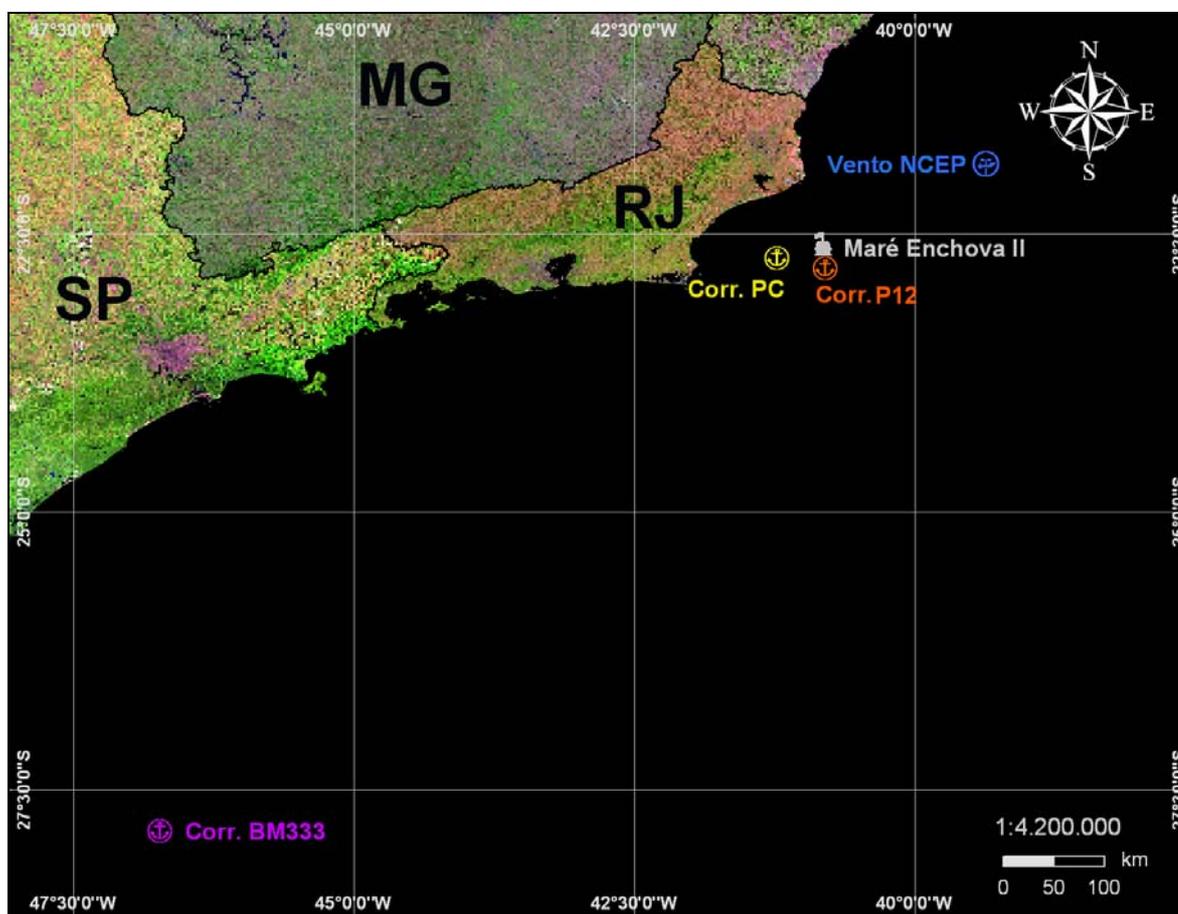
<sup>4</sup> Global Fluid Dynamics Laboratory - Modular Ocean Model.

<sup>5</sup> <http://ingrid.lidgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.

<sup>6</sup> European Centre for Medium-range Weather Forecast.

## II ANÁLISE DE DADOS

A primeira etapa deste trabalho consistiu no levantamento de informações pretéritas meteorológicas e oceanográficas nas imediações da região de estudo. Essa fase visou disponibilizar dados para: (1) uma melhor compreensão da dinâmica da área; (2) para aplicação direta na elaboração dos cenários do descarte de água produzida; e (3) validação do modelo hidrodinâmico. Os dados, cujos pontos de coleta são apresentados na figura II-1, são descritos e analisados neste capítulo.

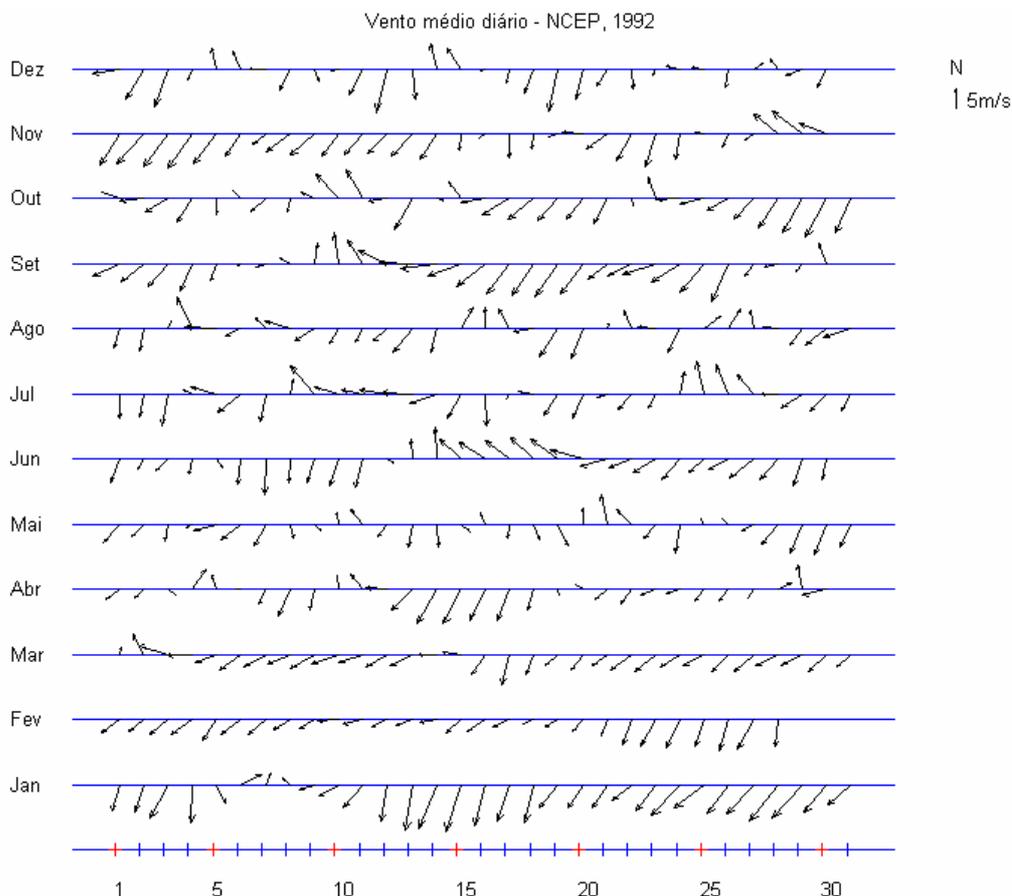


**Figura II-1** - Mapa com a localização das estações de medição de correntes, vento e nível do mar.

## II.1 VENTOS

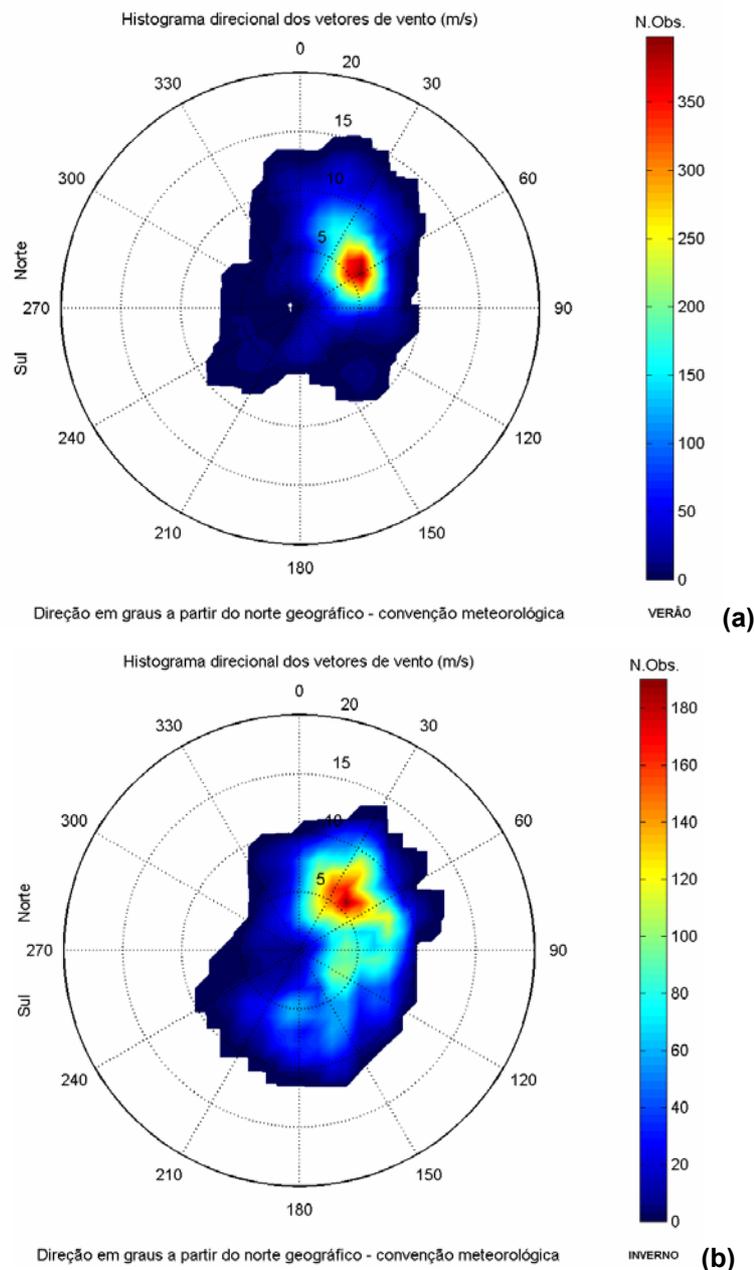
Os ventos apresentados a seguir são provenientes de dados das reanálises dos modelos meteorológicos NCEP e NCAR para o ano de 1992.

A figura II.1-1 apresenta os valores médios diários do vento NCEP relativo ao quadrilátero de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  em torno das coordenadas  $21,9^\circ\text{S}$  e  $39,4^\circ\text{W}$  (indicado na figura II-1), para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992. Observa-se que os ventos seguiram um padrão onde os mais frequentes e mais intensos foram provenientes do quadrante NE, principalmente durante o verão (janeiro, fevereiro e março).



**Figura II.1-1** - Diagrama stick plot dos valores médios diários de dados de vento (NCEP) para o período de 1º de janeiro de 1992 a 31 de dezembro de 1992 (convenção vetorial).

As figuras II.1-2 (a) e (b) apresentam os histogramas direcionais dos dados de vento (NCEP) para dois períodos de 3 meses que caracterizam os principais padrões observados: (a) janeiro a março, quando os ventos mais freqüentes são provenientes de nordeste, e (b) julho a setembro, quando também ocorrem ventos provenientes de sul-sudeste. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa o número de observações (N.Obs.).



**Figura II.1-2 - Histograma direcional dos vetores de vento (NCEP) para os períodos de (a) janeiro a março e (b) julho a setembro.**

A tabela II.1-1 apresenta a frequência de ocorrência conjunta entre intensidade e direção dos ventos NCEP para o período de janeiro a março. Os ventos mais frequentes vieram de NE (32,3%); os ventos com velocidade média máxima (8,2 m/s) vieram de N e os ventos mais intensos registrados (13,4 m/s) vieram de NNE. Dos ventos amostrados, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 11,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

**Tabela II.1-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento NCEP no período de 1º de janeiro de 1992 a 31 de março de 1992, com intervalo de amostragem dt=1h (convenção meteorológica).**

| Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento.   |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |       |           |
|--|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----------|
| Obs.: a direção é medida em graus e para o sentido utiliza-se a convenção meteorológica (de onde o vento vem). |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |       |           |
|  | N    | NNE  | NE   | ENE  | E   | ESE | SE  | SSE | S   | SSW | SW  | WSW | W   | WNW | NW  | NNW | Total | Porc. | Dir. méd. |
| 0,0- 1,0   | 1    | 1    | 0    | 0    | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 3     | 0,1   | 48        |
| 1,0- 2,0   | 0    | 1    | 0    | 0    | 4   | 0   | 3   | 6   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 14    | 0,6   | 131       |
| 2,0- 3,0   | 3    | 7    | 13   | 5    | 18  | 6   | 6   | 7   | 2   | 1   | 2   | 0   | 2   | 1   | 1   | 5   | 79    | 3,6   | 74        |
| 3,0- 4,0   | 9    | 36   | 38   | 28   | 23  | 8   | 2   | 7   | 6   | 3   | 0   | 1   | 0   | 0   | 3   | 3   | 167   | 7,6   | 57        |
| 4,0- 5,0   | 6    | 31   | 83   | 74   | 31  | 8   | 0   | 4   | 7   | 2   | 1   | 5   | 0   | 1   | 0   | 5   | 258   | 11,8  | 58        |
| 5,0- 6,0   | 3    | 34   | 130  | 160  | 33  | 1   | 0   | 1   | 0   | 3   | 4   | 2   | 4   | 4   | 0   | 2   | 381   | 17,4  | 56        |
| 6,0- 7,0   | 27   | 63   | 157  | 138  | 48  | 0   | 4   | 0   | 0   | 1   | 3   | 2   | 0   | 0   | 0   | 1   | 444   | 20,3  | 51        |
| 7,0- 8,0   | 22   | 80   | 110  | 58   | 20  | 7   | 14  | 0   | 0   | 0   | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 318   | 14,6  | 46        |
| 8,0- 9,0   | 14   | 70   | 54   | 6    | 8   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 154   | 7,1   | 32        |
| 9,0-10,0   | 30   | 61   | 46   | 3    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 142   | 6,5   | 28        |
| 10,0-11,0  | 27   | 37   | 53   | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 117   | 5,4   | 27        |
| 11,0-12,0  | 12   | 34   | 17   | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 63    | 2,9   | 23        |
| 12,0-13,0  | 4    | 26   | 5    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 35    | 1,6   | 21        |
| 13,0-14,0  | 0    | 9    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 9     | 0,4   | 21        |
| Total  | 158  | 490  | 706  | 472  | 186 | 30  | 29  | 25  | 15  | 10  | 15  | 10  | 6   | 6   | 4   | 22  | 2184  |       |           |
| Porc.  | 7,2  | 22,4 | 32,3 | 21,6 | 8,5 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 1,0 |       |       |           |
| Vel. méd.  | 8,2  | 7,8  | 6,8  | 5,8  | 5,2 | 4,6 | 5,5 | 3,0 | 3,7 | 4,5 | 5,9 | 5,1 | 4,4 | 4,8 | 3,1 | 5,1 |       |       |           |
| Vel. máx.  | 12,1 | 13,4 | 12,3 | 9,5  | 8,3 | 7,8 | 8,0 | 5,3 | 4,2 | 6,6 | 7,7 | 6,7 | 5,4 | 5,5 | 3,7 | 9,9 |       |       |           |
| Percts. (0,9)  | 10,7 | 11,0 | 10,0 | 7,0  | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 4,0 | 4,0 | 5,5 | 7,0 | 6,0 | 5,0 | 5,0 | 3,0 | 8,3 |       |       |           |

A tabela II.1-2 apresenta a frequência de ocorrência conjunta entre intensidade e direção dos ventos NCEP para o período de julho a setembro. Os ventos mais frequentes vieram de NE (19,2%), assim como os com velocidade média máxima (6,9 m/s); os ventos mais intensos registrados (11,6 m/s) vieram de NNE e ENE. Dos ventos amostrados, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 10,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

**Tabela II.1-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento NCEP no período de 1º de julho de 1992 a 30 de setembro de 1992, com intervalo de amostragem dt=1h (convenção meteorológica).**

| Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do Vento.                             |     |      |      |      |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |       |       |           |
|--|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----------|
| Obs.: a direção é medida em graus a partir do Norte geográfico, convenção meteorológica. |     |      |      |      |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |       |       |           |
|  | N   | NNE  | NE   | ENE  | E   | ESE | SE  | SSE  | S    | SSW | SW  | WSW | W   | WNW | NW  | NNW | Total | Porc. | Dir. méd. |
| 0,0- 1,0   | 1   | 4    | 0    | 1    | 0   | 0   | 0   | 1    | 1    | 1   | 0   | 2   | 0   | 0   | 1   | 1   | 13    | 0,6   | 347       |
| 1,0- 2,0   | 4   | 8    | 2    | 1    | 5   | 5   | 5   | 1    | 0    | 3   | 1   | 1   | 0   | 1   | 0   | 4   | 41    | 1,9   | 59        |
| 2,0- 3,0   | 11  | 12   | 8    | 6    | 6   | 14  | 22  | 8    | 0    | 2   | 3   | 1   | 2   | 4   | 5   | 6   | 110   | 5,0   | 75        |
| 3,0- 4,0   | 16  | 24   | 25   | 19   | 24  | 31  | 12  | 6    | 6    | 4   | 1   | 0   | 0   | 1   | 5   | 3   | 177   | 8,0   | 70        |
| 4,0- 5,0   | 11  | 40   | 40   | 29   | 25  | 23  | 34  | 11   | 17   | 4   | 1   | 2   | 1   | 3   | 1   | 10  | 252   | 11,4  | 75        |
| 5,0- 6,0   | 19  | 50   | 84   | 33   | 32  | 22  | 22  | 26   | 22   | 25  | 11  | 2   | 0   | 0   | 0   | 2   | 350   | 15,9  | 78        |
| 6,0- 7,0   | 15  | 68   | 70   | 36   | 34  | 21  | 21  | 29   | 13   | 16  | 13  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 336   | 15,2  | 72        |
| 7,0- 8,0   | 21  | 66   | 50   | 62   | 54  | 34  | 10  | 30   | 11   | 15  | 1   | 2   | 0   | 0   | 0   | 4   | 360   | 16,3  | 73        |
| 8,0- 9,0   | 27  | 35   | 74   | 76   | 34  | 25  | 17  | 24   | 22   | 10  | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 4   | 350   | 15,9  | 71        |
| 9,0-10,0   | 1   | 32   | 44   | 11   | 0   | 0   | 11  | 14   | 14   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 127   | 5,8   | 62        |
| 10,0-11,0  | 0   | 31   | 22   | 4    | 0   | 0   | 0   | 12   | 2    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 71    | 3,2   | 47        |
| 11,0-12,0  | 0   | 13   | 5    | 3    | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 21    | 1,0   | 40        |
| Total  | 126 | 383  | 424  | 281  | 214 | 175 | 154 | 162  | 108  | 80  | 33  | 10  | 3   | 9   | 12  | 34  | 2208  |       |           |
| Porc.  | 5,7 | 17,3 | 19,2 | 12,7 | 9,7 | 7,9 | 7,0 | 7,3  | 4,9  | 3,6 | 1,5 | 0,5 | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 1,5 |       |       |           |
| Vel. méd.  | 5,8 | 6,7  | 6,9  | 6,8  | 6,0 | 5,6 | 5,4 | 6,8  | 6,7  | 6,0 | 5,6 | 4,2 | 3,3 | 3,0 | 3,0 | 4,4 |       |       |           |
| Vel. máx.  | 9,1 | 11,6 | 11,3 | 11,6 | 8,7 | 9,0 | 9,6 | 10,6 | 10,1 | 9,0 | 8,2 | 8,0 | 4,5 | 4,2 | 5,0 | 8,9 |       |       |           |
| Percts. (0,9)  | 8,0 | 10,0 | 9,0  | 8,0  | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 9,0  | 9,0  | 8,0 | 6,2 | 7,0 | 4,0 | 4,0 | 3,3 | 8,0 |       |       |           |

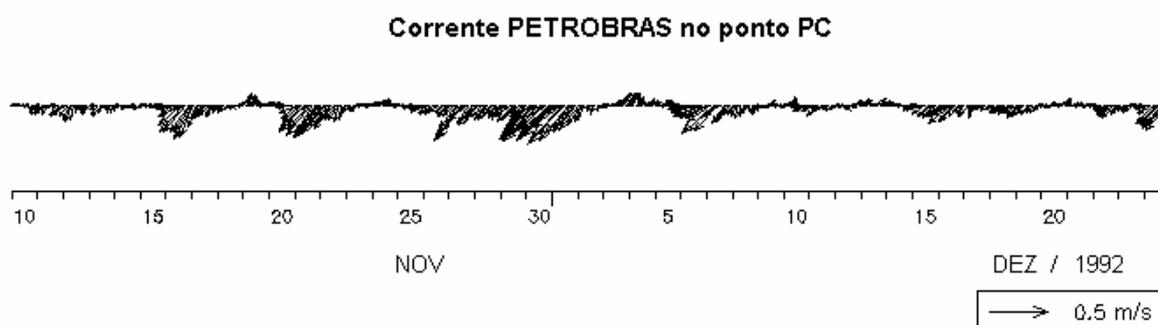
## II.2 CORRENTES

As informações de correntes apresentadas a seguir foram obtidas junto a PETROBRAS e ao Banco de Dados do WOCE<sup>7</sup>. A localização, profundidade e período de coleta são apresentados na tabela II.2-1.

**Tabela II.2-1 - Localização e período de coleta dos dados de corrente.**

| DADO                | LATITUDE / LONGITUDE  | PROFUNDIDADE (m) | PERÍODO               |
|---------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| PETROBRAS - PC      | 22,7167°S / 41,2667°W | 15               | 03/fev/92 a 31/dez/92 |
| WOCE<br>ACM12/BM333 | 27,9020°S / 46,7040°W | 230              | 03/jan/91 a 26/nov/92 |
| PETROBRAS - P12     | 22,7597°S / 40,8161°W | 1                | 20/nov a 08/dez/04    |

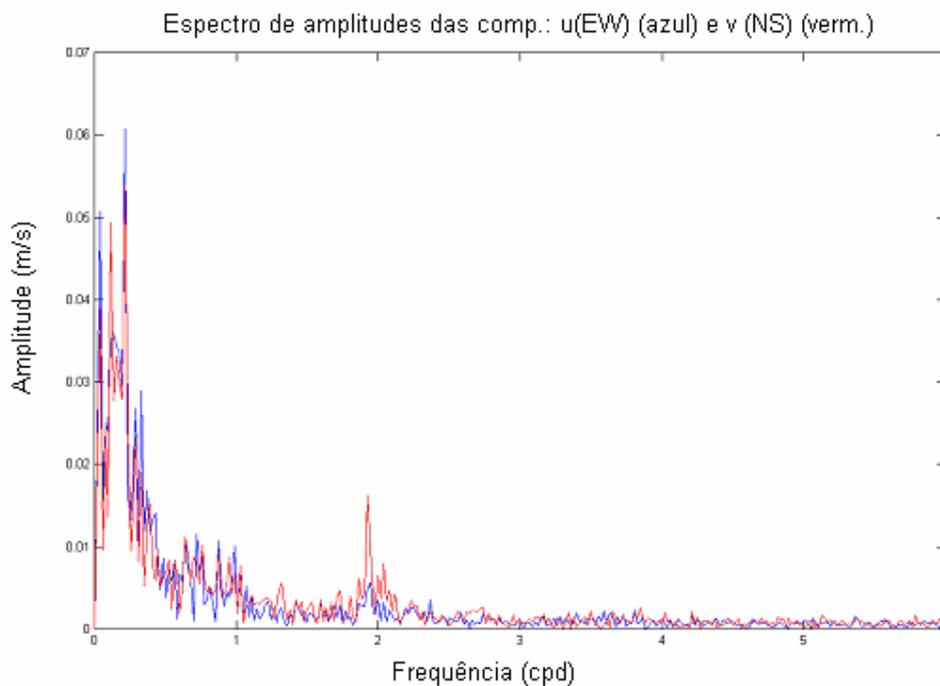
A figura II.2-1 apresenta o diagrama *stick plot* da série temporal da corrente no Ponto PC para o período compreendido entre 10 de novembro e 25 de dezembro de 1992. Nesta região, situada ainda sobre a plataforma (profundidade local de cerca de 60 m), já se detecta a presença da CB, embora o padrão de circulação sofra considerável influência do campo de vento.



**Figura II.2-1 - Diagrama stick plot dos vetores de corrente no Ponto PC medidos a 15 m de profundidade, na região da Bacia de Campos, entre 10 de novembro e 25 de dezembro de 1992, dt=1h.**

<sup>7</sup> World Ocean Circulation Experiment

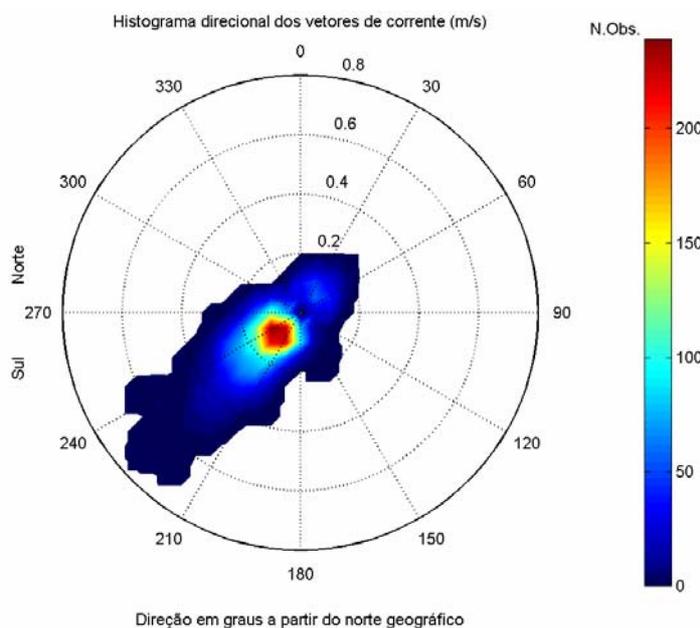
A figura II.2-2 apresenta o espectro de amplitude das correntes para os dados no Ponto PC, para o período compreendido entre o dia 10 de novembro e 25 de dezembro de 1992. A análise do espectro de amplitudes mostra que a variação da corrente no ponto de medição apresenta uma pequena influência de oscilação de maré, sendo predominantes nas baixas frequências, associadas à passagem de perturbações atmosféricas sobre a região (*i.e.* sistemas frontais, ciclones extratropicais).



**Figura II.2-2** - Espectro de amplitudes (m/s) da corrente no Ponto PC, coletada a 15 m de profundidade, na região da Bacia de Campos, para os meses de novembro e dezembro de 1992.

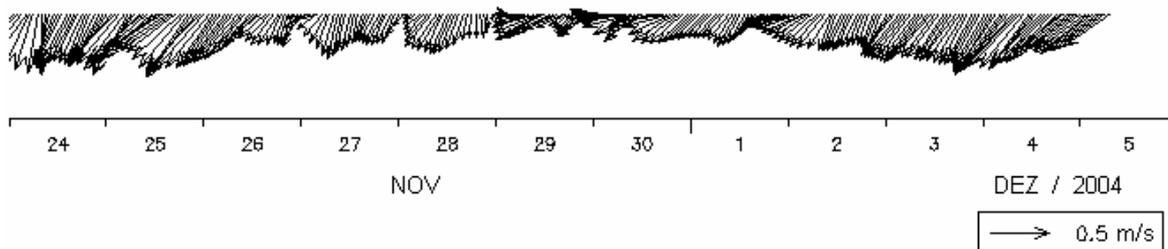
A figura II.2-3 apresenta os dados de corrente (PC - PETROBRAS) plotados na forma de histograma direcional. Verifica-se predominância de correntes no quadrante SW, com variação de intensidade associada à passagem de perturbações atmosféricas sobre o local.

A figura II.2-4 apresenta o diagrama *stick plot* da série temporal da corrente no ponto P12, para o período compreendido entre 24 de novembro e 5 de dezembro de 2004. Neste ponto, ainda situado em região de plataforma, a uma profundidade local de cerca de 90 m, também se detecta a presença da CB, com influência do campo de vento.



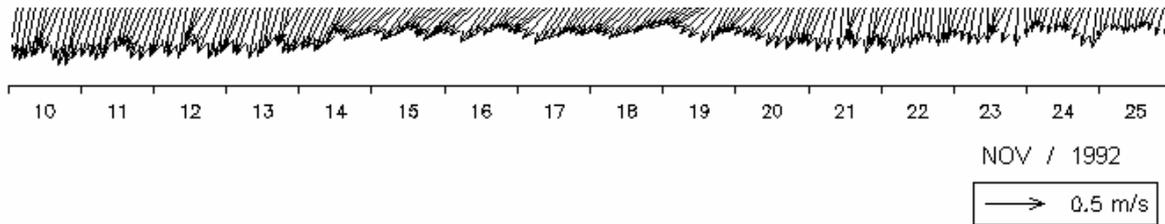
**Figura II.2-3** - Histograma direcional dos vetores de corrente no ponto PC (PETROBRAS), coletada a 15 m de profundidade, na região da Bacia de Campos, em novembro e dezembro de 1992.

#### Corrente PETROBRAS no ponto P12



**Figura II.2-4** - Diagrama stick plot dos vetores de corrente no ponto P12, medidos a 1 m de profundidade, entre 24 de novembro e 5 de dezembro de 2004.

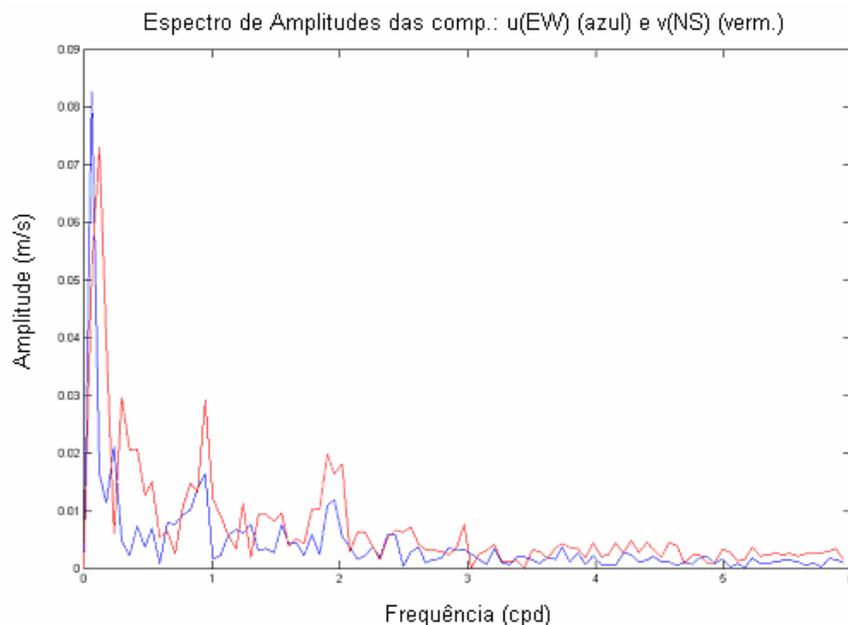
A figura II.2-5 apresenta o diagrama *stick plot* da série temporal da corrente no fundeio BM/333 do experimento ACM12, para o período compreendido entre 10 e 26 de novembro de 1992. Neste ponto, situado na região do talude (profundidade local de cerca de 1.200 m), pode se observar o visível sinal associado à maré diurna e variações de baixa frequência, não havendo, contudo, a reversão do sentido predominante devido à presença mais acentuada da CB, a qual domina a direção da corrente.

**Corrente WOCE ACM12 - BM333**

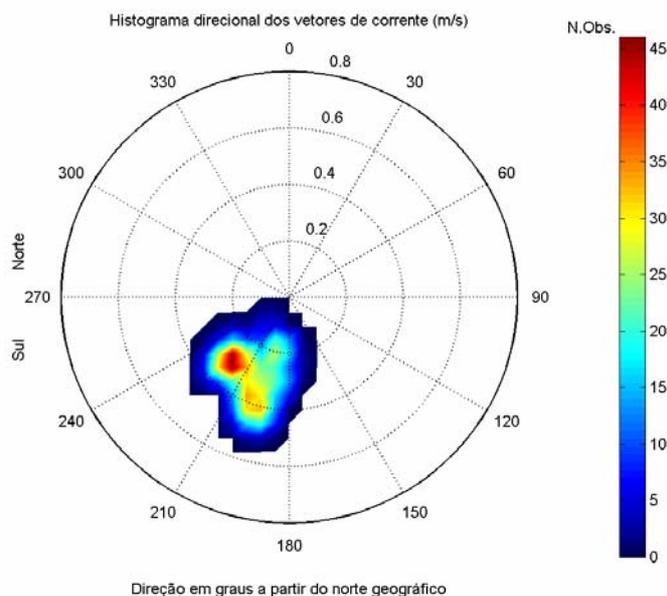
**Figura II.2-5** - Diagrama stick plot dos vetores de corrente no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medidos a 230 m de profundidade, entre 10 e 26 de novembro de 1992,  $dt=2h$ .

A figura II.2-6 apresenta o espectro de amplitude das correntes para os dados do fundeio BM/333. A análise do espectro de amplitudes mostra que as variações da corrente são inferiores a 10 cm/s sendo que o mesmo apresenta uma leve influência de oscilação de maré, com maiores intensidades na baixa frequência.

