

Modelagem do Descarte de Água Produzida a partir dos Blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42 e BM-C-43, Bacia de Campos



Revisão 00

Julho/10



ASA South America
Rua Fidalga, 711
Vila Madalena – São Paulo –SP
CEP 05432-070
<http://www.asascience.com.br>



OGX
<http://www.ogx.com.br>

***Modelagem de Água Produzida na Área Abrangida
pelos Blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42
e BM-C-43, Bacia de Campos***

Equipe **ASA South America:**

ANA CAROLINA R. LAMMARDO

(Nº IBAMA : 325047)

BRENO MENDES Q. SIERRA

(Nº IBAMA : 1988616)

EDUARDO YASSUDA

(Nº IBAMA : 94066)

GABRIEL CLAUZET

(Nº IBAMA : 1031373)

MARCO ANTONIO CORRÊA

(Nº IBAMA : 434236)

MAURÍCIO PERSON LAMMARDO

(Nº IBAMA : 272165)

Revisão 00
Julho / 2010

A **ASA South America** é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da **ASA South America** como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da **ASA** for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da **ASA South America**”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a **ASA South America**.

ASA (Applied Science Associates South America), 2010. Modelagem de Água Produzida na Área Abrangida pelos Blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42 e BM-C-43, Bacia de Campos. Relatório Técnico Rev.01. São Paulo, 23 de julho de 2010. 90pp+anexos.

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 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO.....	I-8
II ANÁLISE DE DADOS	II-1
II.1 VENTOS.....	II-2
II.2 CORRENTES.....	II-6
II.3 ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR	II-11
II.4 TEMPERATURA E SALINIDADE	II-14
III MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	III-1
III.1 DADOS DE ENTRADA	III-1
III.1.1 ESTRUTURA TERMOHALINA.....	III-1
III.1.2 VENTOS.....	III-2
III.1.3 MARÉS.....	III-4
III.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO CONSIDERADO	III-5
III.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA	III-6
III.3.1 AVALIAÇÃO PARA A MARÉ	III-7
III.3.2 AVALIAÇÃO PARA AS CORRENTES.....	III-9
III.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	III-14
IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE E COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE	IV-1
V MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO.....	V-1
V.1 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO.....	V-1
VI MODELAGEM DA DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO	VI-1
VI.1 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	VI-1
VI.1.1 CENÁRIOS PROBABILÍSTICOS	VI-1
VI.1.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS.....	VI-4
VII RESULTADOS DA MODELAGEM DE DESCARTE DE EFLUENTES.....	VII-1
VII.1 RESULTADOS DA DILUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO	VII-1
VII.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS	VII-4
VII.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS	VII-8

VIII	CONSIDERAÇÕES FINAIS	VIII-1
IX	BIBLIOGRAFIA	IX-1
ANEXO A	DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL	A-1
A.1	EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM	A-2
A.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS	A-5
A.3	BIBLIOGRAFIA.....	A-6
ANEXO B	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CORMIX	B-1
B.1	BIBLIOGRAFIA.....	B-2
ANEXO C	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CHEMMAP	C-1
C.1	DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP	C-1
C.1.1	FORMULAÇÃO DO MODELO	C-4
C.2	DADOS DE ENTRADA	C-21
C.3	BIBLIOGRAFIA	C-22
ANEXO D	CONDIÇÕES DOS INSTANTES INICIAIS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS.....	D-1
ANEXO E	EQUIPE TÉCNICA E CADASTROS TÉCNICOS FEDERAIS IBAMA.....	E-1
E.1	EQUIPE TÉCNICA DA EMPRESA CONSULTORA APPLIED SCIENCE CONSULTORIA LTDA.....	E-1
E.2	CADASTROS TÉCNICOS FEDERAIS IBAMA	E-3

LISTA DE TABELAS

Tabela I-1 - Coordenadas (SAD69) e lâmina d'água (m) do ponto de descarte.	I-3
Tabela I-2 - Amplitude (cm) e fase local ($^{\circ}$) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica São Tomé (SP). Fonte: FEMAR (2000).....	I-12
Tabela II-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP ($23^{\circ}48'00,00''S$ e $41^{\circ}18'00,00''W$) para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de verão.	II-5
Tabela II-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP ($23^{\circ}48'00,00''S$ e $41^{\circ}18'00,00''W$) para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de inverno.	II-5
Tabela II-3 - Localização e período de coleta dos dados de corrente.....	II-6
Tabela II-4 - Amplitude (cm) e fase local ($^{\circ}$) das principais componentes harmônicas para as estações maregráficas de Enchova II (RJ) e Bom Abrigo (SP). Fonte: FEMAR (2000).....	II-14
Tabela IV-1 - Parâmetros utilizados para a modelagem das plumas de descarte de água produzida.	IV-1
Tabela IV-2 - Características do efluente de água produzida.	IV-1
Tabela IV-3 - Resultados dos testes de toxicidade com o equinodermo <i>Lytechinus variegatus</i> realizados com amostras de água produzida na Bacia de Campos.....	IV-2
Tabela IV-4 - Composição, concentrações limite da legislação e CENO para o efluente de água produzida descartada pela OGX na Bacia de Campos.	IV-2
Tabela V-1 - Dados de entrada adotados no CORMIX1.	V-3
Tabela VII-1 - Resultados das simulações do campo próximo para o descarte de água produzida da OGX na Bacia de Campos.	VII-1
Tabela VII-2 - Concentrações dos compostos selecionados no ponto de lançamento, concentrações limite da legislação, CENO e valores correspondentes à diluição no campo próximo para a água produzida descartada pela OGX na Bacia de Campos.....	VII-4
Tabela VII-3 - Diluições médias calculadas para a água produzida descartada a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.	VII-5
Tabela VII-4 - Concentrações calculadas para a água produzida descartada a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, no período de verão.	VII-8
Tabela VII-5 - Concentrações calculadas para a água produzida descartada a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, no período de inverno.....	VII-8

LISTA DE FIGURAS

- Figura I-1** - Localização do ponto de descarte, Bacia de Campos. Fonte: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002. I-2
- Figura I-2** - Médias de 60 anos (1948-2008) do vento a 10 m no período de verão. I-4
- Figura I-3** - Médias de 60 anos (1948-2008) do vento a 10 m no período de inverno. I-4
- Figura I-4** - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos de Reanálise do NCEP para o dia 1º de junho de 2003 (situação de bom tempo). I-5
- Figura I-5** - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos de Reanálise do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal). I-6
- Figura I-6** - Intensidade média anual do vento NCEP (22,5°S e 40,0°W) em 925 hPa no período de 1987 a 2007. I-7
- Figura I-7** - Intensidade média mensal do vento para de dados do NCEP (22,5°S e 40,0°W) em 925 hPa no período de 1987 a 2007. I-7
- Figura I-8** - 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-8
- Figura I-9** - Esquema da circulação oceânica na costa brasileira. As cores diferenciam as massas d'água existentes na região: Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA) e Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). I-9
- Figura I-10** - 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-10
- Figura I-11** - Média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM. ... I-12
- Figura I-12** - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente M_2 . I-14
- Figura II-1** - Mapa com a localização das estações de medição de TS, correntes, vento e elevação da superfície do mar. II-1
- Figura II-2** - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento NCEP durante o período de janeiro a dezembro de 1992, na posição 23°48'00,00S e 41°18'00,00W. II-2
- Figura II-3** - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para janeiro a março de 1992, Bacia de Campos. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de

vento (m/s), enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência (convenção meteorológica)..... II-3

Figura II-4 - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para junho a agosto de 1992, Bacia de Campos. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento (m/s), enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência (convenção meteorológica)..... II-4

Figura II-5 - Histograma direcional dos vetores de corrente no ponto BM333 (WOCE). Dados de corrente coletados a 230 m de profundidade, na região da Bacia de Santos, para o período de janeiro a março de 1992. Intervalo de amostragem: 2h. Intensidade das correntes (m/s) indicadas pelos círculos concêntricos, direção (graus) a partir do norte geográfico e, a barra lateral de cores informa o percentual de ocorrência relativa ao número total de observações. II-7

Figura II-6 - Histograma direcional dos vetores de corrente no ponto BM333 (WOCE). Dados de corrente coletados a 230 m de profundidade, na região da Bacia de Santos, para o período de junho a agosto de 1992. Intervalo de amostragem: 2h. Intensidade das correntes (m/s) indicadas pelos círculos concêntricos, direção (graus) a partir do norte geográfico e, a barra lateral de cores informa o percentual de ocorrência relativa ao número total de observações. II-8

Figura II-7 - Espectro de amplitudes (cm/s) da corrente registrada no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade. Verão de 1992, intervalo de amostragem: 2h..... II-9

Figura II-8 - Espectro de amplitudes (cm/s) da corrente registrada no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade. Inverno de 1992, intervalo de amostragem: 2h..... II-10

Figura II-9 - Previsão harmônica de maré para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992, na estação Enchova II (RJ). Previsão harmônica realizada pelo método de Schuremann (1941), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR..... II-11

Figura II-10 - Previsão harmônica de maré para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992, na estação Bom Abrigo (SP). Previsão harmônica realizada pelo método de Schuremann (1941), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR..... II-13

Figura II-11 - Seção vertical de Sigma-T ao longo de 23,1ºS para o período de janeiro a março (verão)..... II-15

Figura II-12 - Seção vertical de Sigma-T ao longo de 23,1ºS para o período de junho a agosto (inverno). II-16

Figura III-1 - Campos de temperatura e de salinidade de superfície (a partir dos resultados do OCCAM) projetados na grade do modelo hidrodinâmico. A salinidade é apresentada como isohalinas e a temperatura (°C) é apresentada através dos tons de cores. III-2

Figura III-2 - Instantâneo do campo de ventos NCEP projetado na grade do modelo hidrodinâmico.....	III-3
Figura III-3 - Mapa cotidal com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude da componente de maré M_2 , projetado na grade do modelo hidrodinâmico.....	III-4
Figura III-4 - Grade computacional do modelo hidrodinâmico e projeção da batimetria, com foco na região da Bacia de Campos.	III-5
Figura III-5 - Série temporal de elevação de superfície (em metros) para a localização geográfica de Enchova II (RJ) durante o mês de fevereiro de 1992. Resultado do modelo em vermelho e da previsão de maré em azul. Intervalo de amostragem: 1h.	III-8
Figura III-6 - Série temporal de elevação de superfície (em metros) para a localização geográfica de Bom Abrigo (SP) para o período de 5 de outubro a 5 de novembro de 1992. Resultado do modelo em vermelho e da previsão de maré em azul. Intervalo de amostragem: 1h.	III-9
Figura III-7 - Série temporal medida das componentes u e v da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 6 e 28 de janeiro de 1992 para o Ponto BM333.	III-11
Figura III-8 - Diagrama stick plot dos vetores de corrente medida no Ponto BM333 (a) e calculada pelo modelo (b) entre os dias 1º a 30 de janeiro de 1992.....	III-11
Figura III-9 - Série temporal medida das componentes u e v da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1º de junho e 2 de julho de 1992 para o Ponto BM333.	III-12
Figura III-10 - Diagrama stick plot dos vetores de corrente medida no Ponto BM333 (a) e calculada pelo modelo (b) entre os dias 1º e 30 de junho de 1992.....	III-12
Figura III-11 - Velocidade média e histograma direcional dos vetores de corrente medidos na região do ponto ACM12/BM333 (a), e resultantes da simulação numérica (b), para o período de janeiro a dezembro de 1992.	III-13
Figura III-12 - Instantâneo do campo de correntes de superfície para o verão, obtido a partir de resultados do POM.	III-15
Figura III-13 - Instantâneo do campo de correntes de superfície para o inverno, obtido a partir de resultados do POM.	III-16
Figura VI-1 - Grade habitat utilizada nas simulações com o modelo CHEMMAP. No detalhe inferior são apresentadas a localização do ponto, da grade e o continente como referência.	VI-3
Figura VII-1 - Diluição em relação à distância do ponto de lançamento da pluma de água produzida descartada nos períodos de verão e inverno.	VII-2
Figura VII-2 - Profundidades em relação à distância do ponto de lançamento da pluma de água produzida descartada nos períodos de verão e inverno.	VII-3



Figura VII-3 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida, simulada no período de verão, após 48 horas. VII-6

Figura VII-4 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida, simulada no período de inverno, após 48 horas..... VII-7

Figura VII-5 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida descartada, simulada no período de verão, após 48 horas. VII-9

Figura VII-6 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida, simulada no período de inverno, após 48 horas..... VII-10

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do processo de dispersão das plumas provenientes do descarte de água produzida a partir dos blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42 e BM-C-43, localizados na 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 das plumas 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 diluição da pluma). O campo próximo foi simulado utilizando-se o modelo CORMIX da *Cornell University*. Para simular a diluição da pluma no campo afastado, foi utilizado o modelo CHEMMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** Este modelo simula a diluição de produtos químicos (e.g. dispersão, entranhamento, deposição, dissolução, evaporação) e sua distribuição 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.

Para o descarte da água produzida foram realizadas simulações com duração de 48 horas, utilizando a vazão de 12.996 m³/dia e dois critérios ambientais: Resolução do CONAMA de nº 357/05 e Concentração de Efeito Não Observado (CENO).

Os resultados das simulações do descarte de água produzida mostraram que os componentes do efluente se enquadram na legislação (CONAMA 357/05) distâncias de até 79 m do ponto de lançamento. Para enquadramento no critério ambiental mais conservativo (CENO), é necessária uma diluição maior, alcançada em distância inferior a 160 m do ponto de lançamento. Os resultados mostram que o descarte de água produzida enquadra-se, em ambos os critérios ambientais considerados, em uma distância inferior ao estabelecido como a máxima distância permitida para a zona de mistura na Resolução do CONAMA de nº 393/07 (*i.e.* 500 m).

I INTRODUÇÃO

Neste relatório é apresentada a modelagem computacional de dispersão de água produzida descartada a partir dos blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42 e BM-C-43, localizados na Bacia de Campos.

Essa avaliação foi conduzida através da separação de dois domínios conhecidos por campo próximo e campo afastado. O campo próximo foi simulado com o modelo CORMIX da *Cornell University* e o campo afastado com 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 dos resultados de um modelo hidrodinâmico implementado pela equipe da **ASA South America**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), e apresentado em ASA (2009).

A seguir, o Capítulo I, além de apresentar os objetivos desse estudo, fornece informações sobre a área em questão. O Capítulo II apresenta a análise dos dados meteorológicos e oceanográficos relevantes aos estudos de modelagem. A modelagem hidrodinâmica é descrita do Capítulo III, assim como a avaliação desta. O Capítulo IV mostra as características do descarte de efluentes. O Capítulo V descreve a modelagem do fator de diluição do campo próximo enquanto o Capítulo VI descreve a modelagem do campo afastado. Os resultados das simulações apresentados no Capítulo VII. Por fim, no Capítulo VIII os resultados obtidos neste estudo são discutidos.

Os Anexos A, B e C apresentam, respectivamente, a descrição dos modelos POM, CORMIX e CHEMMAP. O Anexo D apresenta as condições meteorológicas e oceanográficas referentes aos instantes iniciais das simulações determinísticas críticas, apresentadas neste estudo. Por fim, o Anexo E apresenta a relação da equipe técnica e respectivas cópias dos cadastros técnicos federais do IBAMA.

I.1 ÁREA DE ESTUDO

As simulações da dispersão de efluentes foram realizadas a partir do ponto mais raso dos blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42 e BM-C-43 na Bacia de Campos, ao largo do litoral do Estado do Rio de Janeiro, segundo solicitação da contratante, conforme mostra a Figura I-1.

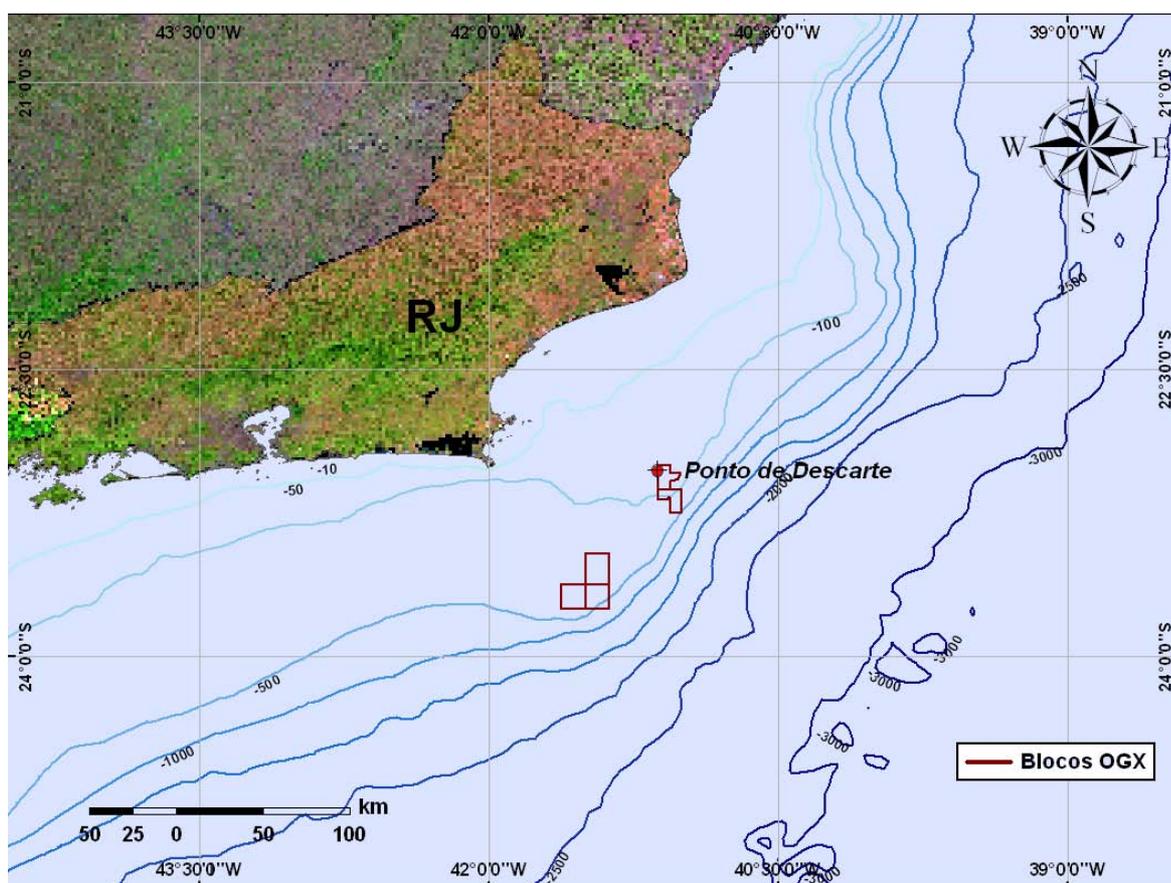


Figura I-1 - Localização do ponto de descarte, Bacia de Campos. Fonte: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002¹.

¹ MIRANDA, E.E. de & COUTINHO, A.C. (Coord.), 2002. Brasil Visto do Espaço. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002. CD-ROM.

As coordenadas do ponto de lançamento foram especificadas pela OGX e são listadas na Tabela I-1.

Tabela I-1 - Coordenadas (SAD69) e lâmina d'água (m) do ponto de descarte.

PONTO DESCARTE	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
Ponto mais raso dos blocos da OGX	23°01'46,26"S	41°07'27,38"W	~ 94

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, como circulações associadas à topografia e à brisa marítima.

A influência da ASAS está associada a ventos de NE/ENE e a condições de tempo estáveis, devido à subsidência induzida na região de alta pressão. A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região, devido ao deslocamento da ASAS, é ilustrado na Figura I-2 para o período de verão (janeiro) e na Figura I-3 para o período de inverno (junho). Tais figuras apresentam o comportamento sazonal da circulação atmosférica obtida através de médias mensais de 60 anos (1948–2008) das reanálises do modelo de circulação geral do NCEP/NCAR². Nessa análise foram utilizados dados de vento na altura de 10 m acima da superfície do mar.