A figura II.2-7 apresenta os dados de corrente (fundeio BM/333 - WOCE) plotados na forma de histograma direcional para o mês de novembro. Verifica-se predominância de correntes nos quadrantes SW e S.



**Figura II.2-6** - Espectro de amplitudes (m/s) da corrente registrada no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade, entre 10 e 26 de novembro de 1992,  $dt=2h$ .



**Figura II.2-7** - Histograma direcional dos vetores de corrente no fundo BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade em novembro de 1992,  $\Delta t=2h$ .

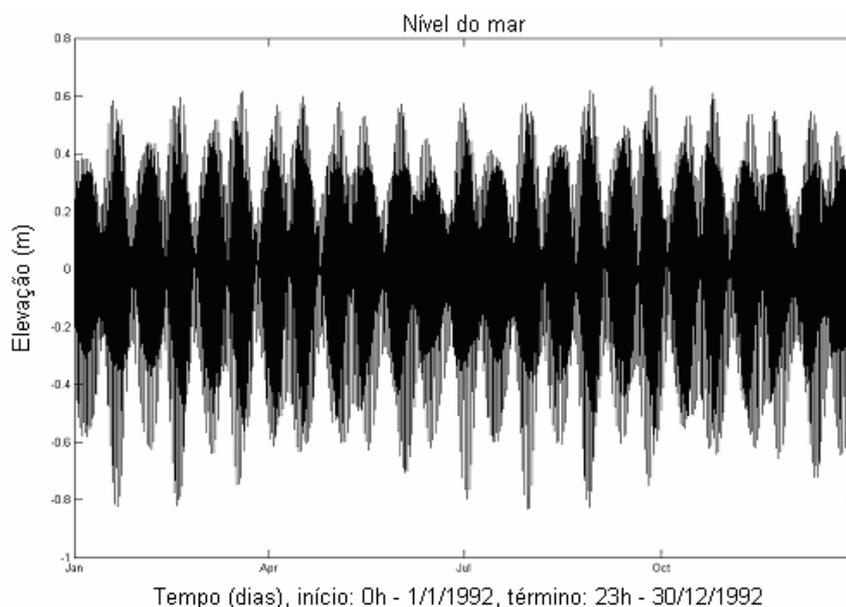
A análise dos dados disponíveis na região indica que a circulação oceânica na região da Bacia de Campos é determinada por forçantes variadas, que se sobrepõem de modo diferenciado, dependendo de fatores morfológicos e dinâmicos da área. Sobre a plataforma há amplificação natural do sinal de maré e intensificação dos padrões meteorológicos locais, *i.e.* brisa marinha e efeitos orográficos no vento. Sobreposto a estes sinais existe a presença energética da passagem de frentes. Em região de oceano profundo, a composição da passagem de frentes e do fluxo determinado pela Corrente do Brasil é preponderante.

### II.3 MARÉS

Há poucos dados de elevação disponíveis para a região oceânica ao largo do Rio de Janeiro. Os dados de elevação utilizados foram obtidos através de previsões harmônicas de maré com base nas constantes da FEMAR<sup>8</sup> para a estação de Enchova II (RJ), localizada nas coordenadas 22°42'S e 40°50,2'W, para o período compreendido de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992, com

<sup>8</sup> Fundação de Estudos do Mar.

intervalos horários. Esses dados se encontram representados na figura II.3-1. A tabela II.3-1 apresenta as constantes harmônicas obtidas para esta estação, a partir de uma série temporal medida no período de 05 a 15 de julho de 1980, suficiente para fornecer informação sobre os principais componentes.



**Figura II.3-1** - Previsão harmônica de maré para o período de 1º de janeiro a 30 de dezembro de 1992, na estação Enchova II.

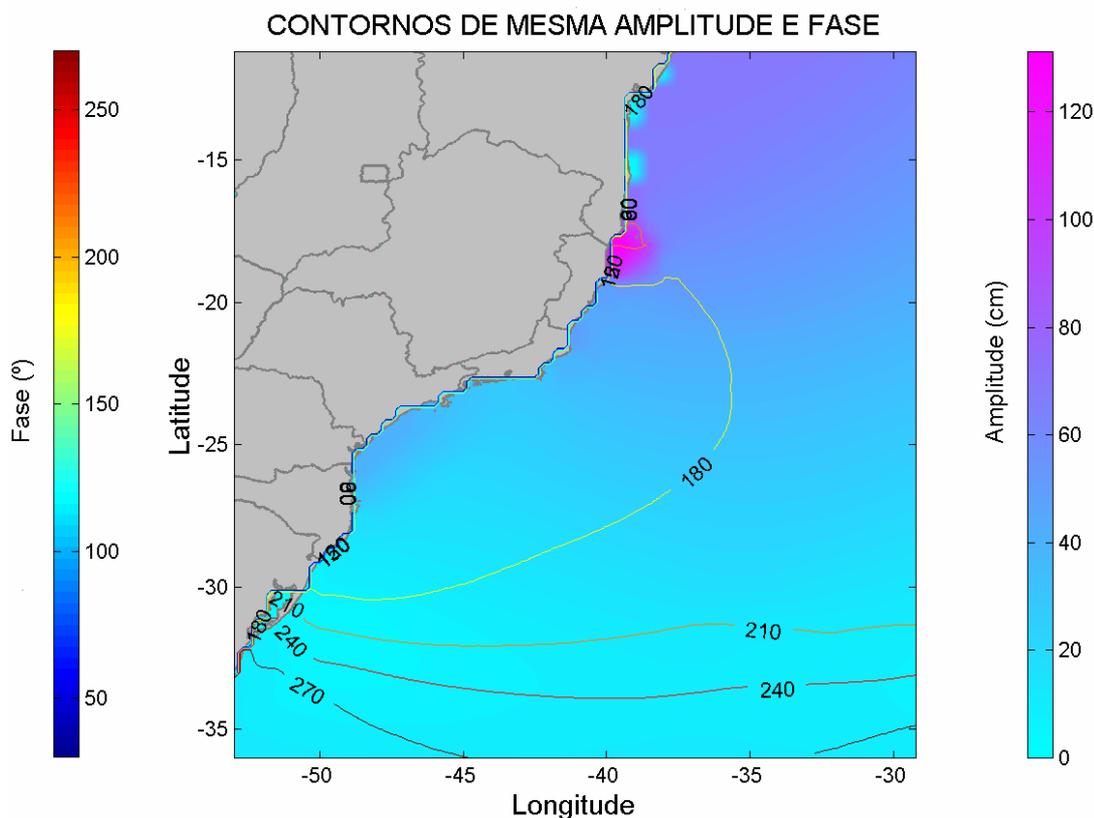
A maré astronômica na região é predominantemente semidiurna. As principais componentes para a região são  $M_2$  e  $S_2$ , com amplitudes de 32,4 cm e 16,2 cm, respectivamente. A componente  $O_1$  tem amplitude de 11,3 cm e todas as demais componentes apresentam amplitudes inferiores a 10 cm. A tabela II.3-1 apresenta ainda os níveis de: média das preamares de sizígia (MPS), média das baixa-mares de sizígia (MBS), média das preamares de quadratura (MPQ) e média das baixa-mares de quadratura (MBQ).

A figura II.3-2 apresenta o mapa cotidal, com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude de maré ( $CSR3^9$ ) para a costa sul-sudeste brasileira. Observa-se que esta é uma região de baixíssima resposta a forçante astronômica da maré, fato esperado pela relativamente pequena largura da plataforma continental. Exceção feita ao platô de Abrolhos, onde há evidente amplificação do sinal de maré.

<sup>9</sup> Modelo global de maré do *Center for Space Research* da Universidade do Texas.

**Tabela II.3-1 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica Enchova II (RJ). Fonte: FEMAR (2000).**

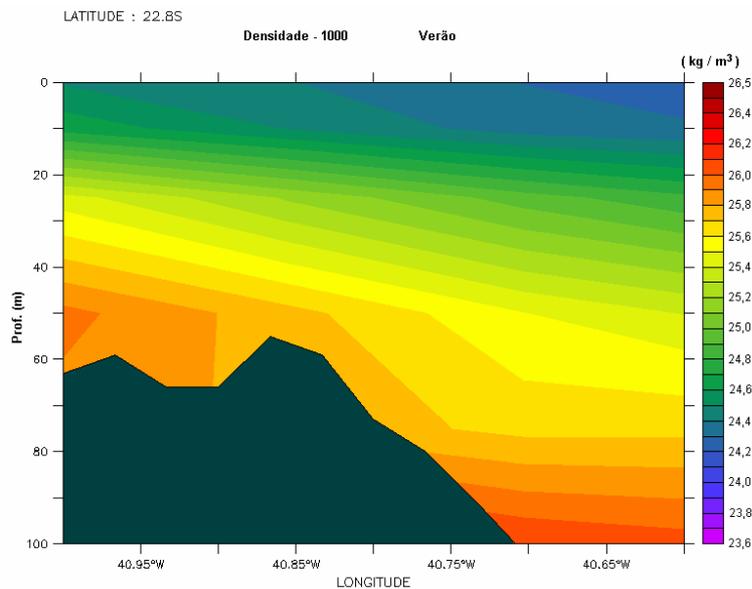
| COMPONENTE      | AMPLITUDE (cm) | FASE (°) |
|-----------------|----------------|----------|
| Q <sub>1</sub>  | 5,4            | 75       |
| O <sub>1</sub>  | 11,3           | 75       |
| P <sub>1</sub>  | 2,0            | 139      |
| K <sub>1</sub>  | 6,2            | 144      |
| 2N <sub>2</sub> | 0,8            | 83       |
| N <sub>2</sub>  | 6,2            | 83       |
| NU <sub>2</sub> | 1,2            | 83       |
| M <sub>2</sub>  | 32,4           | 83       |
| T <sub>2</sub>  | 1,0            | 88       |
| S <sub>2</sub>  | 16,2           | 88       |
| K <sub>2</sub>  | 4,4            | 88       |
| M <sub>4</sub>  | 3,5            | 347      |
| MS <sub>4</sub> | 2,8            | 65       |
| MPS             |                | 122      |
| MBS             |                | 30       |
| MPQ             |                | 111      |
| MBQ             |                | 8        |
| Nível médio     |                | 68       |



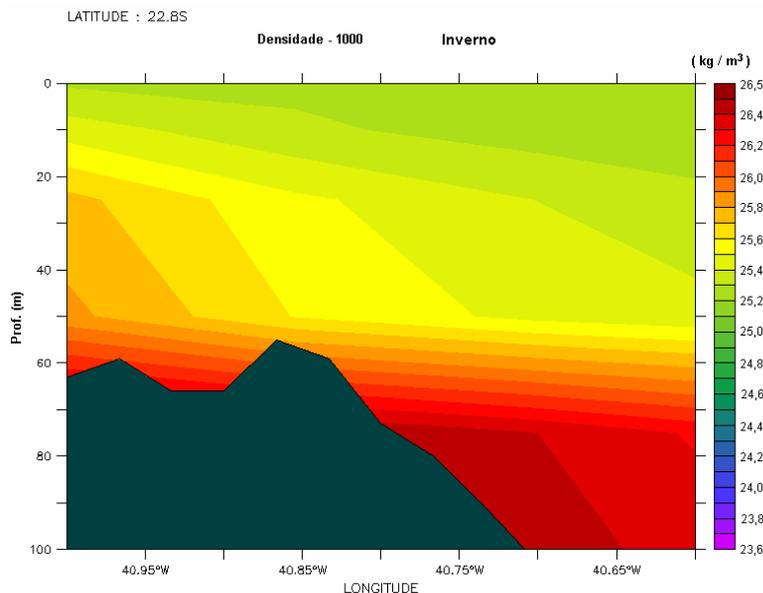
**Figura II.3-2 - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente M<sub>2</sub>.**

## II.4 TEMPERATURA E SALINIDADE

Dados de temperatura e salinidade foram obtidos do Atlas Eletrônico de dados do WOCE. Estes foram analisados, filtrados e interpolados no espaço. As figuras II.4-1 a II.4-12 apresentam seções verticais, ao longo de 22,8°S, do campo de densidade médio calculado para os períodos de janeiro a março e de julho a setembro, com base nestes dados.



**Figura II.4-1** - Seção vertical de densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) ao longo de 22,8°S para o período de janeiro a março, na região do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.



**Figura II.4-2** - Seção vertical de densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) ao longo de 22,8°S para o período de julho a setembro, na região do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.

### III MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta etapa do trabalho foi implementado um modelo hidrodinâmico visando simular o campo de correntes na região da Bacia de Campos e adjacências. Foi utilizado um modelo baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**.

O modelo utiliza como forçantes, marés do CSR3, campos tridimensionais de ventos das reanálises dos modelos meteorológicos NCEP e campo termohalino tratado a partir dos resultados do OCCAM. Nas bordas abertas são também utilizadas condições datadas do OCCAM para elevação, velocidade barotrópica, temperatura e salinidade.

#### III.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado foi baseado no POM, desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987), e implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**. O código fonte desse modelo é de domínio público e disponível *on-line*<sup>10</sup>.

A formulação deste modelo possui estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas escritas na forma de fluxo, sob as aproximações de Boussinesq e hidrostáticas. Este modelo permite também a utilização de grades curvilíneas, de coordenadas  $\sigma$  na vertical e a resolução das camadas turbulentas de superfície e de fundo, por meio de um submodelo de fechamento turbulento de 2ª ordem.

No sistema de coordenadas  $\sigma$ , a coordenada  $z$  é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água local, conforme mostra a equação abaixo, onde  $D$  é a profundidade local,  $\eta$  a elevação da superfície e  $H$  a profundidade média local:

<sup>10</sup> <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>

$$\sigma = \frac{z - \eta}{D} \quad (\text{III.1-1})$$

onde

$$D(x, y, t) = H(x, y) + \eta(x, y, t).$$

Nesta formulação também está incluído um submodelo de fechamento turbulento, para o cálculo dos coeficientes de mistura turbulenta vertical. O fechamento turbulento de 2ª ordem utiliza os resultados das equações da energia cinética turbulenta e da escala de comprimento de turbulência, no cálculo dos coeficientes cinemáticos de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal na vertical (Mellor & Yamada, 1982). Esses cálculos são efetuados com base em relações empíricas, que utilizam constantes estabelecidas em experimentos de laboratório e em observações de campo. Com o fechamento turbulento de 2ª ordem, o modelo reproduz de maneira mais realística as camadas de Ekman, de superfície e de fundo.

Além dos aspectos específicos acima mencionados, o modelo adota soluções largamente utilizadas na literatura, como gradeamento do tipo C de Arakawa e métodos de integração diferentes na horizontal e na vertical – integração horizontal e temporal explícita e vertical implícita. Por meio desses procedimentos, elimina-se a restrição temporal na vertical, permitindo o uso de maior resolução nas camadas de Ekman de superfície e de fundo.

O modelo apresenta uma superfície livre e dois intervalos de tempo distintos, um para o modo de oscilação externo e outro para o interno. O modo externo (barotrópico) usa um intervalo de tempo menor, baseado na condição de estabilidade computacional de Courant-Friedrichs-Levy (CFL). O modo interno (baroclínico) usa um intervalo de tempo mais longo (*splitting mode*).

### III.1.1 Equações Básicas do POM

O modelo hidrodinâmico aqui descrito é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: as três componentes da velocidade ( $u, v$  e  $w$ ), a

temperatura ( $T$ ), a salinidade ( $S$ ), a energia cinética turbulenta ( $q^2/2$ ), a escala turbulenta ( $l$ ), e a elevação da superfície ( $\eta$ ).

O conjunto de equações básicas utilizadas no código é descrito abaixo. Consideremos um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com  $x$  crescendo para Leste,  $y$  para Norte e  $z$  para cima, no qual as coordenadas horizontais (*i.e.*  $x, y$ ) referem-se ao espaço computacional. A superfície livre está localizada em  $z = \eta(x, y, t)$  e o fundo em  $z = -H(x, y)$ . Neste sistema as equações de conservação e a equação de estado são escritas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.1.1-1})$$

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{III.1.1-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.1.1-3})$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{III.1.1-4})$$

Conservação de Temperatura Potencial:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F(H) \quad (\text{III.1.1-5})$$

Conservação de Salinidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (\text{III.1.1-6})$$

Equação de Estado:

$$\rho = \rho(S, \Theta, P) \quad (\text{III.1.1-7})$$

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2}{\partial t} + U \frac{\partial q^2}{\partial x} + V \frac{\partial q^2}{\partial y} + W \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] \\ + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \end{aligned} \quad (\text{III.1.1-8})$$

Equação da Turbulência em Macro Escala:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x} (q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y} (q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z} (2q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_q \frac{\partial}{\partial z} (q^2 l) \right] \\ + l E_1 K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (\text{III.1.1-9})$$

sendo,

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial y} \right) \quad (\text{III.1.1-10})$$

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \quad (\text{III.1.1-11})$$

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (\text{III.1.1-12})$$

onde

$U, V, W$  = componentes do vetor velocidade (m/s);

$f$  = parâmetro de Coriolis ( $s^{-1}$ );

$\rho_0$  = densidade de referência ( $kg/m^3$ );

$\rho$  = densidade *in situ* ( $kg/m^3$ );

$P$  = pressão ( $N/m^2$ );

$K_M$  = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ );

$K_H$  = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal ( $m^2/s$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\Theta$  = temperatura potencial ( $^{\circ}C$ );

$S$  = salinidade (PSU);

- $A_M$  = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ );
- $A_H$  = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor sal ( $m^2/s$ );
- $F_H, F_S$  = parametrização (em termos de processos de mistura horizontal) para processos de pequena escala não resolvidos diretamente pela grade do modelo.
- $q^2/2$  = energia cinética turbulenta;
- $l$  = escala característica de comprimento para o movimento turbulento;
- $\tilde{W}$  = função proximidade-do-contorno;
- $k$  = constante de von Karman ( $k=0,4$ );
- $F_{q^2, q^2l}$  = termos horizontais de mistura para  $q^2$  e  $q^2l$ .

### III.1.2 Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno naturais do modelo são dadas pela velocidade normal nula nos contornos terrestres. Em áreas com aporte fluvial significativo para a escala do domínio, os valores de vazão, temperatura e salinidade dos rios são diretamente especificados nos contornos. Na superfície livre, além das condições dinâmicas locais (Mellor & Yamada, 1982), é também considerada a tensão de cisalhamento do vento. Opcionalmente, fluxos de calor e sal (evaporação) podem ser incluídos. Na modelagem em questão estes fluxos não foram considerados. No fundo, são aplicadas as condições dinâmicas descritas em Mellor & Yamada (op. cit.). A velocidade de arrasto é calculada como uma função empírica da energia cinética turbulenta, por sua vez decorrente do fechamento turbulento de segunda ordem.

Nos contornos artificiais são aplicadas, ao modelo, condições de contorno para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2D), velocidades do modo interno (3D), temperatura, salinidade, velocidade vertical e energia cinética turbulenta.

Nas componentes perpendiculares à fronteira são aplicadas condições radiacionais em função da elevação, do tipo  $H\bar{U} \pm C_e \eta = BC^2$ , onde  $C_e = \sqrt{gH}$  é a velocidade de fase da onda que chega ao sistema,  $\eta$  é a elevação do nível do mar e B é um coeficiente empírico. Nos casos da temperatura e da salinidade, disponibiliza-se esquema que permita advecção através da fronteira, condição esta descrita por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ (condição análoga aplicada à salinidade)} \quad (\text{III.1.2-1})$$

## III.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

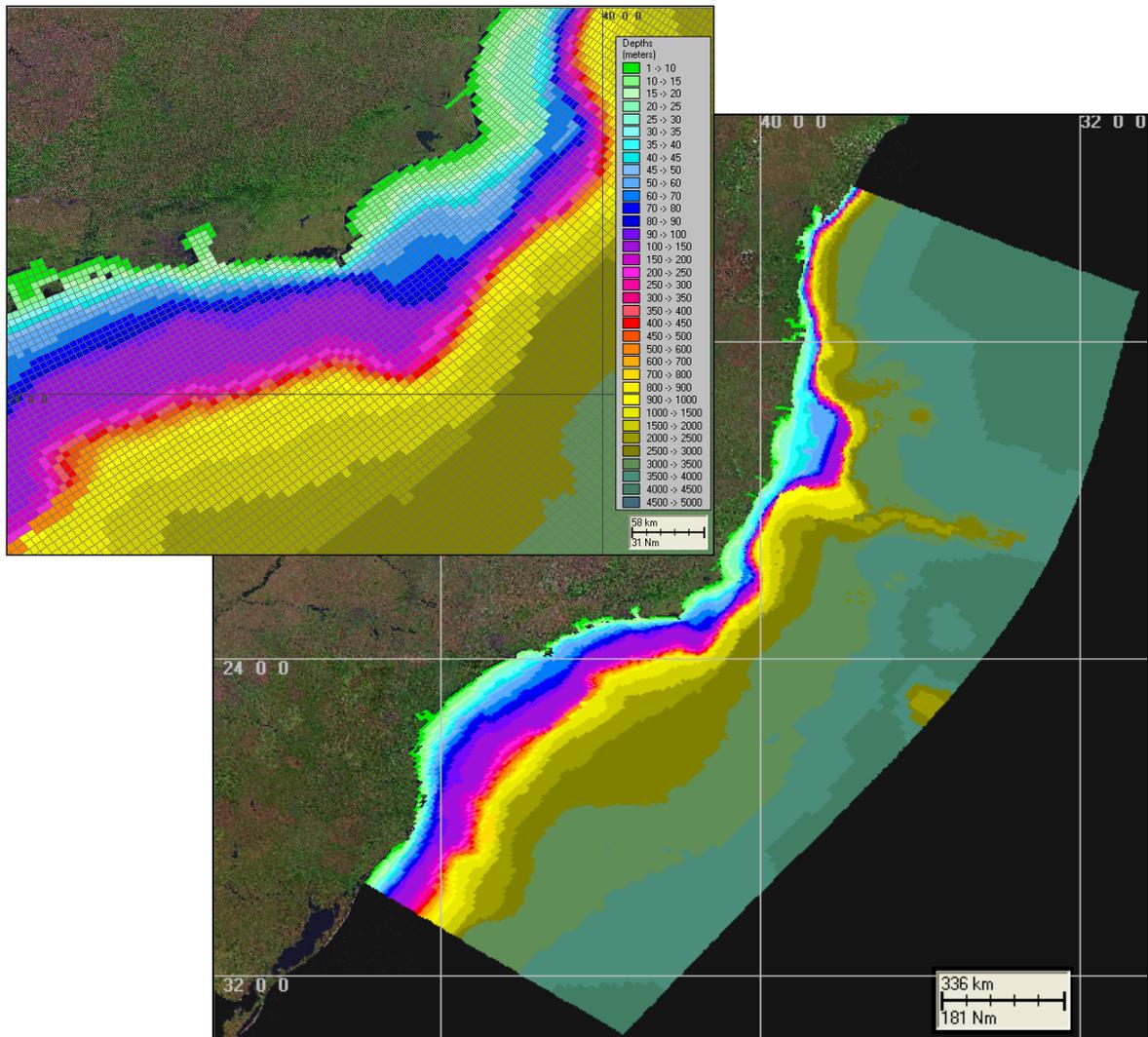
A grade geral implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto de modelagem final e a descrição dos processos hidrodinâmicos necessariamente definidos para a região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário. Uma grade final de meso-escala com dimensões de 100x300 pontos foi implementada sobre toda a região com resolução média máxima de 3 km na área de foco, e está ilustrada na figura III.2-1. Nessa grade foram utilizadas 20 camadas sigma para a definição da estrutura vertical da região. Os resultados obtidos nas simulações são comparados com dados observacionais de elevação e correntes, medidos na zona costeira da área de interesse.

Para a região da plataforma, os dados de profundidade foram obtidos através da digitalização dos valores batimétricos das cartas náuticas da DHN<sup>11</sup>, n<sup>os</sup> 70, 1.100, 1.131, 1.400, 1.420, 1.700, 1.800, 1.820 e 1.824. Para a representação topográfica da região do talude e planície abissal foi também utilizada a base de dados batimétricos extraída do ETOPO 2 obtido no NGDC<sup>12</sup>, reamostradas para um espaçamento de 10'. Visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa e as camadas de sistemas de informações geográficas (SIG) utilizadas pelos modelos matemáticos implementados na região, foram utilizadas também informações

<sup>11</sup> Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

<sup>12</sup> National Geophysical Data Center da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

provenientes de imagens de satélite, complementando a base de dados batimétricos da **ASA SOUTH AMERICA** na área. Os resultados finais da discretização da área e projeção da batimetria estão ilustrados na figura III.2-1.



**Figura III.2-1** - Grade computacional do modelo hidrodinâmico e projeção da batimetria, com foco na região da Bacia de Campos.

### III.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A metodologia de validação fundamenta-se na avaliação do modelo quanto à sua capacidade de reprodução da circulação na região em estudo. Neste relatório estão sendo apresentadas comparações entre dados e resultados do modelo

hidrodinâmico em pontos sobre a plataforma continental, onde predominam os sinais de maré e vento e no talude/oceano profundo, área com maior presença de variabilidades de larga escala, relacionadas à presença da Corrente do Brasil.

O coeficiente de ajuste, utilizado como parâmetro de avaliação para as séries temporais, foi baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é comumente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio:

$$\frac{RMS}{\bar{A}} \quad (III.3-1)$$

onde

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

$\bar{A}$  = range médio do dado;

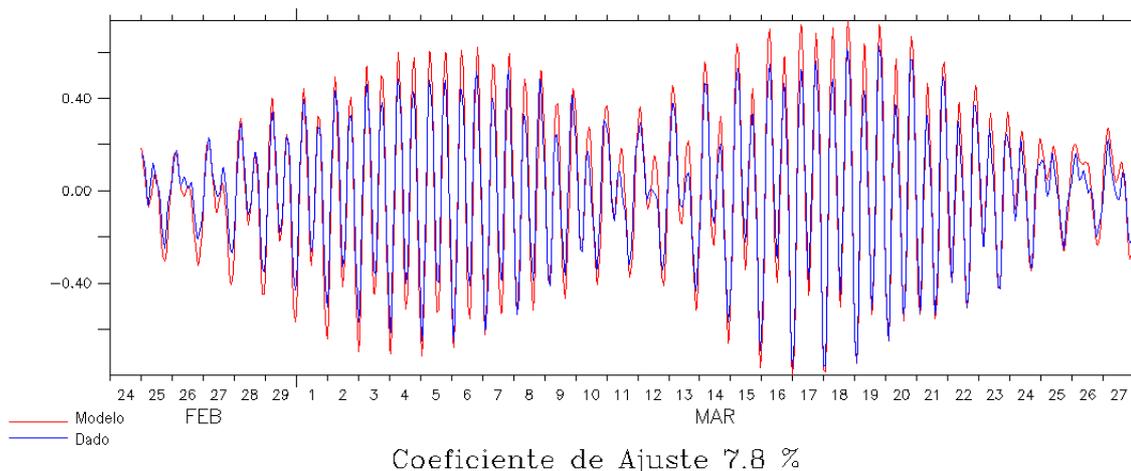
$P$  = previsão;

$O$  = observação.

### III.3.1 Validação para a Maré

Para a validação da maré, foi produzida uma previsão a partir da tabela de constantes harmônicas da FEMAR para o ponto Enchova II, nas coordenadas 22°42,0'S e 40°50,2'W.

A figura III.3.1-1 mostra uma comparação entre o resultado do processamento da variável elevação calculada pelo modelo (vermelho) com a série temporal da previsão (azul). Para ambas às séries foi selecionado um período de 30 dias, compreendido entre os dias 24 de fevereiro a 27 de março de 1992. Observa-se, nesta figura, boa concordância, tanto na amplitude quanto na fase, entre os resultados obtidos com o modelo e a previsão de maré. O coeficiente de ajuste obtido para este período foi de 7,8%.

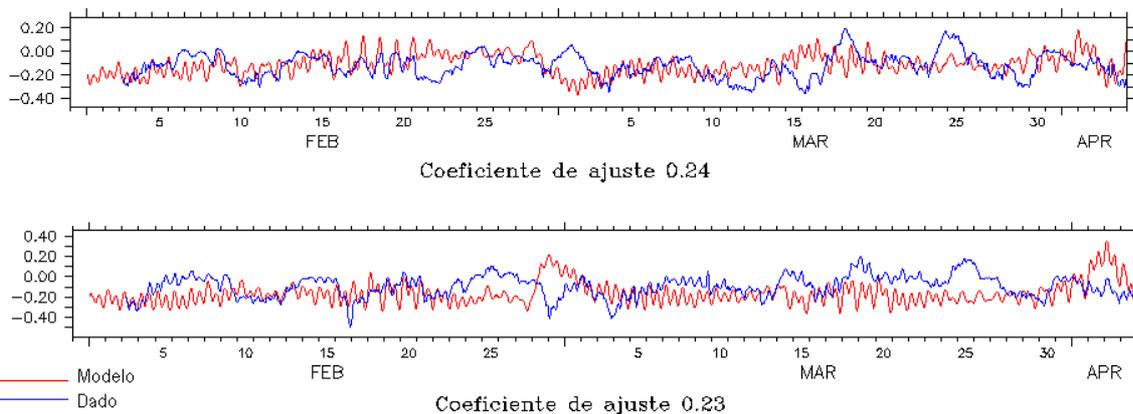


**Figura III.3.1-1** - Série temporal da previsão de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 24 de fevereiro a 27 de março de 1992.

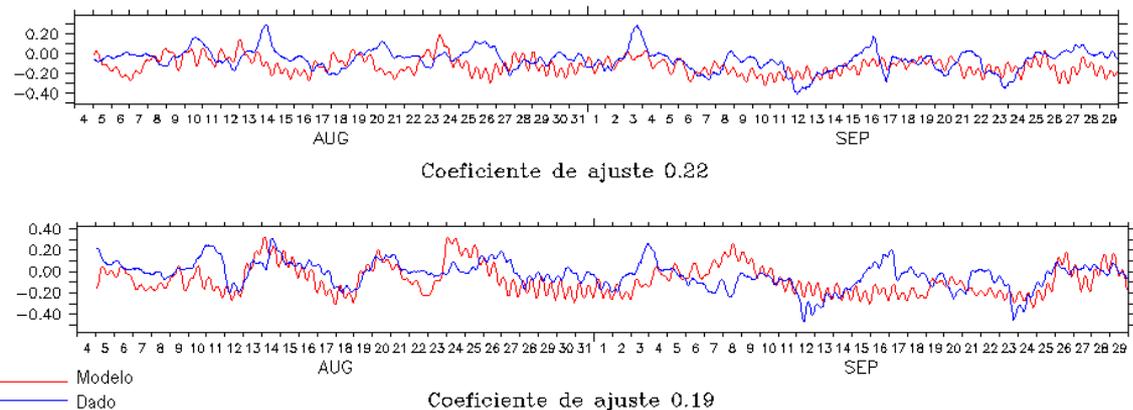
### III.3.2 Validação para as Correntes

Para a validação das informações de correntes geradas pelo modelo hidrodinâmico, foram utilizados conjuntos de dados de superfície (ponto PC) e um conjunto de dados não superficiais (devido às implicações de uso destes resultados no atual projeto), no caso os dados do WOCE - BM333, indicados na figura II-1. As componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) dos dados foram comparadas separadamente com a saída do modelo.

As figuras III.3.2-1 e III.3.2-2 apresentam para o ponto PC as comparações entre os resultados do processamento para as componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S), calculadas pelo modelo (vermelho) e medidas (azul), relativas à dois períodos do ano de 1992. Estes dados foram escolhidos para caracterização aproximada das variabilidades presentes na área no verão e inverno. No período de verão, o coeficiente de ajuste obtido foi de 24% para componente  $u$  e 23% para a componente  $v$ . Já no período de inverno, o coeficiente de ajuste obtido foi de 22% para componente  $u$  e 19% para a componente  $v$ .

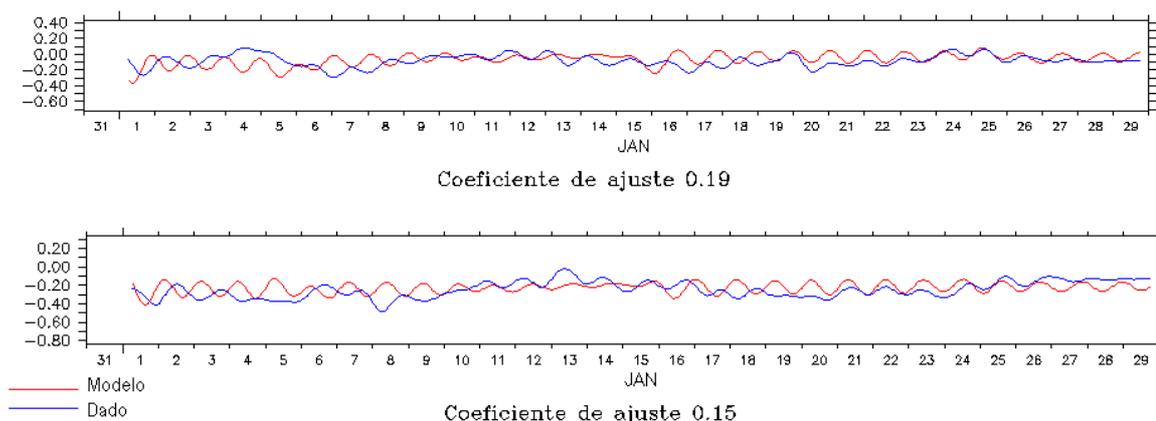


**Figura III.3.2-1** - Série temporal medida das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1<sup>o</sup> de fevereiro e 15 de abril de 1992 para o ponto PC.

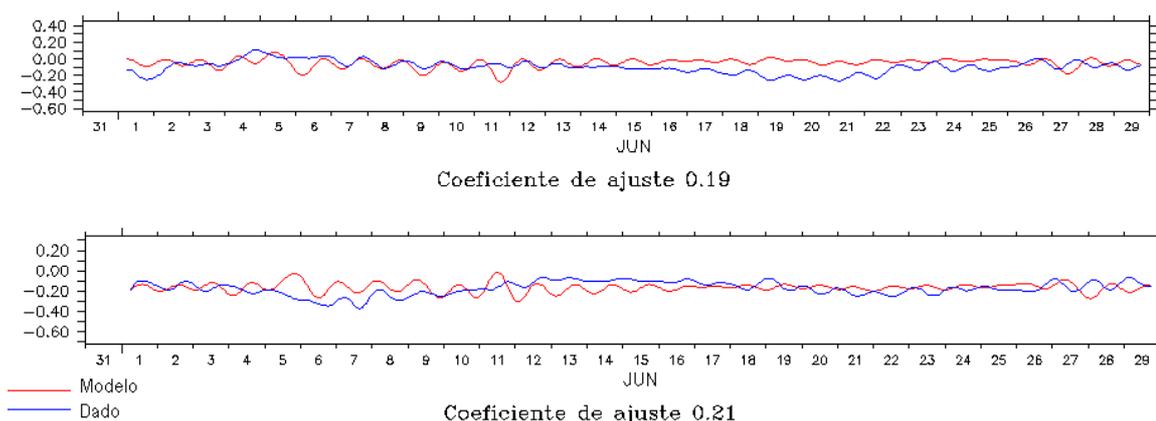


**Figura III.3.2-2** - Série temporal medida das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 5 de agosto a 29 de setembro de 1992 para o ponto PC.

As figuras III.3.2-3 e III.3.2-4 apresentam para o ponto BM333 as comparações, utilizando o método do coeficiente de ajuste, entre os resultados do processamento para as componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) calculadas pelo modelo (vermelho) e medidas (azul), utilizando os períodos de 1<sup>o</sup> a 30 de janeiro de 1992 e 1<sup>o</sup> a 30 de junho de 1992, representativos dos períodos de verão e inverno, respectivamente. O coeficiente de ajuste obtido na comparação para o período de verão foi de 19% para componente  $u$  e de 15% para a componente  $v$ . Na comparação para o período de inverno, o coeficiente de ajuste obtido foi de 19% para componente  $u$  e de 21% para a componente  $v$ .



**Figura III.3.2-3** - Série temporal medida das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1<sup>o</sup> e 30 de janeiro de 1992 para o ponto BM333.



**Figura III.3.2-4** - Série temporal medida das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1<sup>o</sup> a 30 de junho de 1992 para o ponto BM333.

### III.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Os resultados da caracterização ambiental física e numérica, aqui apresentados, são decorrentes de um processo evolutivo de estudo, baseado em modelos numéricos na região das bacias de Campos e Santos. Esse texto apresenta, portanto, o processo de calibração e validação de modelo

hidrodinâmico tridimensional, baroclínico e prognóstico, estabilizado para variabilidades médias (climatológicas) nos campos de temperatura e salinidade. A validação desse modelo, simultaneamente sobre a plataforma continental, talude e oceano profundo (nas diversas profundidades amostradas), é indicação de que se atingiu altos níveis de representação teórica (matemática) do padrão de circulação na costa leste do Brasil.

Especificamente em relação à validação do modelo obteve-se, na plataforma, coeficiente de ajuste de 7,8% para a maré (Enchova II). Para as componentes zonal e meridional do campo de correntes (ponto PC), no verão obteve-se, respectivamente, coeficientes iguais a 24% e 23%. Já no período de inverno, o coeficiente de ajuste obtido foi de 22% para componente  $u$  e de 19% para a componente  $v$ . Em região de talude (ponto BM333) obteve-se, no verão, para as componentes zonal e meridional do campo de correntes, coeficientes iguais a 19% e 15%, respectivamente. No inverno os coeficientes obtidos foram de 19% para componente  $u$  e 21% para a componente  $v$ .

Os índices de ajuste obtidos no processo de calibração, fato válido para qualquer estudo envolvendo modelagem numérica no oceano, devem ser compreendidos e analisados dentro de margens de erro pouco mensuráveis. Esses limites, usuais em qualquer simulação hidrodinâmica, são dados pela complexidade da circulação numa região específica, aliada à quantidade de informação anterior existente e ao fato da comparação entre os resultados do modelo e as medições realizarem-se sempre em pontos restritos no espaço e no tempo.

Embora se tenha conseguido bom ajuste do modelo hidrodinâmico à região, deve-se lembrar que seus resultados são específicos para um dado período e determinados pelo atual nível de conhecimento na área de estudo. A extrapolação desses resultados no espaço e no tempo é sempre possível, sendo esta uma das vantagens da utilização de ferramentas numéricas. No entanto, é recomendável manter margens de segurança suficientes na análise dos resultados.

## IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE E COMPOSIÇÃO DA ÁGUA PRODUZIDA

Na tabela IV-1 são apresentadas as características do descarte de água produzida do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.

*Tabela IV-1 - Parâmetros utilizados para a modelagem das plumas de descarte de água produzida.*

| PARÂMETROS PARA MODELAGEM DA PLUMA      | VALORES                   |
|---|---------------------------|
| Diâmetro da tubulação                   | 4"                        |
| Orientação da tubulação                 | vertical                  |
| Profundidade local no ponto de descarte | 91 m                      |
| Profundidade de descarte                | Superfície do mar         |
| Vazão do efluente                       | 1.455 m <sup>3</sup> /dia |
| Densidade do efluente                   | 1.050 kg/m <sup>3</sup>   |

Para avaliação da diluição e dispersão da água produzida e descartada a partir do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras, foram considerados parâmetros orgânicos e inorgânicos. A tabela IV-2 apresenta a composição do efluente da água produzida fornecida pela PETROBRAS. Ressalta-se que estas informações são oriundas da UEP PPM-1, uma vez que o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras ainda não entrou em operação. Nesta tabela estão representados apenas os parâmetros cujos valores apresentaram-se acima de seus respectivos limites de detecção.

O teor de óleos e graxas (TOG) no mar é uma medida generalizada da massa de óleo presente em efluentes, determinada através de gravimetria e infravermelho, cujos limites de detecção, dessas metodologias, variam em torno de 1 mg/L.

Como a concentração de óleo na água do mar apresenta-se muito diluída, da ordem de µg/L ou ng/L, as metodologias de medida do TOG não alcançam os níveis encontrados na água do mar. Assim, nesse relatório, para a determinação da dispersão e diluição da água produzida do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras, não foram realizadas simulações com o TOG propriamente dito, mas com os parâmetros (BTEX, HPA e Fenóis) que compõem o conjunto do TOG.

**Tabela IV-2 - Composição da água produzida.**

| COMPONENTES                   | CONCENTRAÇÃO NO PONTO<br>DE LANÇAMENTO (µg/L) |
|-------------------------------|---|
| <b>Parâmetros orgânicos</b>   |   |
| Benzeno                       | 630,0   |
| Tolueno                       | 480,0   |
| Etilbenzeno                   | 50,0  |
| Fenóis totais                 | 342,0   |
| Benzo(a)antraceno             | 0,11  |
| Naftalenos                    | 5,67  |
| Carbono orgânico total        | 153.000,0                                     |
| Teor de óleos e graxas        | 20.000,0                                      |
| <b>Parâmetros inorgânicos</b> |   |
| Cobre dissolvido              | 140,0   |
| Manganês total                | 60,0  |
| Salinidade                    | 77.987.000,0                                  |

## V MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO

A modelagem do transporte da pluma de efluentes compreende a modelagem do campo próximo e do campo afastado. O campo próximo corresponde à zona de diluição inicial, onde prevalecem os efeitos oriundos da velocidade inicial de ejeção e a diferença de densidade entre o efluente e o meio. Por campo afastado entende-se a região onde passam a predominar os efeitos da dinâmica local no transporte e dispersão da pluma.

### V.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CORMIX

O modelo CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*), da Cornell University, foi utilizado para simular o campo próximo do lançamento de água produzida no FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras. O CORMIX é um sistema de modelos computacionais desenvolvido para a análise, previsão e planejamento do lançamento de efluentes em diferentes corpos d'água (Jirka *et al.*, 1996). A ênfase do sistema se dá na previsão da geometria e das características de diluição da zona de mistura inicial, permitindo que valores aceitáveis de qualidade de água sejam calculados e discutidos.

O CORMIX é composto por três subsistemas: (a) CORMIX1, utilizado para a análise de lançamentos pontuais abaixo da superfície (*submerged single port discharges*); (b) CORMIX2, para a análise de múltiplos lançamentos pontuais (difusores) abaixo da superfície (*submerged multiport diffuser discharges*); e (c) CORMIX3, para a análise de lançamentos superficiais (*buoyant surface discharges*).

Embora a metodologia do CORMIX considere condições ambientais estacionárias, o sistema representa uma ferramenta adequada para a previsão tanto de feições qualitativas (e.g. classificação de fluxos) quanto de aspectos quantitativos (e.g. taxas de diluição, trajetórias de plumas) dos processos de mistura hidrodinâmicos resultantes de diferentes configurações de lançamentos e em vários tipos de corpos d'água, incluindo pequenos riachos, grandes rios, lagos, reservatórios, estuários e águas costeiras.

---

## **V.2 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO**

As simulações foram divididas entre os períodos de verão e inverno, de forma a reproduzir a variabilidade sazonal das forçantes meteorológicas e oceanográficas na região de estudo. Os valores de corrente, utilizados nas simulações do comportamento da pluma do efluente no campo próximo, foram obtidos a partir do modelo hidrodinâmico implementado na região. As informações do campo termohalino utilizadas no CORMIX foram obtidas do Atlas Eletrônico de dados do WOCE, conforme o Capítulo II. As características do descarte de água produzida, utilizadas nas simulações do campo próximo, encontram-se descritas no Capítulo IV.

## **VI MODELAGEM DA DISPERSÃO NO CAMPO AFASTADO**

Na modelagem do campo afastado foi utilizado o modelo CHEMMAP, desenvolvido pela **ASA**, para previsão da trajetória e transformações biogeoquímicas (*trajectory and fates*) de produtos químicos, incluindo as substâncias flutuantes, as que afundam e as substâncias solúveis.

O CHEMMAP é um sistema de modelos que pode ser utilizado em Análises de Risco, Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Relatório de Controle Ambiental (RCA), e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) decorrentes de derrames acidentais de produtos químicos, do descarte de efluentes, e do descarte de água de produção associado às operações de óleo e gás (French, 2001; French *et al.*, 2002) em qualquer região do mundo.

### **VI.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP**

O CHEMMAP foi projetado em uma configuração modular de forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, podem ser acoplados dependendo do problema e situação em estudo. Através de sua interface gráfica, o CHEMMAP permite ao usuário a especificação dos cenários; animação das trajetórias, correntes e vento; importar e exportar dados ambientais; a definição da grade computacional para qualquer área dentro do domínio; gerar correntes médias ou de maré; incluir ou editar as características dos produtos químicos registrados no banco de dados; apresentar dados contidos em objetos georreferenciados (SIG); e determinar o impacto ambiental em recursos naturais. As funções do SIG permitem ao usuário a entrada, manipulação e exibição de objetos na tela através de pontos, linhas e polígonos georreferenciados ao domínio definido pelo cenário. A cada objeto podem ser atribuídos dados em formato de texto, valores numéricos ou arquivos a partir de *links* externos.

O sistema CHEMMAP inclui os seguintes modelos: um modelo tridimensional de deriva e intemperismo (*trajectory and fates*), um modelo de impactos biológicos e um modelo probabilístico.

Para a elaboração de cenários de deriva deve ser definido um conjunto de duas grades computacionais, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo. Uma das grades, compreendendo apenas a região de água, define o campo de circulação, podendo neste caso ser baseada em resultados de um modelo hidrodinâmico implementado na região de estudo. A outra grade pode ser compatível com o modelo OILMAP (grade *land-water*) ou ser compatível com o modelo SIMAP (grade *habitat/depth*) ambos desenvolvidos, também, pela **ASA**. A grade *land-water* define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definida pela linha de costa. A linha de costa é representada por uma série de blocos que limita a extensão em que a mancha de químicos pode se movimentar em uma determinada direção, dependendo do tipo de costa (costões rochosos, praias, etc.). A grade *habitat/depth* alia a mesma funcionalidade da grade *land-water*, com informações de batimetria na área definida como água e os *habitats* correspondentes aos determinados tipos de costa (bancos de corais, manguezais, etc.).

O modelo de trajetória estima a distribuição do produto (massa e concentração) na superfície da água, em linhas de costa, na coluna d'água e nos sedimentos. O modelo tem estrutura tridimensional que simula, separadamente, a mancha superficial, as parcelas na coluna d'água, as parcelas do composto químico puro, as parcelas adsorvidas ao material particulado em suspensão e as parcelas dissolvidas (ASA, 2002).

Os processos biogeoquímicos simulados são: espalhamento, advecção, dispersão, evaporação-volatilização, entranhamento, dissolução, partição, sedimentação, adsorção e degradação.

O modelo utiliza propriedades físico-químicas para simular a trajetória e o destino da pluma de efluentes descartados em superfície ou na coluna d'água. As propriedades incluem densidade, pressão de vapor, solubilidade na água, taxa de degradação, coeficientes de partição adsorvido e dissolvido ( $K_{ow}$ ,  $K_{oc}$ ), viscosidade e tensão superficial. Essas propriedades e outras, requeridas pelo modelo para simular o transporte e destino do material descartado, estão contidas

no banco de dados químicos do CHEMMAP. O banco de dados engloba uma variedade de informações na forma de texto e descritores numéricos com o qual o usuário pode identificar e caracterizar o produto químico ou a mistura. O modelo é capaz de simular derrames de substâncias puras, produtos em soluções aquosas ou hidrofóbicas, ou substâncias em emulsões (*i.e.* mistura de material particulado em suspensão em base aquosa). Além do mais, o banco de dados inclui características que definem as misturas e as soluções.

A massa do produto químico simulado é transportada pelo campo tridimensional de correntes determinado pelo modelo hidrodinâmico, considerando marés, vento, correntes oceânicas e o movimento vertical determinado pelo empuxo (*buoyancy*) e dispersão.

O modelo também é capaz de simular a adsorção de produtos a partículas de sedimentos em suspensão, resultando na sedimentação de materiais, calculada a partir da Lei de Stokes. Partículas sedimentadas podem sofrer ressuspensão, uma vez que a velocidade no fundo ultrapasse o limite de erosão.

A pluma de efluentes é simulada segundo uma abordagem Lagrangiana, com uma série de partículas (*spillets*) representando a massa total do composto químico de interesse. A cada passo de tempo, as partículas deslocam-se de acordo com o movimento do campo hidrodinâmico, sofrem reações biogeoquímicas e são transferidas para o próximo intervalo de tempo.

Para determinar a trajetória e o destino da mancha na superfície, no caso de manchas superficiais, o modelo estima o espalhamento superficial, o transporte da mancha (advectivo e difusivo), o entranhamento na coluna d'água e a evaporação.

O espalhamento é simulado utilizando-se o algoritmo de Fay (1971) e o entranhamento é modelado segundo Delvigne & Sweeney (1988). As manchas superficiais interagem com a linha de costa, depositando material de acordo com o tipo de costa e a viscosidade do material. Os algoritmos utilizados são aqueles desenvolvidos para derrames de óleo, como descrito em French *et al.* (1999).

Utilizando-se o CHEMMAP no modo probabilístico é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de comportamento da pluma são realizadas através de variadas condições meteorológicas e

oceanográficas dentro do período de disposição de dados ambientais. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar estocasticamente.

No modo probabilístico, várias simulações são realizadas para cada cenário de descarte. Usando séries de dados de ventos e correntes para uma locação, o modelo seleciona aleatoriamente a data do descarte e as condições ambientais associadas. Como critério de parada das simulações, o modelo permite selecionar um limite (e.g. CENO, limite legal) acima do qual as probabilidades e concentrações esperadas sejam registradas. Cinco tipos de resultados são produzidos para cada parcela do químico ou mistura que se encontra na superfície da água, em linhas de costa, na coluna d'água e ou nos sedimentos, os quais podem ser apresentados em mapas de contorno:

- probabilidade de qualquer quantidade exceder o limite de concentração;
- tempo decorrido para que seja excedido o limite de concentração;
- média das máximas concentrações (ou massa) esperadas;
- pior caso (máxima concentração/massa) que pode ocorrer (e.g. pico de exposição no tempo e máximo de todas as simulações sob todas as condições ambientais simuladas);
- data e hora inicial da simulação para reproduzir o pior caso de um determinado elemento e ou local.

### VI.1.1 *Formulação do Modelo*

A massa do produto químico simulado é transportada pelo campo tridimensional de correntes determinado pelo modelo hidrodinâmico, considerando marés, vento, correntes oceânicas e o movimento vertical determinado pelo empuxo (*buoyancy*) e dispersão. No CHEMMAP, a pluma do produto químico é considerada como um conjunto de partículas lagrangianas contendo, cada uma delas, massa conhecida. O vetor posição ( $X_t$ ) de uma dada partícula, num determinado instante de tempo  $t$ , é definido como:

$$X_t = X_{t-1} + \Delta t(U_t + D_t + R_t) \quad (\text{VI.1.1-1})$$

onde

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

$X_{t-1}$  = vetor posição no passo de tempo anterior;

$U_t$  = soma das componentes da velocidade advectiva nas três dimensões no instante  $t$  (m/s);

$D_t$  = soma das componentes da velocidade difusiva nas três dimensões no instante  $t$  (m/s);

$R_t$  = velocidade vertical das partículas na coluna d'água (m/s).

As velocidades difusivas são movimentos de subescala que não são explicitamente simulados pelo transporte da corrente ou pelo empuxo. A magnitude das componentes de  $D_t$  são proporcionais aos coeficientes de dispersão vertical e horizontal (Okubo, 1971) através da formulação *random walk* (Bear & Verruijt, 1987). Valores típicos de coeficientes de dispersão horizontal encontram-se dentro da faixa de 0,1 m<sup>2</sup>/s, em águas estuarinas, a valores maiores ou iguais a 10 m<sup>2</sup>/s em regiões oceânicas. O coeficiente de dispersão vertical, baseado em Thorpe (1984), é considerado em função da velocidade do vento na camada de mistura de onda, aproximadamente, 1,5 vezes a altura da onda. Esta, por sua vez, é calculada através do algoritmo de CERC (1984). Em águas profundas, valores típicos para o coeficiente de dispersão vertical são da ordem de 0,0001 m<sup>2</sup>/s, ou ainda menores.

O termo responsável pelo empuxo ( $R_t$ ), tanto para cima quanto para baixo, é causado pela diferença relativa na densidade (e na força gravitacional) entre as partículas (sólidas, líquidas ou bolhas de gás) e a água adjacente. Este termo é calculado através da Lei de Stokes, na qual a velocidade de subida ou de afundamento aumenta em função da diferença de densidade entre a partícula e a água, e em proporção ao quadrado do diâmetro da partícula. Desta forma, para uma pluma flutuante, quanto menos denso o químico e quanto maior a partícula, mais rápido a pluma se aproxima da superfície. Em contrapartida, quanto mais denso este for e quanto maior a partícula, mais rápido a pluma afundará.

O modelo simula ainda a adsorção de produtos a partículas de sedimentos em suspensão, resultando na sedimentação de materiais. Neste caso, a Lei de Stokes é utilizada para calcular as velocidades verticais das partículas do químico

puro, ou partículas de sedimento em suspensão adsorvidas aos químicos. Se a velocidade de subida ou de afundamento supera a mistura turbulenta, as partículas irão flutuar ou se depositar no fundo. Partículas depositadas podem ser ressuspendidas, caso a velocidade da corrente supere 0,2 m/s.

Se as correntes de superfície, fornecidas pelo modelo hidrodinâmico (ou dados observacionais), não são forçadas pelo vento, então a velocidade de deriva devida ao vento,  $u_{wc}$  e  $v_{wc}$  (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wc} = C_w u_w \quad (\text{VI.1.1-2})$$

$$v_{wc} = C_w v_w \quad (\text{VI.1.1-3})$$

onde

$u_w$  = componente Leste-Oeste da velocidade do vento (m/s);

$v_w$  = componente Norte-Sul da velocidade do vento (m/s);

$C_w$  = fator de deriva (%).

O fator de deriva,  $C_w$ , é constante (Lange & Hühnerfuss, 1978), podendo variar entre 2,5 e 4,5%, baseado em observações. O valor *default* no modelo é 3,5%.

O ângulo de deriva é no sentido anti-horário da direção do vento (Hemisfério Sul). Assim, a velocidade de deriva devida ao vento,  $u_{wd}$  e  $v_{wd}$  (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wd} = u_{wc} \cos \theta + v_{wc} \operatorname{sen} \theta \quad (\text{VI.1.1-4})$$

$$v_{wd} = -u_{wc} \operatorname{sen} \theta + v_{wc} \cos \theta \quad (\text{VI.1.1-5})$$

onde

$u_{wc}$  = componente Leste-Oeste da velocidade devida à deriva do vento (m/s);

$v_{wc}$  = componente Norte-Sul da velocidade devida à deriva do vento (m/s);

$\theta$  = ângulo de deriva ( $^\circ$ ) constante ( $\theta = C_a$ ). O valor *default* é zero.

De maneira alternativa, um algoritmo desenvolvido por Youssef (1993) e Youssef & Spaulding (1993) é utilizado no transporte induzido pelo vento na camada de mistura de onda de regiões oceânicas. Seus resultados mostram que o fator de deriva devido ao vento na superfície da água,  $C_{wo}$ , está relacionado à velocidade do vento ( $w$ ):

$$C_{wo} = 3,9088 - 0,031885w \quad (\text{VI.1.1-6})$$

A deriva do vento varia entre 3% e 4% a velocidade do vento, respectivamente, para ventos com velocidade de 30 m/s a ventos fracos. De forma similar, o ângulo de deriva na superfície da água,  $C_{ao}$ , está relacionado à velocidade do vento ( $w$ ):

$$C_{ao} = 23,627 - 7,97 \log(w) \quad (\text{VI.1.1-7})$$

Com o aumento da profundidade, o fator de deriva do vento diminui, enquanto o ângulo de deriva aumenta (Youssef, 1993; Youssef & Spaulding, 1993). Dessa forma, há um cisalhamento entre as águas superficiais e subsuperficiais, que faz com que as partículas se distanciem e se separem da pluma superficial. Essas funções se baseiam em formulações empíricas ajustadas aos resultados de seus modelos:

$$C_{wz} = \exp(k_{w1}w + 0,7768) \quad (\text{VI.1.1-8})$$

$$k_{w1} = 1/[24,289/w - 5,26] \quad (\text{VI.1.1-9})$$

$$C_{az} = k_{w2} \log_{10}(w) + k_{w3} \quad (\text{VI.1.1-10})$$

$$k_{w2} = -27,28w^{-1/2} - 6,5 \quad (\text{VI.1.1-11})$$

$$k_{w3} = 49,545w^{-1/2} + 23,9 \quad (\text{VI.1.1-12})$$

onde

$C_{wz}$  = fator de deriva do vento;

$C_{az}$  = ângulo de deriva do vento na profundidade  $z$  ;

$k_{w1}, k_{w2}, k_{w3}$  = constantes.

Para calcular o destino e a trajetória de uma pluma superficial de um produto flutuante, o modelo leva em consideração o transporte da pluma, o espalhamento superficial, o entranhamento na coluna d'água e a evaporação.

O espalhamento ocorre devido à dois processos, modelados separadamente por algoritmos previamente desenvolvidos para manchas de óleo: (1) o balanço entre as forças gravitacional, inércia, viscosidade e tensão superficial, que aumenta a real extensão de cada partícula (espalhamento gravitacional); e (2) espalhamento e cisalhamento da corrente, que afastam as partículas umas das outras (Elliott, 1986; Lehr, 1996). Um conjunto teórico de equações para o espalhamento gravitacional foi desenvolvido quase que simultaneamente por Fay (1971) e por Houtl (1972), com uma abordagem similar. Mackay *et al.* (1980) modificaram o modelo de Fay-Houtl através da formulação de mancha espesso-fina, através de uma formulação empírica baseada no comportamento de espalhamento terminal (Fay, 1971). Estas assumem que a mancha espessa contém entre 80 a 90% da massa total associada à mancha.

No modelo CHEMMAP, as partículas na superfície da água aumentam de diâmetro de acordo com o algoritmo empírico desenvolvido por Mackay *et al.* (1980). A taxa de mudança da área superficial, para o espalhamento da mancha espessa, em m<sup>2</sup>/s, é definida por:

$$\frac{dA}{dt} = K_1 A^{1/3} \left( \frac{V}{A} \right)^{4/3} \quad (\text{VI.1.1-13})$$

onde

- $A$  = área superficial da mancha (m<sup>2</sup>);
- $K_1$  = taxa de espalhamento constante (s<sup>-1</sup>);
- $V$  = volume da superfície da mancha (m<sup>3</sup>);
- $t$  = tempo (s).

A análise de sensibilidade deste algoritmo demonstrou que a solução é sensível ao número de partículas utilizadas. Com o objetivo de minimizar esta dependência, Kolluru (1992) derivou uma formulação, normalizando a solução para diferentes números de partículas superficiais.

A taxa de mudança da área superficial de uma única partícula,  $\bar{A}_{tk}$  (m<sup>2</sup>/s), é dada por:

$$\frac{dA_{th}}{dt} = K_1 A_{th}^{1/3} \left( \frac{V_s}{A_{th}} \right)^{4/3} \left( \frac{R_s}{R_e} \right)^{4/3} \quad (\text{VI.1.1-14})$$

onde

$A_{th}$  = área superficial de uma partícula (m<sup>2</sup>);

$K_1$  = taxa de espalhamento constante (s<sup>-1</sup>);

$V_s$  = volume de óleo de uma partícula (m<sup>3</sup>);

$R_s$  = raio de uma partícula (m);

$R_e$  = raio efetivo da superfície da mancha (m).

O raio efetivo da mancha superficial,  $R_e$  (m), (Kolluru, 1992) é dado por:

$$R_e = \left[ \left( \frac{1}{\pi} \right) \sum_{n=1}^N A_{tk} \right]^{1/2} \quad (\text{VI.1.1-15})$$

onde

$N$  = número de partículas usadas para representar a mancha superficial.

No CHEMMAP, as partículas movem-se individualmente e podem tanto se separar, quanto convergir, dependendo das correntes superficiais. O algoritmo de transporte inclui, ainda, um termo de difusão turbulenta aleatória, cuja função é separar as partículas e induzir o espalhamento.

Adicionalmente, se o produto flutuando na superfície entranha na coluna d'água, ele se dispersa verticalmente para baixo, em uma água que se move a uma velocidade mais lenta devido a resposta das forças meteorológicas. Caso estas partículas entranhadas voltem a superfície, elas estarão numa posição posterior à pluma da superfície, o que faz com que a pluma seja mais alongada na direção do vento.

Os processos de entranhamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna d'água por gotículas de óleo. O tamanho da partícula entranhada diminui com altos níveis de energia turbulenta e baixa viscosidade.

Plumas superficiais interagem com a linha de costa, dependendo das características e do tipo do material simulado e linha de costa. Os algoritmos utilizados para estes cálculos são os mesmos desenvolvidos para modelagens de óleo, em especial os desenvolvidos por French *et al.* (1999).

A dissolução de substâncias puras e de químicos de uma mancha de um solvente hidrofóbico ou de gotículas em suspensão (*i.e.* para formulações nas quais o produto está dissolvido em, ou está adsorvido à um solvente hidrofóbico) é tratada como o fluxo de massa através da área superficial da pluma ou gotícula (French *et al.* 1996a,b, 1999). O modelo desenvolvido por Mackay & Leinonem (1977) é utilizado para a dissolução da pluma superficial. A pluma (partículas) é considerada como uma placa circular e achatada, com o fluxo de massa relacionado à solubilidade e à temperatura (Hines & Maddox, 1985). Este assume uma camada não estratificada, com a maior resistência à transferência de massa a uma região estagnada hipotética (camada de água) próxima à pluma. Para gotículas em subsuperfície, a dissolução é considerada como um fluxo de massa através da área superficial da gotícula (tratada como uma esfera), num algoritmo análogo ao de Mackay & Leinonem (1977).

A taxa de dissolução de um químico puro ou solvente,  $\dot{N}_{i,d}$  (mols/s), é definida por:

$$\dot{N}_{i,d} = d \frac{N_{i,d}}{dt} = K_d (x_i C_i^s - C_i^w) A \quad (\text{VI.1.1-16})$$

onde

$i$  =  $i$ -ésima componente;

$A$  = área superficial da pluma ou partícula ( $\text{cm}^2$ );

$K_d$  = coeficiente de transferência de dissolução da massa ( $\text{cm/s}$ );

$x_i$  = fração molar da fase solvente do componente (1,0 para químicos puros);

$C_i^s$  = solubilidade do produto puro da componente  $i$  (mols/cm<sup>3</sup>);

$C_i^w$  = concentração do componente  $i$  na fase aquosa (mols/cm<sup>3</sup>).

Para químicos dissolvidos em solventes hidrofóbicos, a solubilidade do componente puro ( $C_i^s$ ) é definida por:

$$C_i^s = \frac{C_i^o}{P_i} \quad (\text{VI.1.1-17})$$

onde

$P_i$  = coeficiente de particionamento solvente-água para a componente  $i$ ;

$C_i^o$  = concentração da componente na fase solvente.

O coeficiente de transferência de massa para uma pluma superficial pode ser considerado similar à transferência de massa em uma placa achatada (Hines & Maddox, 1985). O coeficiente de transferência de dissolução da massa,  $K_{d_s}$  (m/s), é:

$$K_{d_s} = \frac{Sh D_{AB}}{L} \quad (\text{VI.1.1-18})$$

onde

$Sh$  = número de Sherwood médio;

$L$  = diâmetro da pluma superficial (m);

$D_{AB}$  = coeficiente de difusão a 25 °C (m<sup>2</sup>/s).

Para o cálculo de  $D_{AB}$ , utiliza-se o método de Hayduk & Laudie (Lyman *et al.*, 1982 *apud* Hines & Maddox, 1985).

$$D_{AB} = \left[ \frac{RT}{(\mu_w^{1,14}) (V_B^{0,589})} \right] \quad (\text{VI.1.1-19})$$

onde

$R$  = constante universal dos gases ( $8,206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol-K);

$T$  = temperatura (K);

$\mu_w$  = viscosidade da água a 25 °C (cp);

$V'_B$  = volume molar de Le Bas (cm<sup>3</sup>/mols).

A viscosidade da água varia com a temperatura e com a seguinte equação, ajustada à dados empíricos:

$$\mu_w = \exp \left[ -24,71 + \left( \frac{4.209}{T} \right) + 0,04527T - 0,00003376T^2 \right] \quad (\text{VI.1.1-20})$$

O volume molar de Le Bas de químicos orgânicos e inorgânicos representativos, foram obtidos através da regressão do peso molecular, a seguir:

$$\text{Inorgânicos: } V'_B = 2,8047(MW^{0,651}) \quad (\text{VI.1.1-21})$$

$$\text{Orgânicos: } V'_B = 4,9807(MW^{0,6963}) \quad (\text{VI.1.1-22})$$

onde

$MW$  = peso molecular (g/mol).

Os volumes molares para os químicos orgânicos e inorgânicos foram obtidos em Mackay *et al.* (1992).

O número de Sherwood médio é obtido através da equação:

$$Sh = 0,578Sc^{1/3} Re_L^{1/2} \quad (\text{VI.1.1-23})$$

onde

$Sc$  = número do Schmidt;

$Re_L$  = número de Reynolds.

O número de Schmidt é definido por:

$$Sc = \frac{\gamma}{D_{AB}} \quad (\text{VI.1.1-24})$$

$$\gamma = 10^{-6} \frac{\mu_w}{\rho_w} \quad (\text{VI.1.1-25})$$

onde

$\gamma$  = viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s);

$\rho_w$  = densidade da água (g/cm<sup>3</sup>).

O número de Reynolds é definido por:

$$Re_L = \frac{U_w L}{\gamma} \quad (\text{VI.1.1-26})$$

onde

$U_w$  = velocidade do vento (m/s);

O coeficiente de transferência de massa para gotículas de sub-superfície é similar à transferência de massa para gotículas esféricas (Hines & Maddox, 1985). O coeficiente de transferência de dissolução da massa,  $K_{d_{ss}}$  (m/s), é definido por:

$$K_{d_{ss}} = \frac{Sh D_{AB}}{d} \quad (\text{VI.1.1-27})$$

onde

$Sh$  = número de Sherwood médio;

$d$  = diâmetro da gotícula (m);

$D_{AB}$  = coeficiente de difusão a 25 °C (m<sup>2</sup>/s).

O número de Sherwood médio, para este caso, é definido como:

$$Sh = 2 + 0,552 Re_d^{0,5} Sc^{1/3} \quad (VI.1.1-28)$$

onde

$Sc$  = número do Schmidt;

$Re_d$  = número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula.