² National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR), disponibilizados pelo Climate Diagnostics Center (CDC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

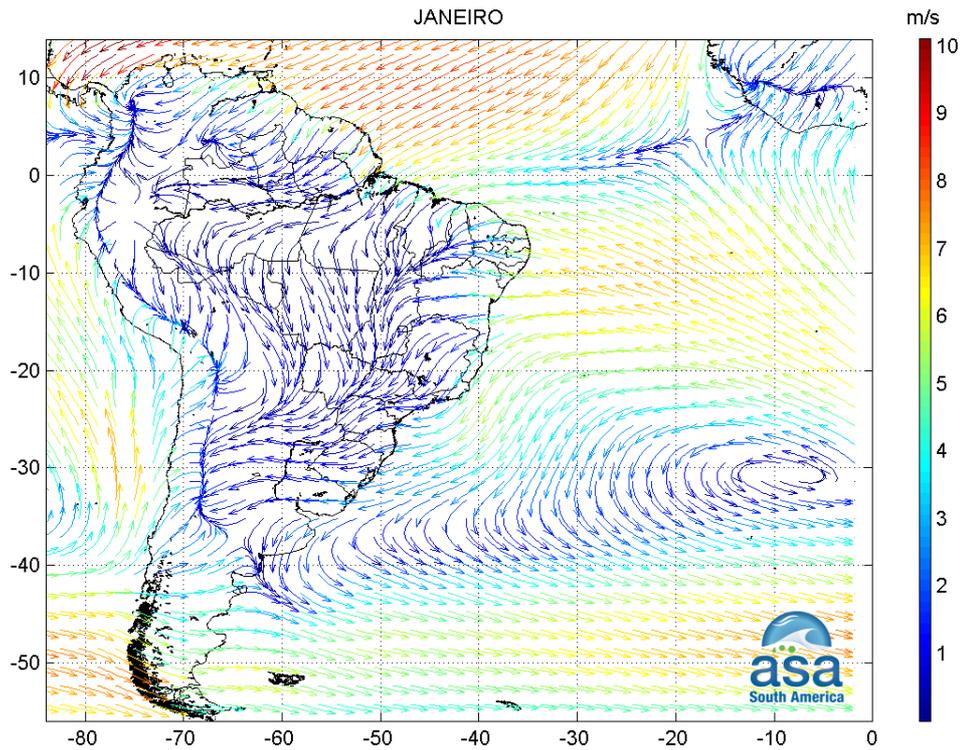


Figura I-2 - Médias de 60 anos (1948-2008) do vento a 10 m no período de verão.

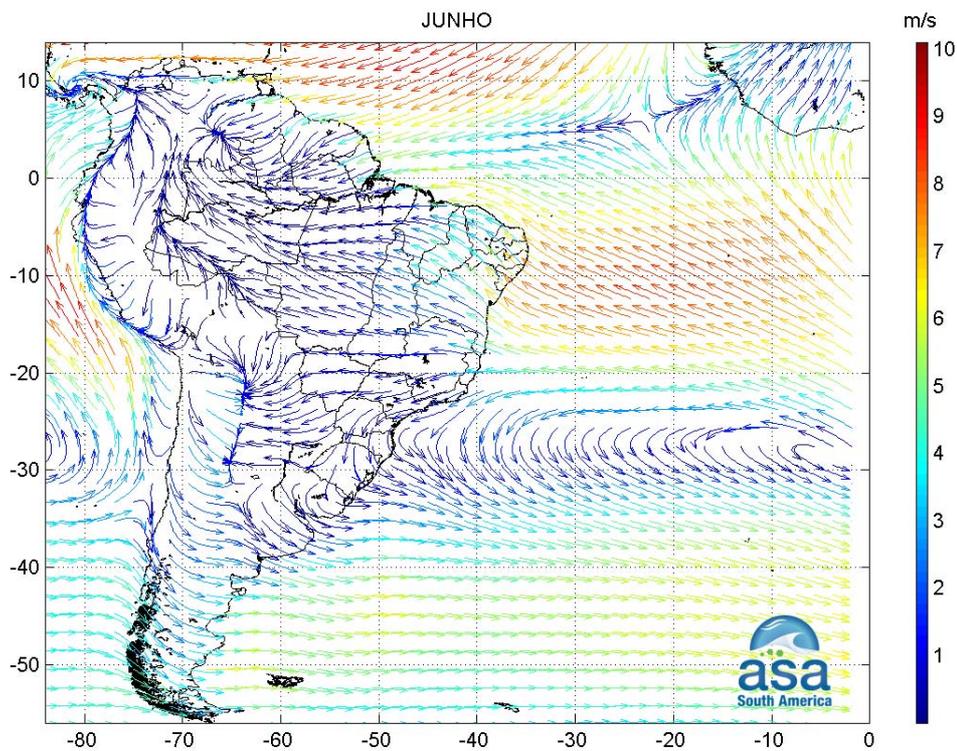


Figura I-3 - Médias de 60 anos (1948-2008) do vento a 10 m no período de inverno.

Periodicamente a situação de bom tempo induzida pela ASAS é perturbada pelo deslocamento de sistemas atmosféricos transientes (*i.e.* sistemas frontais e ciclones extratropicais e subtropicais), que atuam durante o ano todo sobre todo o Atlântico sul, com frequências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas. A Figura I-4 e a Figura I-5 ilustram instantâneos do vento NCEP/NCAR a 10 m de altura para a América do Sul, em situação de bom tempo e de deslocamento de um sistema frontal, respectivamente.

Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre todo o Atlântico Sul e as perturbações atmosféricas geradas são essenciais para a determinação das variabilidades intra-anuais na superfície oceânica.

O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala em médios e altos níveis da atmosfera. As Regiões Sul e Sudeste do Brasil são ditas frontogenéticas, ou seja, regiões onde as frentes podem se formar ou se intensificar (Satyamurty & Mattos, 1989).

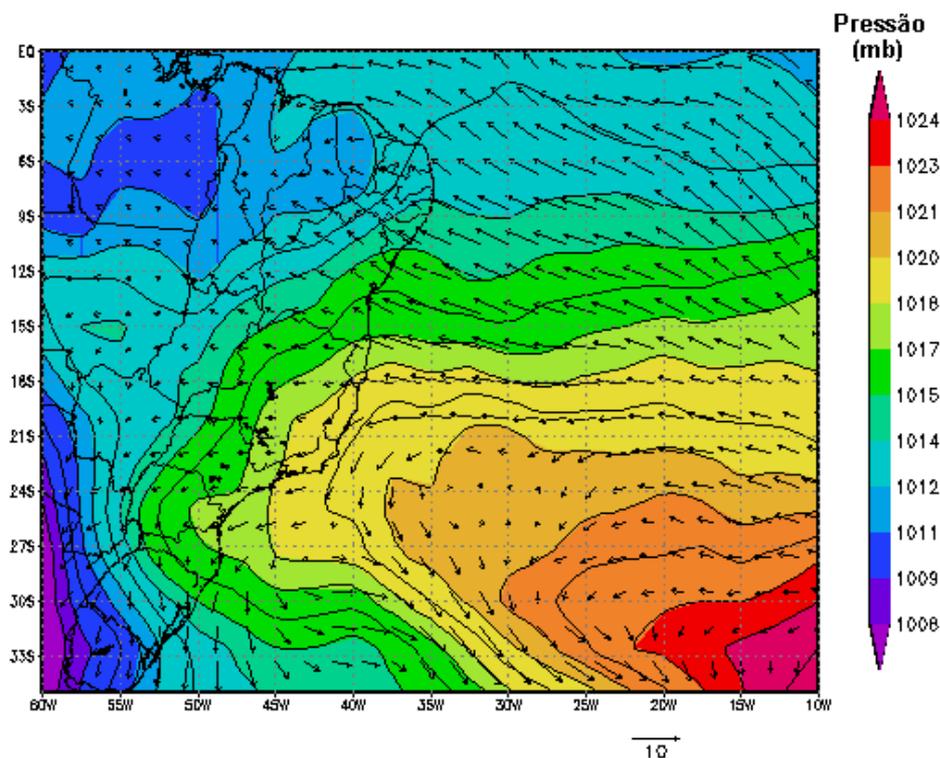


Figura I-4 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos de Reanálise do NCEP para o dia 1º de junho de 2003 (situação de bom tempo).

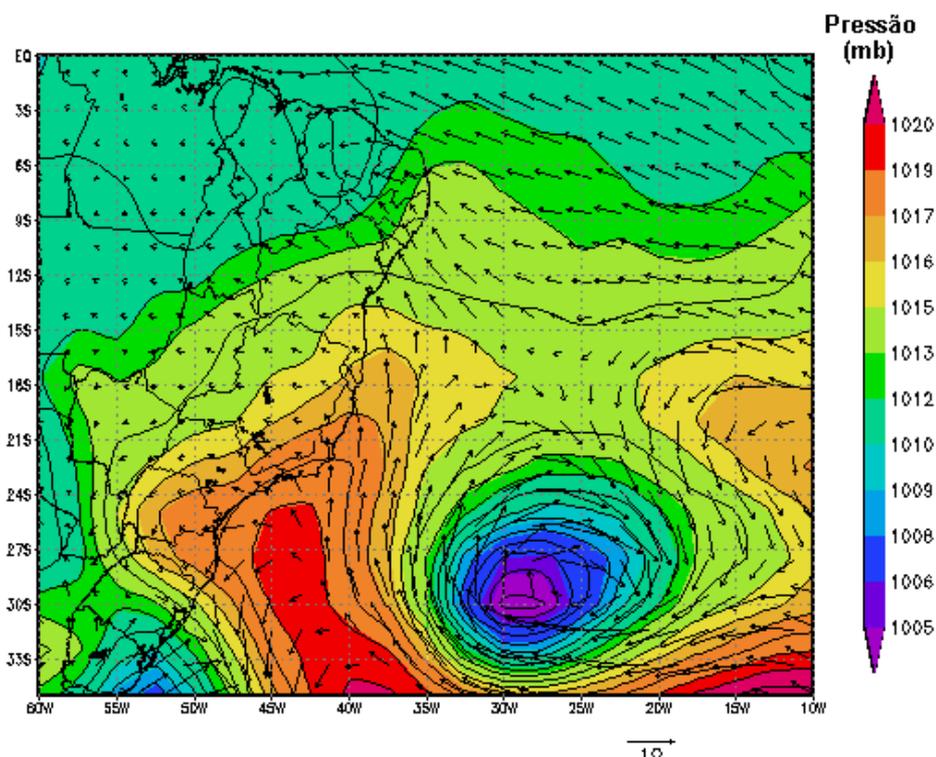


Figura I-5 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos de Reanálise do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).

Uma análise dos ventos em baixos níveis foi realizada com dados de vento de reanálise do NCEP no nível de 925 hPa, disponíveis com resolução temporal de 6 horas e espacial de 2,5°, para o período de 1987 a 2007, na posição de 22,5° S e 40,0° W.

A intensidade média anual do vento é apresentada na Figura I-6. Observa-se que a média anual do vento em todo período indicou intensidade de 7,03 m/s e a média anual mais intensa ocorreu em 1992 (7,46 m/s).

A Figura I-7 apresenta o comportamento médio mensal da intensidade do vento para o período analisado. Verifica-se que a média mensal menos intensa ocorre no outono e a mais intensa no verão. A velocidade mensal máxima do vento ocorreu durante o verão e a mínima durante o inverno. Com relação ao ano de 1992, observa-se maior intensidade do vento para a maioria dos meses, quando comparada à média mensal do período considerado (1987-2007).

Portanto, com relação à intensidade do vento, o ano de 1992 apresentou valores superiores à média, o que o torna um ano importante para a utilização em simulações que reproduzam eventos extremos, permitindo modelagens mais conservativas.

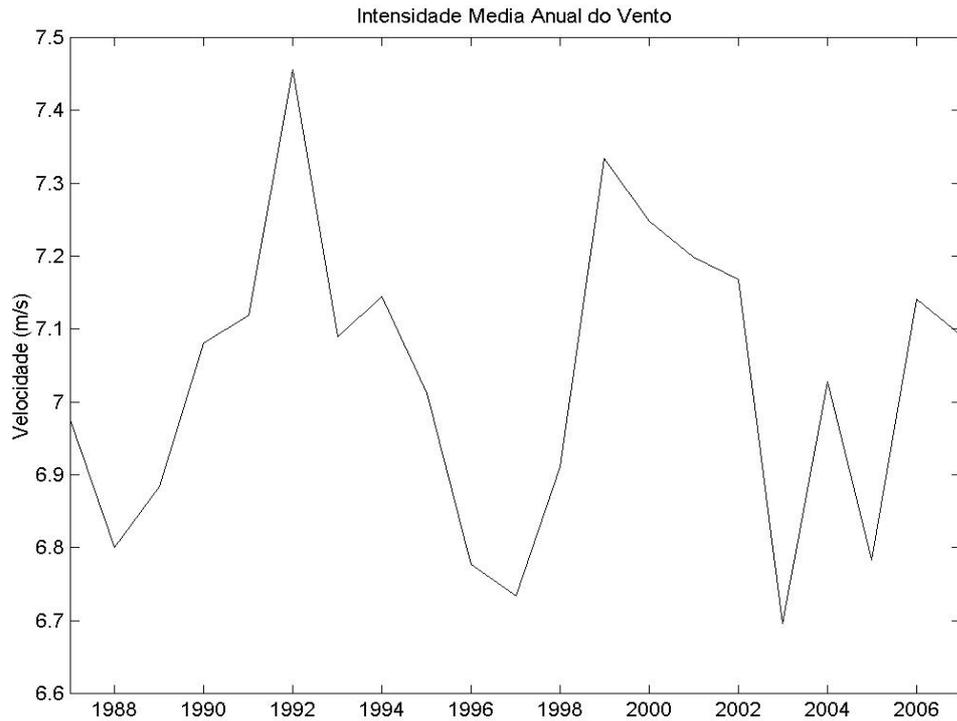


Figura I-6 - Intensidade média anual do vento NCEP (22,5°S e 40,0°W) em 925 hPa no período de 1987 a 2007.

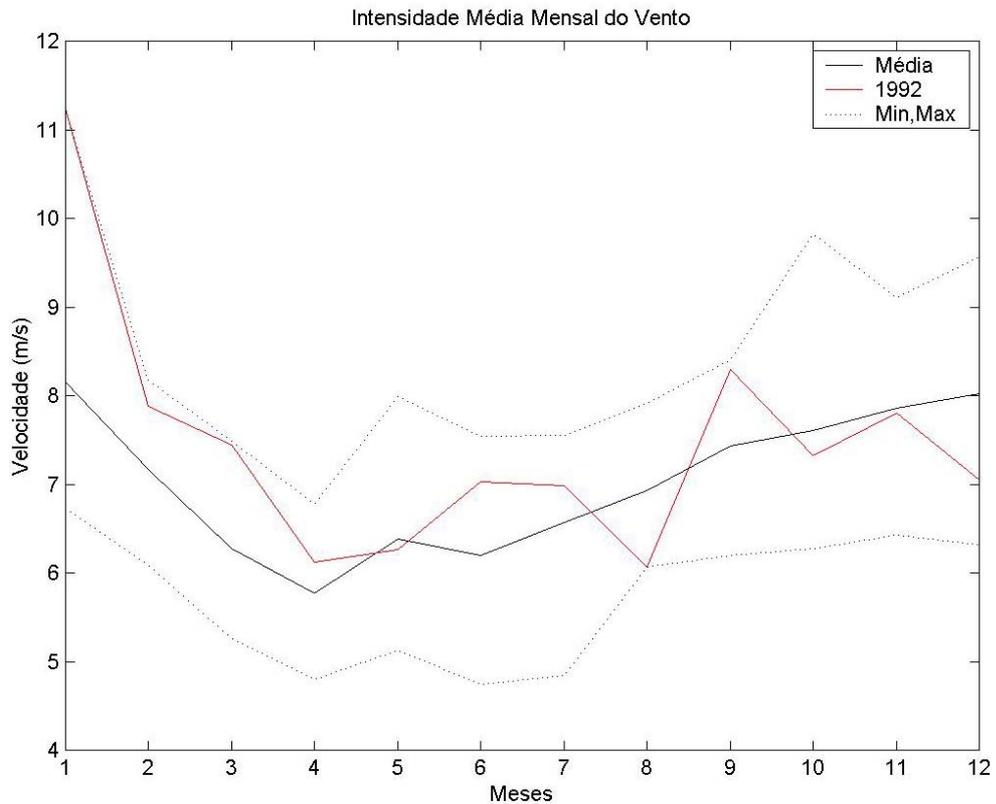


Figura I-7 - Intensidade média mensal do vento para de dados do NCEP (22,5°S e 40,0°W) em 925 hPa no período de 1987 a 2007.

I.1.2 Características Oceanográficas da Região

Na costa sudeste brasileira, o padrão de circulação está relacionado ao “Sistema Corrente do Brasil” (Godoi, 2005), sistema de correntes de contorno formadas pela Corrente do Brasil (CB), fluindo para sul-sudoeste, com seus meandros e vórtices, e pela subjacente Corrente de Contorno Intermediária (CCI), fluindo para norte-nordeste. Sobre a plataforma, o padrão predominante está relacionado ao campo de vento e à maré, com eventuais intrusões da CB. A partir do talude e em região oceânica, há predomínio do sistema CB-CCI.

A Figura I-8 ilustra o Giro Sub-Tropical do Atlântico Sul na superfície, onde a CB é a corrente de contorno oeste, que se origina na bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE) e se separa da costa na região da confluência com a Corrente das Malvinas (CM).

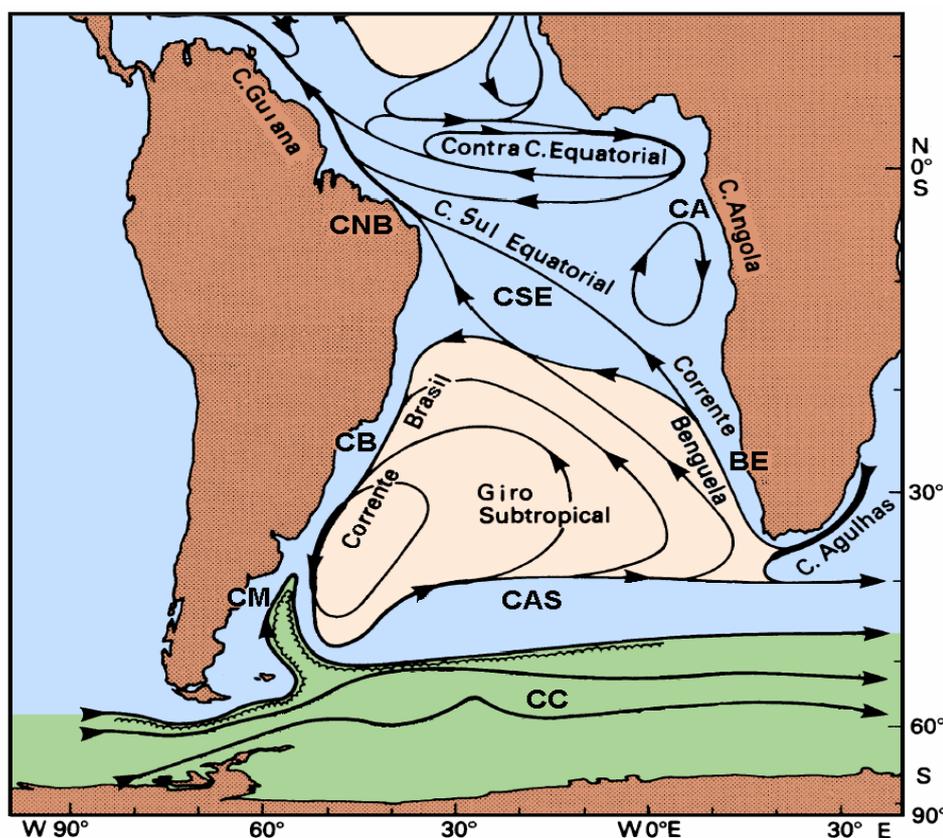


Figura I-8 - Representação da circulação no Oceano Atlântico Sul, indicando as seguintes correntes oceânicas: Corrente Circumpolar (CC), Corrente do Atlântico Sul (CAS), Corrente de Benguela (BE), Corrente de Angola (CA), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente do Brasil (CB) e Corrente das Malvinas (CM). Adaptado de Tomczak & Godfrey (1994).

A Figura I-9 ilustra a estrutura vertical das correntes de contorno presentes na costa brasileira. A CB flui para sudoeste, com espessura característica de 500 m ao largo do sudeste brasileiro; a Corrente de Contorno Intermediária (CCI) flui para nordeste, ocupando porções intermediárias do talude continental, com extensão vertical de pelo menos 700 m (Böebel *et al.*, 1999 *apud* Silveira *et al.*, 2000; Stramma & England, 1999). Abaixo da CCI, ocupando por vezes cerca de dois quilômetros de coluna de água e com uma estrutura vertical complexa, a Corrente de Contorno Profunda (CCP) flui para o sudoeste (Stramma & England, 1999).