Com o número de Reynolds,  $Re_d$ , definido por:

$$Re_d = \frac{Wd}{\gamma} \quad (VI.1.1-29)$$

onde

$W$  = velocidade resultante atuando na gotícula (m/s);

Uma vez que a dissolução ocorreu, o químico na coluna d'água é tratado como parcialmente dissolvido e parcialmente adsorvido à partículas de sedimento em suspensão. Assume-se, então, um particionamento de proporções constantes entre estas frações (baseado na teoria de equilíbrio linear, utilizando-se o  $K_{oc}$  do químico em questão). Sólidos descartados na forma particulada se dissolvem e são, então, particionados entre as formas dissolvida e particulada na coluna d'água, através do equilíbrio de particionamento.

A razão entre as concentrações adsorvidas,  $C_a$ , e dissolvidas,  $C_{dis}$ , é calculada através da teoria padrão equilíbrio de particionamento, a seguir:

$$\frac{C_a}{C_{dis}} = K_{oc} C_{ss} \quad (VI.1.1-30)$$

onde

$K_{oc}$  = coeficiente de partição entre o carbono orgânico e a água (adimensional);

$C_{ss}$  = concentração de materiais particulados em suspensão na coluna d'água, expresso como a massa do particulado pelo volume da água.

A massa total da fração adsorvida,  $C_a / (C_a + C_{dis})$ , afunda através da coluna d'água, a uma taxa de sedimentação  $V_s$ . Assume-se que o químico se adsorve a partículas de silte de 50  $\mu\text{m}$  e densidade de 1,0512  $\text{g/cm}^3$ . Através da Lei de Stokes, a taxa de sedimentação é de aproximadamente 3 m/dia na água do mar (densidade de 1,024  $\text{g/cm}^3$ ) e águas calmas.

Assume-se que a sedimentação não ocorra em águas nas quais as ondas são influenciadas pelo fundo (*i.e.* ondas de águas rasas ou transicionais, ao contrário ondas de águas profundas).

A altura e o período das ondas são calculados com base em CERC (1984). O comprimento de onda é calculado através do período e da profundidade. As ondas passam de águas profundas à transicionais e, posteriormente, à ondas de águas rasas, quando a profundidade for menor que a metade do comprimento da onda (CERC, *op.cit.*).

A evaporação é calculada de acordo com a Lei de Raoult. A taxa de evaporação por unidade de área,  $E$  ( $\text{g/m}^2\text{h}$ ), de um químico flutuando na superfície (Mackay & Matsugu, 1973), é definida por:

$$E = \frac{K_e M W P_{vp}}{RT} \quad (\text{VI.1.1-31})$$

onde

$K_e$  = coeficiente de transferência de massa por evaporação ( $\text{m/h}$ );

$MW$  = peso molecular ( $\text{g/mol}$ );

$P_{vp}$  = pressão de vapor ( $\text{atm}$ );

$R$  = constante universal dos gases ( $8,206 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$ );

$T$  = temperatura ( $\text{K}$ ).

A temperatura é considerada a mesma definida para a superfície da água. O coeficiente de transferência de massa por evaporação,  $K_e$  ( $\text{m/h}$ ), é definido por (Mackay & Matsugu, 1973):

$$K_e = 0,0292U^{0,78} L^{-0,11} Sc_a^{-0,67} \quad (\text{VI.1.1-32})$$

onde

- $U$  = velocidade do vento a 10 m de altura (m/h);  
 $L$  = diâmetro da pluma ou partícula flutuante (m);  
 $Sc_a$  = número do Schmidt para o químico no ar.

O número de Schmidt para o químico no ar é obtido através da divisão da viscosidade cinemática do ar ( $0,15 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) pela difusividade do químico no ar,  $D_{ar}$ , baseado em Thibodeaux (1979):

$$D_{ar} = D_{ref} \text{SQRT} \left( \frac{MW_{ref}}{MW} \right) \quad (\text{VI.1.1-33})$$

onde

- $D_{ref}$  = difusividade no ar de um químico de referência ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  
 $MW_{ref}$  = peso molecular de um químico de referência (g/mol).

Os químicos de referência são: o cumene para  $MW > 100 \text{ g/mol}$  ( $D_{ar} = 0,0556$  e  $MW_{ref} = 120$ ; Mackay & Matsugu, 1973) e o pentano para  $MW \leq 100 \text{ g/mol}$  ( $D_{ar} = 0,071$  e  $MW_{ref} = 72,15$ ; Kawamura & Mackay, 1987).

A volatilização de químicos dissolvidos para a atmosfera é função da pressão de vapor e da solubilidade. O CHEMMAP utiliza o procedimento esquematizado por Lyman *et al.* (1982 *apud* Hines & Maddox, 1985), baseado em na Lei de Henry e no fluxo de massa. A profundidade de volatilização para as substâncias dissolvidas é limitada a camada de mistura superior, estimada a partir da profundidade de difusão ou como metade da altura da onda, estimada a partir da velocidade do vento (CERC, 1984).

A Lei de Henry utiliza a constante da Lei de Henry. Caso esta não tenha sido especificada, ela é calculada através do vapor de pressão do químico (que por sua vez está fortemente relacionado com a temperatura), solubilidade e peso molecular (Lyman *et al.* 1982 *apud* Hines & Maddox, 1985), dado por:

1) Cálculo da constante da Lei de Henry ( $H$ ):

$$H = \frac{P_{vp}}{(S / MW)} \quad (\text{VI.1.1-34})$$

onde

$P_{vp}$  = pressão de vapor (atm);

$S$  = solubilidade (mg/L);

$MW$  = peso molecular (g/mol).

2) Para  $H < 3 \times 10^{-7}$ , a volatilização pode ser desprezada.

3) Para  $H > 3 \times 10^{-7}$ , calcula-se a constante adimensional da Lei de Henry ( $H'$ ):

$$H' = \frac{H}{RT} \quad (\text{VI.1.1-35})$$

onde

$R$  = constante universal dos gases ( $8,206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol-K);

$T$  = temperatura (K).

4) Cálculo do coeficiente de mudança da fase líquida ( $K_5$ , cm/h):

$$K_5 = 20 \sqrt{\frac{44}{MW}} \quad (\text{VI.1.1-36})$$

5) Cálculo do coeficiente de mudança da fase gasosa ( $K_6$ , cm/h):

$$K_6 = 3.000 \sqrt{\frac{18}{MW}} \quad (\text{VI.1.1-37})$$

6) Cálculo do coeficiente de transferência de massa total ( $K_7$ , cm/h):

$$K_7 = \frac{(H' K_5 K_6)}{(H' K_6 + K_5)} \quad (\text{VI.1.1-38})$$

A taxa de transferência de massa da coluna d'água para a atmosfera passa a ser, então:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{K_7 m}{d} \quad (\text{VI.1.1-39})$$

na qual  $m$  é a massa do poluente, considerada igualmente distribuída na profundidade  $d$ . A profundidade de volatilização para substâncias dissolvidas é limitada, no máximo, a metade da altura da onda, ou a profundidade de difusão  $d$ :

$$d = \sqrt{2D_z \Delta t} \quad (\text{VI.1.1-40})$$

onde

$D_z$  = difusividade vertical ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\Delta t$  = passo de tempo do modelo (s).

Um modelo de dispersão atmosférica é incorporado ao CHEMMAP com a função de estimar as concentrações das substâncias simuladas no ar, até uma camada de 2 m de altura (*i.e.* até aproximadamente a altura que uma pessoa possa ser exposta à estas). O fluxo de massa para a atmosfera é rastreado através de uma abordagem lagrangiana, análoga ao transporte na água. A substância é transportada no ar pelo vento, e sofre degradação de acordo com as taxas especificadas.

A massa se dispersa horizontalmente devido à turbulência, através de uma taxa constante especificada (coeficiente de dispersão horizontal), ou através do algoritmo de Gifford (1961), descrito em Csanady (1973). O coeficiente de dispersão horizontal calculado pelo modelo é função da velocidade do vento e da estabilidade do ar, definida como moderadamente estável, ligeiramente estável, neutra, ligeiramente instável e moderadamente instável, baseadas em Turner (1970).

A massa também é dispersada para cima pela turbulência, que é dependente da velocidade do vento. A aproximação básica utiliza a teoria da camada

planetária e a teoria de comprimento de mistura (descrito em vários livros de dinâmica dos fluidos, e.g. Holton, 1979). Nesta teoria, a variação vertical da velocidade e atrito é definida por uma lei logarítmica. Esta fornece a seguinte relação:

$$Dz = L^2 \frac{du}{dz} \quad (\text{VI.1.1-41})$$

onde

$Dz$  = taxa de mistura vertical;

$L$  = comprimento de mistura;

$\frac{du}{dz}$  = cisalhamento da velocidade vertical.

Esta pode ser aproximada como:

$$Dz = zU^* \quad (\text{VI.1.1-42})$$

$$U^* = \sqrt{\frac{bs}{\rho_{ar}}} \quad (\text{VI.1.1-43})$$

onde

$bs$  = tensão do fundo;

$\rho_{ar}$  = densidade do ar ( $\text{g/cm}^3$ ).

Em resumo:

$$Dz = zW_v(Cd)^{1/2} \quad (\text{VI.1.1-44})$$

onde

$W_v$  = velocidade do vento a 10 m (m/h);

$Cd$  = atrito do fundo ( $\sim 0,0013$ ).

Esta fornece o coeficiente de difusão turbulenta, calculado a partir da velocidade do vento, e que permite a resolução do termo de difusão:

$$Dz * d(dC / dz) / dz \quad (\text{VI.1.1-45})$$

onde

$C$  = concentração do químico no ar, especificado na interface devido ao fluxo com a água.

Considera-se que a bioturbação nos primeiros 10 cm do sedimento misture completamente a massa do químico sedimentado, na escala de tempo de interesse (dias a semanas), de forma que a concentração seja calculada, simplesmente, como a massa pela área dividida por 10 cm. As concentrações do contaminante no sedimento são distribuídas entre as formas adsorvidas e dissolvidas através do equilíbrio de particionamento, como na coluna d'água. A razão de particulados para água intersticial é considerada como 0,45 (CERC, 1984).

A degradação é estimada através da taxa de decaimento constante especificada para ambiente em que a massa se encontre (*i.e.* na atmosfera, superfície ou coluna d'água ou sedimento). O algoritmo de decaimento é dado por:

$$M_t = M_0 e^{-kt} \quad (\text{VI.1.1-46})$$

onde

- $t$  = tempo (dias);
- $M_t$  = massa remanescente no instante  $t$ ;
- $M_0$  = massa descartada no instante 0;
- $k$  = taxa de decaimento instantâneo ( $\text{dia}^{-1}$ ).

A meia-vida,  $t(1/2)$ , do químico no ambiente é calculado através da equação:  $M_t / M_0 = 0,5 = e^{-kt(1/2)}$ , que pode ser reagrupada como:

$$t(1/2) = -\ln(0,5) / K = 0,693 / K \quad (\text{VI.1.1-47})$$

ou

$$k = 0,693 / t(1/2) \quad (\text{VI.1.1-48})$$

## VI.2 DADOS DE ENTRADA

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:

- ✓ localização geográfica do ponto de derrame;
- ✓ data e horário;
- ✓ duração do derrame;
- ✓ volume derramado;
- ✓ profundidade de descarte;
- ✓ tipo de produto;
- ✓ duração da simulação;
- ✓ opções de resposta (e.g. barreiras);
- ✓ campo de correntes;
- ✓ arquivo de dados meteorológicos;
- ✓ concentração de sedimentos em suspensão;
- ✓ temperatura, salinidade e densidade do corpo d'água receptor;
- ✓ opções de saída;
- ✓ parâmetros de simulação:
  - fator de vento;
  - número de partículas;
  - coeficiente de dispersão horizontal;
  - coeficiente de dispersão vertical;
  - passo de tempo do modelo.

Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo.

## VI.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

### VI.3.1 Cenários Probabilísticos

As simulações para a determinação da dispersão e diluição da água produzida no campo afastado foram realizadas utilizando-se o modelo CHEMMAP no modo probabilístico. Como neste modo é considerada a variabilidade das forçantes ambientais, as simulações de comportamento da pluma são realizadas através da variação das condições meteorológicas e oceanográficas, divididas em duas condições principais correspondendo aos períodos de verão (janeiro a março) e inverno (julho a setembro). O campo hidrodinâmico de cada período, utilizado para as simulações do comportamento da pluma foram obtidos a partir do modelo hidrodinâmico apresentado no Capítulo III, assim como os dados de vento utilizados, apresentados no Capítulo II.

Para incorporar essas variabilidades, cada cenário probabilístico foi composto por uma série de 20 simulações com o modelo CHEMMAP, com duração de 24 horas, divididas em dois períodos: verão e inverno.

Nas simulações probabilísticas, para a determinação da área de influência do descarte de água produzida, as múltiplas trajetórias das plumas foram utilizadas para a produção de curvas de contorno para as máximas concentrações esperadas de cada componente químico em cada ponto de grade. Ou seja, ao final de cada uma das simulações, registra-se o máximo valor de concentração na coluna d'água para cada ponto de grade, e ao final de todas as 20 simulações calcula-se a média de todas as máximas obtidas.

Os compostos químicos considerados nas simulações do descarte de água produzida foram: BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno), fenóis totais, hidrocarbonetos poliaromáticos - HPAs (benzo(a)antraceno, naftalenos), metais (cobre dissolvido e manganês total), carbono orgânico total e salinidade.

Como critério ambiental, foram utilizadas as concentrações correspondentes à Concentração de Efeito Não Observado (CENO) e à Concentração de Efeito Observado (CEO) da água produzida, obtidas nos testes de toxicidade com o equinodermo *Lytechinus variegatus*. A tabela VI.3.1-1 apresenta os valores de CENO e CEO, e o fator de diluição destes para a água produzida utilizada neste

estudo. De acordo com esta tabela, selecionou-se o valor de CENO, por ser mais conservativo. Assim, a concentração do critério ambiental ficou definida como a concentração no efluente tratado diluído pelo fator de diluição do CENO apresentado nesta tabela.

**Tabela VI.3.1-1 - Resultados dos testes de toxicidade com o equinodermo *Lytechinus variegatus* realizados com amostras de água produzida.**

| EFLUENTE        | CENO** |                   | CEO*** |                   |
|-----------------|--------|-------------------|--------|-------------------|
|                 | %      | FATOR DE DILUIÇÃO | %      | FATOR DE DILUIÇÃO |
| Água produzida* | 2,5    | 1:40              | 5,0    | 1:20              |

\* Origem do efluente: PPM-1;

\*\* Concentração de Efeito Não Observado;

\*\*\* Concentração de Efeito Observado.

Fonte: PETROBRAS.

Como critério de parada das simulações probabilísticas e para apresentação dos resultados, foi utilizada a concentração correspondente a 10.000 vezes a concentração inicial do efluente. Esses cortes foram escolhidos, para melhorar a visualização das manchas de probabilidade e, dessa forma, auxiliar o desenvolvimento de possíveis trabalhos de monitoramento ambiental na área do empreendimento. No caso da salinidade, foi utilizado como critério de parada o valor de salinidade do meio (ver item II.4), atingido ainda dentro dos limites do campo próximo. Dessa forma, não são apresentadas figuras para a salinidade.

### VI.3.2 Cenários Determinísticos

A análise dos resultados das simulações probabilísticas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos de verão e inverno. Para essas simulações foram considerados como mais críticos os cenários que apresentaram as maiores concentrações, nas proximidades do ponto de descarte, dos compostos simulados.

Como critério de parada das simulações determinísticas e para apresentação dos resultados, também foram utilizadas as concentrações iguais a 10.000 vezes a concentração inicial do efluente.



## VII MODELAGEM DO DESCARTE DE ÁGUA PRODUZIDA

A tabela VII-1 apresenta as concentrações iniciais dos componentes da água produzida, as concentrações referentes às diluições calculadas para o valor do CENO (critério ambiental), as concentrações referentes à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial do efluente (concentração limite) e o valor de salinidade do meio.

**Tabela VII-1 - Concentrações dos compostos simulados no ponto de lançamento, valores correspondentes à diluição para o valor do CENO, valores limites de concentração (diluição de 10.000 vezes a concentração inicial) e o valor de salinidade da região de descarte.**

| COMPONENTES                   | CONCENTRAÇÃO NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L)        | CRITÉRIO AMBIENTAL(CENO) DILUIÇÃO 1:40 (µg/L) | CONCENTRAÇÃO LIMITE DILUIÇÃO 1:10.000 (µg/L) |
|-------------------------------|---|---|--|
| <b>Parâmetros inorgânicos</b> |   |   |  |
| Cobre dissolvido              | 140,0   | 3,50  | 0,014  |
| Manganês total                | 60,0  | 1,50  | 0,006  |
| <b>Parâmetros orgânicos</b>   |   |   |  |
| Benzeno                       | 630,0   | 15,75   | 0,063  |
| Tolueno                       | 480,0   | 12,00   | 0,048  |
| Etilbenzeno                   | 50,0  | 1,25  | 0,005  |
| Fenóis totais                 | 342,0   | 8,55  | 0,0342                                       |
| Benzo(a)antraceno             | 0,11  | 0,0028  | 0,000011                                     |
| Naftalenos                    | 5,67  | 0,14  | 0,000567                                     |
| Carbono orgânico total        | 153.000,0   | 3.285,00                                      | 15,3   |
| <b>COMPONENTE</b>             | <b>CONCENTRAÇÃO NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L)</b> | <b>CONCENTRAÇÃO NO MEIO (µg/L)</b>            |  |
| Salinidade                    | 77.987.000,0                                      | 36.759.250,0                                  |  |

A seguir, são apresentados os resultados das simulações de campo próximo e campo afastado para o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.

## VII.1 RESULTADOS DA DILUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO

A tabela VII.1-1 apresenta os resultados das simulações no campo próximo para a água produzida do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras. Observa-se que a diluição é maior no período de inverno (403 vezes) do que no período de verão (313 vezes).

**Tabela VII.1-1 - Resultados das simulações do campo próximo.**

| PARÂMETROS                         | VALORES |         |
|------------------------------------|---------|---------|
|                                    | VERÃO   | INVERNO |
| Diluição                           | 313,4   | 403,0   |
| Espessura da pluma (m)             | 3,3     | 3,9     |
| Comprimento da zona de mistura (m) | 27,5    | 31,5    |
| Profundidade terminal da pluma (m) | 20,4    | 23,0    |

A tabela VII.1-2 apresenta as concentrações iniciais dos componentes e as concentrações correspondentes à diluição no final do campo próximo. Salienta-se que, no caso da salinidade, o critério de parada adotado (*i.e.* valor do meio, 36.759,25 mg/L) é atingido ainda dentro do campo próximo, nas proximidades do ponto de lançamento.

**Tabela VII.1-2 - Concentrações dos compostos simulados no ponto de lançamento e valores correspondentes à diluição no campo próximo.**

| COMPONENTES            | CONCENTRAÇÃO NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L) | CONCENTRAÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO (µg/L) |              |
|------------------------|--|--------------------------------------|--------------|
|                        |  | VERÃO                                | INVERNO      |
| <b>BTEX</b>            |  |                                      |              |
| Benzeno                | 630,0                                      | 2,01                                 | 1,56         |
| Tolueno                | 480,0                                      | 1,53                                 | 1,19         |
| Etilbenzeno            | 50,0                                       | 0,16                                 | 0,12         |
| <b>HPAs</b>            |  |                                      |              |
| Benzo(a)antraceno      | 0,11                                       | 0,00035                              | 0,00027      |
| Naftalenos             | 5,67                                       | 0,02                                 | 0,01         |
| Fenóis totais          | 342,0                                      | 1,09                                 | 0,85         |
| <b>METAIS</b>          |  |                                      |              |
| Cobre dissolvido       | 630,0                                      | 0,45                                 | 0,35         |
| Manganês total         | 480,0                                      | 0,19                                 | 0,15         |
| Carbono orgânico total | 153.000,0                                  | 488,19                               | 379,65       |
| Salinidade             | 77.987.000,0                               | 36.759.250,0                         | 36.759.250,0 |

## VII.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

A seguir, são apresentadas as curvas de contorno das plumas de dispersão para as médias das máximas concentrações dos componentes químicos simulados para o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras. Os contornos das plumas de água produzida apresentados nas figuras estendem-se até a diluição de 10.000 vezes a concentração inicial do efluente (tabela VII-1). Cabe ressaltar que a área ilustrada nas figuras representa a média das máximas concentrações obtidas em todas as 20 simulações, e não corresponde à posição da pluma em um determinado instante de tempo. São apresentadas ainda, tabelas com os valores das concentrações máximas obtidas para essas simulações, às distâncias de 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento.

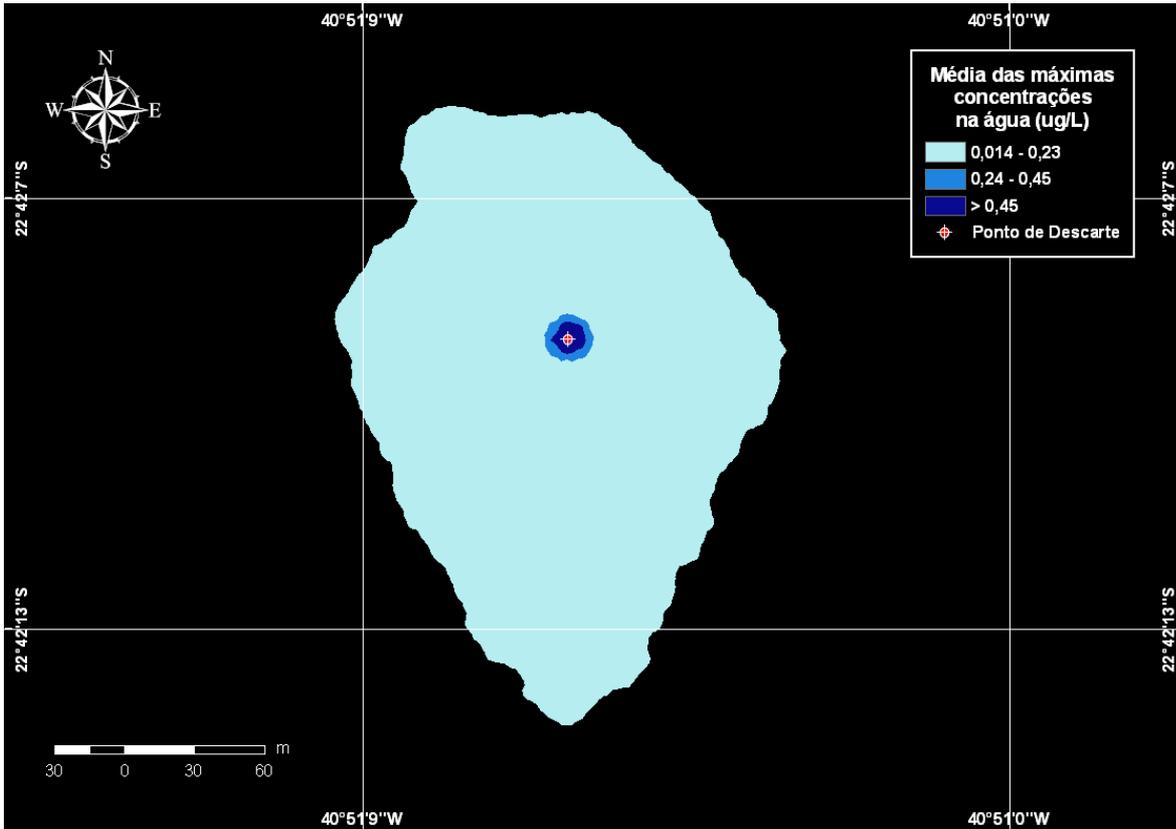
### VII.2.1 Resultados das Simulações dos Parâmetros Inorgânicos

A tabela VII.2.1-1, a seguir, apresenta os valores de concentração obtidos para os parâmetros inorgânicos, durante os períodos de verão e inverno, à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento.

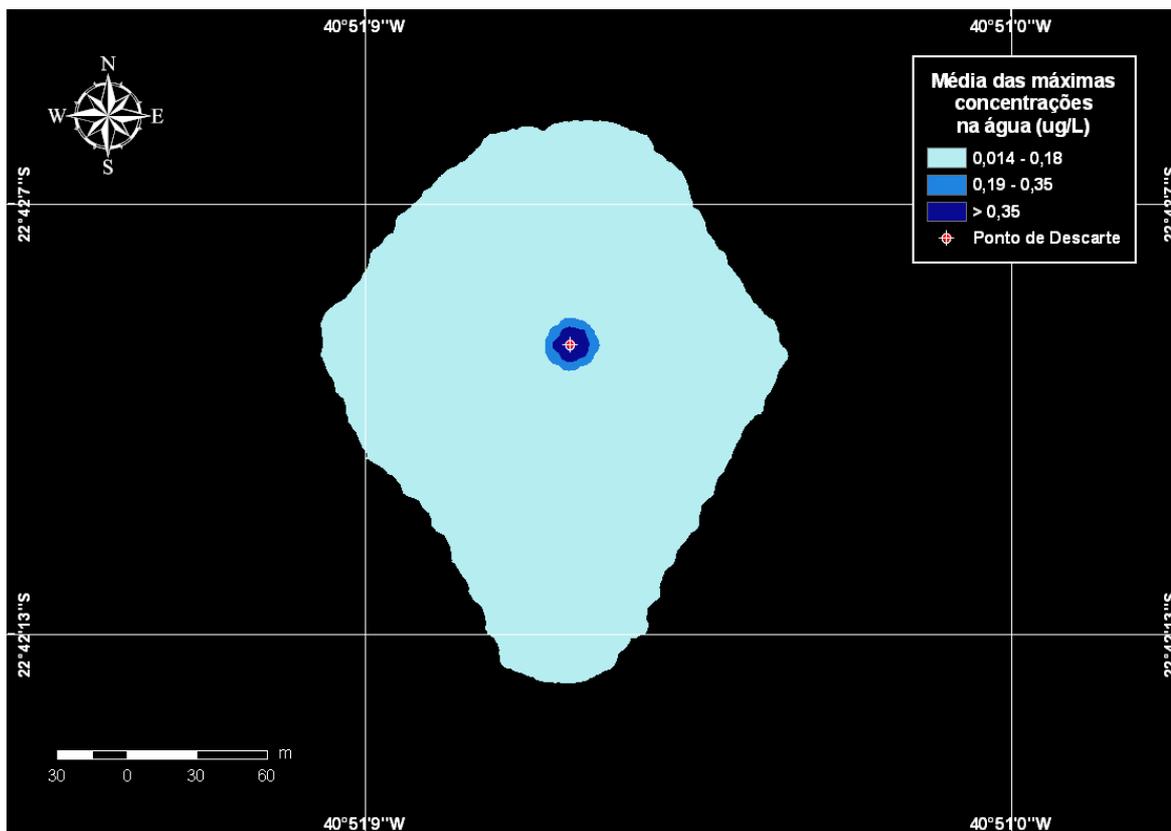
**Tabela VII.2.1-1 - Máximas concentrações obtidas para os parâmetros inorgânicos à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.**

| COMPONENTES      | CONCENTRAÇÃO A 100 m (µg/L) |         | CONCENTRAÇÃO A 250 m (µg/L) |         | CONCENTRAÇÃO A 500 m (µg/L) |         |
|------------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                  | VERÃO                       | INVERNO | VERÃO                       | INVERNO | VERÃO                       | INVERNO |
| Cobre dissolvido | 0,025                       | 0,021   | 0,0110                      | 0,0071  | 0,0043                      | 0,0028  |
| Manganês total   | 0,019                       | 0,014   | 0,0150                      | 0,0094  | 0,0110                      | 0,0080  |

As figuras VII.2.1-1 e VII.2.1-2 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o cobre dissolvido, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 0,014 µg/L.

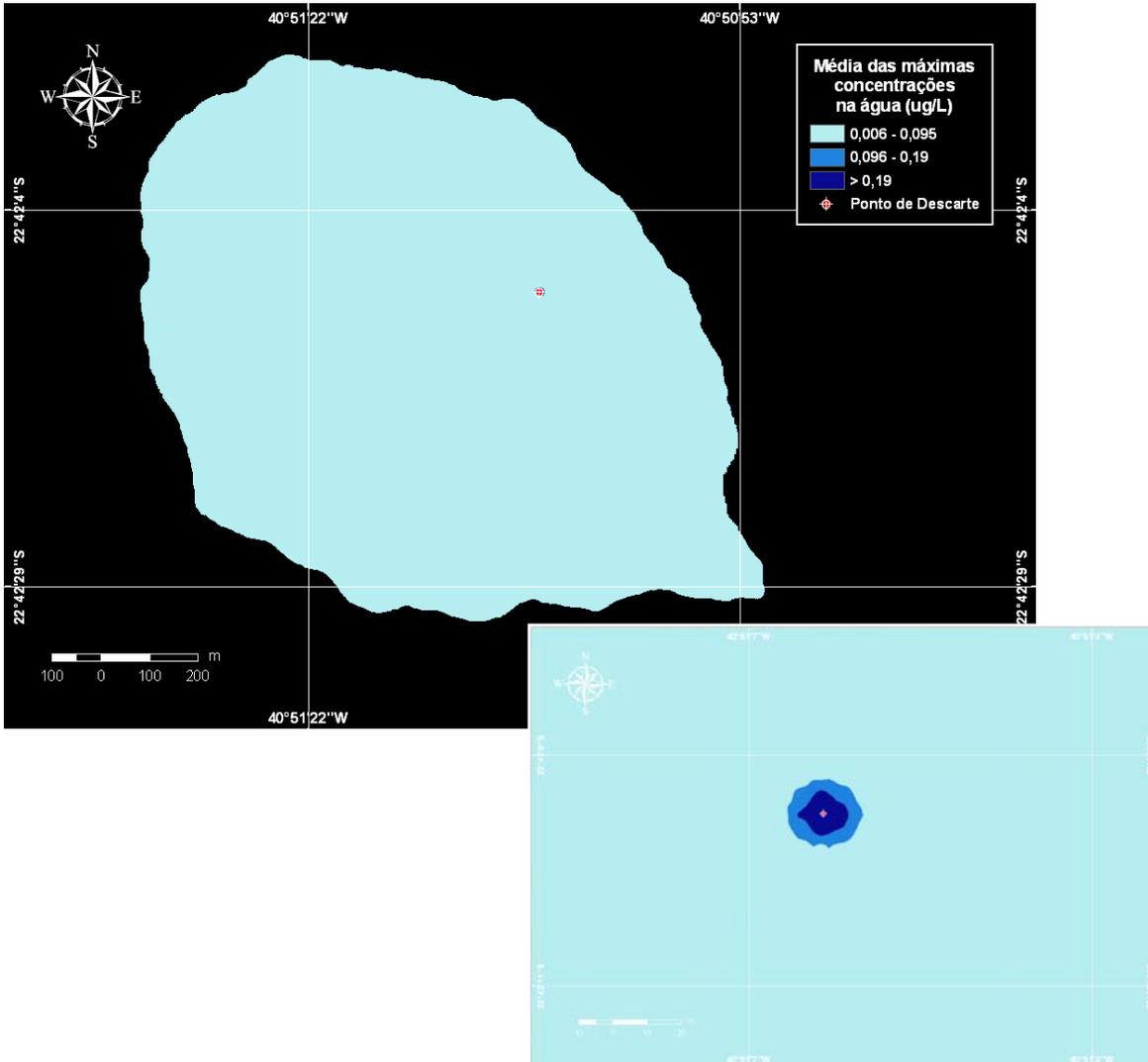


**Figura VII.2.1-1 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

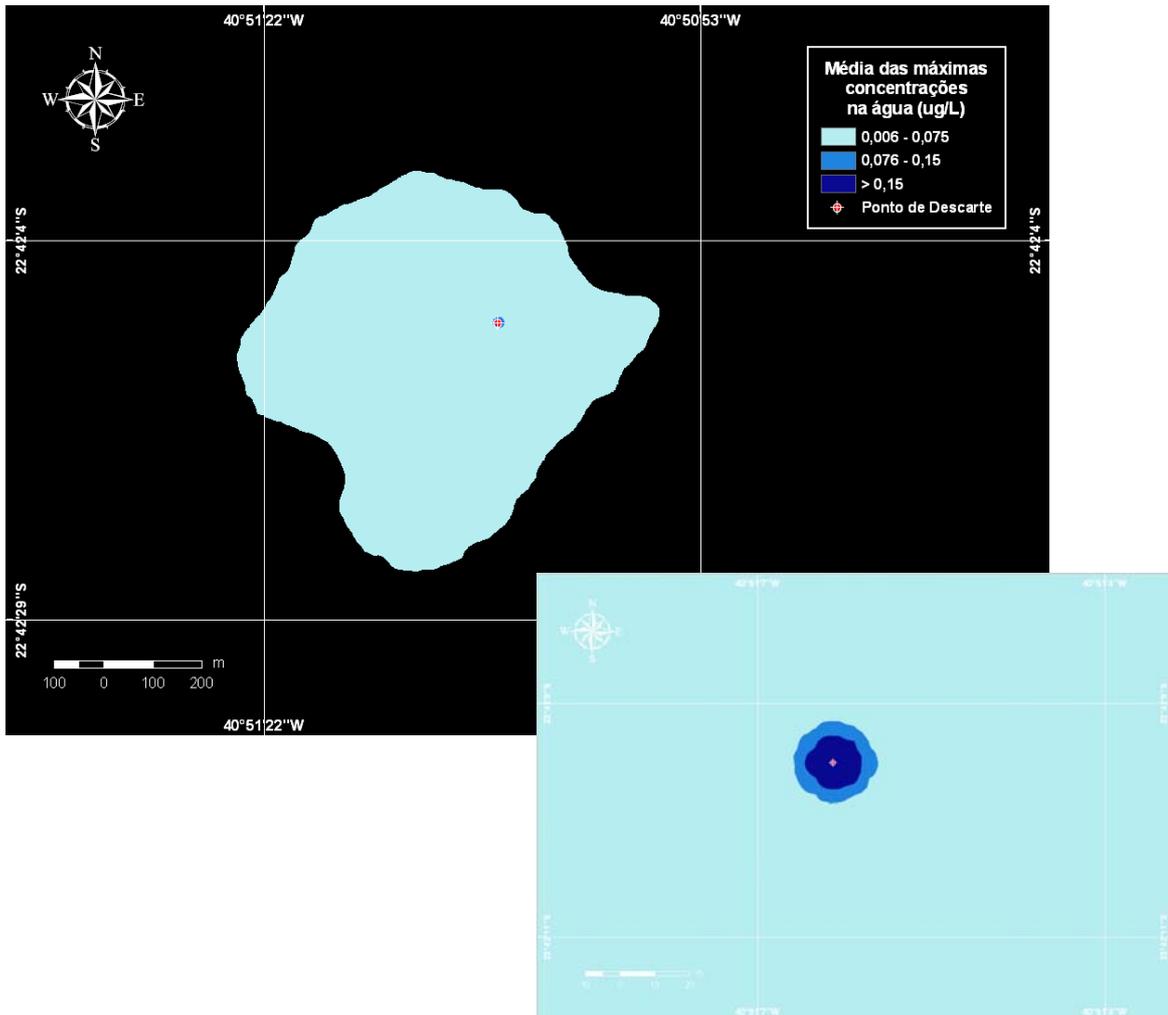


**Figura VII.2.1-2 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.2.1-3 e VII.2.1-4 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o manganês total, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,006 \mu\text{g/L}$ .