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-9, enquanto o outro flui seguindo a linha de quebra da plataforma (Signorini, 1978).

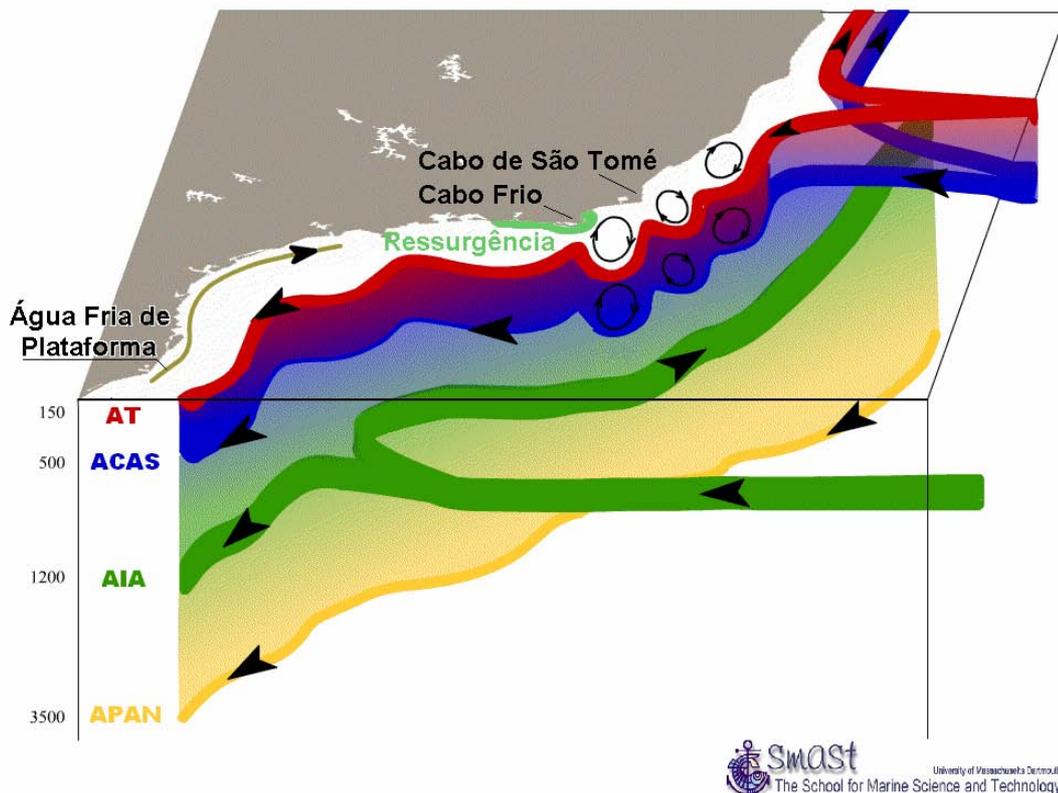


Figura I-9 - Esquema da circulação oceânica na costa brasileira. As cores diferenciam as massas d'água existentes na região: Água Tropical (AT), Água Central do

*Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA) e Água Profunda do Atlântico Norte (APAN).*³

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 a formação de vórtices e meandros, como indicado na Figura I-10.

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).

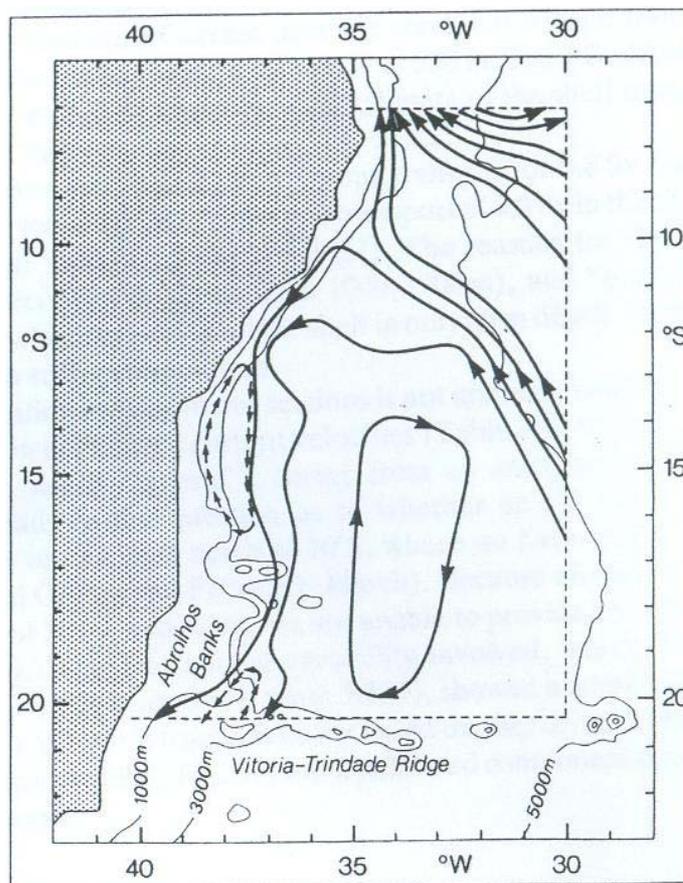


Figura I-10 - Representação esquemática do campo de fluxo geostrófico nos primeiros 500 m, com base em dados hidrográficos históricos, coletados na região demarcada. As linhas cheias correspondem a transporte de 2 Sv e a linha tracejada de 1 Sv (Adaptado de Stramma et al., 1990).

³ <http://www.smast.umassd.edu/modeling>

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, disponibilizados pela Universidade de Southampton. O OCCAM foi elaborado com base no GFDL MOM⁴, incluindo uma superfície livre e esquemas de advecção melhorados. A grade, para o Oceano Atlântico Sul, é regular ($\frac{1}{4}$ 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 LEVITUS⁵, forçado na superfície com dados de vento do ECMWF⁶ (médias mensais) e relaxado para os campos sazonais de temperatura e salinidade do LEVITUS.

A Figura I-11 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.

⁴ *Global Fluid Dynamics Laboratory - Modular Ocean Model.*

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

⁶ *European Centre for Medium-range Weather Forecast.*

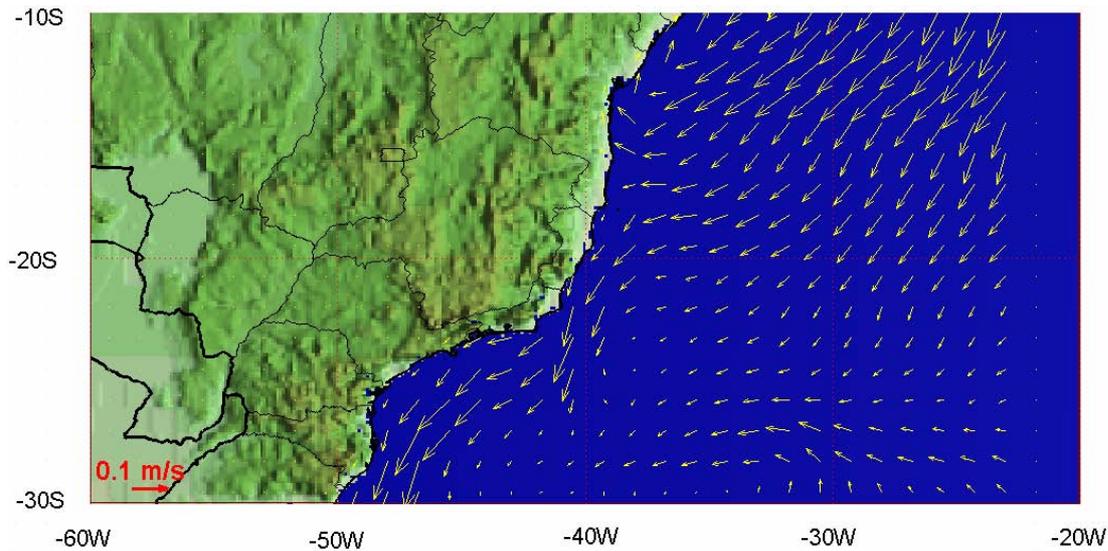


Figura I-11 - Média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM.

Com relação à maré astronômica, observa-se, na região da Bacia de Santos, a predominância das componentes semidiurnas, conforme indicam as constantes harmônicas da FEMAR⁷ para a estação maregráfica Cabo de São Tomé (22°07,7'S e 41°03,2'W) apresentadas na Tabela I-2. Observa-se que as principais componentes para a região são M_2 e S_2 , com amplitudes de 31,4 cm e 19,4 cm, respectivamente. A componente O_1 tem amplitude de 8,5 cm e todas as demais componentes apresentam amplitude inferior a 7 cm.

Tabela I-2 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica São Tomé (SP). Fonte: FEMAR (2000).

⁷ Fundação de Estudos do Mar.

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

Nome da Estação :		CABO DE SÃO TOMÉ - RJ			
Localização :		Na praia em frente ao Farol de São Tomé			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		22° 07,7' S	Longitude :		41° 03,2' W
Período Analisado :		26/01/65 a 26/02/65		Nº de Componentes : 39	
Análise Harmônica :		Método Tidal Liverpool Institute			
Classificação :		Maré de Desigualdades			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		II H 59 min	Nível Médio (Zo):		67 cm acima do NR.
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		123 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHW) :		112 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		24 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :		8 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	3,6	139
Ssa	-	-	N ₂	6,3	103
Mm	3,4	299	NU ₂	1,2	103
Mf	-	-	M ₂	31,4	078
MTM	-	-	L ₂	2,2	084
Msf	6,0	134	T ₂	1,1	084
Q ₁	3,1	070	S ₂	19,4	084
O ₁	8,5	088	K ₂	5,3	084
M ₁	1,2	053	MO ₃	0,8	044
P ₁	1,8	149	M ₃	0,4	040
K ₁	5,5	149	MK ₃	0,1	183
J ₁	0,6	076	MN ₄	0,5	048
OO ₁	0,3	316	M ₄	1,8	075
MNS ₂	-	-	SN ₄	0,2	200
2N ₂	0,8	128	MS ₄	2,1	083
Referências de Nível: RNs colocadas na praia, em pilastras de concreto, em frente ao farol.					
Obs: Não há referências a outros períodos.					

Código BNDO: 50112

A Figura I-12 apresenta o mapa cotidal, com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude de maré para a costa sul-sudeste brasileira (CSR3⁸). Observa-se ser esta uma região de pequena resposta a forçante astronômica da maré; exceção feita ao platô de Abrolhos e região interna da Bacia de Santos, onde há evidente amplificação do sinal de maré.

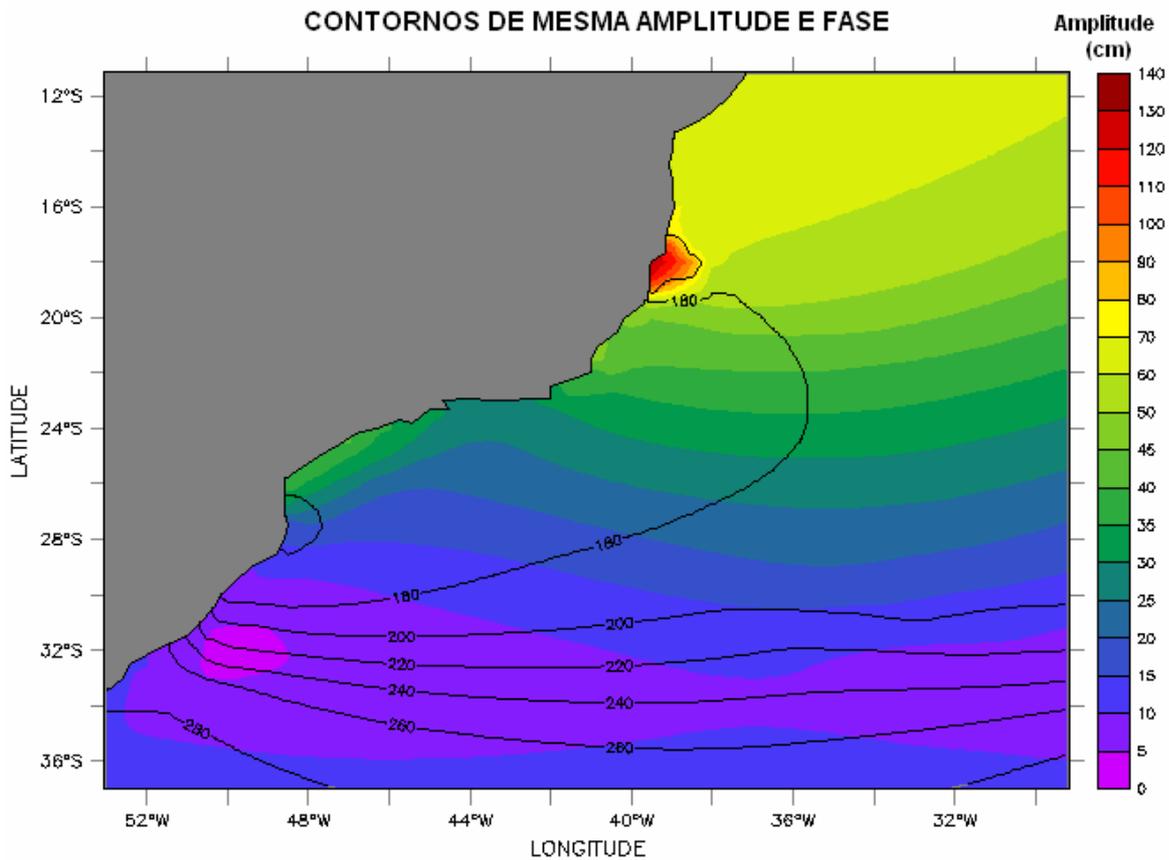


Figura I-12 - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente M_2 .

⁸ Center for Space Research da Universidade do Texas (www.csr.utexas.edu).

II ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises das informações (dados) pretéritas, meteorológicas e oceanográficas, nas imediações da região de estudo. Esta fase teve por objetivo: (1) uma melhor compreensão da dinâmica da área, (2) identificar padrões característicos com o intuito de calibrar/validar o modelo hidrodinâmico, e (3) para aplicação direta na elaboração das simulações de descarte de efluentes. A localização dos dados disponíveis para análise é apresentada na Figura II-1.



Figura II-1 - Mapa com a localização das estações de medição de TS, correntes, vento e elevação da superfície do mar.

II.1 VENTOS

Os dados de vento analisados são referentes ao período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992. Abaixo, são apresentadas análises estatísticas dos ventos NCEP/NCAR realizadas pontualmente na área de estudo. Para estas análises foi extraída uma série temporal na região referente à posição de latitude 23°48'00,00"S e longitude 41°18'00,00"W. A Figura II-2 apresenta o diagrama *stick plot* dos valores médios diários desses dados de vento.

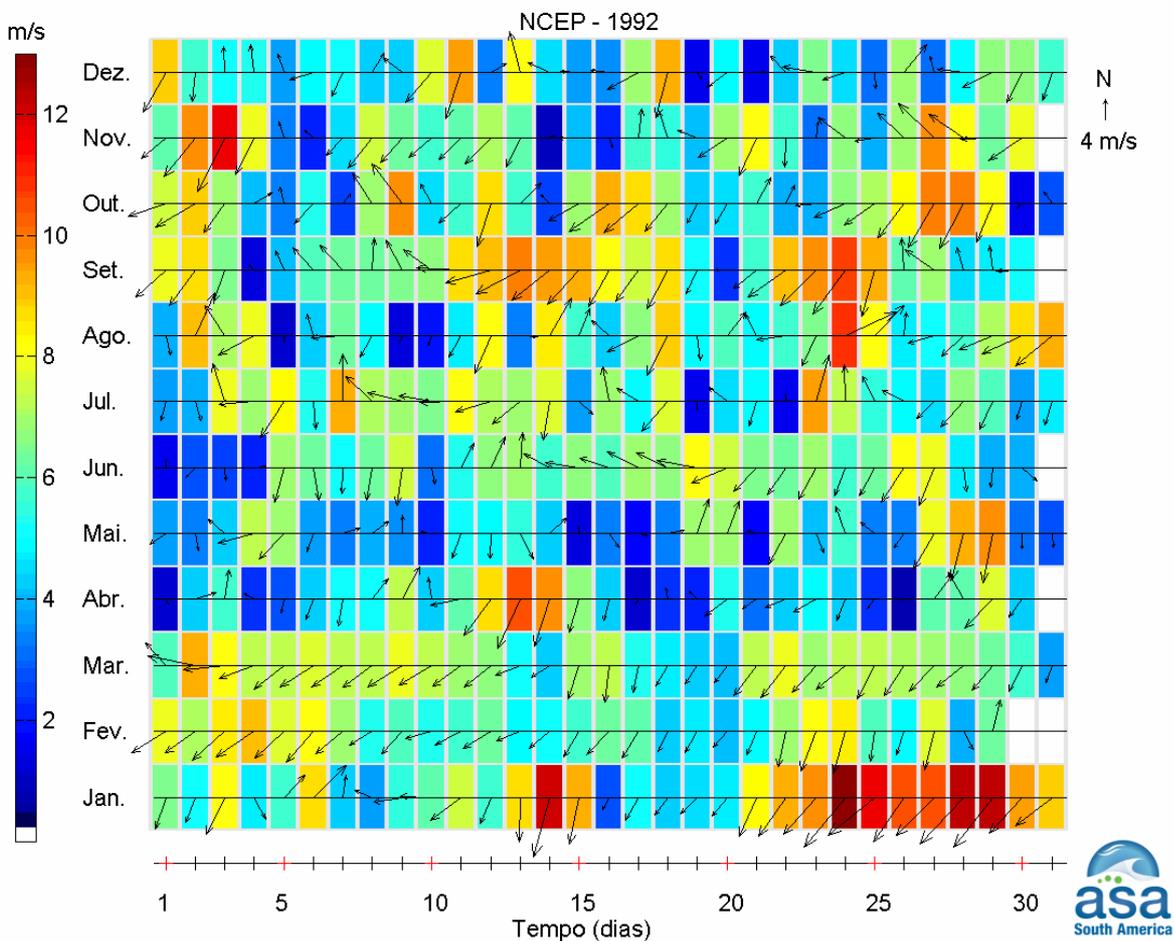
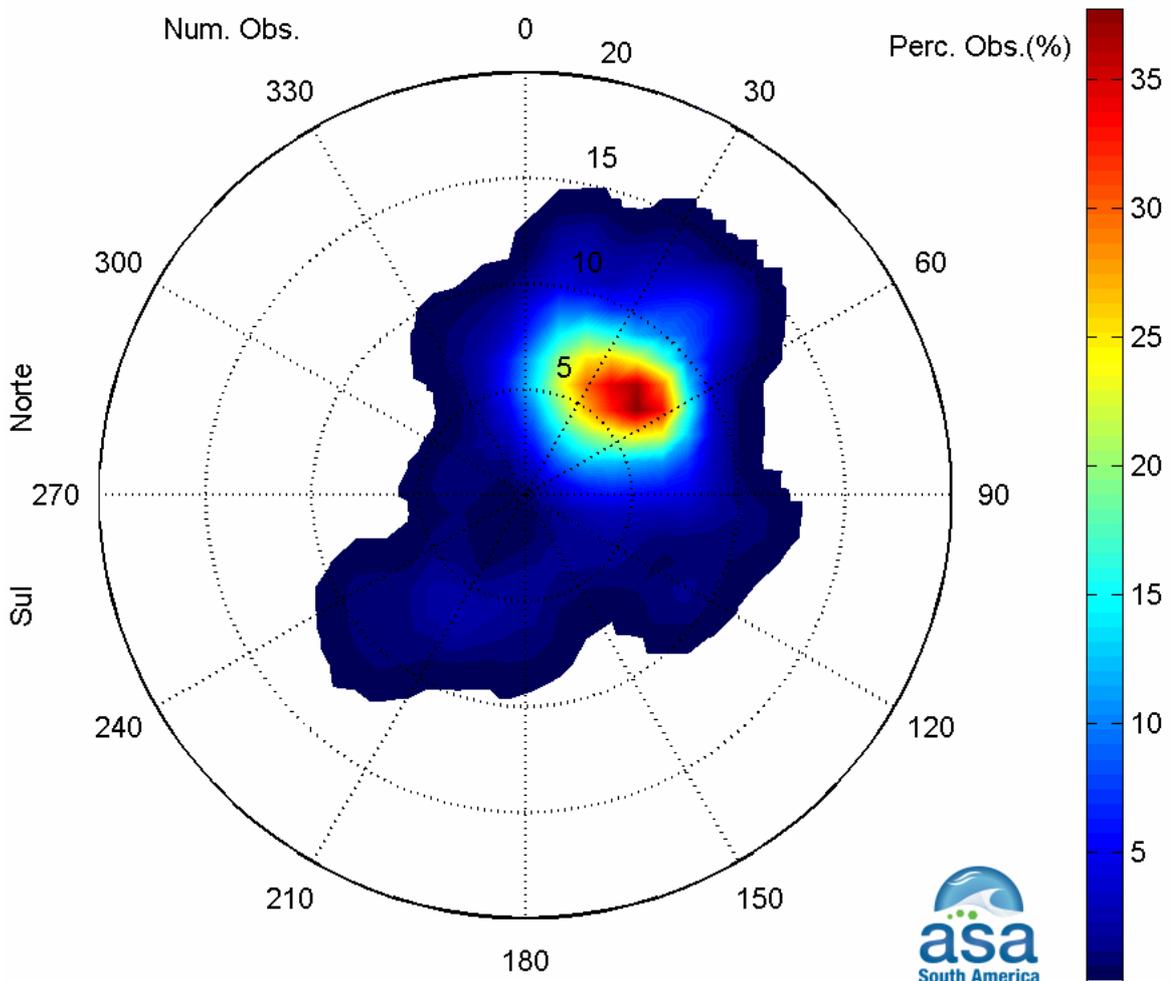


Figura II-2 - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento NCEP durante o período de janeiro a dezembro de 1992, na posição 23°48'00,00S e 41°18'00,00"W.