**Figura VII.2.1-3 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.**



**Figura VII.2.1-4** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas.

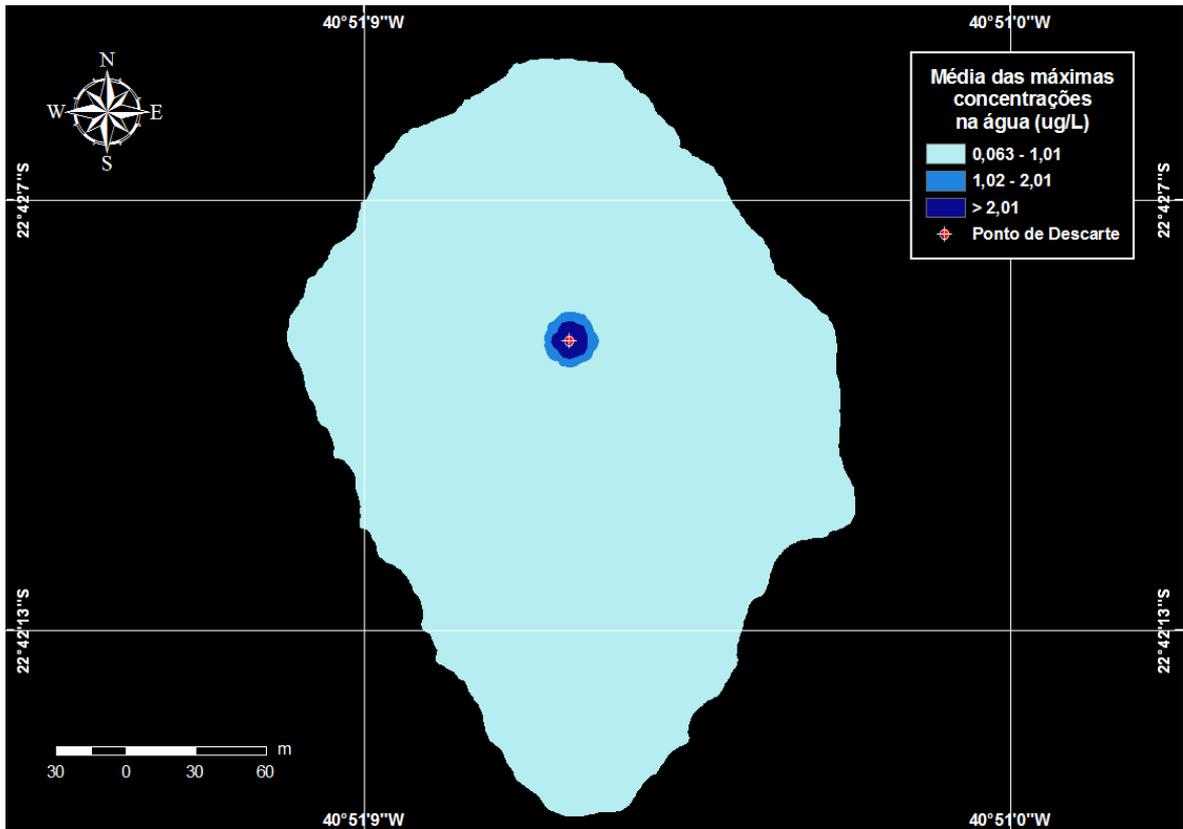
## VII.2.2 Resultados das Simulações dos Parâmetros Orgânicos

A tabela VII.2.2-1, a seguir, apresenta os valores de concentração obtidos para os parâmetros orgânicos, durante os períodos de verão e inverno, à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento.

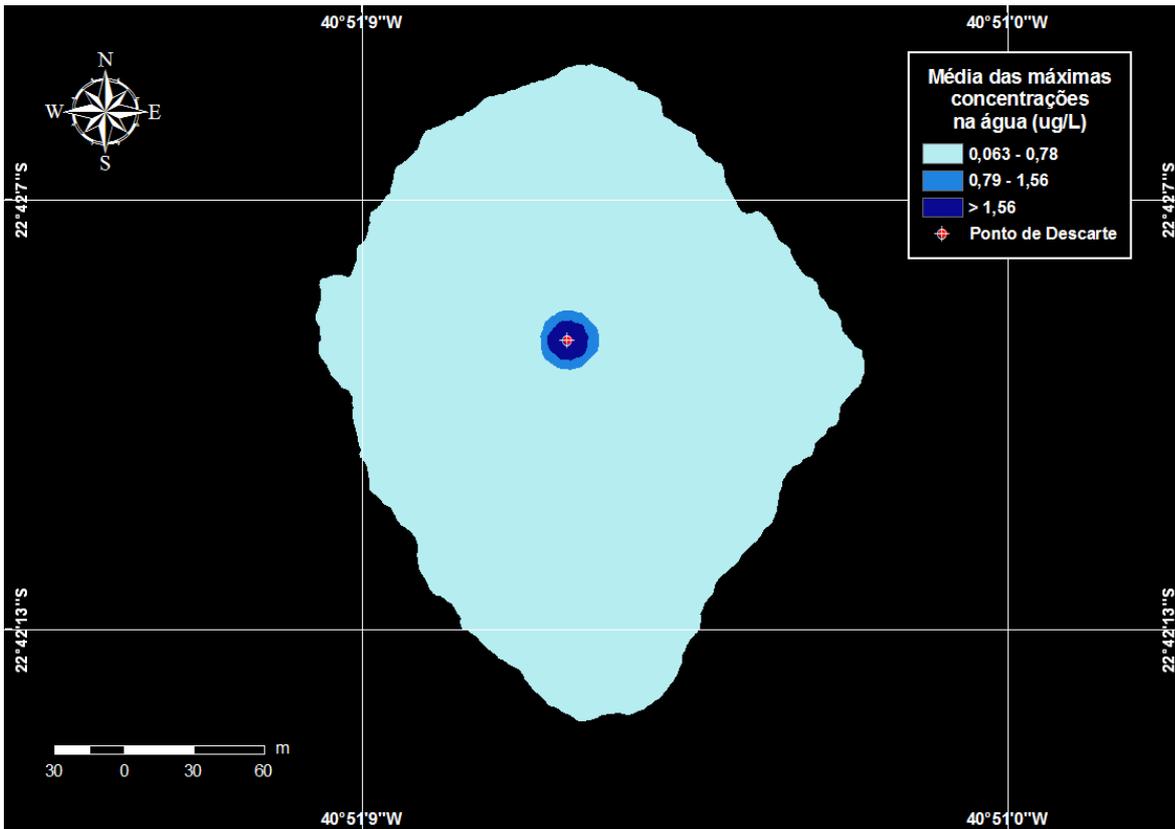
**Tabela VII.2.2-1 - Máximas concentrações obtidas para os parâmetros orgânicos à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.**

| COMPONENTES            | CONCENTRAÇÃO A 100 m (µg/L) |         | CONCENTRAÇÃO A 250 m (µg/L) |         | CONCENTRAÇÃO A 500 m (µg/L) |          |
|------------------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------|----------|
|                        | VERÃO                       | INVERNO | VERÃO                       | INVERNO | VERÃO                       | INVERNO  |
| Benzeno                | 0,12                        | 0,12    | 0,053                       | 0,045   | 0,029                       | 0,022    |
| Tolueno                | 0,093                       | 0,095   | 0,040                       | 0,035   | 0,022                       | 0,017    |
| Etilbenzeno            | 0,013                       | 0,015   | 0,008                       | 0,01    | 0,0057                      | 0,0078   |
| Fenóis totais          | 0,066                       | 0,065   | 0,029                       | 0,025   | 0,015                       | 0,012    |
| Benzo(a)antraceno      | 0,00020                     | 0,00015 | 0,00015                     | 0,00011 | 0,000090                    | 0,000089 |
| Naftalenos             | 0,0062                      | 0,0065  | 0,0051                      | 0,0047  | 0,0040                      | 0,0036   |
| Carbono orgânico total | 29,5                        | 30,18   | 12,84                       | 11,04   | 6,96                        | 5,37     |

As figuras VII.2.2-1 e VII.2.2-2 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para benzeno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 0,063 µg/L.

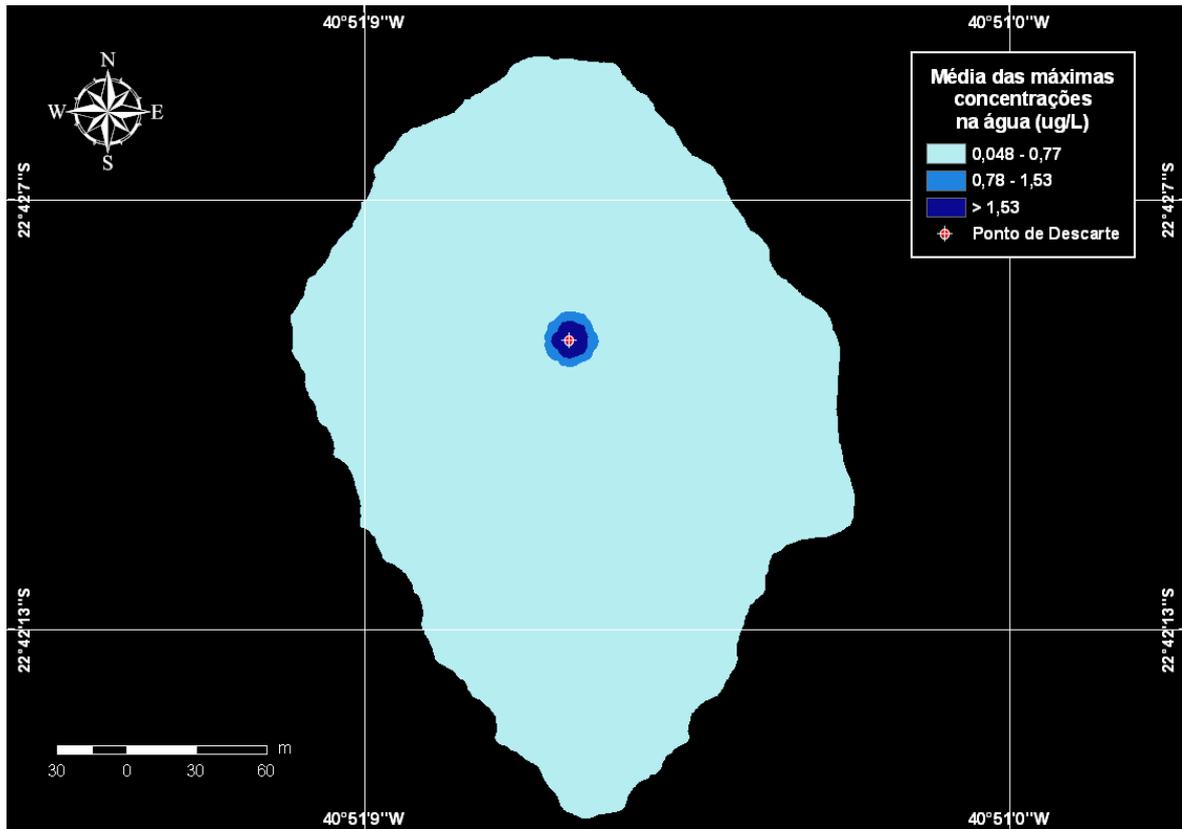


**Figura VII.2.2-1 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

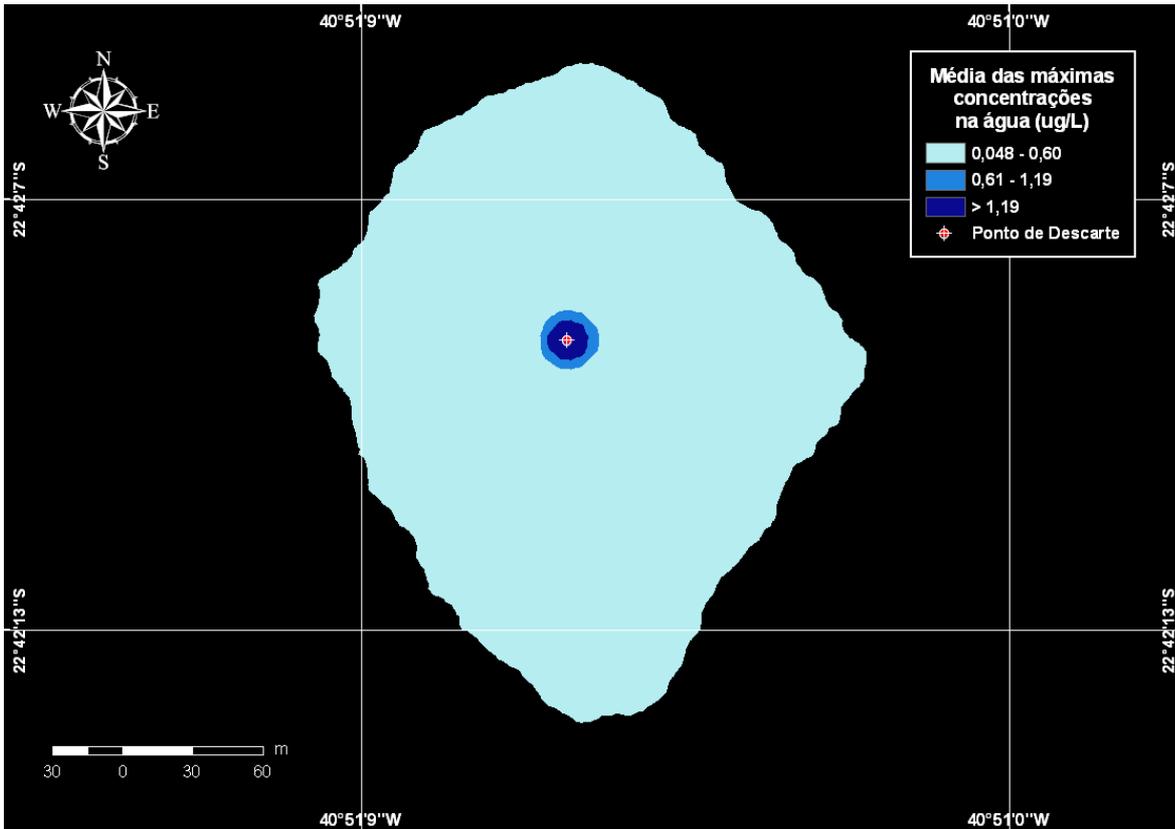


**Figura VII.2.2-2 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.2.2-3 e VII.2.2-4 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o tolueno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,048 \mu\text{g/L}$ .

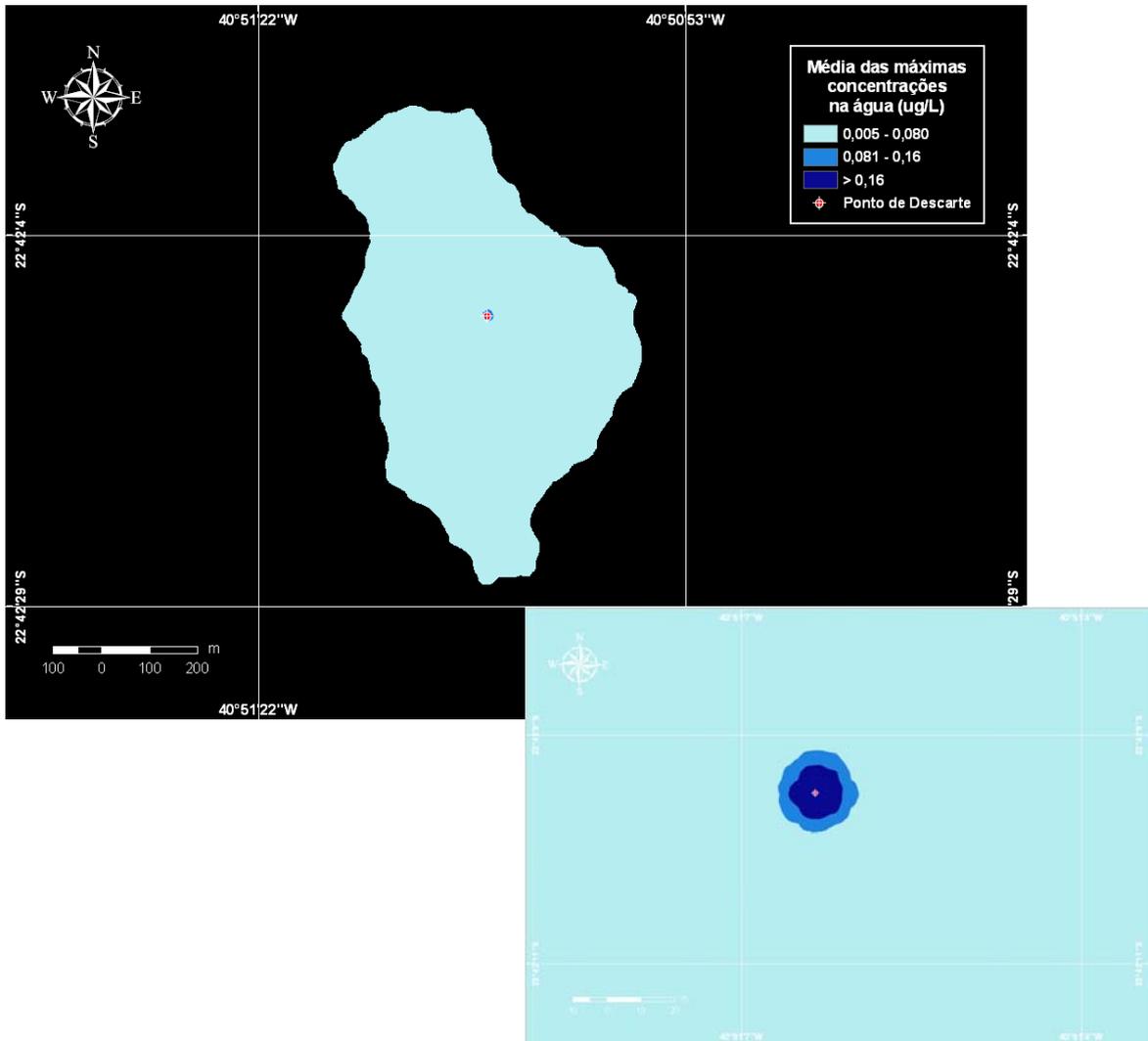


**Figura VII.2.2-3 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

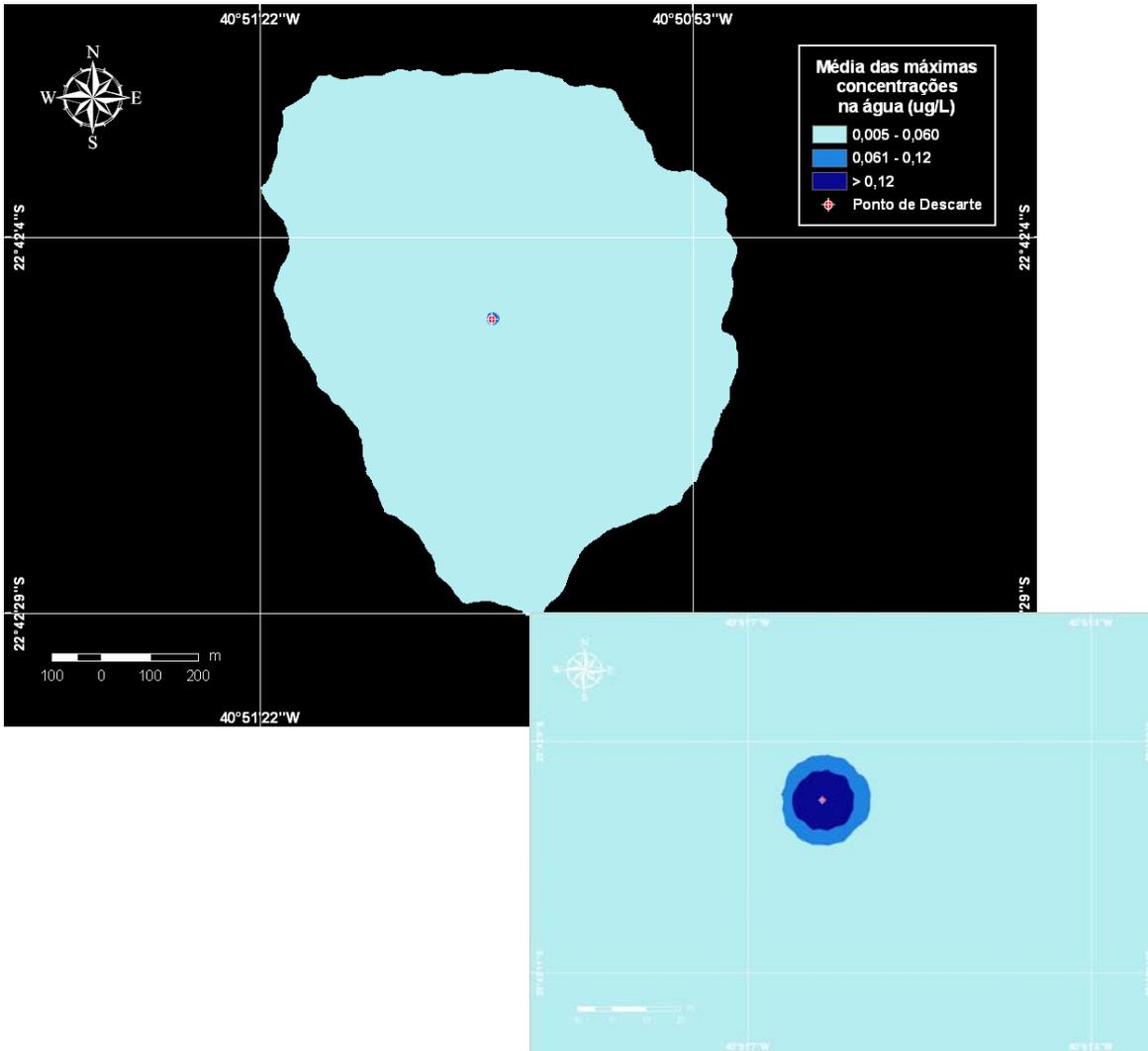


**Figura VII.2.2-4 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.2.2-5 e VII.2.2-6 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o etilbenzeno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,005 \mu\text{g/L}$ .

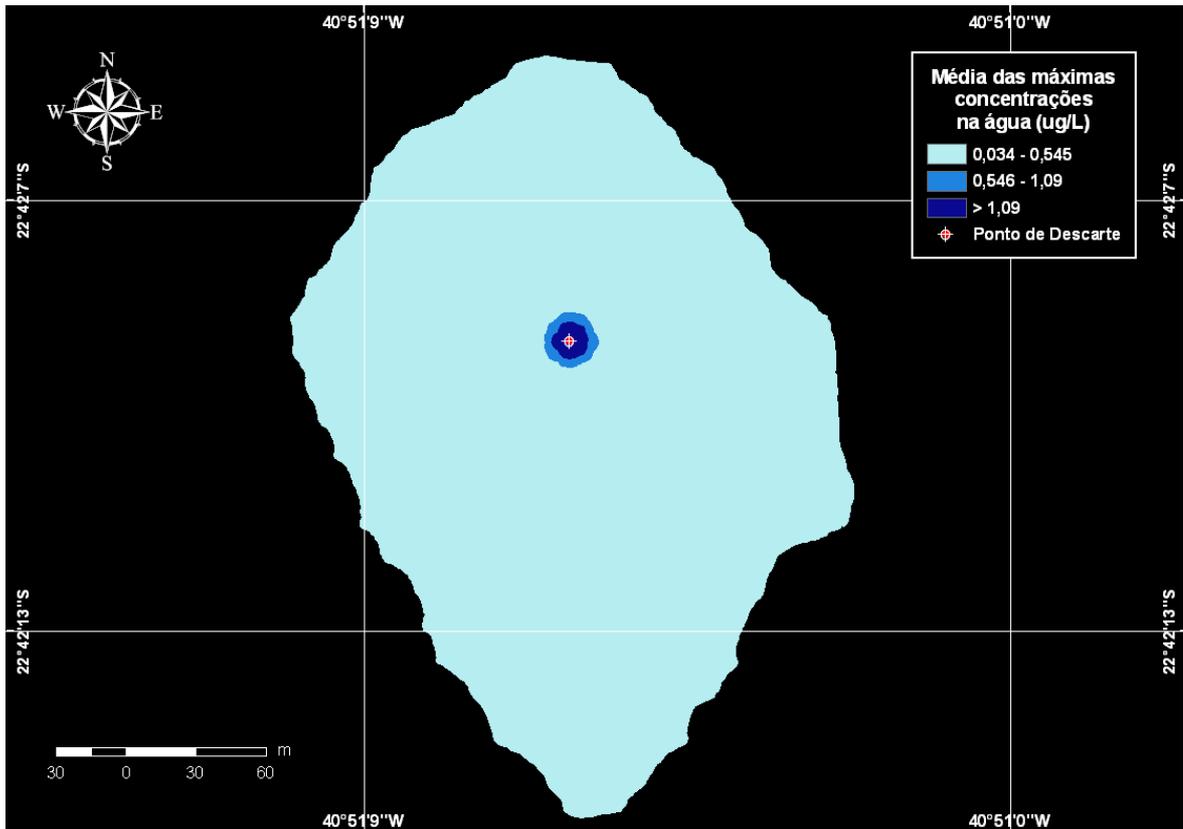


**Figura VII.2.2-5 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

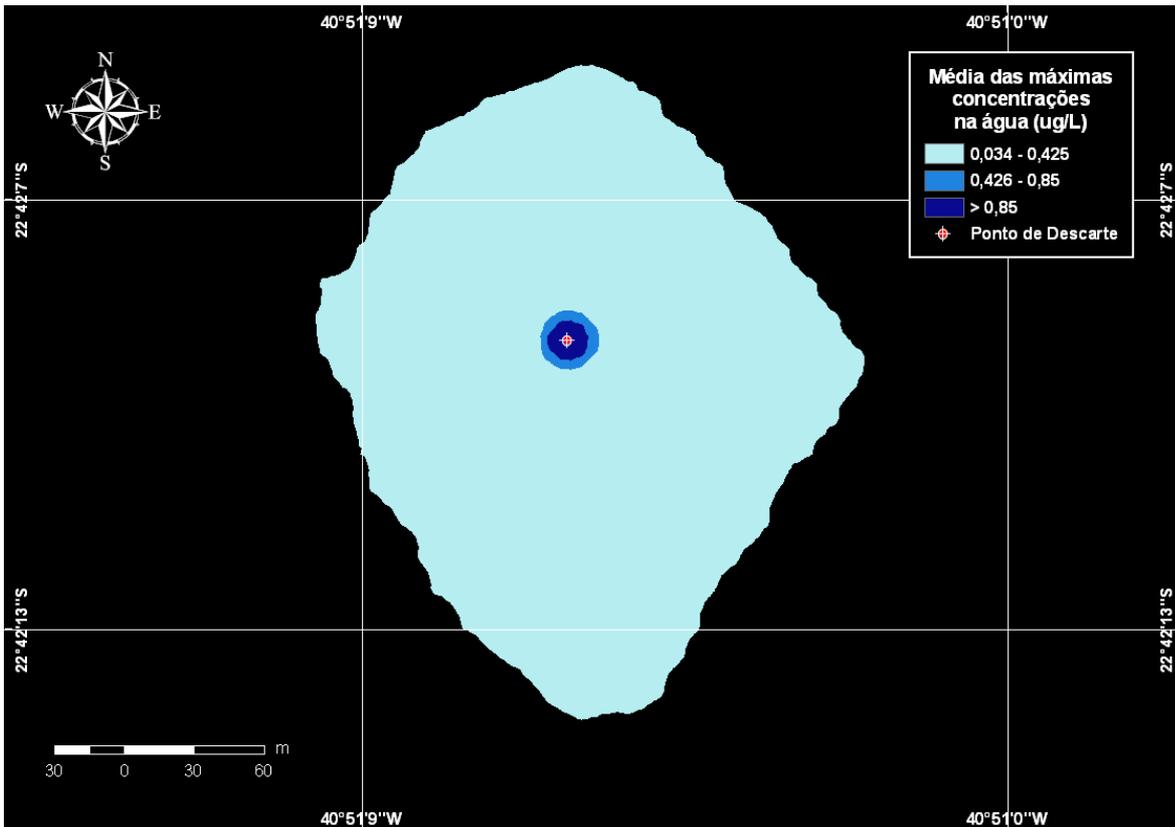


**Figura VII.2.2-6 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.2.2-7 e VII.2.2-8 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para os fenóis totais, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 0,0342  $\mu\text{g/L}$ .

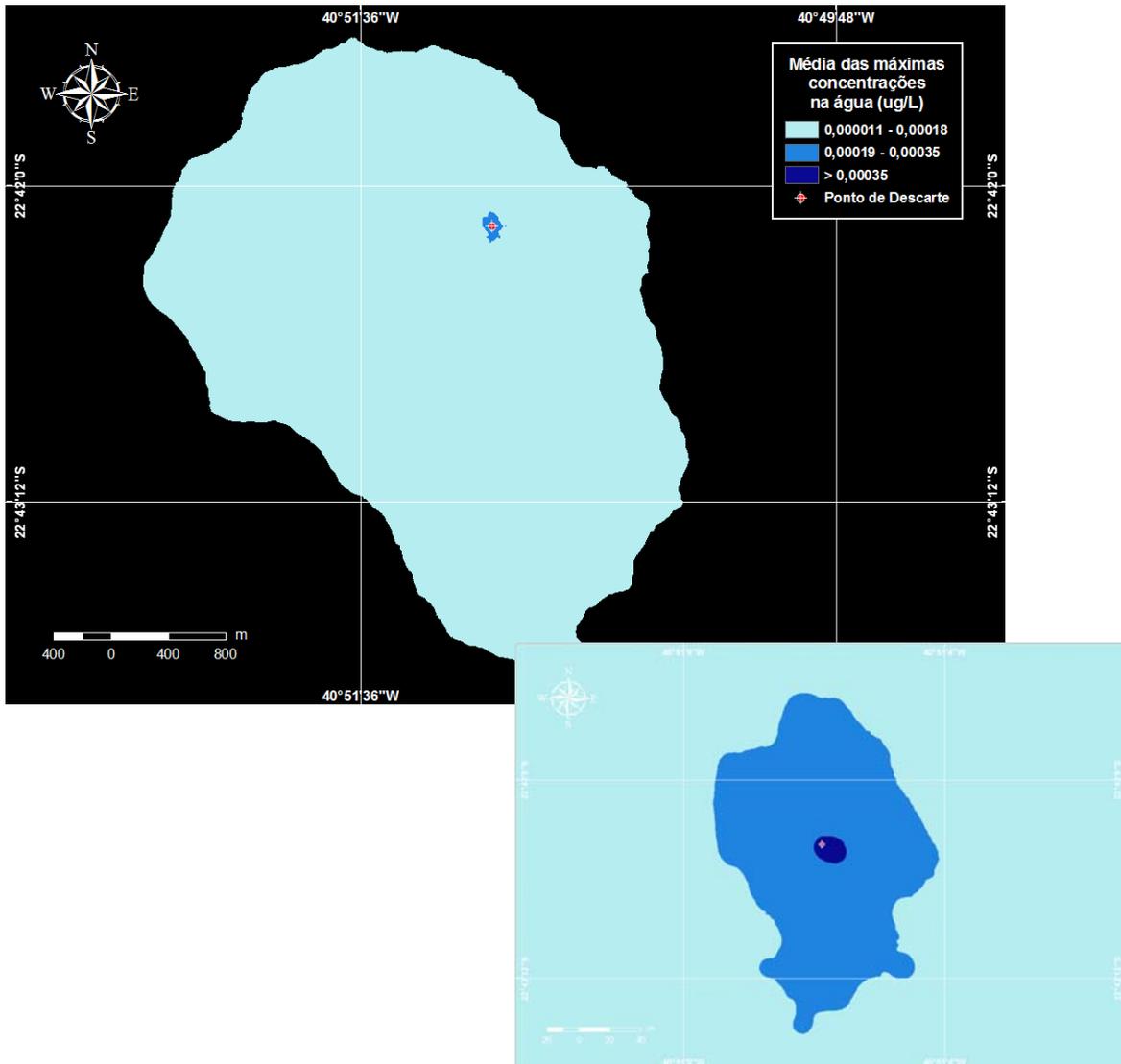


**Figura VII.2.2-7 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de verão, após 24 horas.**

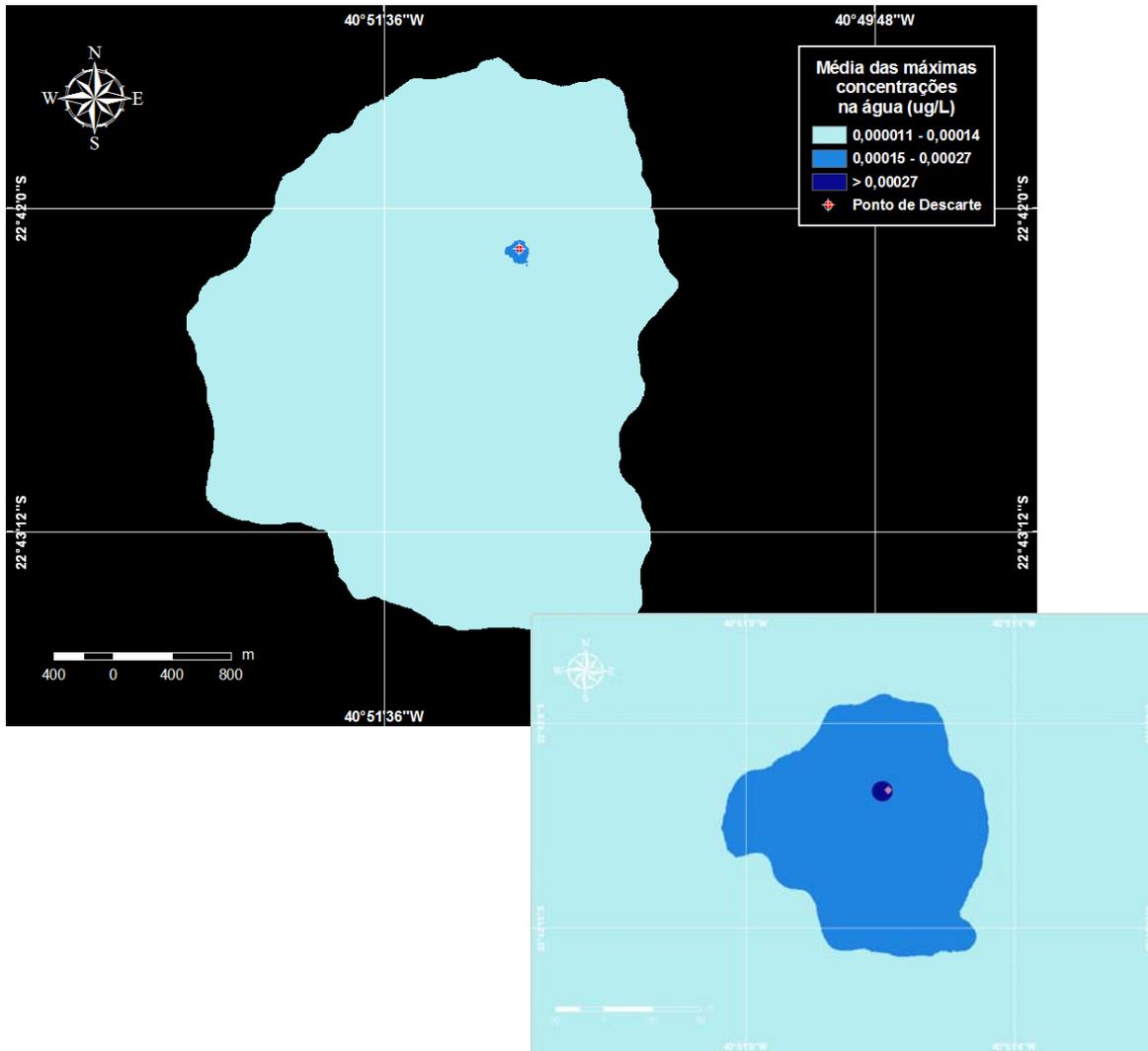


**Figura VII.2.2-8** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de inverno, após 24 horas.

As figuras VII.2.2-9 e VII.2.2-10 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o benzo(a)antraceno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,000011 \mu\text{g/L}$ .

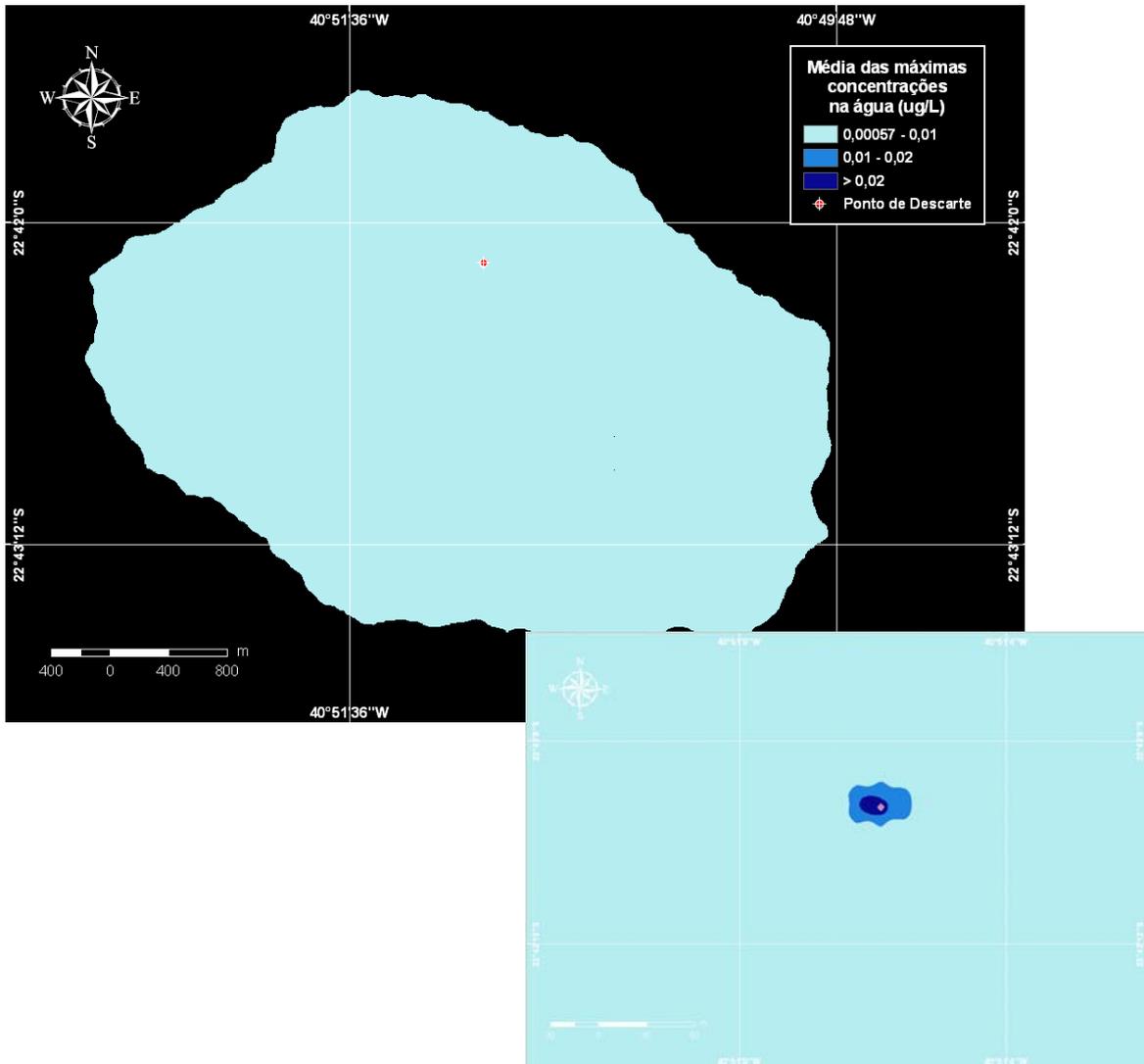


**Figura VII.2.2-9** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTRACENO, simulada no período de verão, após 24 horas.

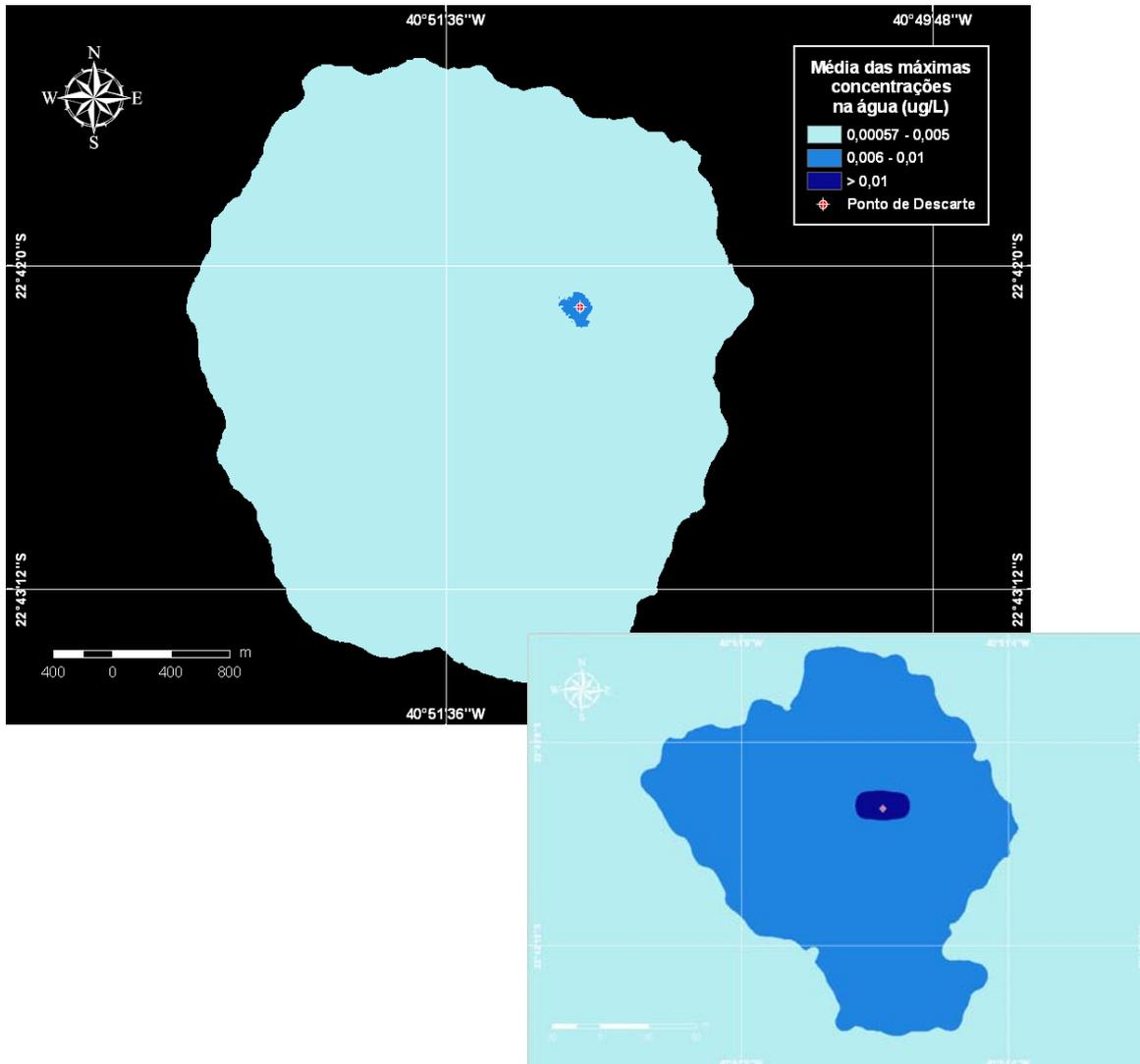


**Figura VII.2.2-10** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTHACENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.

As figuras VII.2.2-11 e VII.2.2-12 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para os naftalenos, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,000567 \mu\text{g/L}$ .

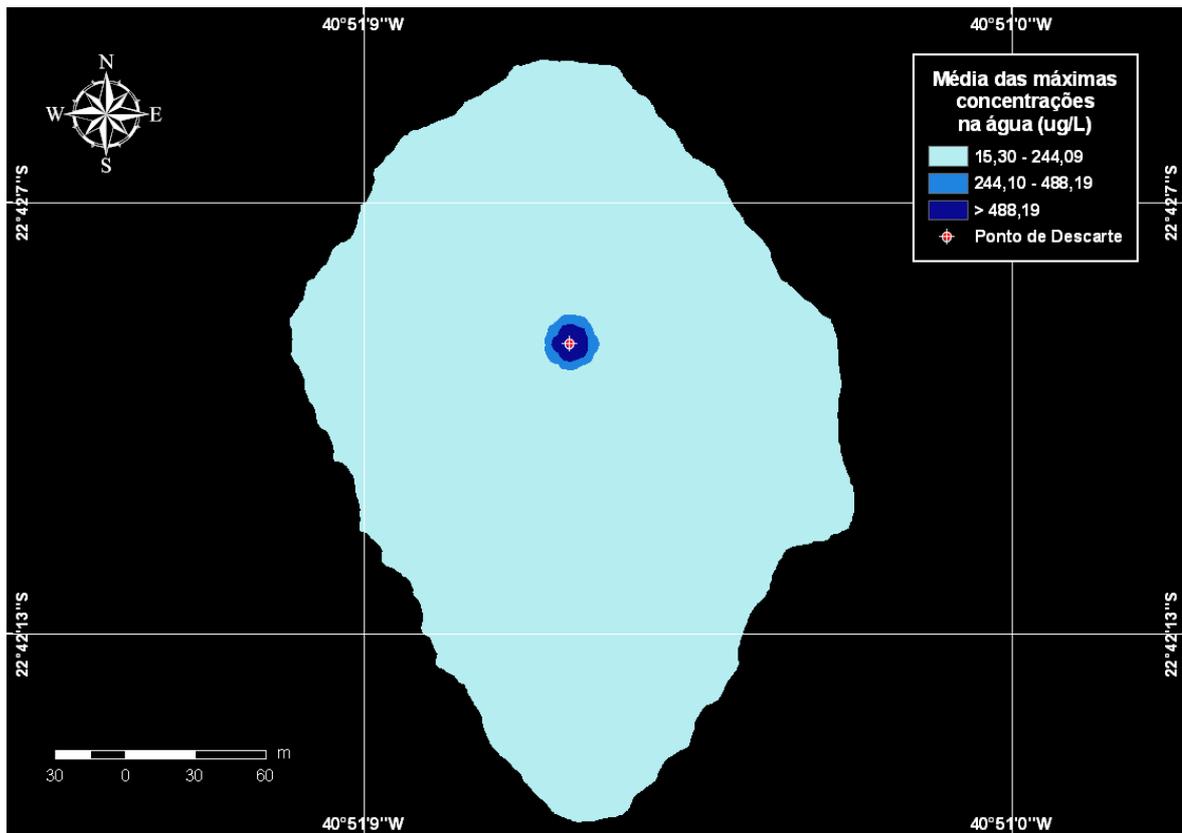


**Figura VII.2.2-11 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de verão, após 24 horas.**

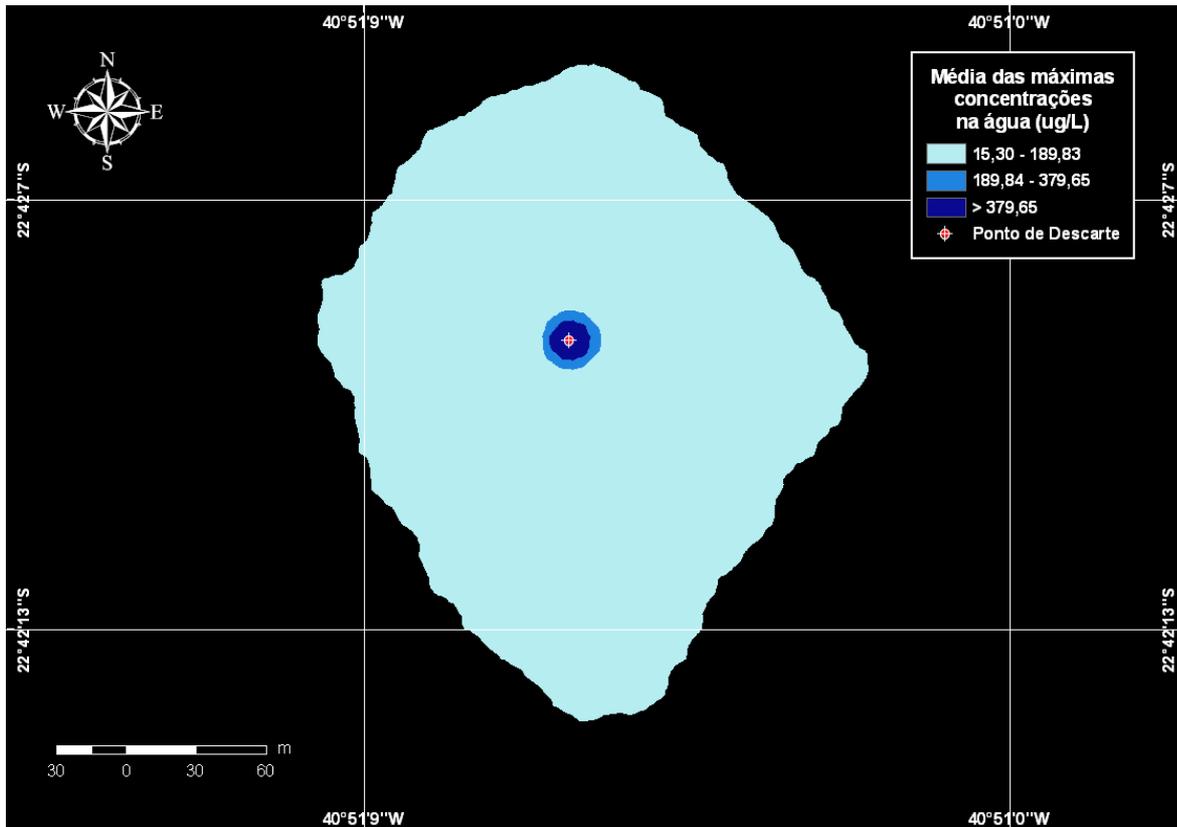


**Figura VII.2.2-12 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.2.2-13 e VII.2.2-14 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para carbono orgânico total, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $15,3 \mu\text{g/L}$ .



**Figura VII.2.2-13** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.



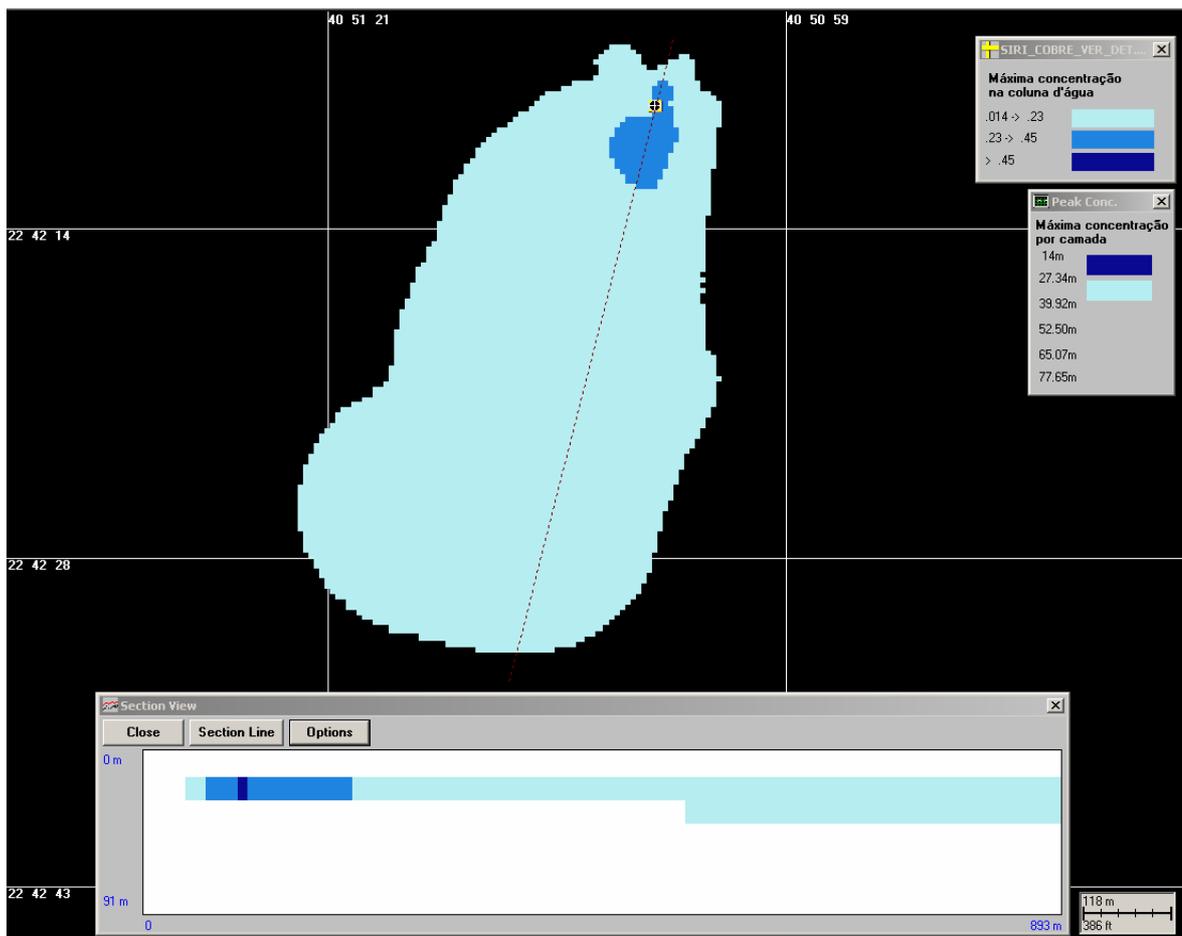
**Figura VII.2.2-14** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas.

### VII.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS

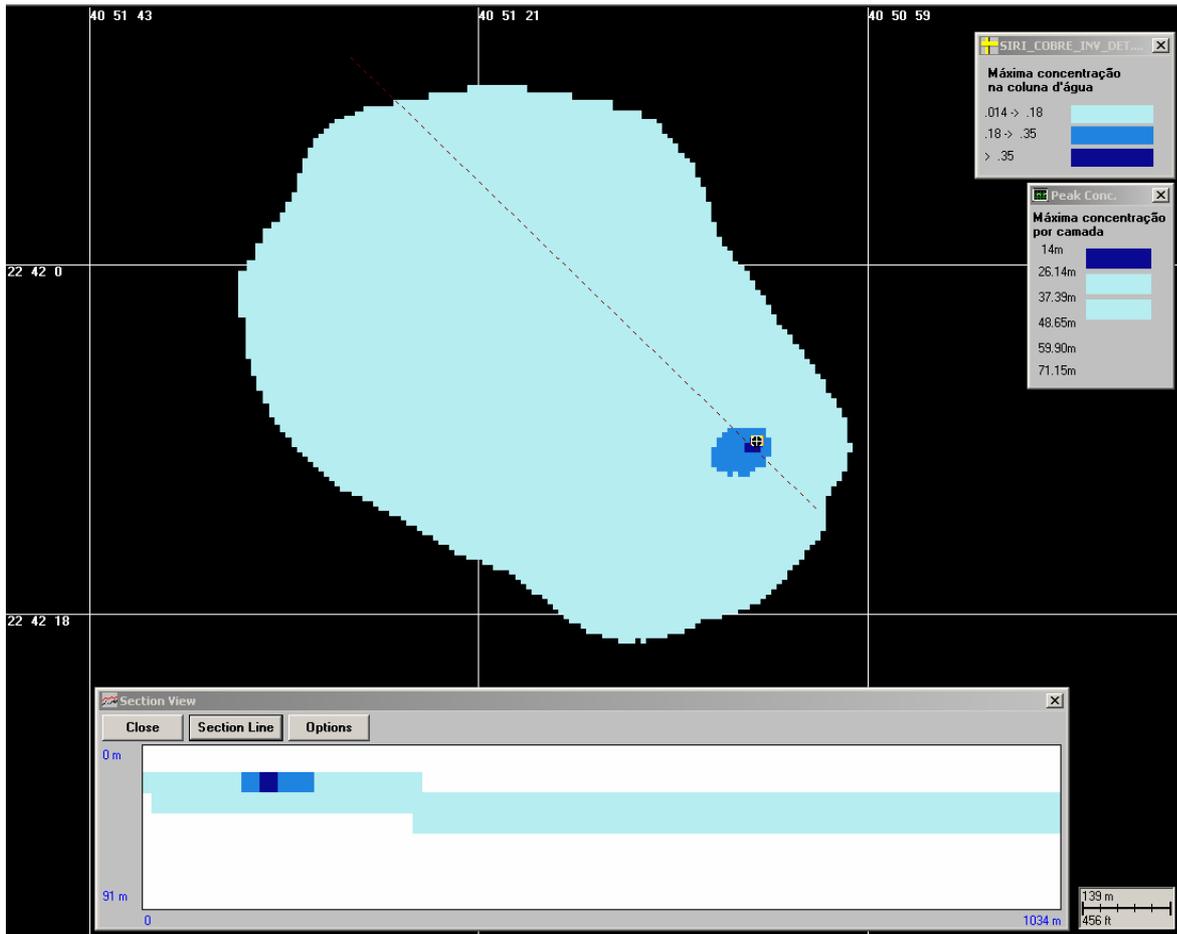
A seguir, são apresentados os resultados das simulações de pior caso de verão e de inverno para o FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras. Para essas simulações foram considerados como mais críticos os cenários que apresentaram as maiores concentrações, nas proximidades do ponto de descarte, dos compostos simulados. Nas figuras são apresentados os contornos de concentração (até as diluições de 10.000 vezes a concentração inicial), uma seção transversal (demarcada por uma linha pontilhada sobre a pluma) com o perfil vertical de concentrações, e as máximas concentrações por camada (intervalos de profundidades) 24 horas após o instante inicial das simulações.

### VII.3.1 Resultados das Simulações dos Parâmetros Inorgânicos

As figuras VII.3.1-1 e VII.3.1-2 apresentam os resultados das simulações determinísticas para o cobre dissolvido, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 0,014  $\mu\text{g/L}$ .

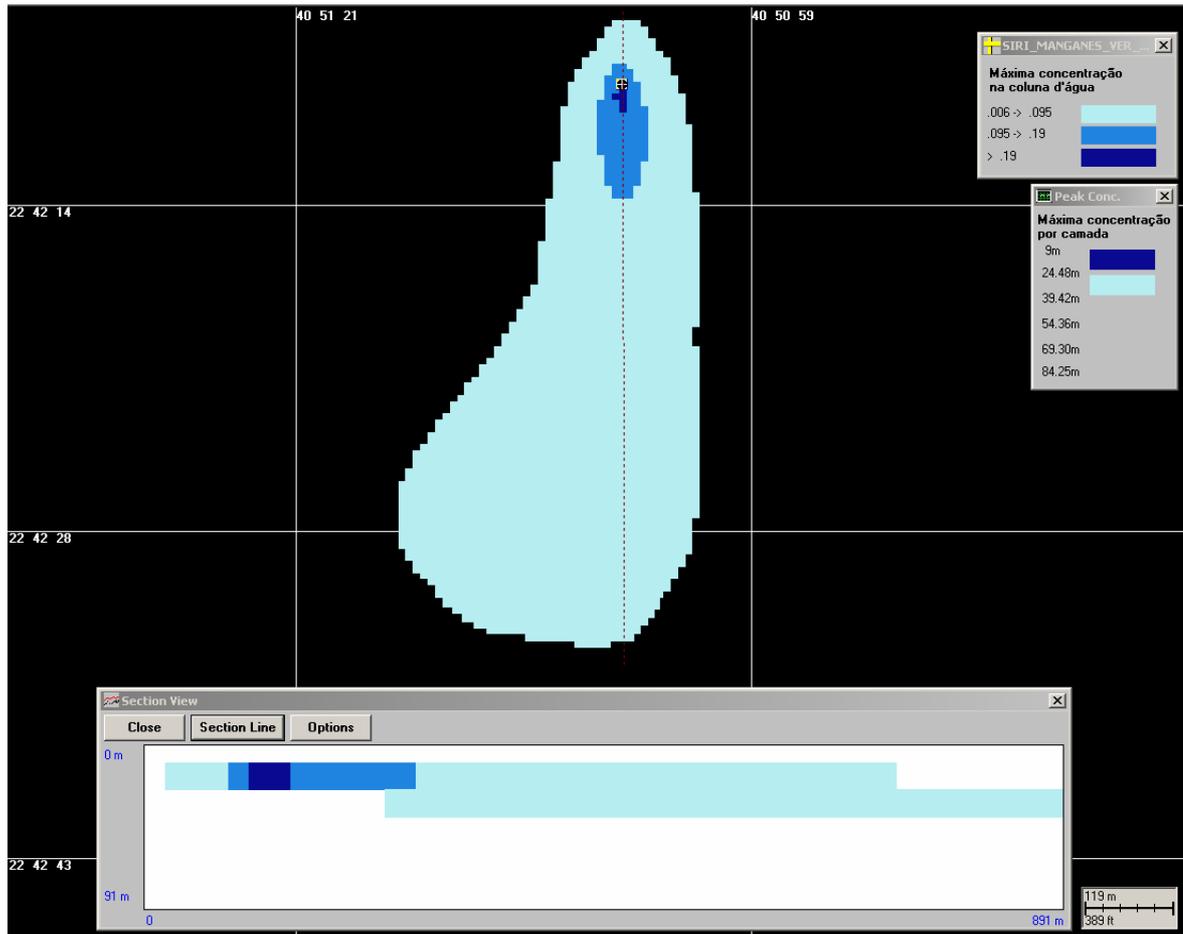


**Figura VII.3.1-1 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

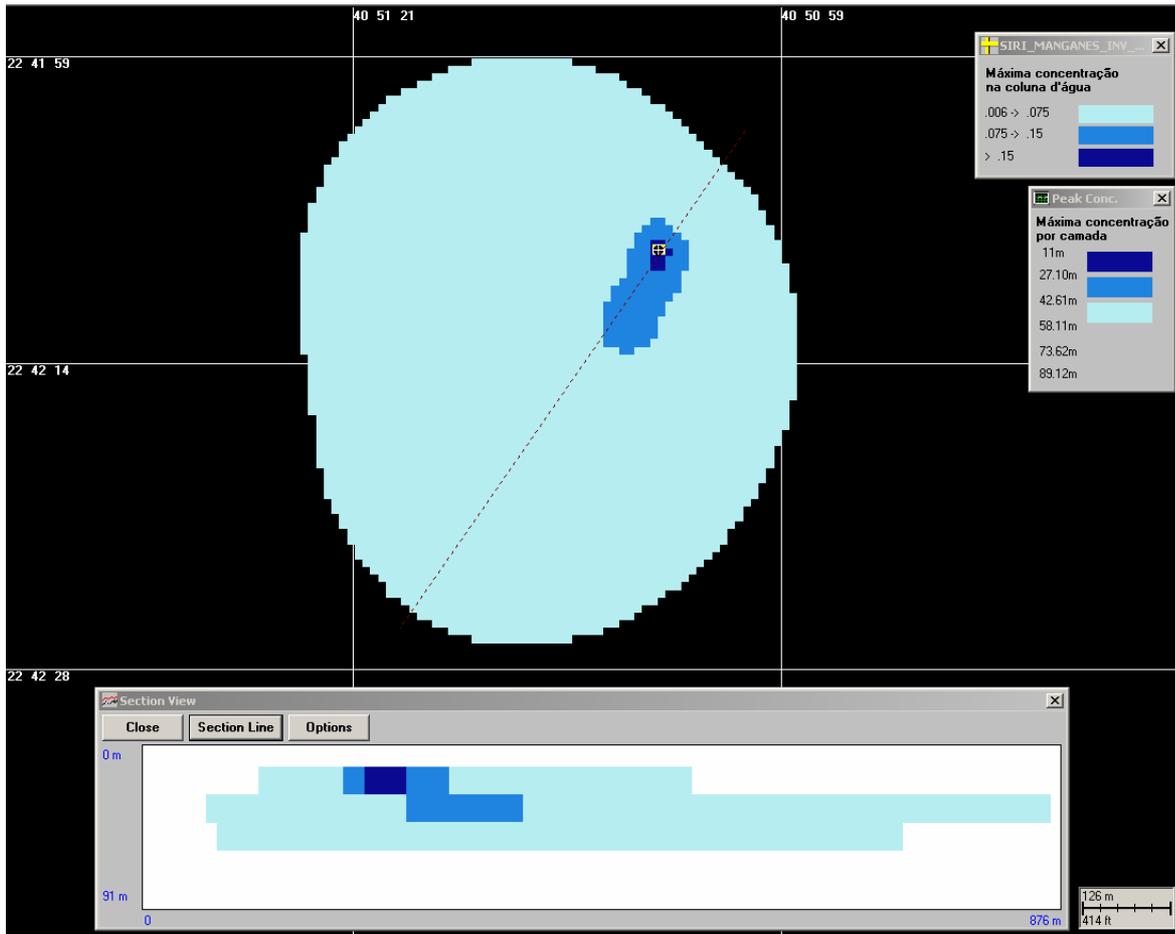


**Figura VII.3.1-2 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de COBRE DISSOLVIDO, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.3.1-3 e VII.3.1-4 apresentam os resultados das simulações determinísticas para o manganês total, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,006 \mu\text{g/L}$ .