A Figura II-3 e a Figura II-4 apresentam os histogramas direcionais dos dados de vento NCEP, para os períodos de verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto). A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vento (em m/s) e a escala de cores representa a porcentagem de incidência (Perc. Obs.). Observa-se que, durante o período de verão, os ventos mais frequentes são provenientes de nordeste; e no inverno existe um aumento de ocorrências de ventos oriundos de leste e sul.

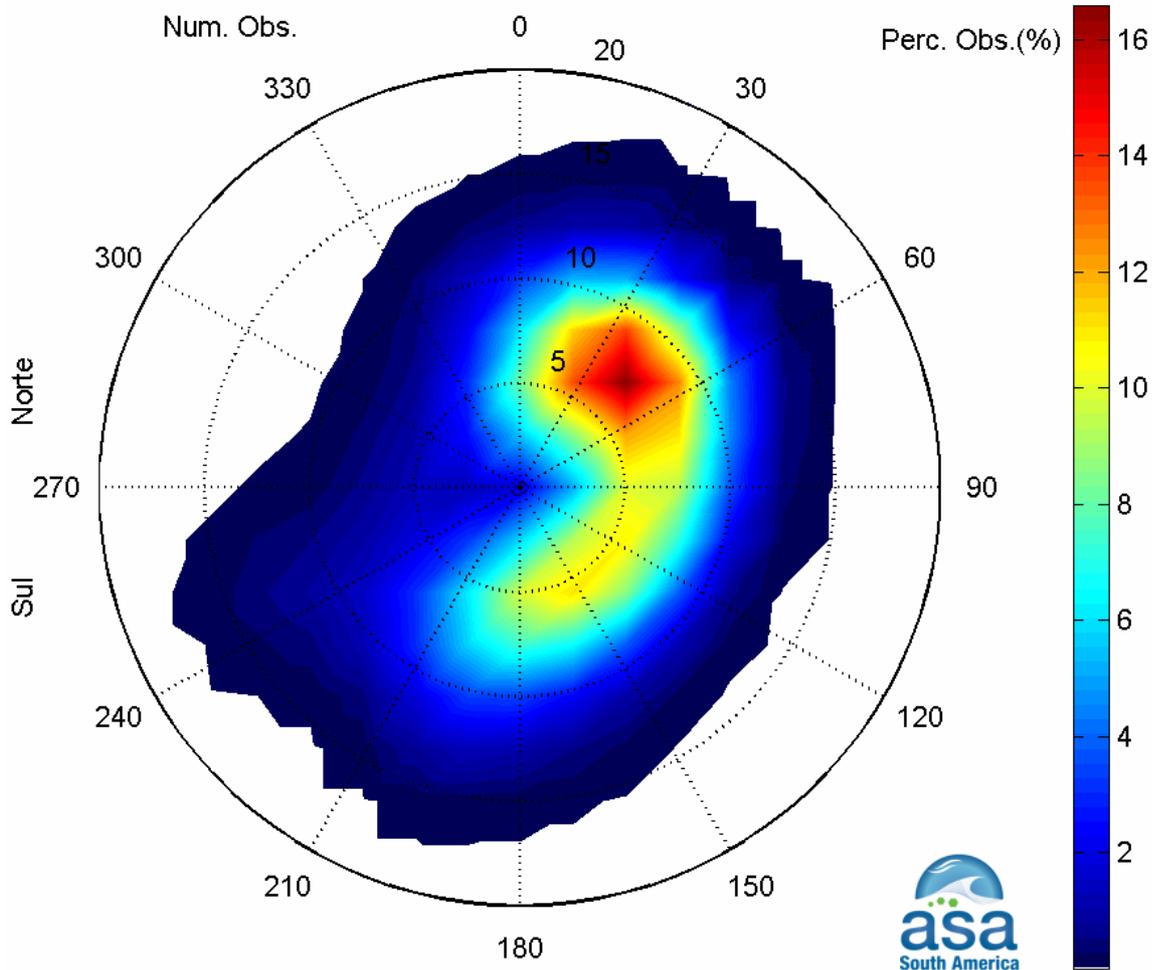
Histograma direcional dos vetores de vento (m/s), total de observações = 2184



Direção em graus a partir do norte geográfico - convenção meteorológica

Figura II-3 - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para janeiro a março de 1992, Bacia de Campos. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento (m/s), enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência (convenção meteorológica).

Histograma direcional dos vetores de vento (m/s), total de observações = 2208



Direção em graus a partir do norte geográfico - convenção meteorológica

Figura II-4 - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para junho a agosto de 1992, Bacia de Campos. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento (m/s), enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência (convenção meteorológica).

A Tabela II-1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento NCEP para o período de verão. Observa-se que os ventos mais frequentes (37,8%), os ventos com velocidades médias máximas (7,5 m/s) e os ventos mais fortes registrados (13,9 m/s) foram provenientes de NE. Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 10,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

Tabela II-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP (23°48'00,00"S e 41°18'00,00"W) para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de verão.

Obs.: a direção é medida em graus a partir do Norte geográfico, convenção meteorológica.

Vel. oc. (m/s)	D I R E Ç Ã O																Tot.	Perc.	Di r. Méd.	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW				
0.0- 2.0	1	1	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0.5	51
2.0- 4.0	13	45	45	27	14	7	7	0	2	0	0	2	2	7	3	10	184	8.4	39	
4.0- 6.0	62	125	160	71	25	9	4	5	10	8	10	4	3	0	0	6	502	23.0	40	
6.0- 8.0	56	184	320	178	33	3	5	0	10	18	14	0	0	0	13	834	38.2	45		
8.0-10.0	41	122	153	50	20	16	2	0	0	2	7	7	0	0	3	423	19.4	41		
10.0-12.0	9	36	100	2	8	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	160	7.3	39		
12.0-14.0	9	14	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	3.0	36		
Total	191	527	825	332	102	35	18	5	22	28	36	13	5	7	3	2181				
Porc.	8.8	24.2	37.8	15.2	4.7	1.6	0.8	0.2	1.0	1.3	1.7	0.6	0.2	0.3	0.1	1.5				
Vel. méd.	6.9	7.0	7.5	6.5	6.3	6.5	4.9	4.2	5.6	6.5	7.4	6.3	3.8	3.1	3.1	5.8				
Vel. máx.	12.6	13.5	13.9	11.0	10.8	9.9	8.7	4.7	7.3	8.9	11.0	8.4	4.1	3.6	3.2	8.5				
Perct. (0.9)	8.0	8.0	10.0	8.0	8.0	8.0	7.4	4.0	6.0	6.0	10.0	8.0	4.0	2.0	2.0	6.6				

A Tabela II-2 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento NCEP para o período de inverno. Observa-se que os ventos mais frequentes são provenientes da direção NE (16,6%). Os ventos com velocidades médias máximas vieram de WSW (7,7 m/s); e os ventos mais fortes registrados (11,9 m/s) foram provenientes de ENE. Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 10,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

Tabela II-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP (23°48'00,00"S e 41°18'00,00"W) para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de inverno.

Obs.: a direção é medida em graus a partir do Norte geográfico, convenção meteorológica.

Vel. oc. (m/s)	D I R E Ç Ã O																Tot.	Perc.	Di r. Méd.
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW			
0.0- 2.0	7	3	3	3	3	0	2	4	3	7	5	3	1	5	3	5	57	2.6	292
2.0- 4.0	24	23	25	5	17	20	18	34	13	11	11	2	7	15	11	17	253	11.5	87
4.0- 6.0	45	64	53	37	28	37	63	58	66	30	7	5	5	6	2	8	514	23.3	104
6.0- 8.0	42	94	81	90	54	84	46	46	68	35	10	7	0	0	3	7	667	30.2	87
8.0-10.0	23	101	170	96	47	6	14	21	29	23	24	3	0	0	0	6	563	25.5	58
10.0-12.0	7	25	31	10	0	0	0	5	20	18	0	13	0	0	0	129	5.8	69	
Total	148	310	363	241	149	147	143	168	199	124	57	33	13	26	19	43	2183		
Porc.	6.8	14.2	16.6	11.0	6.8	6.7	6.6	7.7	9.1	5.7	2.6	1.5	0.6	1.2	0.9	2.0			
Vel. méd.	5.9	7.1	7.6	7.4	6.6	6.1	5.8	5.7	6.6	6.7	6.2	7.7	3.6	2.8	3.5	4.5			
Vel. máx.	10.7	11.8	11.4	11.9	9.3	9.2	8.6	11.0	10.9	11.8	9.5	11.6	5.6	5.7	7.6	9.4			
Perct. (0.9)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	6.0	6.4	8.0	9.2	10.0	8.0	10.0	4.0	4.0	6.0	8.0			

II.2 CORRENTES

As informações de correntes apresentadas a seguir foram obtidas junto a PETROBRAS e ao Banco de Dados do WOCE⁹. A localização, profundidade e período de coleta são apresentados na Tabela II-3. A disposição espacial dos pontos de coleta de dados de corrente é apresentada na Figura II-1.

Tabela II-3 - Localização e período de coleta dos dados de corrente.

DADO	LATITUDE / LONGITUDE	PROFUNDIDADE (m)	PERÍODO
PETROBRAS - PC	22°43'00,12"S e 41°16'00,12"W	15	03/fev/92 a 31/dez/92
WOCE ACM12/BM333	27°54'07,20"S e 46°42'14,40"W	230	03/jan/91 a 26/nov/92

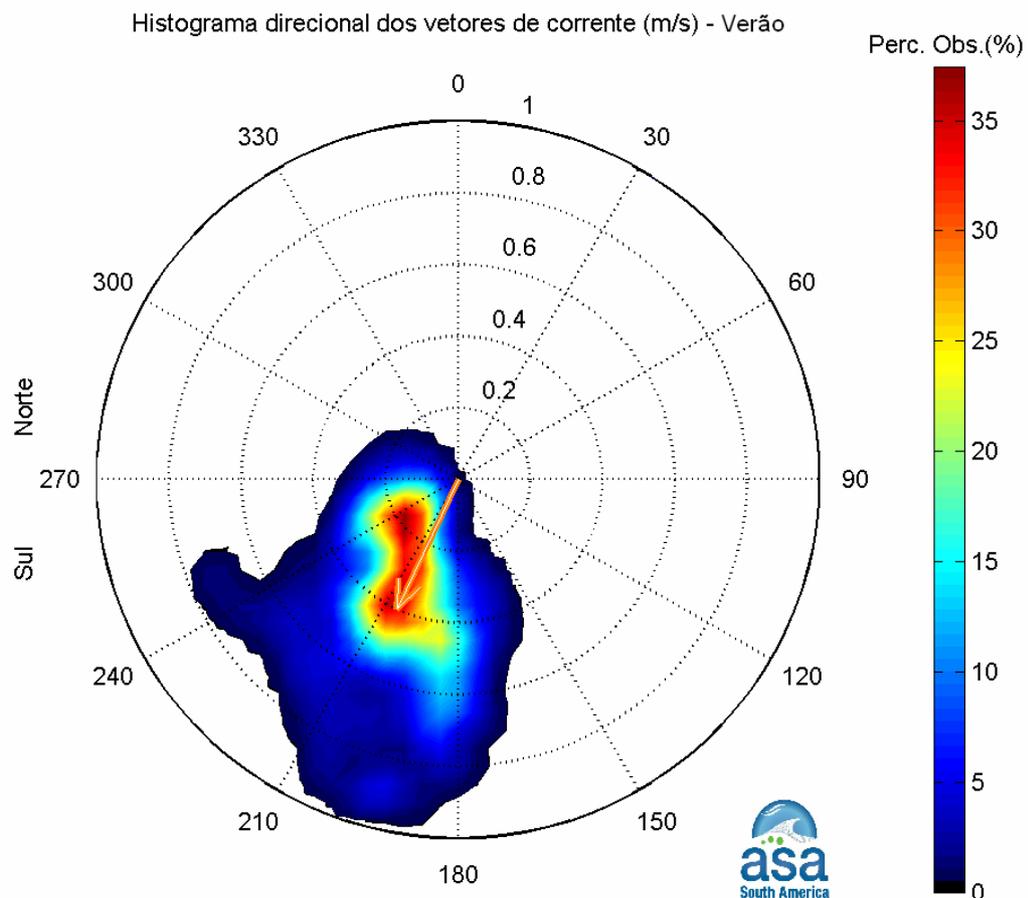
Como os dados de corrente do Ponto PC são privados, não será possível apresentar a análise dos mesmos. Uma análise detalhada destes dados é encontrada em ASA (2009). Neste, verifica-se que a análise dos dados do Ponto PC mostraram que a circulação naquela região é predominada pela CB, com moderada influência de maré (semi-diurna), sendo este padrão alterado por passagens de sistemas frontais (frentes frias) durante o inverno.

A seguir, são analisados os dados de corrente obtidos junto ao Banco de Dados do WOCE (ACM12/BM333) Nesta posição (região de talude com lâmina d'água igual a 1.179 m) foram coletados dados em três profundidades: 230, 475 e 680 m. Porém, a análise realizada refere-se aos dados coletados na profundidade de 230 m. As análises dos dados do WOCE foram separadas em dois períodos: verão e inverno (ano 1992).

A Figura II-5 apresenta o histograma direcional para o período de verão (de janeiro a março de 1992) e a Figura II-6, o análogo para o período de inverno (de junho a agosto de 1992). Neste ponto chama-se atenção para os vetores velocidade média obtidos para o ponto BM333. Estes vetores (em cor laranja nos histogramas direcionais de correntes) apresentam valores característicos da CB na região, tanto para verão quanto para inverno.

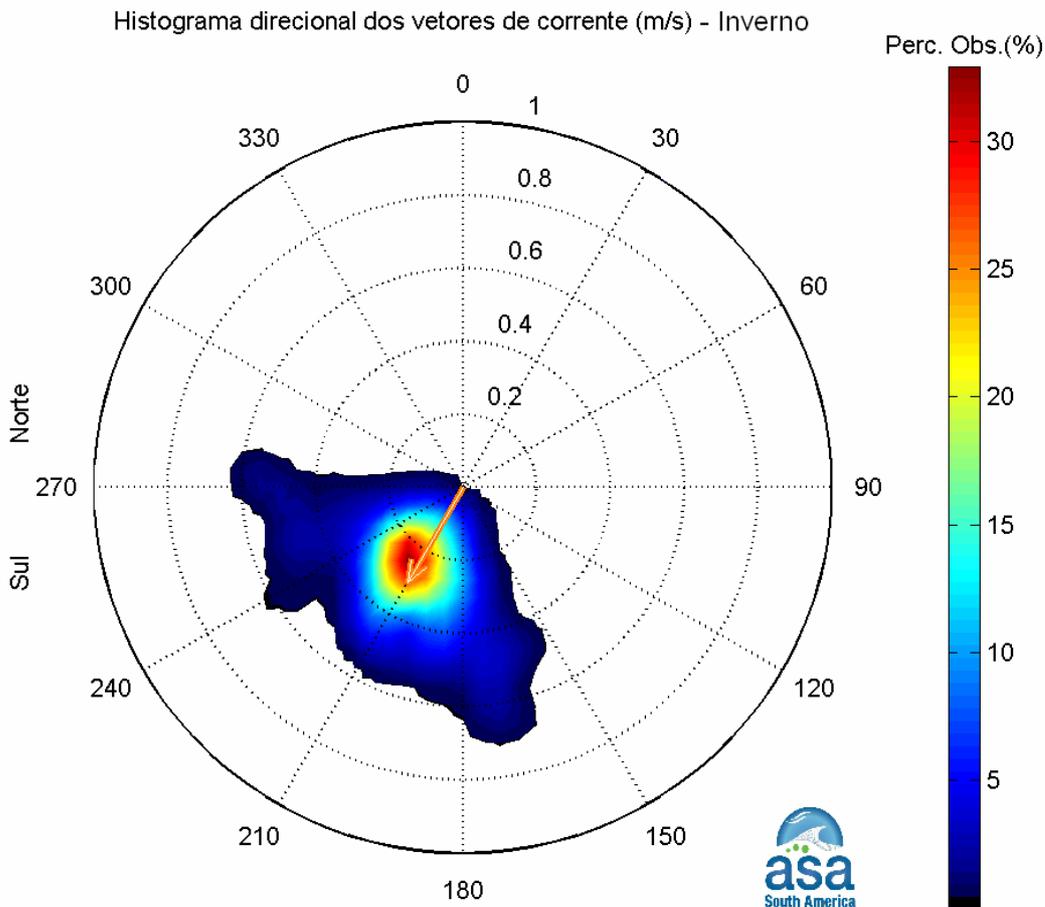
⁹ World Ocean Circulation Experiment.

Porém, deve-se notar que, devido à incidência de sistemas frontais na região (frentes frias), o histograma direcional para o período de inverno apresenta uma variação maior na direção dos vetores de correntes, assim como uma redução na intensidade do vetor velocidade média. As frentes frias têm direção de propagação oposta ao fluxo médio na região e, tendem a frear tais fluxos (redução da intensidade média).



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.4 m/s

Figura II-5 - Histograma direcional dos vetores de corrente no ponto BM333 (WOCE). Dados de corrente coletados a 230 m de profundidade, na região da Bacia de Santos, para o período de janeiro a março de 1992. Intervalo de amostragem: 2h. Intensidade das correntes (m/s) indicadas pelos círculos concêntricos, direção (graus) a partir do norte geográfico e, a barra lateral de cores informa o percentual de ocorrência relativa ao número total de observações.



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.3 m/s

Figura II-6 - Histograma direcional dos vetores de corrente no ponto BM333 (WOCE). Dados de corrente coletados a 230 m de profundidade, na região da Bacia de Santos, para o período de junho a agosto de 1992. Intervalo de amostragem: 2h. Intensidade das correntes (m/s) indicadas pelos círculos concêntricos, direção (graus) a partir do norte geográfico e, a barra lateral de cores informa o percentual de ocorrência relativa ao número total de observações.

A Figura II-7 apresenta o espectro de amplitude das correntes para os dados do fundeio AMC12/BM333 para o período de verão, e a Figura II-8, o espectro de amplitudes das correntes para o período de inverno para o mesmo ponto de coleta. A análise de ambos os espectros de amplitudes mostra que as variações da corrente são inferiores a 15 cm/s, com uma leve influência das oscilações de maré (1 e 2 cpd), e maiores intensidades na baixa frequência.

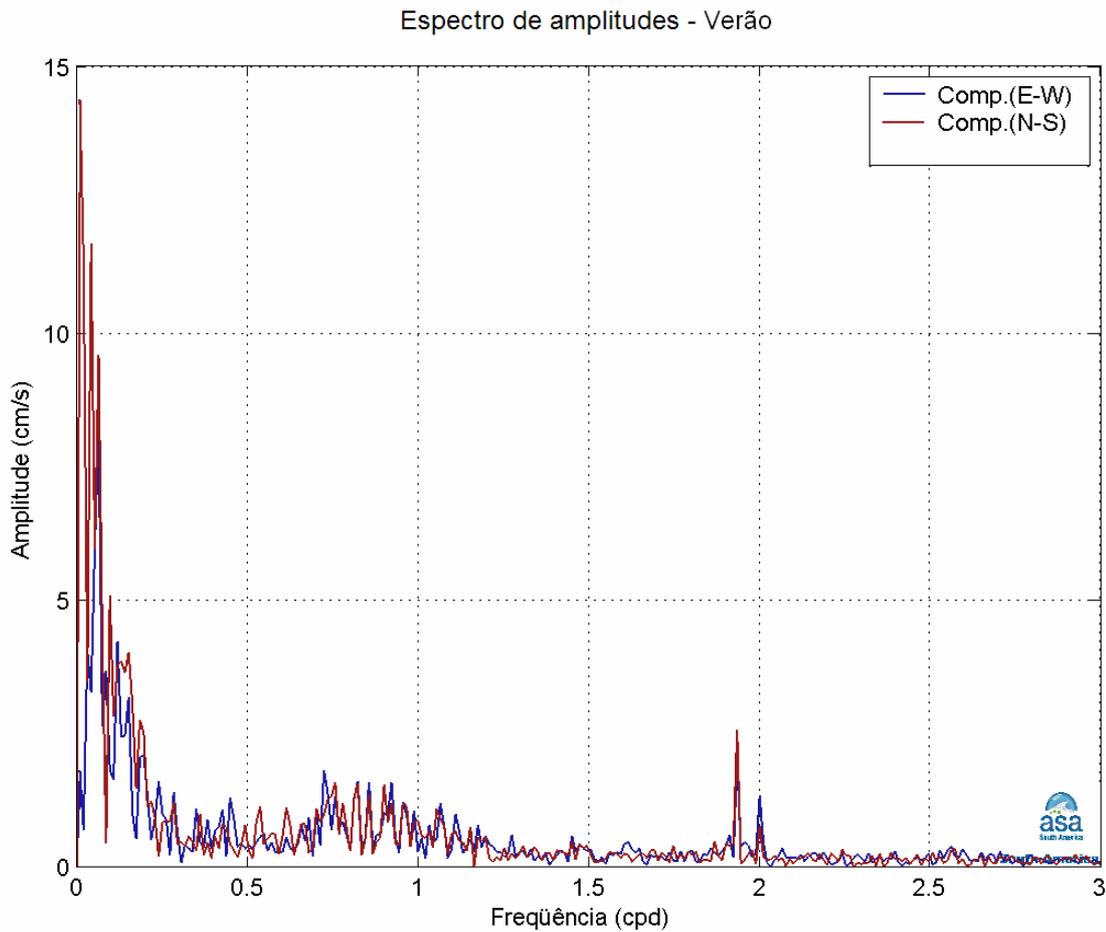


Figura II-7 - Espectro de amplitudes (cm/s) da corrente registrada no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade. Verão de 1992, intervalo de amostragem: 2h.

Espectro de amplitudes - Inverno

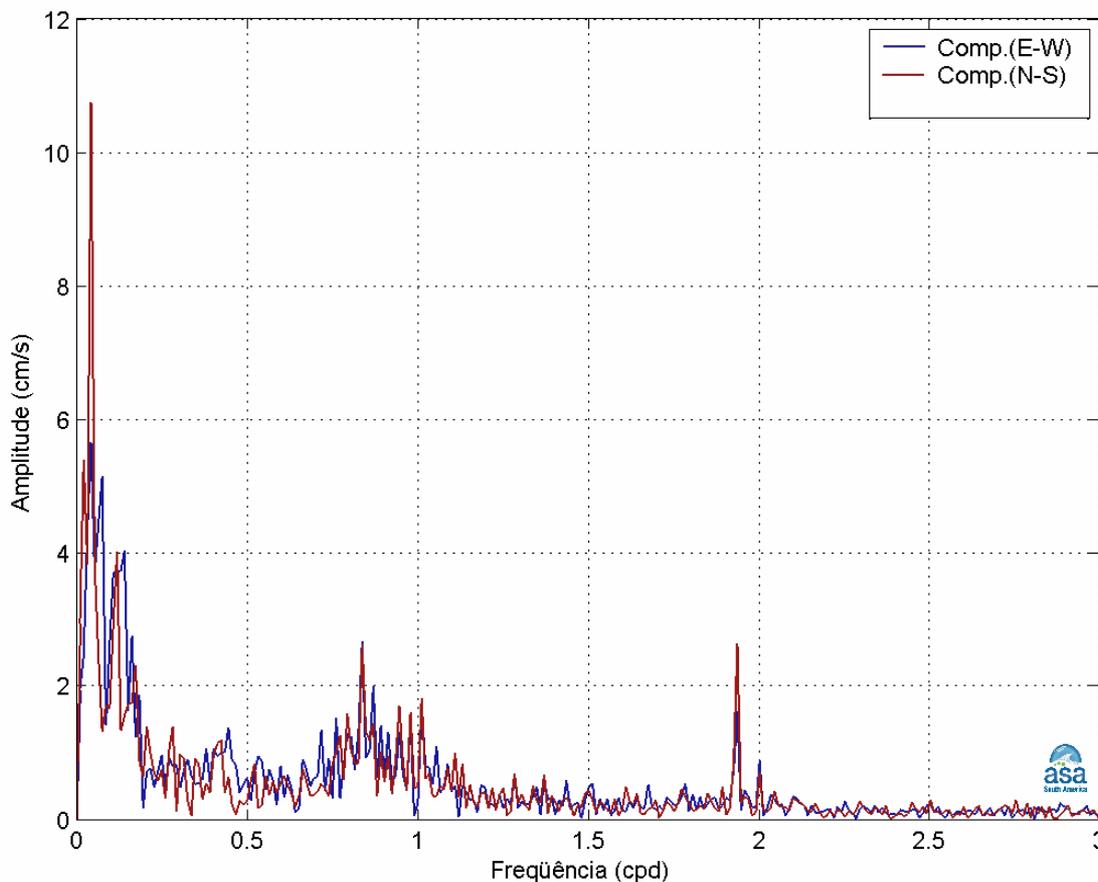


Figura II-8 - Espectro de amplitudes (cm/s) da corrente registrada no fundeio BM/333 do experimento ACM12 do WOCE, medida a 230 m de profundidade. Inverno de 1992, intervalo de amostragem: 2h.

Em suma, através das análises os dados do ponto BM333 (programa WOCE, experimento ACM12) situado na região do talude (profundidade local de cerca de 1.200 m), é possível evidenciar a presença da CB na região. Também se observam sinais associados às marés diurnas e semidiurnas (1 e 2 cpd), assim como variações de baixa frequência. Embora, muito presentes na região e em especial no ano de 1992, descrito como atípico quanto a atividade das frentes frias (Subitem I.1.1), a incursão de frentes frias não foi capaz de promover a reversão do sentido de propagação das correntes na região. Este fato se deve, primordialmente, ao predomínio (energético) da CB, dominando a direção e o sentido da corrente.

Por fim, as análises dos dados de correntes indicam que a circulação oceânica na região sul-sudeste brasileira é determinada por forçantes variadas, que se sobrepõem de modo diferenciado, segundo uma composição de maré, de frentes frias e da CB.

II.3 ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR

Como não há dados de elevação de superfície do mar (coletados) disponíveis para análise na região de interesse, foram realizadas previsões harmônicas de maré para duas posições, através do Método de Schuremann (Schuremann, 1941), a partir das constantes de maré disponibilizada pela FEMAR.

A escolha dessas posições obedeceu à disposição geográfica das estações maregráficas disponíveis pelas FEMAR na região, e a distribuição dessas no domínio de interesse. Dentro desses critérios, as estações maregráficas escolhidas para apresentar as respectivas previsões para elevação de superfície do mar foram Enchova II (RJ) e Bom Abrigo (SP) (figura II-1).

As séries temporais da previsão da elevação de superfície do mar são mostradas na Figura II-9 e Figura II-10 para as estações maregráficas de Enchova II e Bom Abrigo, respectivamente.

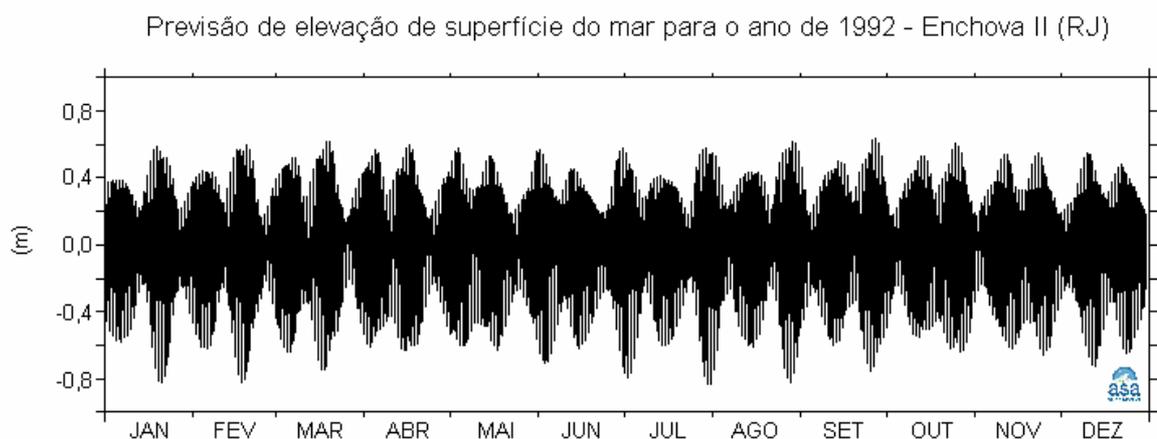


Figura II-9 - Previsão harmônica de maré para o período de 1^o de janeiro a 31 de dezembro de 1992, na estação Enchova II (RJ). Previsão harmônica



realizada pelo método de Schuremann (1941), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

Previsão de elevação de superfície do mar para o ano de 1992 - Bom Abrigo (SP)

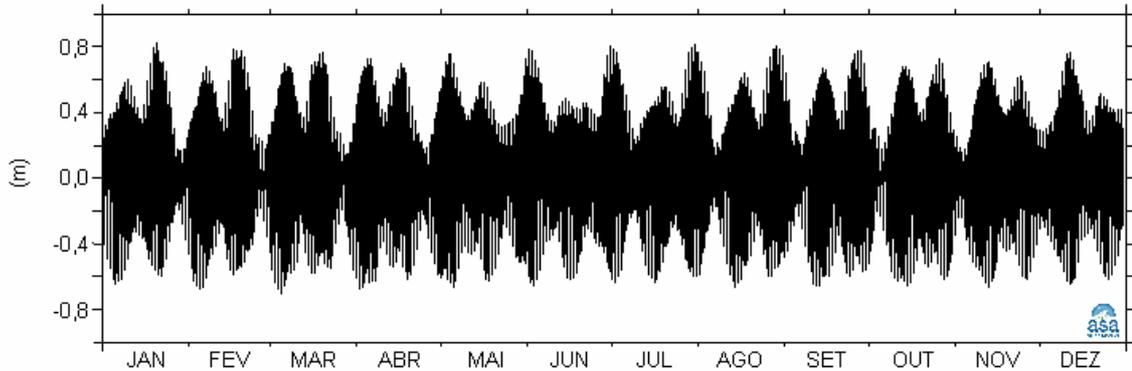


Figura II-10 - Previsão harmônica de maré para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992, na estação Bom Abrigo (SP). Previsão harmônica realizada pelo método de Schuremann (1941), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR.

A maré astronômica na região é predominantemente semidiurna. As principais componentes para a região são M_2 e S_2 , sendo a amplitude da M_2 igual a 32,4 cm para ambas as posições e a amplitude da S_2 igual 16,2 cm para Enchova II e 18,0 cm para Bom Abrigo. Quanto as componentes diurnas, a principal componente harmônica para ambas as estações maregráficas é a O_1 , com amplitude da ordem de 10 cm. A Tabela II-4 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).

Tabela II-4 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para as estações maregráficas de Enchova II (RJ) e Bom Abrigo (SP). Fonte: FEMAR (2000).

COMPONENTE	ENCHOVA II		BOM ABRIGO	
	AMPLITUDE (cm)	FASE (°)	AMPLITUDE (cm)	FASE (°)
Q ₁	5,4	75,0	3,4	38,0
O ₁	11,3	75,0	10,6	73,0
P ₁	2,0	139,0	1,8	131,0
K ₁	6,2	144,0	5,5	131,0
2N ₂	0,8	83,0	1,5	161,0
N ₂	6,2	83,0	11,3	108,0
NU ₂	1,2	83,0	2,2	108,0
M ₂	32,4	83,0	32,4	55,0
T ₂	1,0	88,0	1,1	71,0
S ₂	16,2	88,0	18,0	71,0
K ₂	4,4	88,0	4,9	71,0
M ₄	3,5	347,0	7,4	128,0
MS ₄	2,8	65,0	7,1	210,0
MPS (cm)	122,0		126,0	
MBS (cm)	30,0		27,0	
MPQ (cm)	111,0		112,0	
MBQ (cm)	8,0		10,0	
Nível médio (cm)	68,0		69,0	

II.4 TEMPERATURA E SALINIDADE

Dados de temperatura e salinidade, utilizados na modelagem de dispersão de efluentes, foram obtidos do Atlas Eletrônico de dados do WOCE. A Figura II-11 e a Figura II-12 apresentam as seções verticais do campo de densidade médio calculado com base nestes dados, ao longo de 23,1°S, para os períodos de verão (janeiro a março) e de inverno (junho a agosto), respectivamente.

Os perfis verticais disponíveis no atlas foram obtidos através do *WOCE Hydrographic Program* (via CTD e amostras de água) e complementados com informações de temperatura de superfície obtidas via satélite (NOAA-n AVHRR). Estes dados foram analisados, filtrados e interpolados no espaço, excluindo estações consideradas pouco confiáveis e valores que estivessem fora do intervalo de confiança (estabelecido com base na climatologia do LEVITUS).

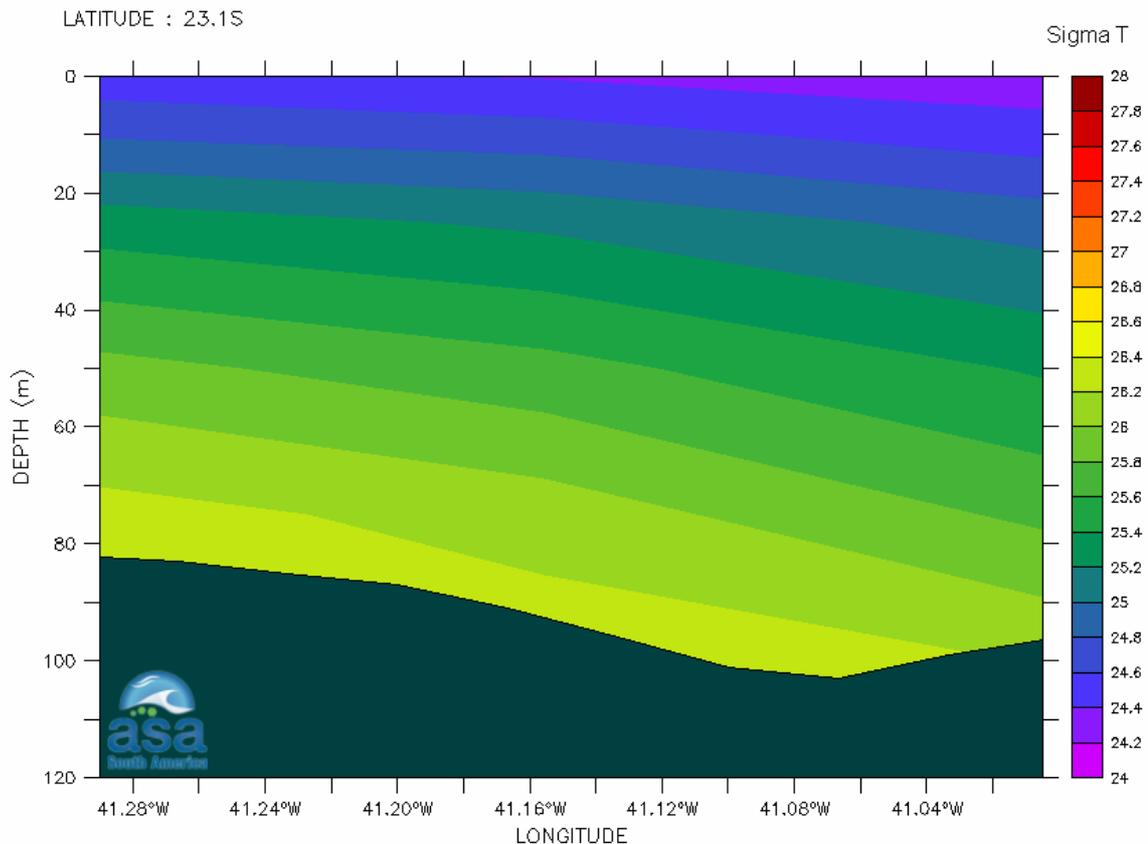


Figura II-11 - Seção vertical de Sigma-T ao longo de 23,1°S para o período de janeiro a março (verão).

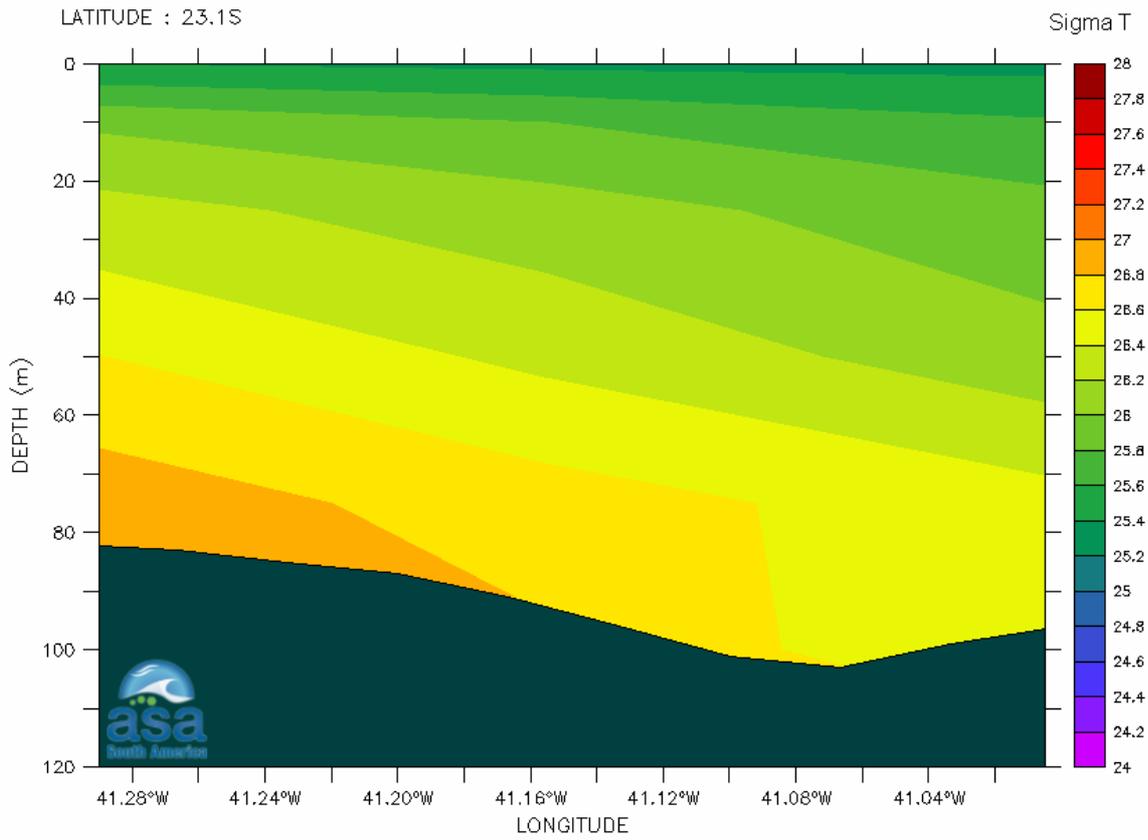


Figura II-12 - Seção vertical de Sigma-T ao longo de 23,1°S para o período de junho a agosto (inverno).

III MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Nesta etapa do trabalho foi implementado um modelo hidrodinâmico visando simular o campo de correntes na região sul-sudeste brasileira. Foi utilizado um modelo baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), implementado pelo grupo de modelagem da **ASA South America**. A descrição detalhada do modelo hidrodinâmico POM utilizado é encontrada no Anexo A.

O modelo POM utiliza como forçantes, marés do CSR3, campos tridimensionais de ventos de reanálise dos modelos meteorológicos NCEP/NCAR e campo termohalino tratado a partir dos resultados do OCCAM. Nas bordas abertas foram também prescritas condições climatológicas do OCCAM para elevação, velocidade barotrópica, temperatura e salinidade.