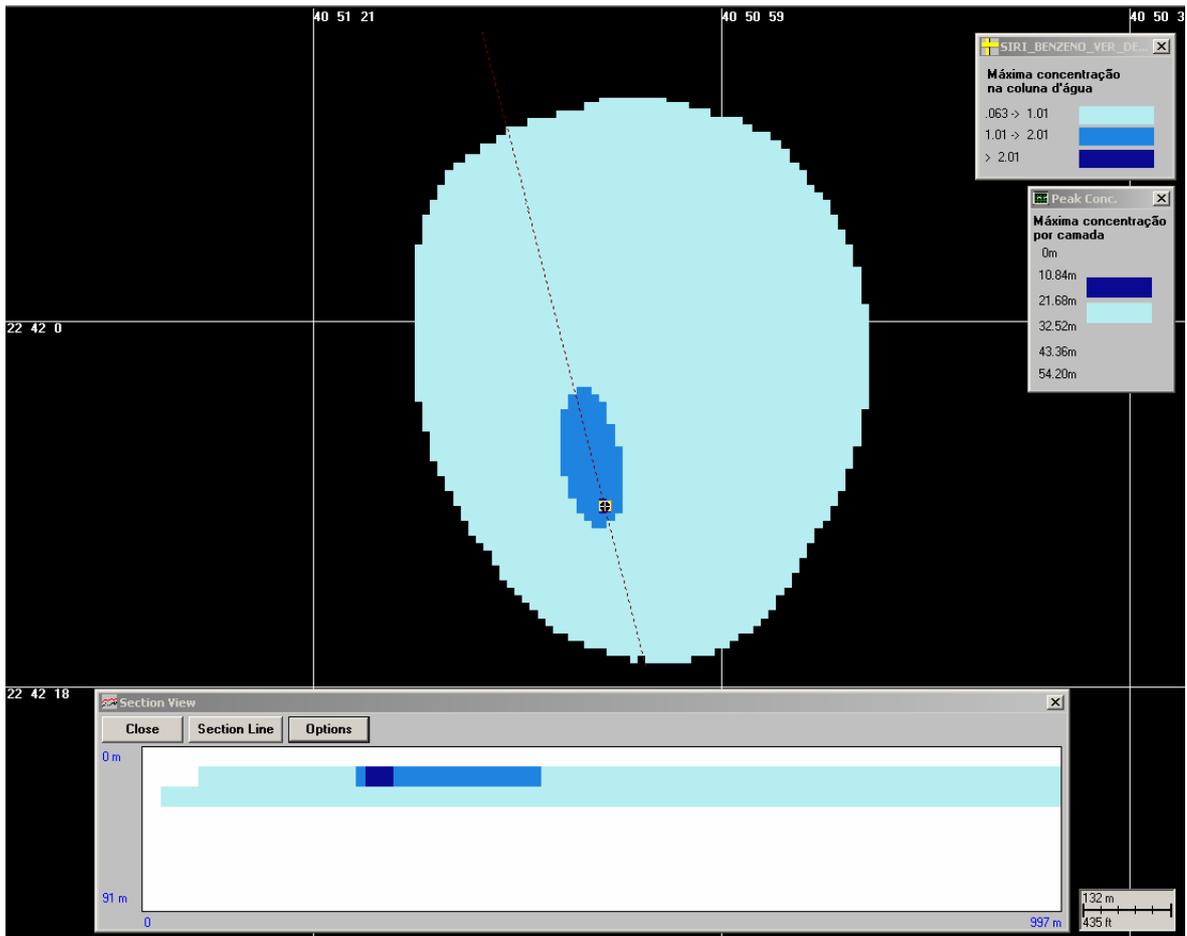
**Figura VII.3.1-3 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.**



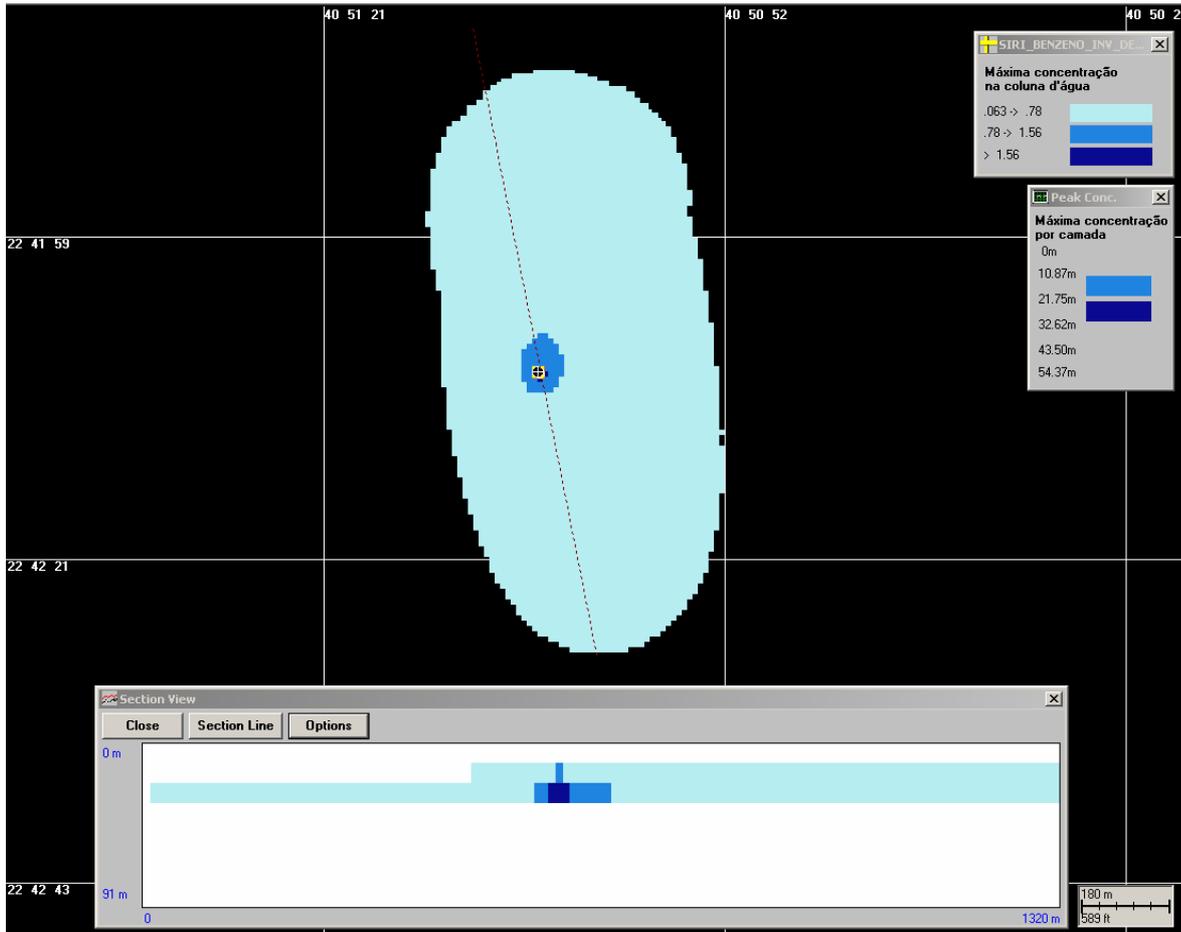
**Figura VII.3.1-4 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de MANGANÊS TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

### VII.3.2 Resultados das Simulações dos Parâmetros Orgânicos

As figuras VII.3.2-1 e VII.3.2-2 apresentam os resultados das simulações determinísticas para o benzeno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,063 \mu\text{g/L}$ .

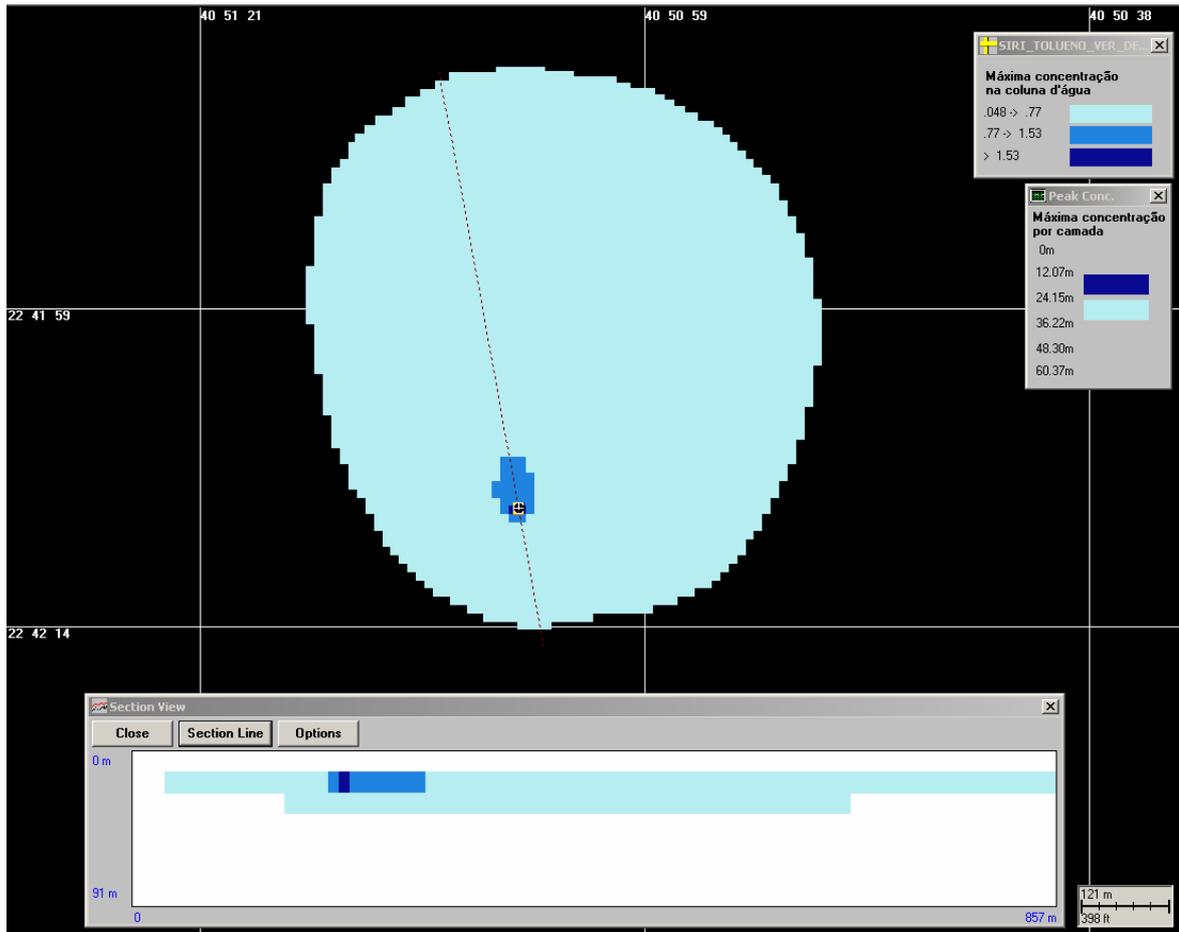


**Figura VII.3.2-1 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

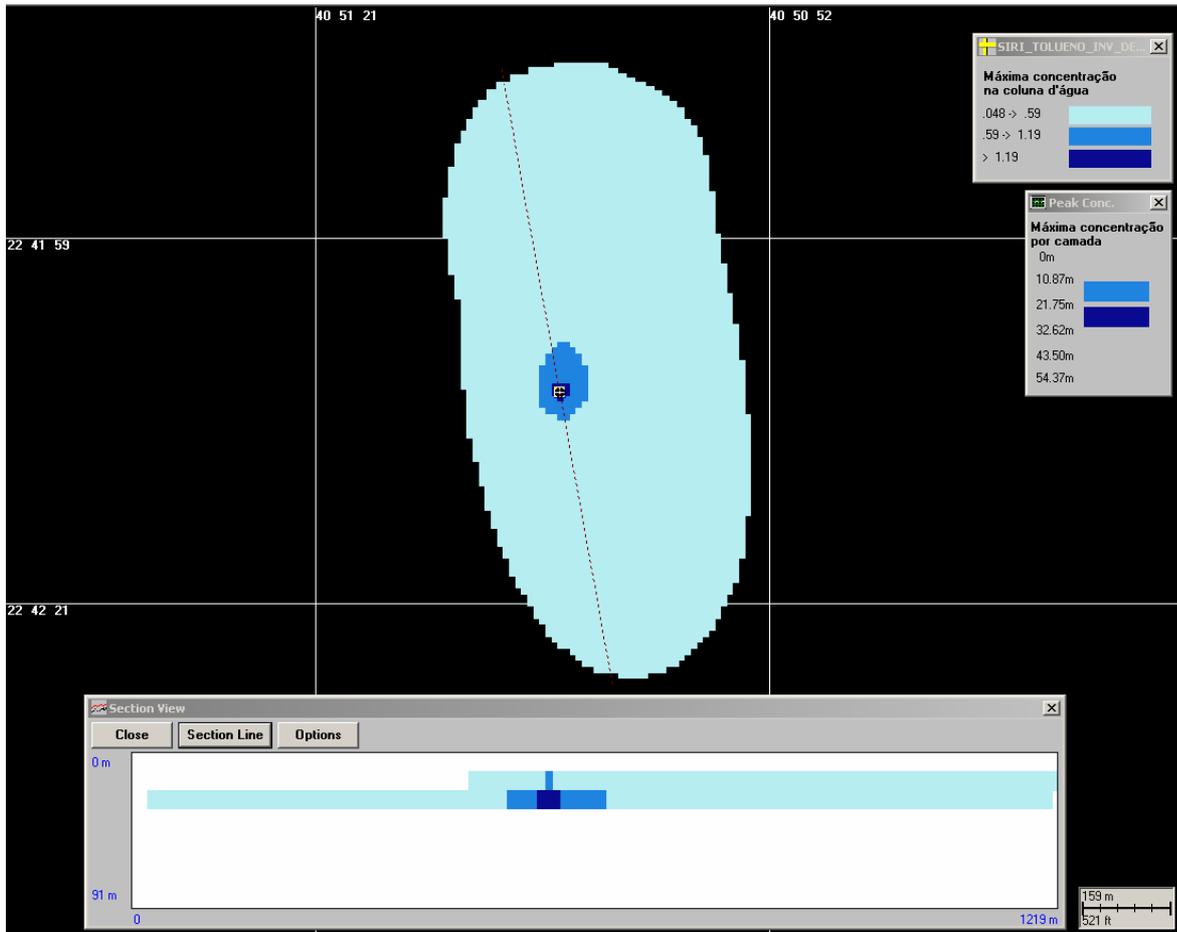


**Figura VII.3.2-2** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.

As figuras VII.3.2-3 e VII.3.2-4 apresentam os resultados das simulações determinísticas para o tolueno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,048 \mu\text{g/L}$ .

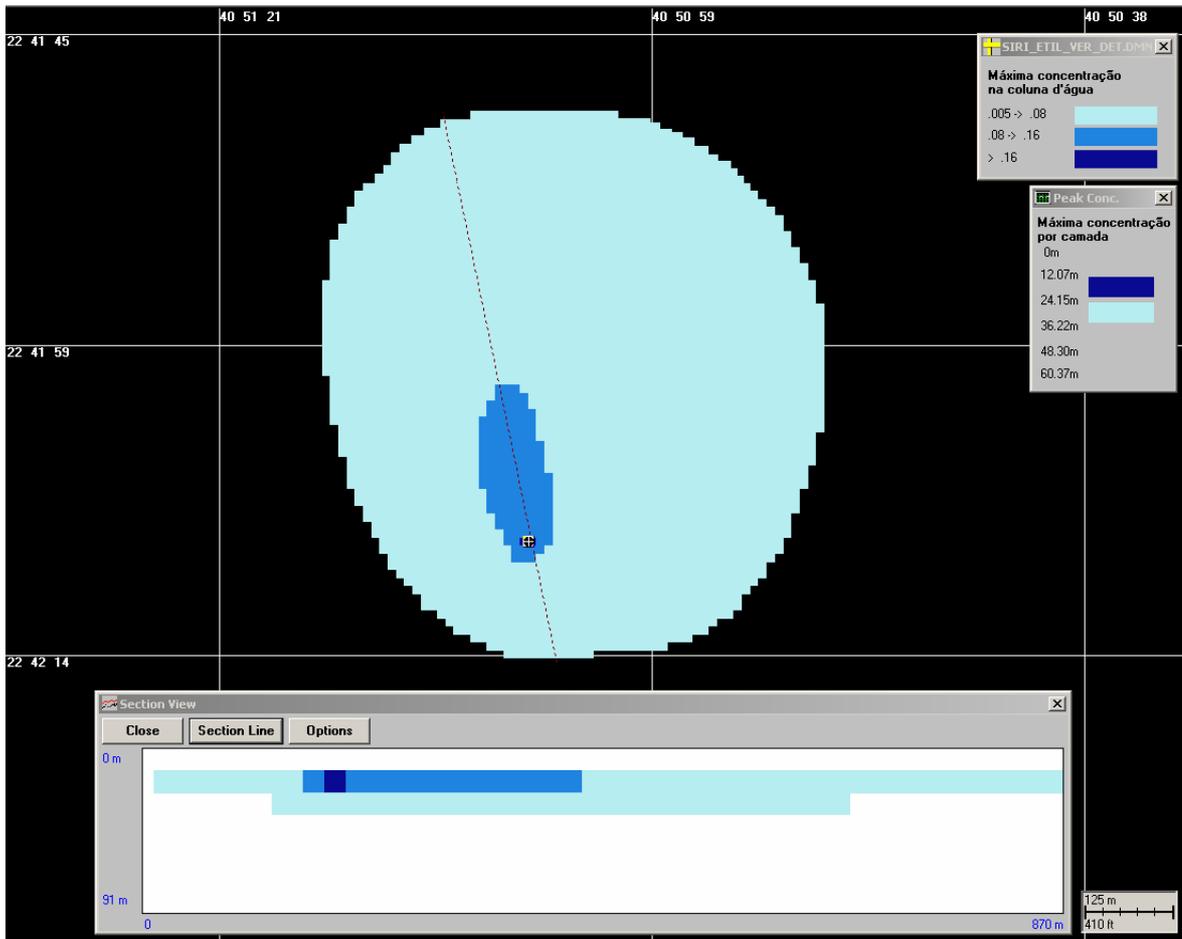


**Figura VII.3.2-3 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

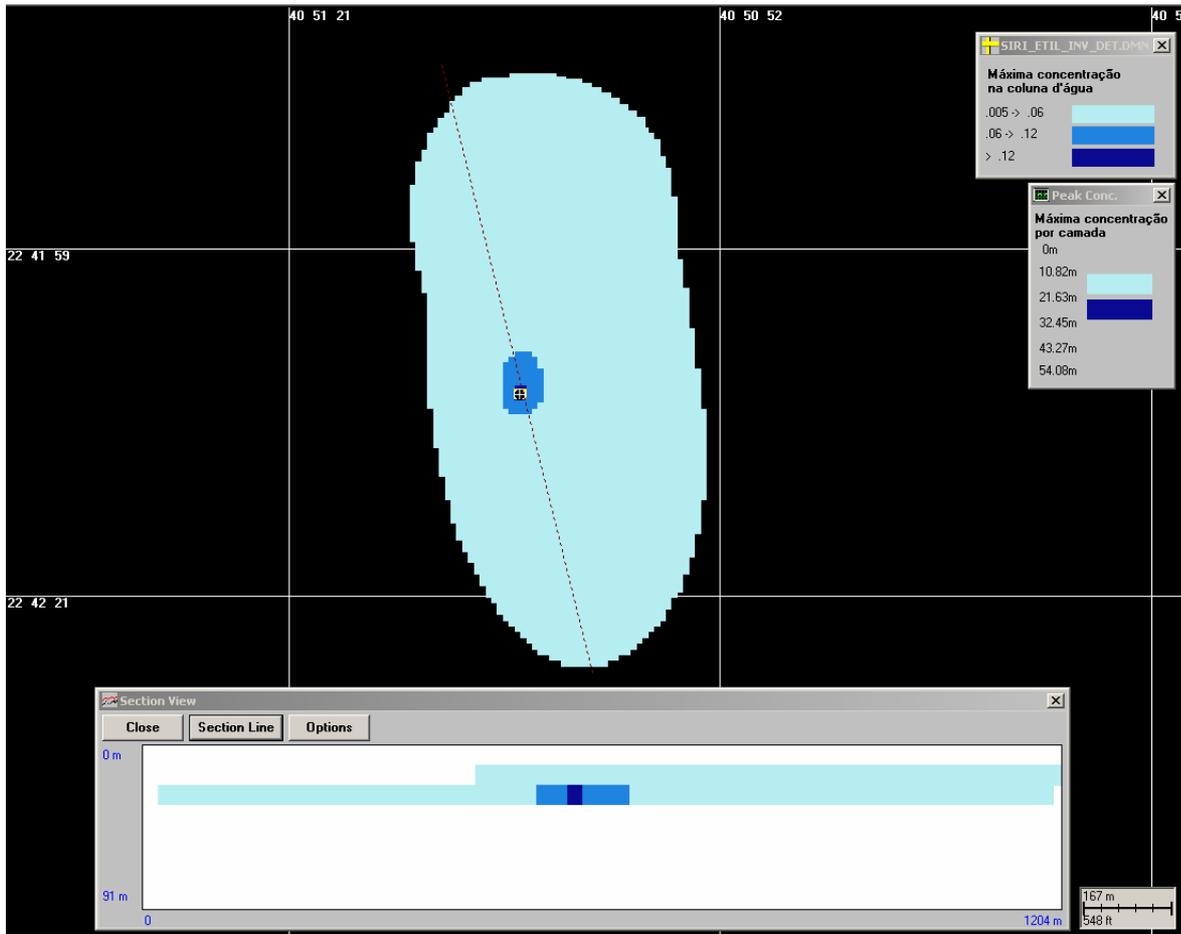


**Figura VII.3.2-4** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de TOLUENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.

As figuras VII.3.2-5 e VII.3.2-6 apresentam os resultados das simulações determinísticas para o etilbenzeno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,005 \mu\text{g/L}$ .

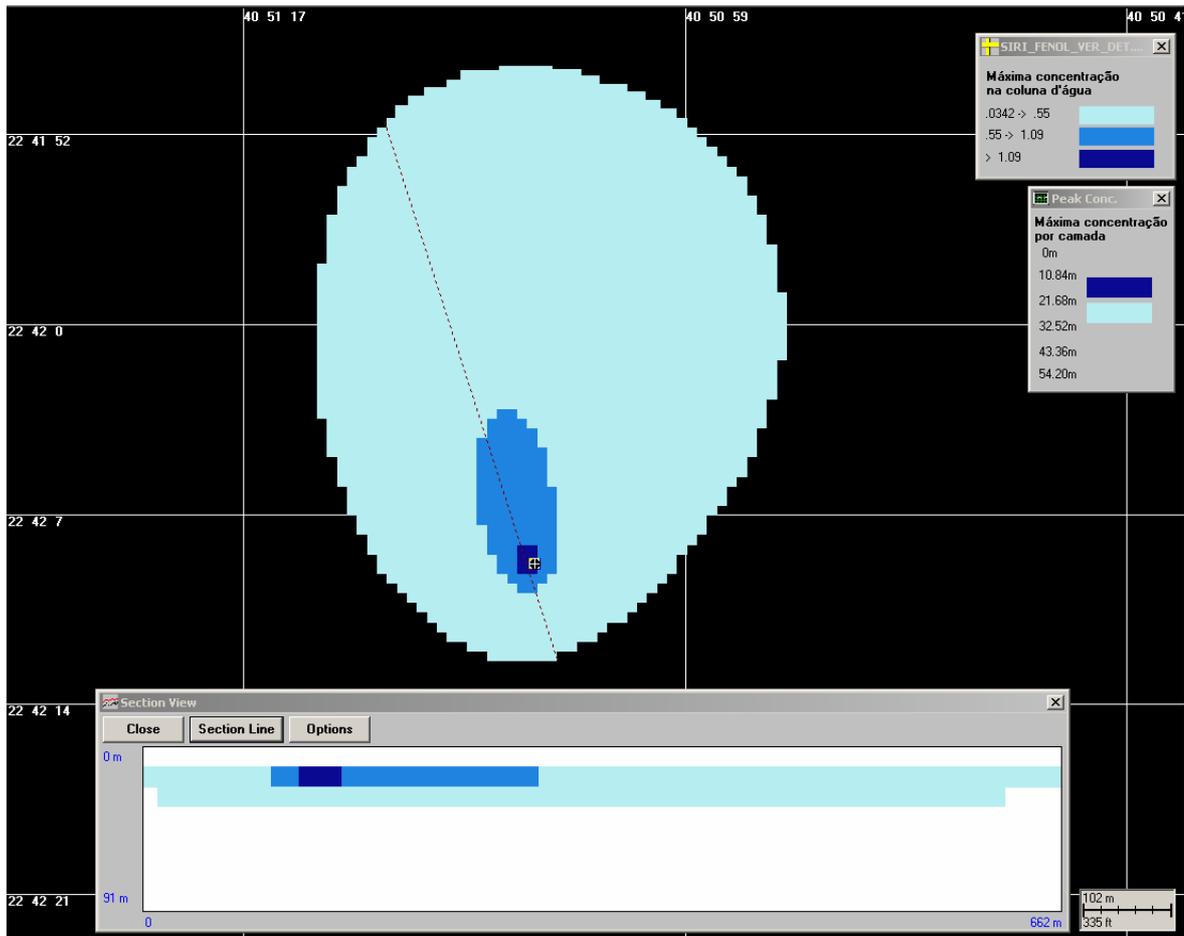


**Figura VII.3.2-5 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de verão, após 24 horas.**

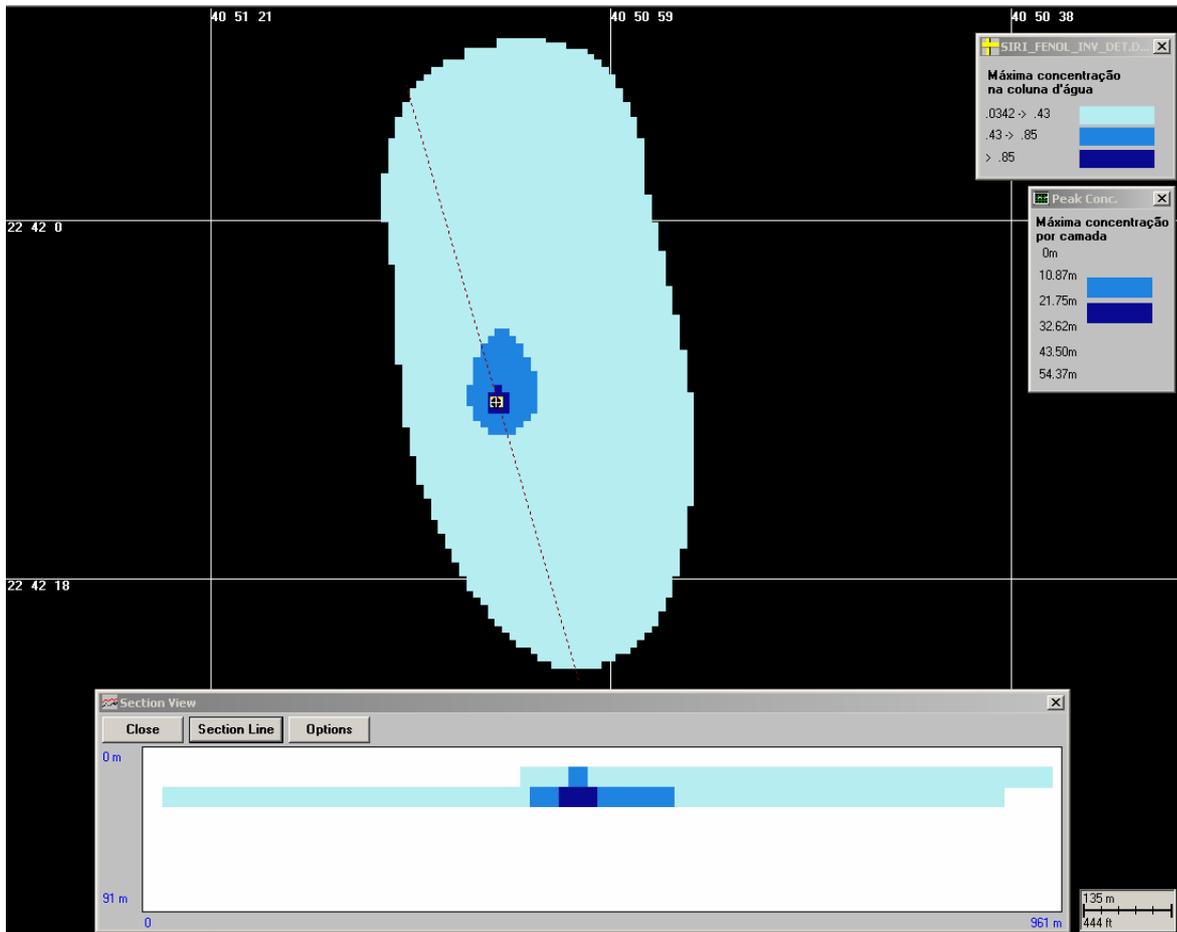


**Figura VII.3.2-6 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de ETILBENZENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.3.2-7 e VII.3.2-8 apresentam os resultados das simulações determinísticas para fenóis totais, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 0,0342  $\mu\text{g/L}$ .

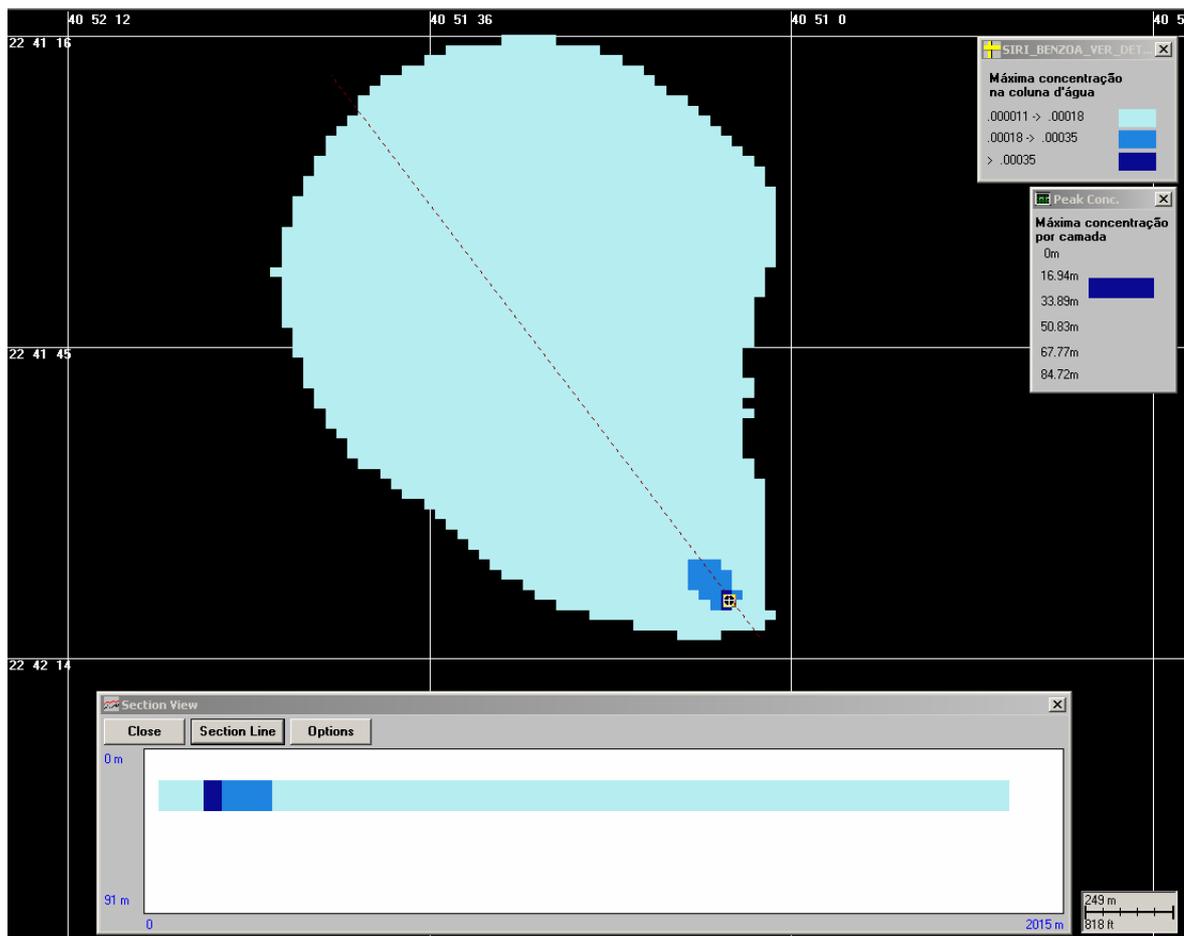


**Figura VII.3.2-7 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de verão, após 24 horas.**

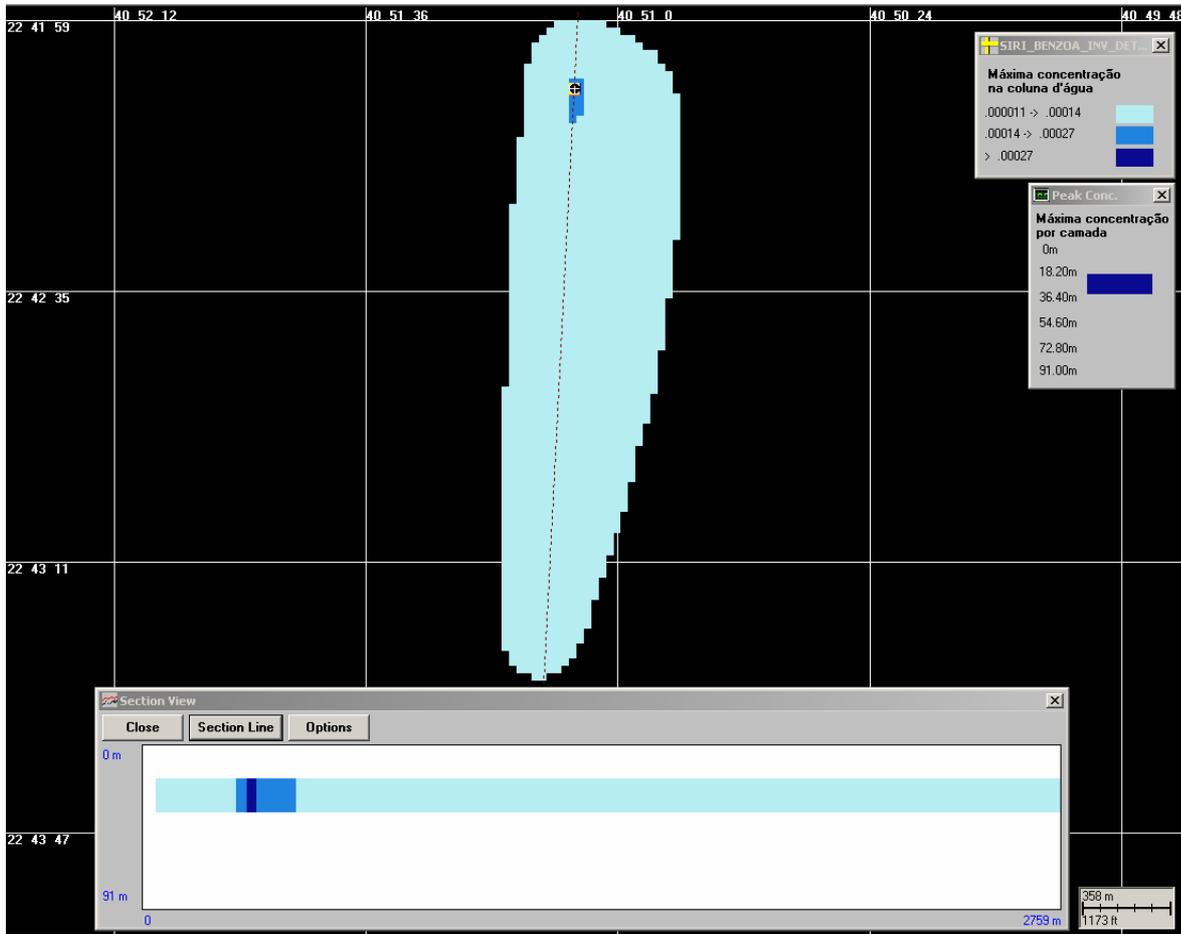


**Figura VII.3.2-8** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de FENÓIS TOTAIS, simulada no período de inverno, após 24 horas.