O procedimento de aquecimento do modelo baseou-se no acompanhamento da variação da energia cinética da simulação. Nesta modelagem, observou-se que a estabilização do modelo ocorreu ao final de um mês de simulação. Assim, a simulação longa foi realizada por 13 meses, (iniciando em dezembro de 1991), descartando-se o primeiro mês (período de estabilização do modelo).

III.1 DADOS DE ENTRADA

III.1.1 Estrutura Termohalina

Os campos de temperatura e salinidade, utilizados para inicialização do campo baroclínico do POM foram obtidos a partir de resultados do OCCAM. A Figura III-1 ilustra os campos superficiais, projetados na grade do modelo.

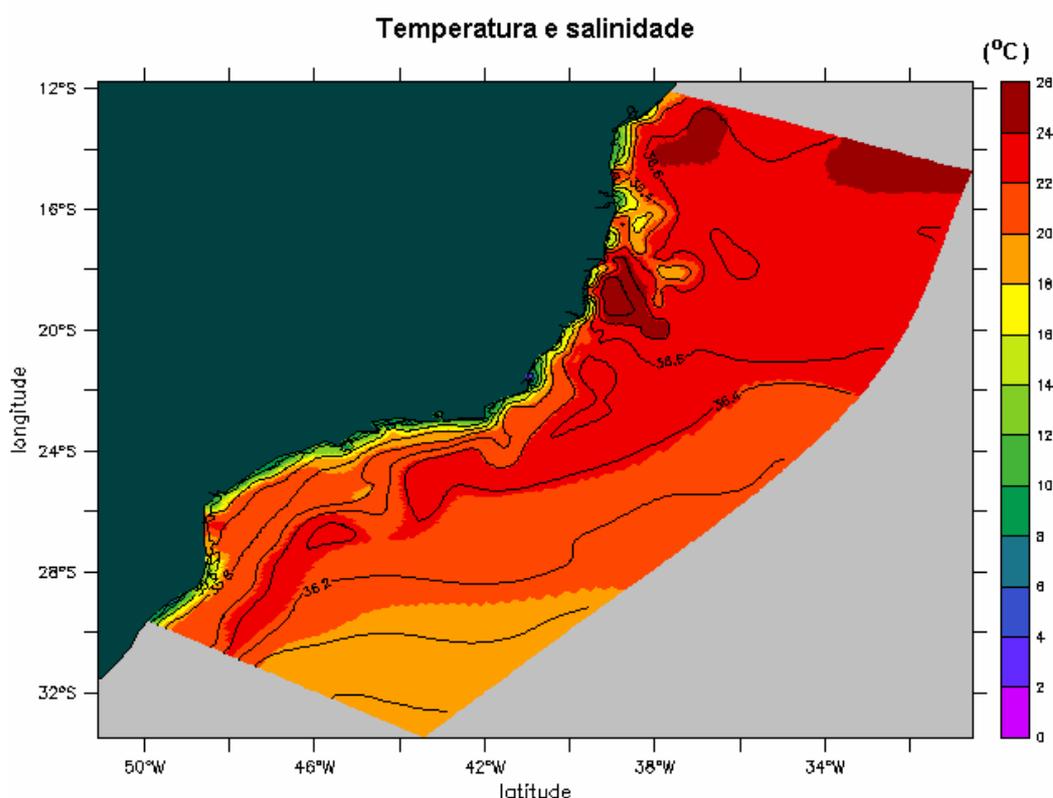


Figura III-1 - Campos de temperatura e de salinidade de superfície (a partir dos resultados do OCCAM) projetados na grade do modelo hidrodinâmico. A salinidade é apresentada como isohalinas e a temperatura (°C) é apresentada através dos tons de cores.

III.1.2 Ventos

Para a realização de uma modelagem numérica que considere fenômenos em escala sinótica (como a passagem de sistemas frontais) não é adequado forçar o modelo com campos climatológicos de vento. Assim, se faz necessário escolher um determinado ano para simulação. A escolha deste ano obedece a alguns critérios, os quais são listados a seguir:

1. Representatividade dos padrões dinâmicos típicos, ou extremos para a região, dependendo do propósito do estudo;
2. Disponibilidade de séries temporais simultâneas de ventos, de elevação de superfície e de correntes medidas na região de interesse, necessárias para forçar, calibrar¹⁰ e avaliar o modelo hidrodinâmico.

¹⁰ O procedimento de calibração não é apresentado no relatório, mas os dados disponíveis também podem ser utilizados com este propósito.

Os dados de corrente disponíveis para a realização do presente estudo são referentes ao ano de 1992, assim, dados de vento foram obtidos na região para o mesmo ano. Através de análise estatística (apresentada no Subitem I.1.1), verificou-se que o ano de 1992 apresenta um maior número de eventos extremos na Bacia de Campos. Uma vez que o estudo em questão se tratava da avaliação de impacto ambiental, este ano foi considerado apropriado para a realização das modelagens, uma vez que possibilitaria avaliar cenários mais conservativos.

O campo de vento utilizado como forçante foi extraído de Reanálise dos modelos de circulação geral do NCEP/NCAR para as simulações de calibração e de longo período. Os valores foram interpolados no espaço e no tempo, e projetados na grade do modelo. A Figura III-2 ilustra um instante deste campo de vento, já projetado na grade.

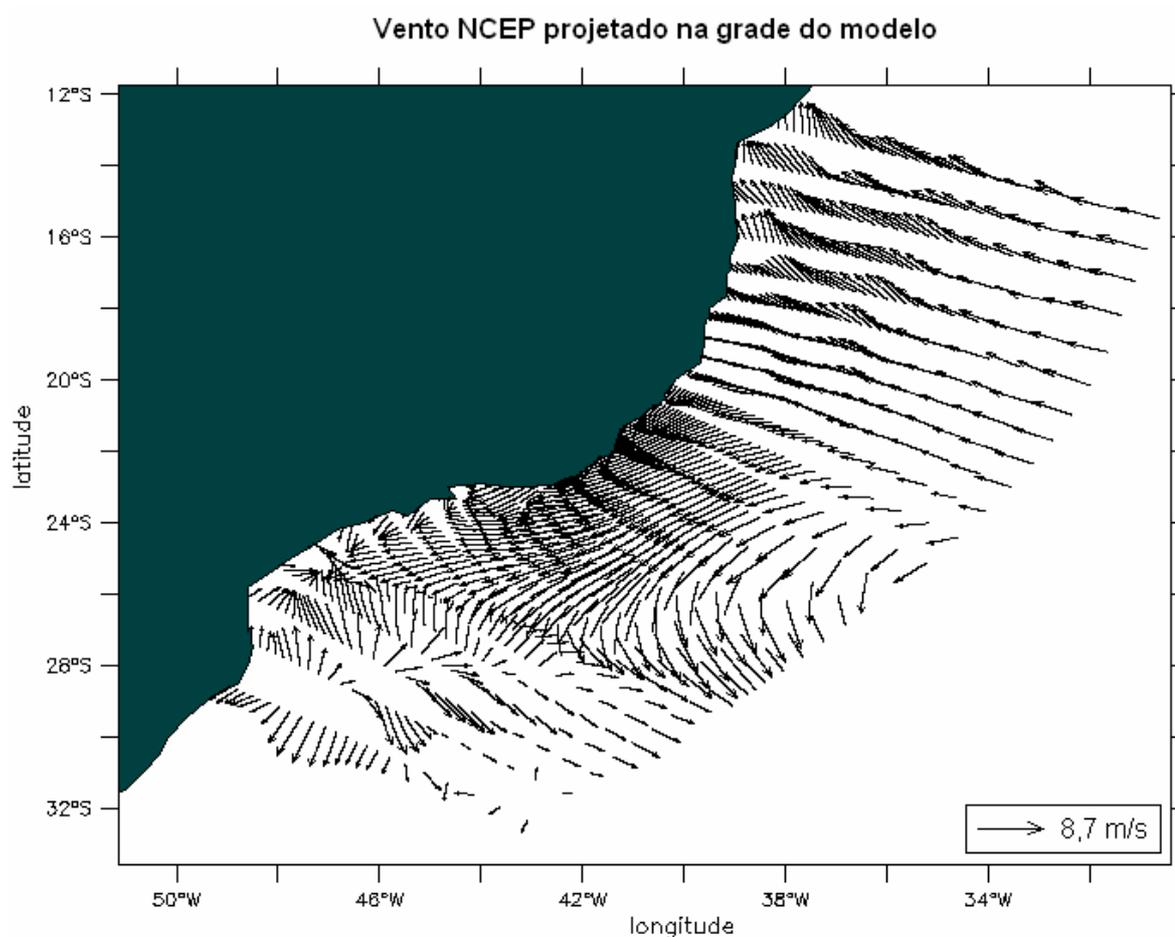


Figura III-2 - Instantâneo do campo de ventos NCEP projetado na grade do modelo hidrodinâmico.

III.1.3 Marés

O campo de harmônicos utilizado como forçante para o POM é proveniente do CSR3. Embora utilizado apenas nos contornos abertos, este campo foi projetado em toda a grade, de tal forma a permitir uma melhor visualização do campo de maré em áreas de interesse (eventual redução do domínio).

Conforme ilustrado na Figura III-3, foram utilizados campos com variação espacial de amplitude e fase das componentes de maré mais significativas na região, com energia superior a 10% da energia da M_2 , no caso, as diurnas e semidiurnas.

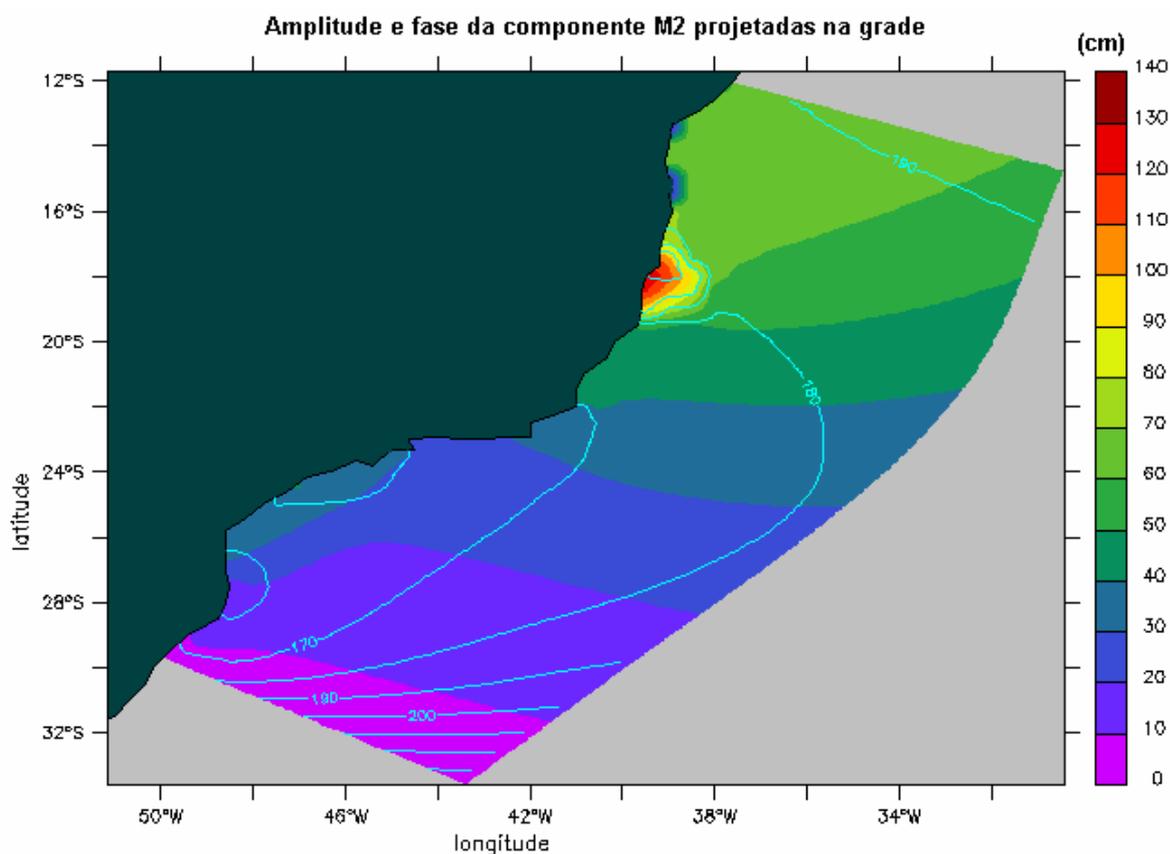


Figura III-3- Mapa cotidal com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude da componente de maré M_2 , projetado na grade do modelo hidrodinâmico.

III.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO CONSIDERADO

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-4.

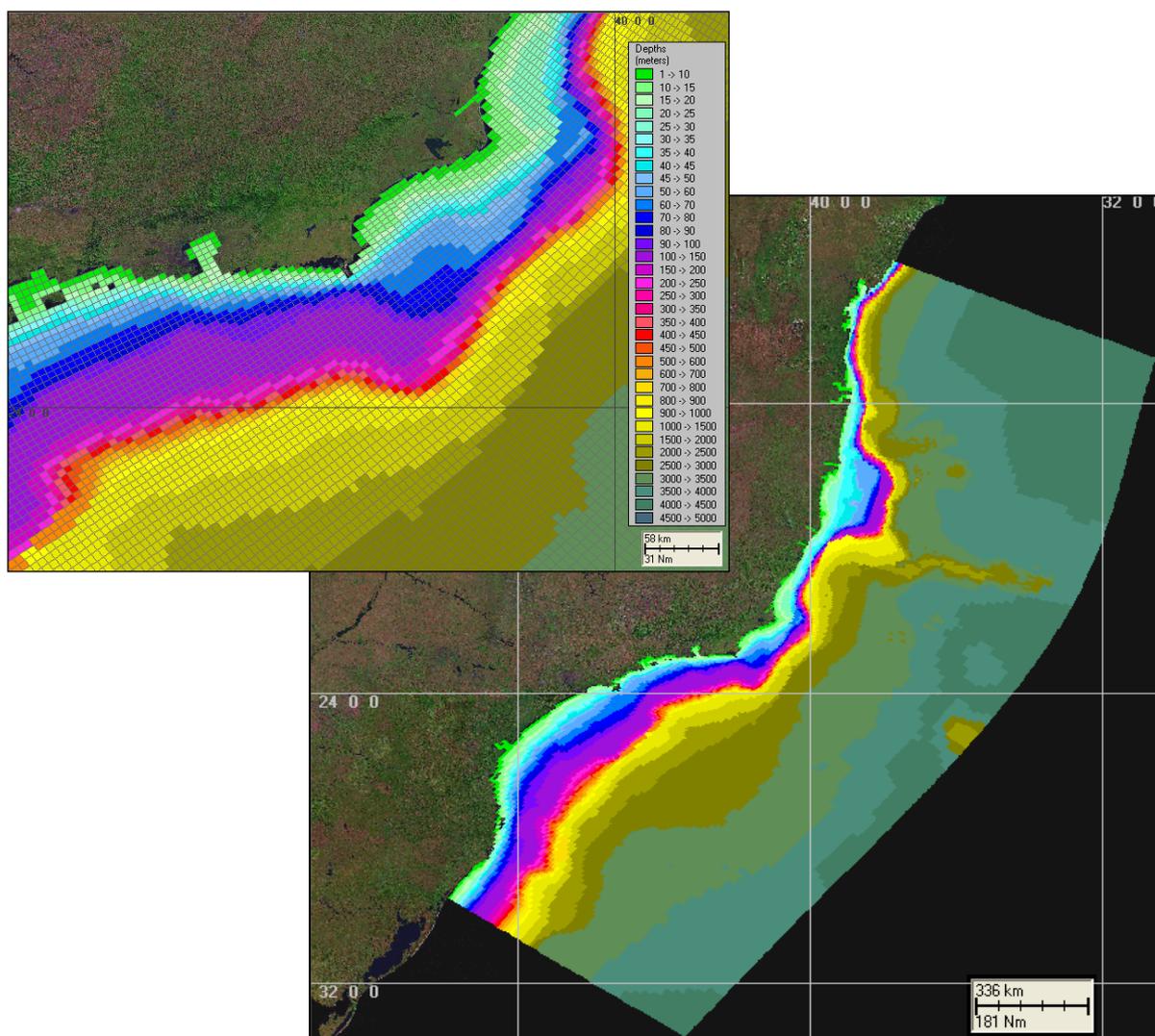


Figura III-4 - Grade computacional do modelo hidrodinâmico e projeção da batimetria, com foco na região da Bacia de Campos.

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 DHN¹¹, nºs 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 NGDC¹², 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 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-4.

III.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de validação fundamenta-se na avaliação do modelo quanto à sua capacidade de reprodução da circulação na região em estudo. Para esta região em particular, verifica-se que sobre a plataforma continental, a circulação hidrodinâmica é fortemente influenciada pela maré e pelo vento, enquanto que no talude e região oceânica, a circulação é influenciada pelas variabilidades de grande escala, relacionadas à presença da Corrente do Brasil.

Para a avaliação da maré, foram produzidas uma previsões a partir da tabela de constantes harmônicas da FEMAR para os pontos Enchova II e Bom Abrigo, descritas no Item II.3 – Análise de Dados. As previsões harmônicas foram realizadas através do Método de Schuremann (Schuremann, 1941).

Para a avaliação das informações de correntes geradas pelo modelo hidrodinâmico, foram utilizados dois conjuntos de dados, um sobre a plataforma continental e outro na região do talude:

¹¹ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

¹² *National Geophysical Data Center da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).*

1. Ponto PC (PETROBRAS) - medições de superfície em região de plataforma continental (lâmina d'água igual a 15 m e coordenadas 22,7167°S; 41,2667°W), e
2. BM333 (WOCE) – medições na profundidade de 230 m em região de talude (lâmina d'água igual a 1.180 m e coordenadas 27,9020°S; 46,7040°W).

A localização dos dados utilizados na avaliação dos resultados da modelagem hidrodinâmica é apresentada na Figura II-1 do Capítulo II.

III.3.1 Avaliação para a Maré

A avaliação para a elevação de superfície do mar consistiu na comparação entre séries temporais de elevação de superfície calculadas pelo modelo e séries temporais de elevação de superfície resultantes da previsão harmônica.

A comparação entre os resultados do modelo e as séries utilizadas (previsões harmônicas) foi quantificada através de um coeficiente utilizado como parâmetro de comparação, Hess & Bosley (1992), cuja formulação é comumente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries temporais com periodicidades relativamente definidas, como é o caso das marés. O coeficiente de comparação é definido pela normalização do erro quadrático médio e é dado pela fórmula:

$$\frac{RMS}{\bar{A}} \quad (III.3.1-1)$$

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.

Na Figura III-5 são apresentadas as séries temporais de elevação de superfície do mar para o mês de fevereiro de 1992. A elevação de superfície calculada pelo modelo é mostrada em vermelho e, em azul, a série temporal da previsão harmônica para a elevação de superfície. Através desta figura, pode-se observar uma boa concordância tanto na amplitude quanto na fase, entre os resultados obtidos com o modelo e a previsão de maré. O coeficiente de comparação obtido para este período foi de 10%, enquanto que o coeficiente de correlação linear entre as séries é de 98%.

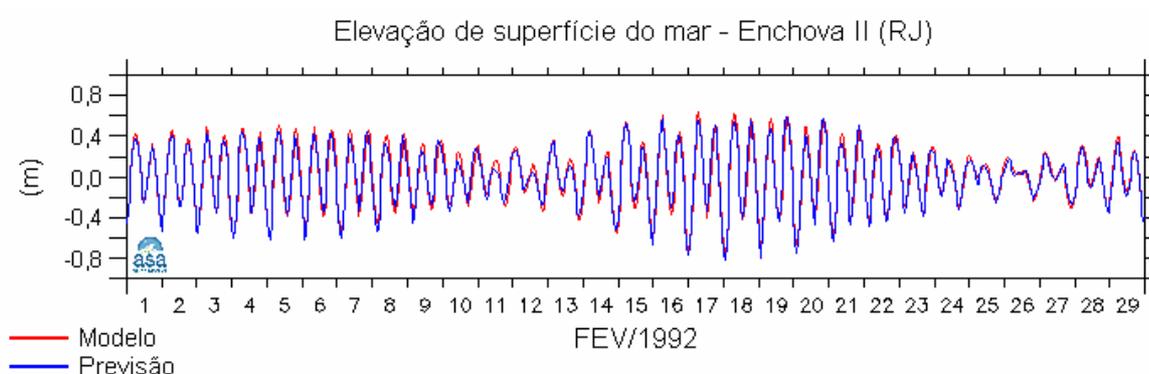


Figura III-5 - Série temporal de elevação de superfície (em metros) para a localização geográfica de Enchova II (RJ) durante o mês de fevereiro de 1992. Resultado do modelo em vermelho e da previsão de maré em azul. Intervalo de amostragem: 1h.

De maneira análoga, para a posição geográfica de Bom Abrigo (SP), a Figura III-6 apresenta a série temporal de elevação de superfície como resultado do modelo numérico (em vermelho) e a previsão de maré (em azul). O coeficiente de comparação entre as séries foi de 19% e a correlação linear, 93%.

Embora o coeficiente de comparação entre as séries de elevação de superfície para a localização de Bom Abrigo seja maior que o observado para Enchova II, alguns pontos devem ser ressaltados. O primeiro deles refere-se à posição geográfica. Bom Abrigo (ver Figura II-1), dentro da grade numérica (domínio do modelo), está em uma região de interface terra-água e, portanto, submetido a processos hidrodinâmicos diferentes daqueles atuantes na região de Enchova II.

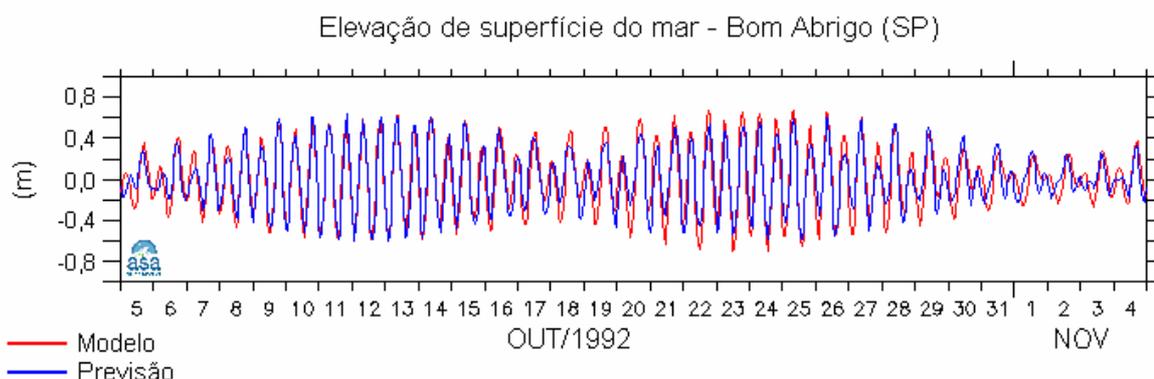


Figura III-6 - Série temporal de elevação de superfície (em metros) para a localização geográfica de Bom Abrigo (SP) para o período de 5 de outubro a 5 de novembro de 1992. Resultado do modelo em vermelho e da previsão de maré em azul. Intervalo de amostragem: 1h.

Por fim, ao considerar a extensão do domínio modelado (ver Figura III-4) e que a distância entre os pontos validados (Enchova II e Bom Abrigo) é superior a 750 km, deve-se destacar a eficácia do modelo quanto a reprodução da elevação de superfície do mar na região.

III.3.2 Avaliação para as Correntes

Pelo fato das correntes apresentarem um comportamento menos determinístico do que as marés optou-se pela utilização de uma metodologia de comparação diferente da anterior. A comparação entre os resultados da modelagem e os dados foi quantificada através do cálculo da Raiz Quadrática Média (*Root-Mean-Square Error Statistic*). A raiz quadrática média é definida como (EPA, 2000):

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2} \quad (\text{III.3.2-1})$$

A raiz quadrática média é um indicador do desvio entre o previsto pelo modelo e as observações. A raiz quadrática média ideal é nula.

Conforme citado no Capítulo II, os dados obtidos no Ponto PC são privados e a avaliação com base nestes dados não poderá ser mostrada neste relatório. Uma descrição detalhada da avaliação do modelo hidrodinâmico implementado encontra-se em ASA (2009). De acordo com ASA (op. cit.), a raiz quadrática média (RMS) calculada na comparação do modelo com os dados do Ponto PC foi 0,15 m/s para componente u e 0,18 m/s para a componente v no período de verão (1^o de fevereiro e 15 de abril de 1992) e 0,15 m/s para componente u e 0,20 m/s para a componente v , no período de inverno (9 de agosto e 28 de setembro de 1992).

A Figura III-7 e a Figura III-9 apresentam, para o Ponto BM333, as comparações 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 6 a 28 de janeiro de 1992 e 1^o de junho a 2 de julho de 1992, representativos dos períodos de verão e inverno, respectivamente. A RMS obtida na comparação para o período de verão foi de 0,11 m/s para componente u e de 0,17 m/s para a componente v . Na comparação para o período de inverno, a RMS obtida foi de 0,12 m/s para componente u e de 0,16 m/s para a componente v .

A Figura III-8 e a Figura III-10 apresentam comparações entre os resultados do modelo hidrodinâmico e correntes medidas no Ponto BM333, respectivamente, para verão e inverno, na forma de diagramas *stick plot*.

Por fim, na Figura III-11 são mostradas comparações entre (a) histogramas direcionais para dados medidos e (b) resultados do modelo, considerando todo o ano de 1992. A análise dos histogramas complementa a validação, permitindo verificar a habilidade do modelo em reproduzir o padrão de circulação observado nos dois locais avaliados, indicando boa concordância entre as direções e intensidades médias observadas e aquelas simuladas.

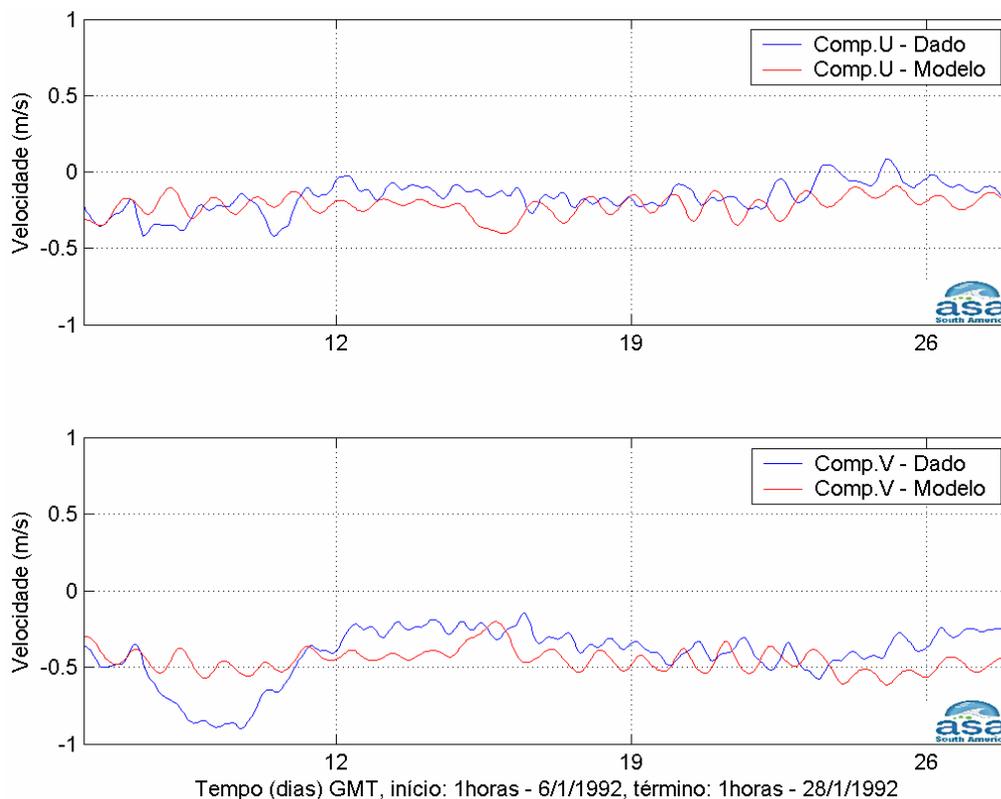


Figura III-7 - Série temporal medida das componentes u e v da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 6 e 28 de janeiro de 1992 para o Ponto BM333.

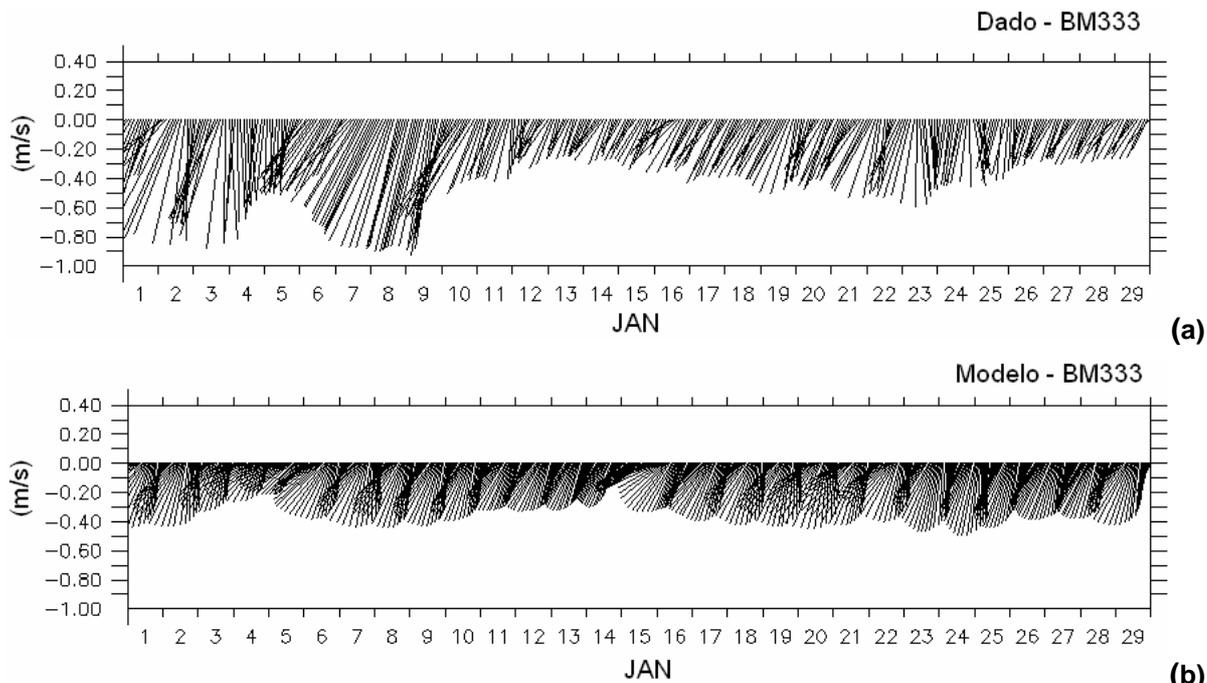


Figura III-8 - Diagrama stick plot dos vetores de corrente medida no Ponto BM333 (a) e calculada pelo modelo (b) entre os dias 1^o a 30 de janeiro de 1992.

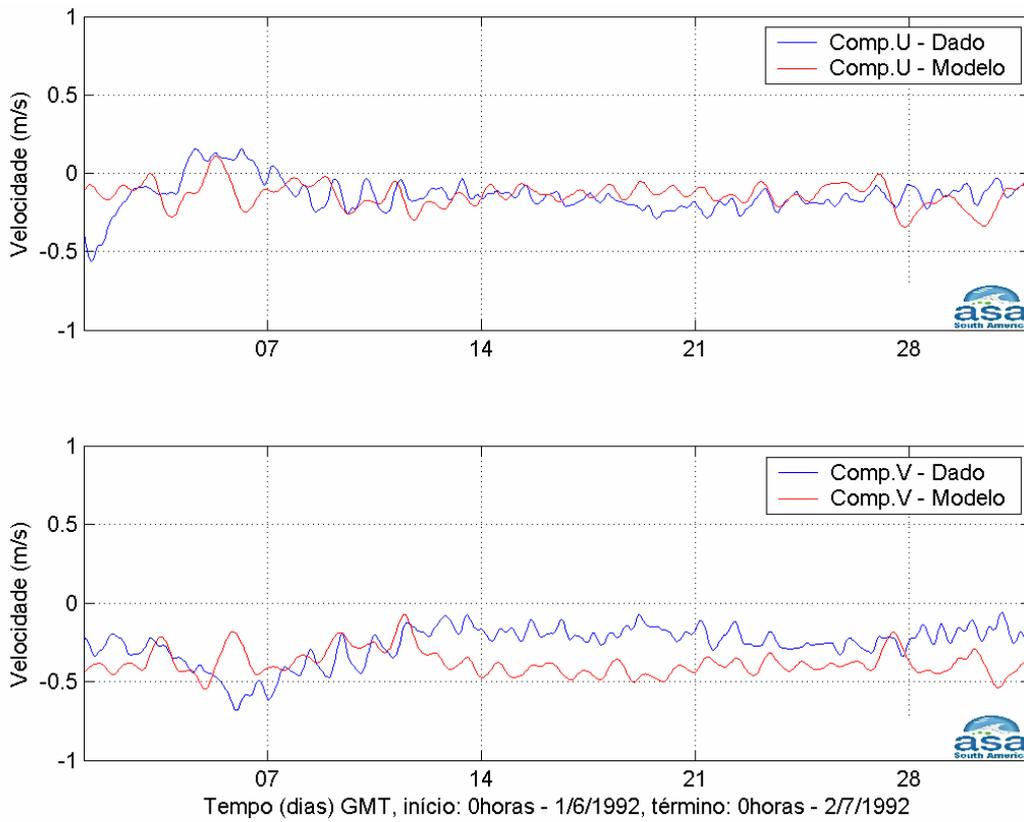


Figura III-9 - Série temporal medida das componentes u e v da velocidade medida (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 1º de junho e 2 de julho de 1992 para o Ponto BM333.

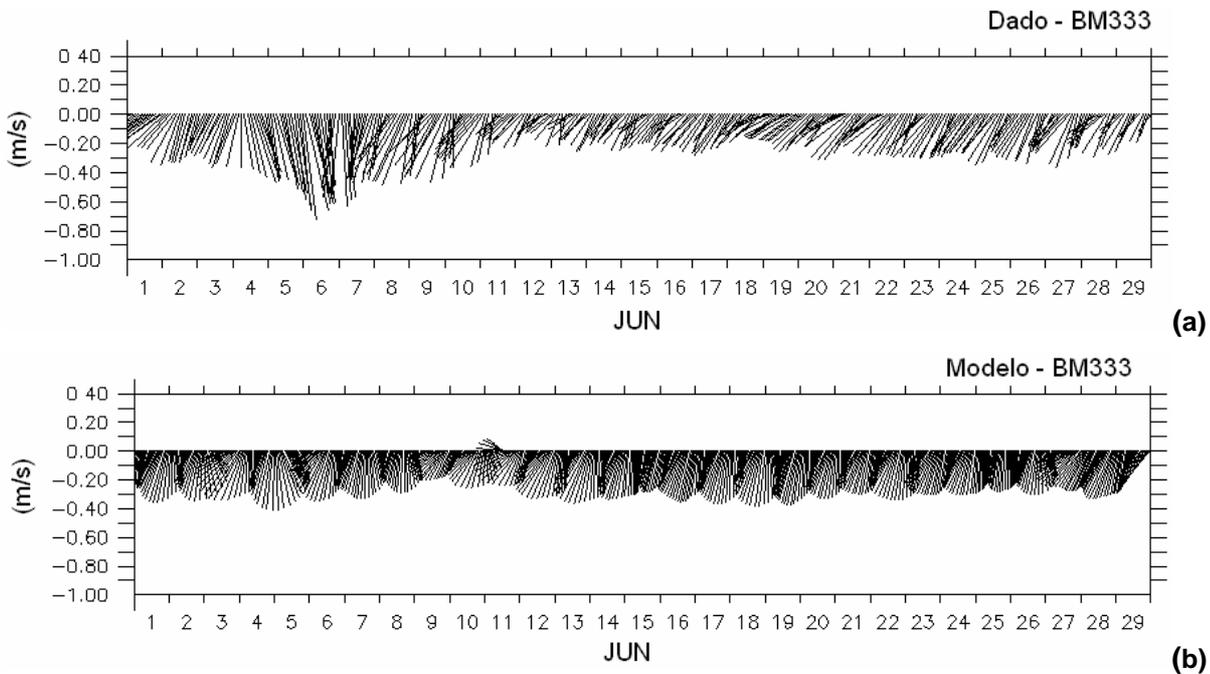
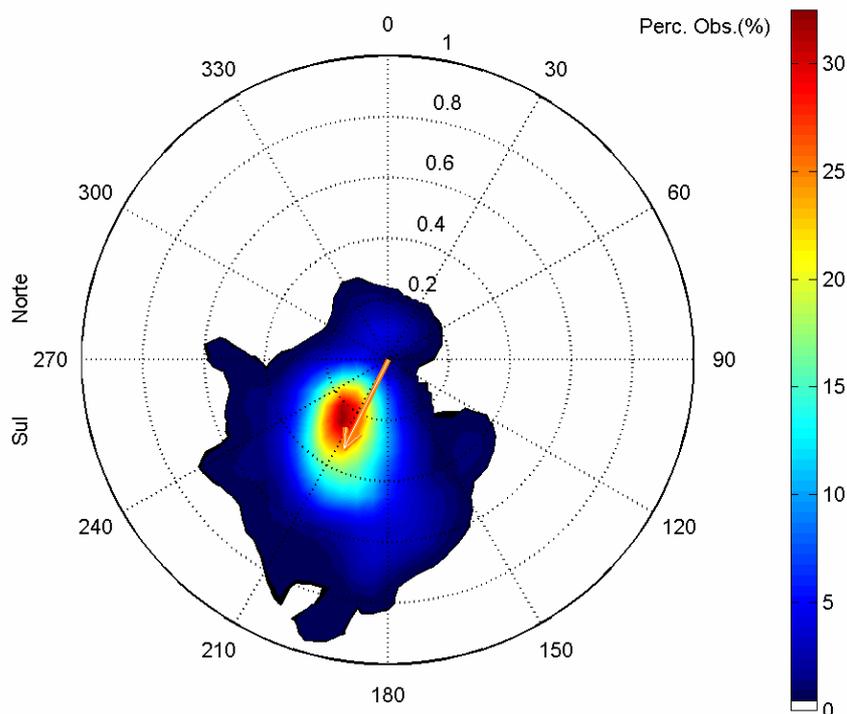


Figura III-10 - Diagrama stick plot dos vetores de corrente medida no Ponto BM333 (a) e calculada pelo modelo (b) entre os dias 1º e 30 de junho de 1992.

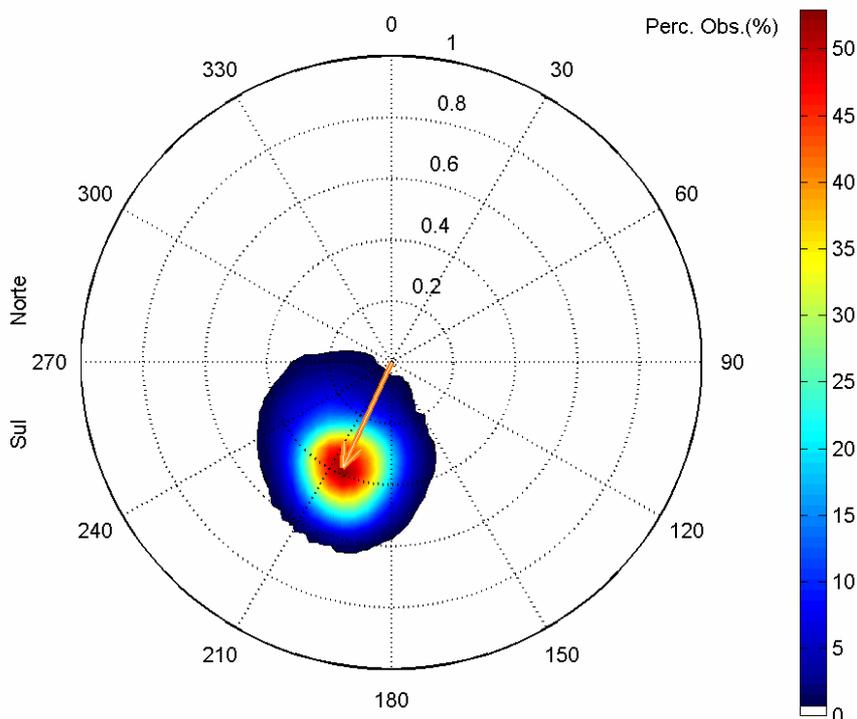
Histograma direcional dos vetores de corrente (m/s), total de observações = 7696



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.33 m/s

(a)

Histograma direcional dos vetores de corrente (m/s), total de observações = 8754



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.38 m/s

(b)

Figura III-11 - Velocidade média e histograma direcional dos vetores de corrente medidos na região do ponto ACM12/BM333 (a), e resultantes da simulação numérica (b), para o período de janeiro a dezembro de 1992.