As figuras VII.3.2-9 e VII.3.2-10 apresentam os resultados das simulações determinísticas para o benzo(a)antraceno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 0,000011  $\mu\text{g/L}$ .

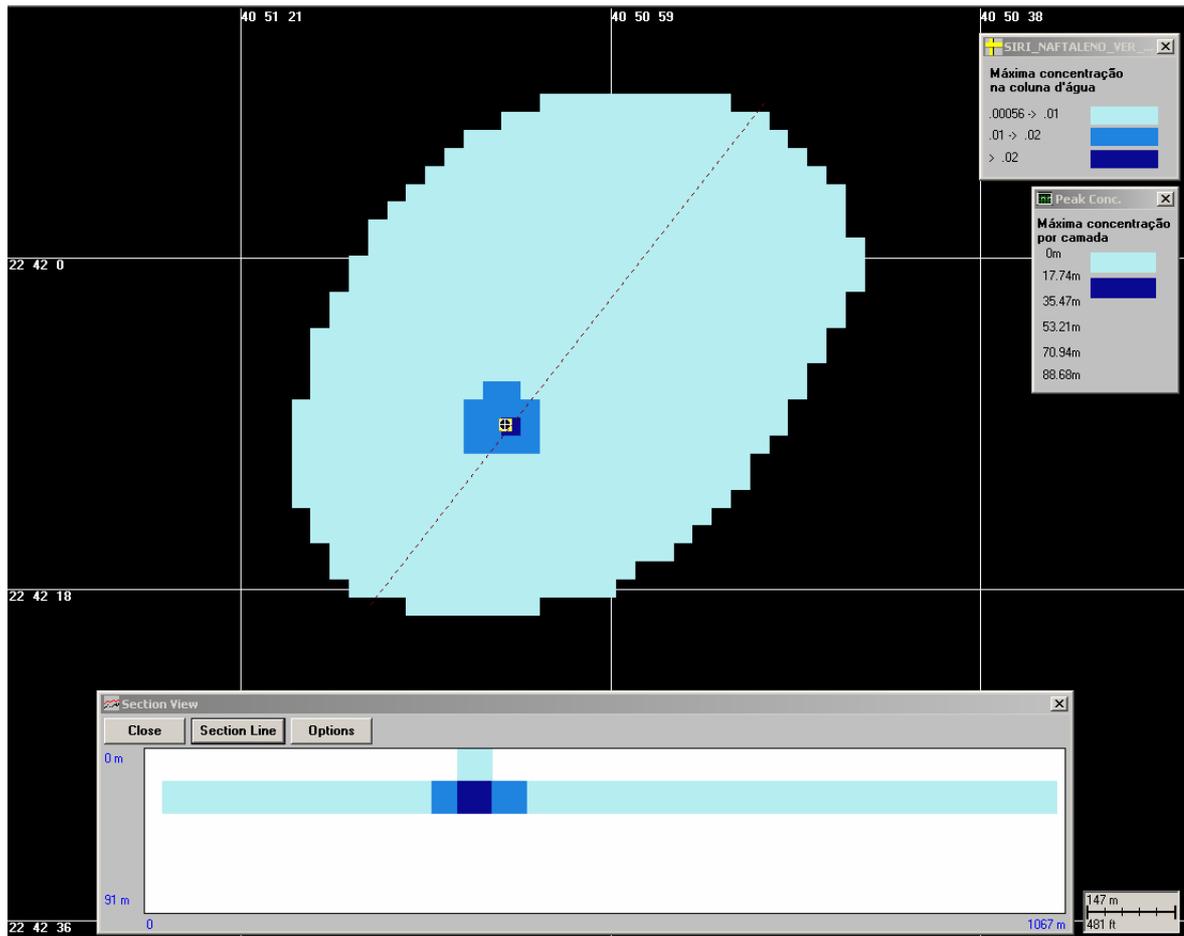


**Figura VII.3.2-9 -** Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTHRACENO, simulada no período de verão, após 24 horas.

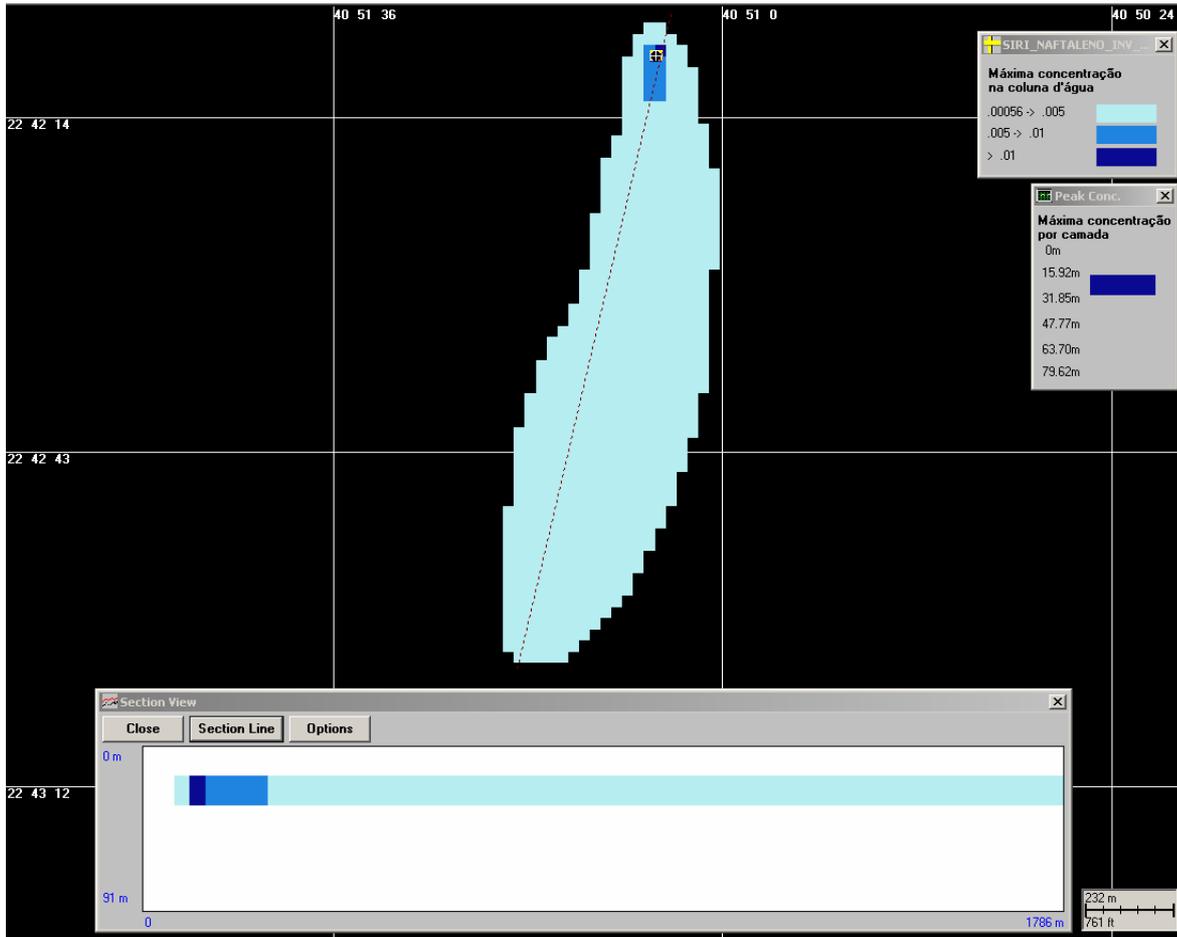


**Figura VII.3.2-10** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de BENZO(A)ANTRACENO, simulada no período de inverno, após 24 horas.

As figuras VII.3.2-11 e VII.3.2-12 apresentam os resultados das simulações determinísticas para os naftalenos, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja,  $0,000567 \mu\text{g/L}$ .

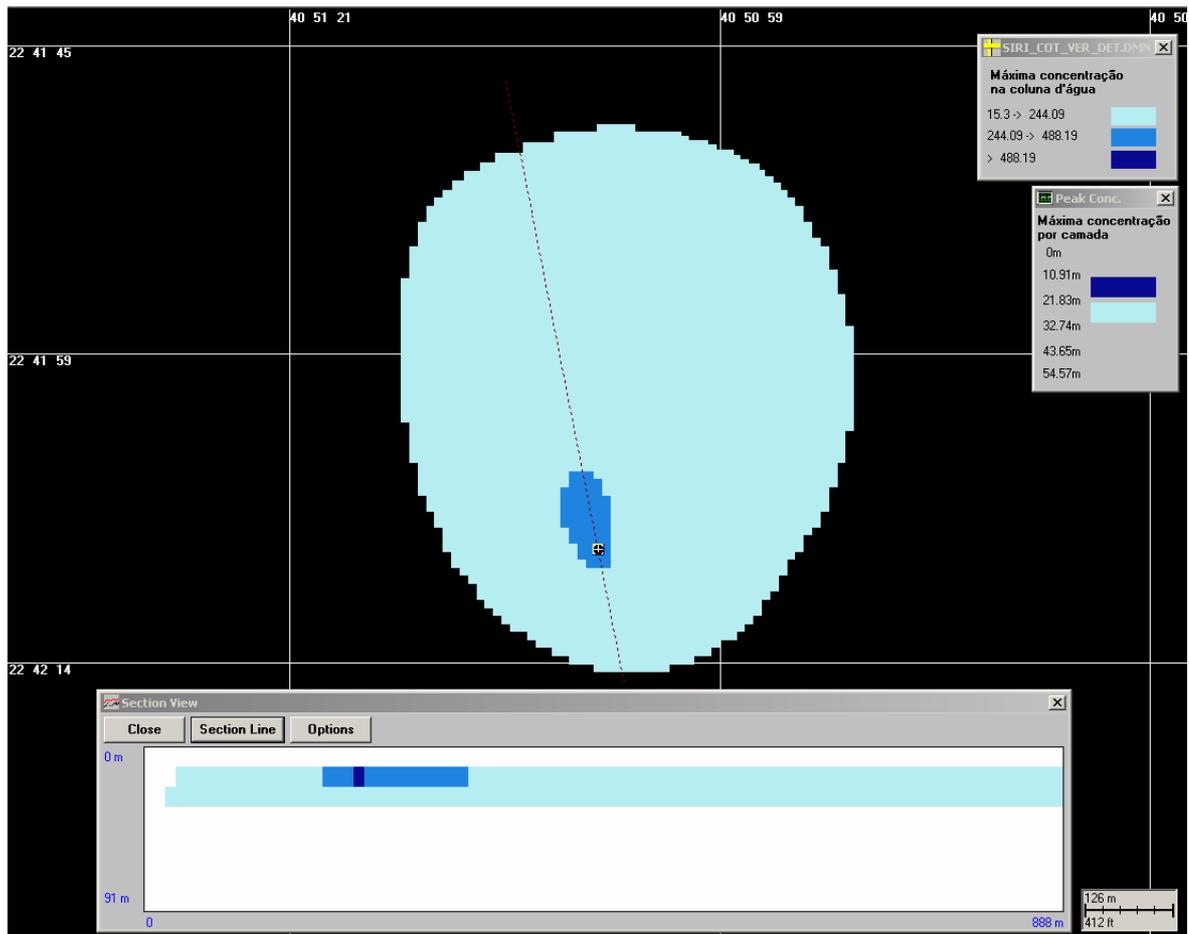


**Figura VII.3.2-11** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de verão, após 24 horas.

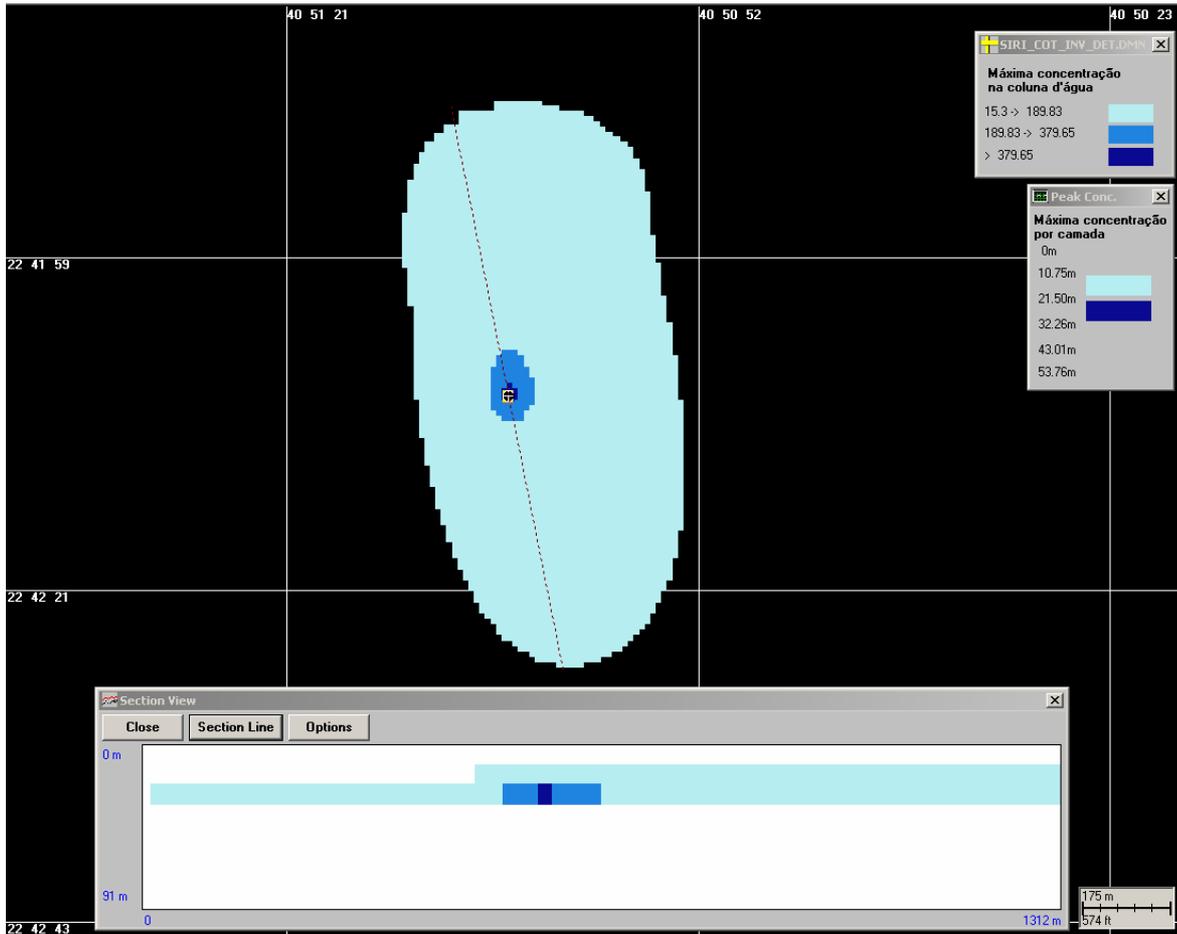


**Figura VII.3.2-12 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de NAFTALENOS, simulada no período de inverno, após 24 horas.**

As figuras VII.3.2-13 e VII.3.2-14 apresentam os resultados das simulações determinísticas para carbono orgânico total, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. O limite de corte adotado nestas figuras corresponde à diluição de 10.000 vezes a concentração inicial, ou seja, 15,3  $\mu\text{g/L}$ .



**Figura VII.3.2-13 - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de verão, após 24 horas.**



**Figura VII.3.2-14** - Concentrações máximas esperadas ( $\mu\text{g/L}$ ) para a pluma de CARBONO ORGÂNICO TOTAL, simulada no período de inverno, após 24 horas.

## VII.4 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA MODELAGEM DE ÁGUA PRODUZIDA

Os resultados das simulações para o campo próximo da água produzida no FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras mostraram diluições de 313 vezes no verão e de 403 vezes no inverno, com profundidade terminal da pluma de, aproximadamente, 20 m para ambos os períodos simulados.

A tabela VII.4-1 apresenta um resumo dos resultados obtidos em função das concentrações no ponto de lançamento, no final do campo próximo e os valores de concentração e diluição a 100, 250 e 500 m.

**Tabela VII.4-1 - Concentrações dos parâmetros químicos simulados e diluição da água produzida, no ponto de lançamento, no final do campo próximo e a 100, 250 e 500 m, calculadas para o descarte no FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.**

| COMPONENTES            | CONC. NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L) | CONCENTRAÇÃO NO FINAL DO CAMPO PROXIMO (µg/L) |              | CONCEN-TRAÇÃO A 100 m (µg/L) |         | CONCENTRAÇÃO A 250 m (µg/L) |         | CONCENTRAÇÃO A 500 m (µg/L) |              |
|------------------------|-------------------------------------|---|--------------|------------------------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------|--------------|
|                        |                                     | VER   | INV          | VER                          | INV     | VER                         | INV     | VER                         | INV          |
| BTEX                   |                                     |   |              |                              |         |                             |         |                             |              |
| Benzeno                | 630,0                               | 2,01  | 1,56         | 0,12                         | 0,12    | 0,053                       | 0,045   | 0,029                       | 0,022        |
| Tolueno                | 480,0                               | 1,53  | 1,19         | 0,093                        | 0,095   | 0,040                       | 0,035   | 0,022                       | 0,017        |
| Etilbenzeno            | 50,0                                | 0,16  | 0,12         | 0,013                        | 0,015   | 0,008                       | 0,01    | 0,0057                      | 0,0078       |
| HPAs                   |                                     |   |              |                              |         |                             |         |                             |              |
| Benzo(a)antraceno      | 0,11                                | 0,00035                                       | 0,00027      | 0,00020                      | 0,00015 | 0,00015                     | 0,00011 | 0,00009<br>0                | 0,00008<br>9 |
| Naftalenos             | 5,67                                | 0,02  | 0,01         | 0,0062                       | 0,0065  | 0,0051                      | 0,0047  | 0,0040                      | 0,0036       |
| Fenóis totais          | 342,0                               | 1,09  | 0,85         | 0,066                        | 0,065   | 0,029                       | 0,025   | 0,015                       | 0,012        |
| METAIS                 |                                     |   |              |                              |         |                             |         |                             |              |
| Cobre dissolvido       | 140,0                               | 0,45  | 0,35         | 0,025                        | 0,021   | 0,0110                      | 0,0071  | 0,0043                      | 0,0028       |
| Manganês total         | 60,0                                | 0,19  | 0,15         | 0,019                        | 0,014   | 0,0150                      | 0,0094  | 0,0110                      | 0,0080       |
| Carbono Orgânico Total | 153.000,0                           | 488,19  | 379,65       | 29,5                         | 30,18   | 12,84                       | 11,04   | 6,96                        | 5,37         |
| Salinidade             | 77.987.000,0                        | 36.759.250,0                                  | 36.759.250,0 | —                            | —       | —                           | —       | —                           | —            |



## VIII CONCLUSÕES

Neste relatório são apresentados os estudos realizados para a determinação da área de influência das plumas descartadas a partir do FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras, localizado na Concessão de Badejo, Bacia de Campos.

A partir do melhor entendimento técnico-científico da dinâmica local, foi possível definir a área de influência das plumas de água produzida descartadas no FPSO Petrojarl Cidade de Rio das Ostras.

Como critério ambiental, foram utilizadas as concentrações correspondentes à Concentração de Efeito Não Observado (CENO). Como critério de parada das simulações probabilísticas e para apresentação dos resultados, foi utilizada a concentração correspondente a 10.000 vezes a concentração inicial de lançamento. Esse corte foi escolhido, para melhorar a visualização das manchas de probabilidade e, dessa forma, auxiliar o desenvolvimento de possíveis trabalhos de monitoramento ambiental na área do empreendimento. No caso da salinidade, foi utilizado como critério de parada o valor de salinidade do meio, atingido ainda dentro dos limites do campo próximo.

Os resultados das simulações para o campo próximo mostraram diluições de 313 vezes e profundidade terminal da pluma de 20,4 m (no período de verão) e 403 vezes e profundidade terminal de 23,0 m (no período de inverno). No campo próximo, todos os compostos simulados apresentaram concentrações inferiores ao critério ambiental.

Os resultados das simulações para o campo afastado, nas condições de descarte simuladas, indicaram que, todos os compostos atingiram valores de concentração referentes à diluição de 30 vezes o critério ambiental, a uma distância de, aproximadamente, 500 m do ponto de lançamento. Dentro desta mesma distância, somente os compostos benzeno, tolueno, fenóis totais, cobre dissolvido e carbono orgânico total atingem a diluição de 10.000 vezes a concentração inicial de lançamento.



## **IX BIBLIOGRAFIA**

ASA (APPLIED SCIENCE ASSOCIATES, INC.). 2002. CHEMMAP Technical Manual, Narragansett, RI.

BEAR, J. & A. VERRUIJT, 1987. Modeling groundwater flow and pollution with computer programs for sample cases. **Kluwer Academic Publishers**.

BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Ed.), Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models. **American Geophysical Union**, p. 1-16.

CASTRO FILHO, B.M.C. & MIRANDA, L.B. 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 40° N and 34° S. The Sea. **John Wiley & Sons**, Inc. 11: p. 209-251.

CERC, 1984. Shore protection manual, Vol. I. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, p. 115-134 apêndices.

CLIMANÁLISE. 1996. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. **Edição comemorativa de 10 anos**. Outubro.

CSANADY, G.T., 1973. Turbulent diffusion in the environment. **D. Reidel Publishing Company**, Dordrecht, Holland, 74p.

DELVIGNE, G.A.L. & SWEENEY, C.E. 1988. Natural dispersion of oil. **Oil & Chemical Pollution 4** (1988): p. 281-310.

ELLIOTT, A.J. 1986. Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea. **Dt. Hydrog**: p.113-137.

EVANS, D.L. & SIGNORINI, S.R. 1985. Vertical structure of the Brazil Current. **Nature**, 315, p. 48-50.

FAY, J.A. 1971. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. In: **Proceedings at Joint Conference and Control of Oil Spills**, Washington, D.C., June 15-17.

FEMAR. 2000. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro. 281pp.

FRENCH, D., 2001. Chemical Spill Model (CHEMMAP) for Forecasts/Hindcasts and Environmental Risk Assessment. In: Proceedings of the 24th Arctic and Marine Oilspill (AMOP) Technical Seminar, Edmonton, Alberta, Canada, June 12-14, 2001, Environment Canada, pp.825-846.

FRENCH, D., M. REED, K. JAYKO, S. FENG, H.M. RINES, S. PAVIGNANO, T. ISAJI, S. PUCKETT, A. KELLER, F.W. FRENCH III, D. GIFFORD, J. MCCUE, G. BROWN, E. MACDONALD, J. QUIRK, S. NATZKE, R. BISHOP, M. WELSH, M. PHILLIPS & B.S. INGRAM, 1996a. The CERCLA type A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments (NRDAM/CME), Technical Documentation, Vol.I - V. Final Report, submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior, Washington, DC, April, 1996, Contract No. 14-0001-91-C-11.

FRENCH, D.P., H.M. RINES, T. OPISHINSKI & J. MCCUE, 1996b. Validation and Sensitivity Analysis: The CERCLA Type A Natural Resource Damage Assessment Models for Coastal and Marine Environments (NRDAM/CME) and for the Great Lakes Environments (NRDAM/GLE) Final Report, Submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior, Washington, DC, April, 1996. Contract N°. 14-01-0001-91-C-11.

- FRENCH, D., H. SCHUTTENBERG, & T. ISAJI, 1999. Probabilities of oil exceeding thresholds of concern: examples from an evaluation for Florida Power and Light. In: **Proceedings: AMOP 99 Technical Seminar**, June 2-4, 1999, Calgary, Alberta, Canada, pp. 243-270.
- FRENCH, D., N. WHITTIER, M. WARD, & C. SANTOS, 2002. Spill Hazard Evaluation for Chemicals Shipped in Bulk Using Modeling. In: **Proceedings, Sixth International Marine Environmental Seminar**, Trondheim, Norway, September 2-4, 2002.
- GIFFORD, F.A., 1961. **Nuclear Safety** 2:47.
- HESS, K.W. & BOSLEY, K.T. 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. **Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling**, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.
- HINES, A.L. & R.N. MADDOX, 1985. Mass transfer fundamentals and application, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 542p.
- HOLTON, J.R., 1979. An Introduction to Dynamic Meteorology. **International Geophysics Series**, Vol 23, Academic Press NY.
- HOULT, D. P., 1972. Oil spreading on the sea. **Ann. Rev. Fluid Mech.**, p.341-368.
- JIRKA, G.H.; DONEKER, R.L. & HINTON, S.W. 1996. User's manual for CORMIX. A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. **U.S. Environmental Protection Agency**. 152pp.
- KAWAMURA, P. & D. MACKAY, 1987. The evaporation of volatile liquids. **J Hazardous Materials**, 15:343-364.
- KOLLURU, V.S., 1992. Influence of Number of Spilllets on Spill Model Predictions. Applied Science Associates Internal Report, 1992.

- LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978. Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. **Journal of Physical Oceanography**, v. 8, p. 142-150.
- LEHR, W., 1996. Progress in Oil Spread Modeling, in Proceedings of the 19th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Environment Canada, pp. 889-894.
- LIMA, J.A.M. 1997. Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Break and Continental Slope at 22°S. Tese de doutorado. University of New South Wales, Austrália.
- LYMAN, C.J., W.F. REEHL, & D.H. ROSENBLATT, 1982. **Handbook of Chemical Property Estimation Methods**. McGraw-Hill Book Co., New York, 960p.
- MACKAY, D. & R.S. MATSUGU, 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 51, pp. 434-439.
- MACKAY, D. & P.J. LEINONEN, 1977. Mathematical model of the behavior of oil spills on water with natural and chemical dispersion. Prepared for Fisheries and Environment Canada. Economic and Technical Review Report EPS-3-EC-77-19, 39p.
- MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980. A Mathematical Model Of Oil Spill Behavior. Department of Chemical and Applied Chemistry, University of Toronto, Canada
- MACKAY, D., W.Y. SHIU, & K.C. MA, 1992. **Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals**, Vol. I-IV. Lewis Publ., Chelsea, Michigan.
- MELLOR, G.L. & YAMADA, T. 1982. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys. Space Phys.**, 20, n. 4, p. 851-875.

- MIRANDA, L.B. de & CASTRO FILHO, B.M. 1979. Condições do movimento geostrófico das águas adjacentes a Cabo Frio (RJ). **Bolm. Inst. Oceanogr.**, S. Paulo, 28(2):79-93.
- OLIVEIRA, A.S., 1986. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. INPE-4008-TDL/239.
- OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. **Deep Sea Research**, v. 8, p. 789-802.
- SATYAMURTI, P. & MATTOS, L.F. 1989. Climatological lower trophospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Mon. Wea. Rev.**, 108:410-520.
- SIGNORINI, S.S. 1978. On the Circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of São Tomé and Guanabara Bay. **Deep Sea Res.**, 25, p. 481-490.3.
- STRAMMA, L.; IKEDA Y. & PETERSEN, R.G. 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, **Deep-Sea. Res.**, 37(12): p. 1875-1886.
- THIBODEAUX, L.J. 1979. **Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil**. John Wiley & Sons, NY 501p.
- THORPE S. A., 1984. On the determination of  $K_v$  in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. **American Meteorological Society**, pp. 861-863.
- TOMCZAK, M. & GODFREY, S.J. 1994. Regional Oceanography: an Introduction. **Pergamon Press**, New York, 422 p.

---

TURNER, D.B. 1970. Workbook of atmospheric dispersion estimates. Report PB-191 482. Research Triangle Park, North Carolina: Office of Air Programs, U.S. Environmental Protection Agency.

YOUSSEF, M., 1993. The behavior of the near ocean surface under the combined action of waves and currents in shallow water. PhD Dissertation, Department of Ocean Engineering, University of Rhode Island, Narragansett, RI.

YOUSSEF, M. & M.L. SPAULDING, 1993. Drift current under the action of wind waves. In: **Proceedings of the 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar**, Calgary, Alberta, Canada, p. 587-615.

**X EQUIPE TÉCNICA*****Equipe da Empresa Consultora Applied Science Consultoria Ltda.***

|  |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Profissional</b>  | Ana Carolina da Rocha |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda  |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0         |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 325047                |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | TODAS                 |
| <b>Assinatura</b>  |                       |

|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>Profissional</b>  | Carlos Eduardo Simão |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria      |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0        |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 434226               |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | VII                  |
| <b>Assinatura</b>  |                      |

|  |                              |
|--|------------------------------|
| <b>Profissional</b>  | Daniel Constantino Zacharias |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda         |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0                |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 638533                       |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | VII                          |
| <b>Assinatura</b>  |                              |

|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>Profissional</b>  | Eduardo Yassuda      |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 060.184.738.5        |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 94066                |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | TODAS                |
| <b>Assinatura</b>  |                      |

|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>Profissional</b>  | Gabriel Clauzet      |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  |                      |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 1031373              |
| <b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>  | I, II e III          |
| <b>Assinatura</b>  |                      |

|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>Profissional</b>  | José Edson Pereira   |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0        |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 326336               |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | I, II e III          |
| <b>Assinatura</b>  |                      |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Profissional</b>  | Hemerson Everaldo Tonin |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda    |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0           |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 1658739                 |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | I, II e III             |
| <b>Assinatura</b>  |                         |

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| <b>Profissional</b>  | Maria Regina Fonseca Guimarães |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda           |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0                  |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 434231                         |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | I, II e III                    |
| <b>Assinatura</b>  |                                |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Profissional</b>  | Marco Antonio Corrêa  |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda. |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0         |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 434236                |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | VII                   |
| <b>Assinatura</b>  |                       |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| <b>Profissional</b>  | Maurício Person Lammardo |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda.    |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0            |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 272165                   |
| <b>Responsável pelo(s) Capítulo (s)</b>  | IV a VIII                |
| <b>Assinatura</b>  |                          |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| <b>Profissional</b>  | Rafael Bonanata da Rocha |
| <b>Empresa</b>   | ASA Consultoria Ltda.    |
| <b>Registro no Conselho de Classe</b>  | 000.000.000-0            |
| <b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b> | 434253                   |
| <b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>  | VII                      |
| <b>Assinatura</b>  |                          |