III.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A base hidrodinâmica aqui apresentada foi obtida a partir de um modelo numérico de mesoescala, baseado no POM, adaptado e implementado pela **ASA South America**. Este modelo é tridimensional, baroclínico e prognóstico, estabilizado para variabilidades médias (climatológicas) nos campos de temperatura e salinidade.

Os resultados da caracterização ambiental física e numérica apresentados, são decorrentes de um processo evolutivo de estudo, baseado em modelos numéricos na região sudeste brasileira. A validação desse modelo, simultaneamente sobre região costeira e oceânica, é indicação de que se atingiu bons 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 comparação de 10% para a maré em Enchova II (RJ) e de 19% para Bom Abrigo (SP). Para as componentes zonal e meridional do campo de correntes (Ponto PC), no verão foram obtidos, respectivamente, valores de *Root-Mean-Square* iguais a 0,15 m/s e 0,18 m/s. Já no período de inverno, os valores obtidos foram de 0,15 m/s para componente u e de 0,20 m/s para a componente v . Em região de talude (Ponto BM333) obteve-se, no verão, para as componentes zonal e meridional do campo de correntes, RMS iguais a 0,11 e 0,17 m/s, respectivamente. No inverno os valores obtidos foram de 0,12 m/s para componente u e 0,16 m/s para a componente v .

Do ponto de vista qualitativo, a comparação dos resultados simulados com a bibliografia, outros resultados numéricos, informações da literatura, etc., é um procedimento válido, que corrobora com a avaliação quantitativa para a verificação da capacidade do modelo numérico em reproduzir a dinâmica oceânica da região.

A Figura III-12 e a Figura III-13 apresentam instantâneos dos campos de superfície no verão e inverno, respectivamente. Observa-se a Corrente do Brasil como feição dominante ao longo da costa sudeste brasileira, fluindo para sul

acima do Cabo de São Tomé, e mudando a direção na região de Cabo Frio, em conformidade com o observado por Evans & Signorini (1985).

A Figura III-12 ilustra o padrão de correntes obtido em situação de bom tempo (sob influência da Alta Atlântico Sul - AAS), mais comum no verão: um fluxo bem definido para sul-sudoeste sobre a plataforma e talude continental. A Figura III-13 ilustra o padrão de correntes perturbado pelo deslocamento de um sistema frontal, mais frequentes no inverno; nestas ocasiões, o campo de correntes inverte sobre a plataforma, apresentando direção norte-nordeste.

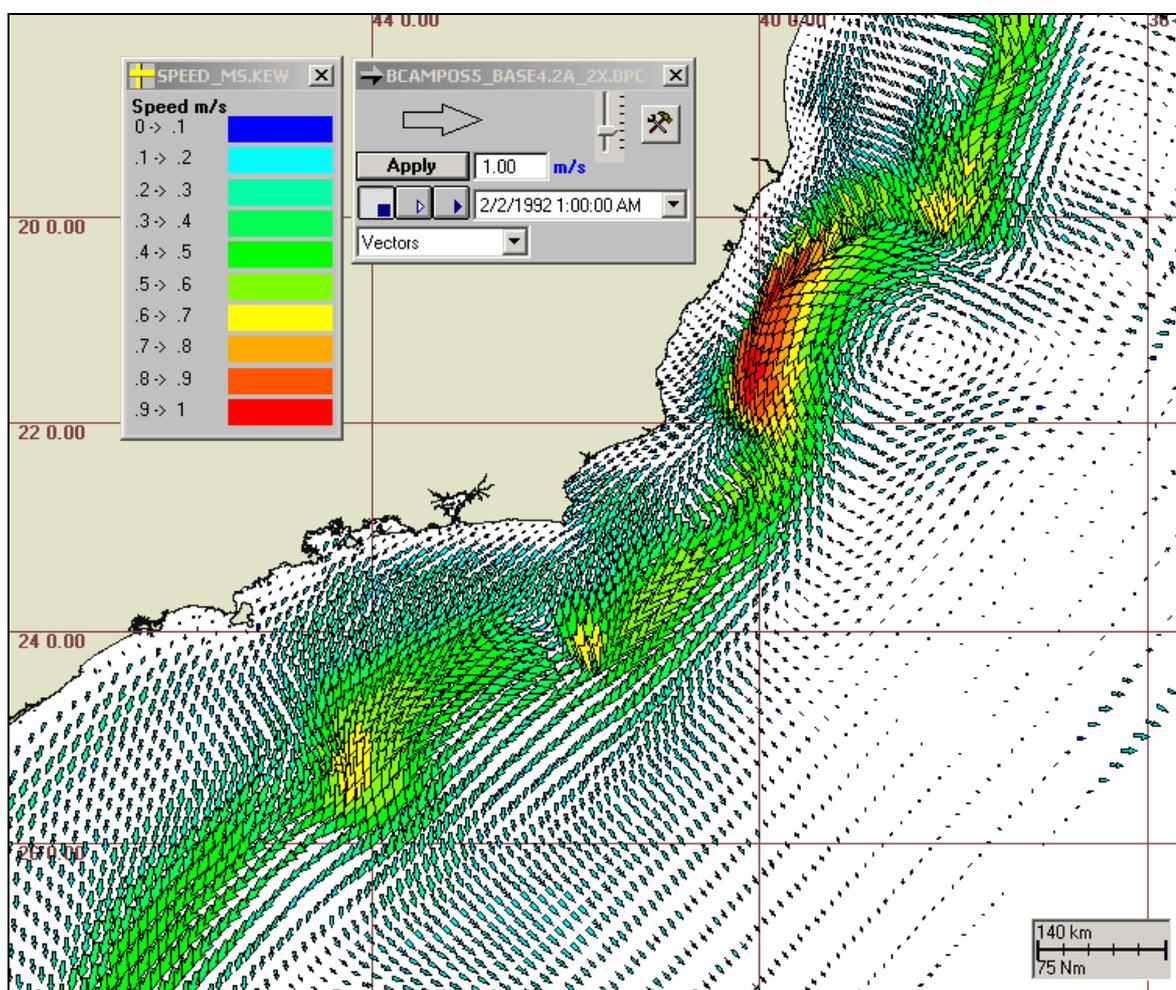


Figura III-12 - Instantâneo do campo de correntes de superfície para o verão, obtido a partir de resultados do POM.

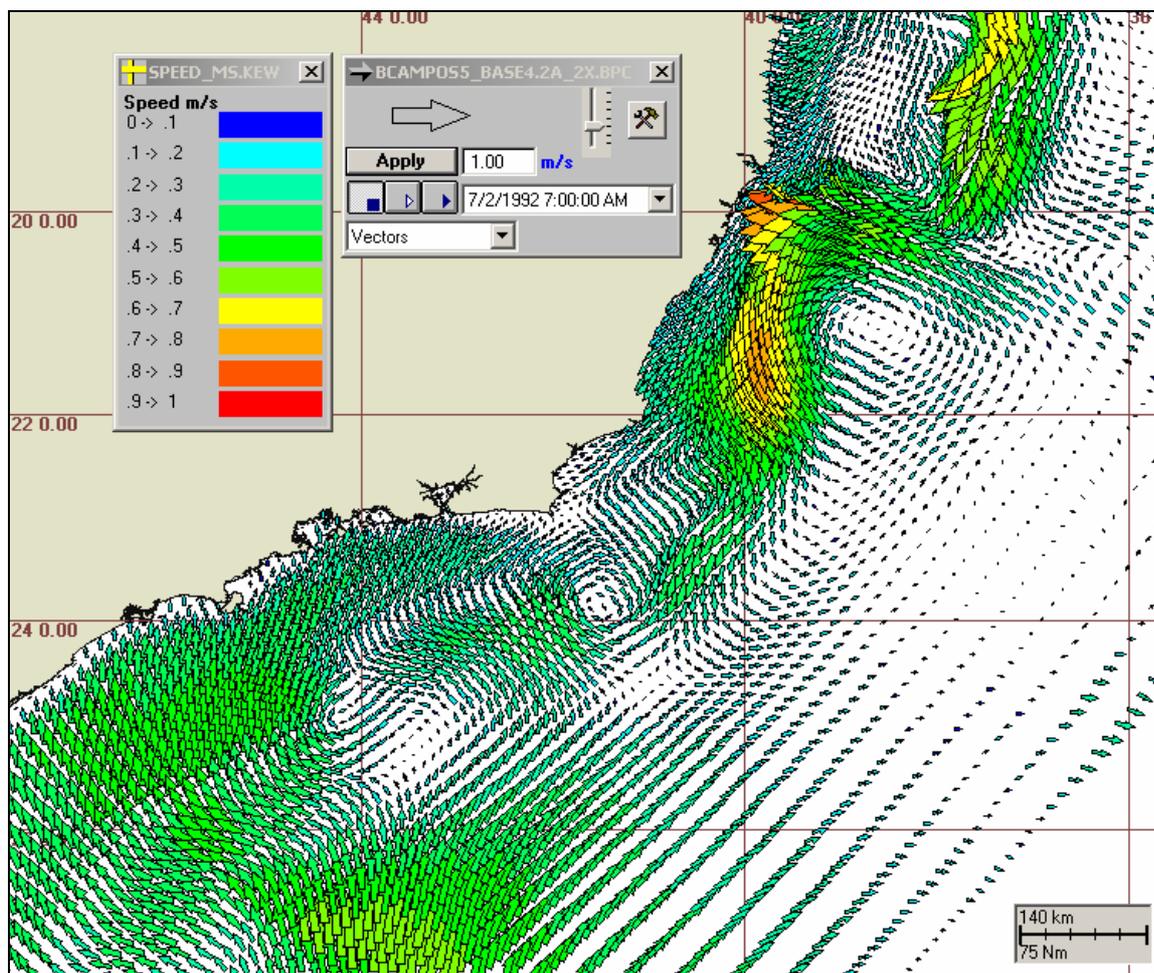


Figura III-13 - Instantâneo do campo de correntes de superfície para o inverno, obtido a partir de resultados do POM.

Os índices de comparação obtidos no processo de avaliação, 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 uma boa representatividade do modelo hidrodinâmico para a região, deve-se lembrar de 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.

IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE E COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE

Na Tabela IV-1 são apresentadas as características do descarte de água produzida considerada na modelagem. A Tabela IV-2 apresenta as características do efluente, fornecidas pela OGX.

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

DIÂMETRO TUBULAÇÃO	ORIENTAÇÃO TUBULAÇÃO	LÂMINA D'ÁGUA	ALTURA DE DESCARTE	VAZÃO DO EFLUENTE
20"	Vertical	94 m	Superfície	12.996 m ³ /d

Fonte: OGX.

Tabela IV-2 - Características do efluente de água produzida.

PARÂMETROS PARA MODELAGEM DO EFLUENTE	
Temperatura do efluente	90,0 °C
Densidade do efluente	1.070,0 kg/m ³

Fonte: Gabardo (2007).

Como critério ambiental foi utilizada a concentração correspondente à Concentração de Efeito Não Observado (CENO), referente ao efluente de água produzida, obtida nos testes de toxicidade com o equinodermo *Lytechinus variegatus*. Uma vez que ainda não existem amostras de água produzida para a área em questão, foram utilizadas informações extraídas de Gabardo (2007) para efluentes da Bacia de Campos. Conforme solicitação da contratante considerou-se o valor mais crítico encontrado em Gabardo (op. cit.), correspondendo a 0,1% da concentração original e, portanto, a uma diluição de 1.000 vezes. A Tabela IV-3 apresenta o valor da CENO e o fator de diluição desta para o efluente simulado. Assim, a concentração do critério ambiental ficou definida como a concentração no efluente tratado diluído pelo fator de diluição da CENO apresentada nesta tabela.

Tabela IV-3 - Resultados dos testes de toxicidade com o equinodermo *Lytechinus variegatus* realizados com amostras de água produzida na Bacia de Campos.

EFLUENTE	CENO*	
	%	FATOR DE DILUIÇÃO
Água produzida	0,1	1:1000

* Concentração de Efeito Não Observado.

Fonte: Gabardo (2007).

A composição e as concentrações do efluente fornecidas pela OGX, além das concentrações da legislação, segundo o Art. 18 da Resolução do CONAMA¹³ de nº 357/05 (Brasil, 2005), referentes aos parâmetros observados nesta água produzida e suas respectivas CENO, são apresentadas na Tabela IV-4.

Tabela IV-4 - Composição, concentrações limite da legislação e CENO para o efluente de água produzida descartada pela OGX na Bacia de Campos.

COMPONENTES	CONCENTRAÇÃO NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L)	LIMITE RESOLUÇÃO CONAMA 357/05 ART. 18 (µg/L)	CENO* (µg/L)
Parâmetros orgânicos			
Benzeno	5.469,0	700,0	5,469
Tolueno	5.979,0	215,0	5,979
Fenóis totais	5.734,0	60,0	5,734
Criseno (HPA**)	3,2	0,018	0,0032
Parâmetros inorgânicos			
Amônia	91.000,0	10,0	91,0
Bário	45.000,0	1.000,0	45,0
Boro	80.100,0	5.000,0	80,1

*Considerando 0,1% (Gabardo, 2007).

** HPA = Hidrocarboneto Policíclico Aromático.

Dessa forma, como critério ambiental, neste relatório, foram utilizadas as concentrações existentes na legislação e a CENO referente à amostras de água produzida da Bacia de Campos.

¹³ Conselho Nacional do Meio Ambiente

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 (quantidade de movimento inicial do jato) 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. À medida que o efluente se afasta do ponto de lançamento diminuem os efeitos associados à velocidade inicial de ejeção e passam a predominar os efeitos associados à velocidade do ambiente. A região onde ocorre a transição entre estes dois domínios define os limites entre os campos próximo e afastado.

V.1 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO

O modelo CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*), da Cornell University, foi utilizado para simular o campo próximo do lançamento de efluentes descartados na Bacia de Campos. A descrição deste modelo encontra-se no Anexo B.

As simulações de campo próximo 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 de efluentes no campo próximo, foram obtidos a partir do modelo hidrodinâmico implementado na região (Capítulo III). Considerando a simplificação quanto às correntes assumida pelo CORMIX (*i.e.* intensidade e direção de correntes constante) e a complexidade e importância do regime de fluxo neste domínio, optou-se por uma abordagem mais conservativa na determinação do fator de diluição do campo próximo. Assim, utilizou-se um valor constante de intensidade de corrente correspondente ao percentil de 10% dos valores observados no modelo hidrodinâmico utilizado. Este valor foi utilizado com

base nas exigências para avaliação de plumas de efluentes da EPA¹⁴ dos EUA (Brandsma, 2004), de forma a fornecer a mínima diluição inicial.

As informações do campo termohalino utilizadas no CORMIX foram obtidas do Atlas Eletrônico de dados do WOCE.

As características do descarte e do efluente utilizadas nas simulações do campo próximo foram apresentadas no Capítulo IV. Para a representação do efluente nestas simulações foi utilizado um composto conservativo.

Apesar de considerar descartes na superfície, o CORMIX3 se aplica apenas para efluentes cuja densidade seja menor do que a do corpo receptor, dessa forma, não se aplica ao caso do efluente em estudo. Assim, foi necessário utilizar o CORMIX1, uma vez que o CORMIX2 considera um descarte realizado a partir de várias portas.

A versão do CORMIX considerada possui algumas limitações quanto aos dados de entrada, para aplicação no descarte de efluentes em mar aberto. Uma delas é relativa à geometria de lançamento. O CORMIX considera lançamentos orientados para baixo apenas até um ângulo vertical de 45°, insuficiente para a representação da condição em estudo, cujo ângulo vertical de lançamento é de 90°.

Para que a limitação quanto ao ângulo de lançamento pudesse ser contornada, foi necessário realizar a inversão do descarte do efluente. Este procedimento foi realizado através de uma adaptação do procedimento proposto por Brandsma (op. cit.). Dessa forma, ao invés de ser descartado próximo à superfície da água, passou a se considerar um descarte próximo ao fundo. Para que a física envolvida nesse processo seja mantida, são necessários alguns ajustes à geometria invertida. O caso real envolve um descarte de um efluente mais denso que o corpo receptor, lançado próximo à superfície em um local com profundidade de 94 m. O caso invertido envolve um descarte de um efluente menos denso que o corpo receptor, descartado próximo ao fundo num local de 94 m de profundidade. A densidade do efluente foi recalculada de forma que a aceleração do efluente menos denso (*i.e.* aceleração com que o efluente sobe em

¹⁴ Environmental Protection Agency (EPA).

direção à superfície) fosse a mesma do efluente mais denso (*i.e.* aceleração com que o efluente afunda). Os resultados são então, convertidos novamente para o sistema real para apresentação.

A Tabela V-1 apresenta os dados de entrada adotados nas simulações de verão e inverno com o modelo CORMIX1.

Tabela V-1 - Dados de entrada adotados no CORMIX1.

PARÂMETROS		DADOS DE ENTRADA	
		VERÃO	INVERNO
Ambiente	Profundidade média (m)	94	94
	Profundidade de descarte (m)	94	94
	Velocidade ambiente (m/s)	0,1006	0,1200
	Coefficiente de Manning	0,01	0,01
	Velocidade do vento (m/s) ¹⁵	5	5
	Densidade ambiente na superfície (kg/m ³)	1.024,38	1.025,36
	Densidade ambiente no fundo (kg/m ³)	1.026,33	1.026,67
Efluente	Vazão do efluente (m ³ /s)	0,15	0,15
	Densidade do efluente ("non-fresh")	984,36	985,55
	Tipo de poluente	conservativo	conservativo
Descarte	A margem mais próxima está a	direita	direita
	Distância até a margem mais próxima (m)	81.000,0	81.000,0
	Diâmetro da porta (m)	0,508	0,508
	Altura da porta (m)	0,5	0,5
	Ângulo vertical THETA	90°	90°
Zona de Mistura	Região de interesse (m)	50.000,0	50.000,0
	Intervalos para apresentação de resultados	20,0	20,0

VI MODELAGEM DA DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO

Na modelagem do campo afastado foi utilizado o modelo CHEMMAP (*Chemical Discharge Model System*), desenvolvido pela **ASA** (Anexo C). O CHEMMAP é um modelo desenvolvido para a previsão da trajetória e transformações biogeoquímicas de produtos químicos, incluindo as substâncias flutuantes, as que afundam e as substâncias solúveis, e possui um histórico de bem sucedidas aplicações em sistemas fluviais, estuarinos e costeiros (ASA, 2007 e ASA, 2008a,b).

Adicionalmente, este modelo possui a capacidade de utilizar campos de correntes e de ventos variáveis no espaço e no tempo, além de considerar a variação espacial da profundidade.

VI.1 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações para a determinação da diluição de efluentes descartados no campo afastado foram realizadas utilizando-se o modelo CHEMMAP em seus modos probabilístico e determinístico.

VI.1.1 Cenários Probabilísticos

Como no modo probabilístico 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 (junho a agosto). O campo hidrodinâmico de cada período, utilizado para as simulações do comportamento da pluma foram obtidos a partir da modelagem hidrodinâmica descrita no Capítulo III, assim como os dados de vento utilizados.

Para incorporar as variabilidades ambientais, cada cenário probabilístico com descarte de água produzida foi composto por uma série de 30 simulações com o modelo CHEMMAP, divididas em dois períodos: verão e inverno.

Como critério de parada adotado nas simulações foi utilizado o tempo necessário para que a área da pluma, onde as concentrações são maiores que as referentes à CENO, apresentasse estabilidade, não variando significativamente, independente do tempo de simulação. Para tanto foram realizados testes determinísticos, nos quais se constatou que, para que isso ocorra, são necessárias 48 horas para essas simulações.

As características (composição e concentração) do efluente utilizadas nas simulações numéricas foram fornecidas pela OGX. Nas simulações do descarte de água produzida considerou-se um composto conservativo para a representação destes efluentes, uma vez que este sofre apenas os processos físicos da diluição sem os efeitos dos processos bioquímicos.

O modelo CHEMMAP foi inicializado com parâmetros calculados na modelagem do campo próximo (profundidade terminal e espessura da pluma). Quanto à diluição, ao *setup* do passo de tempo, às dimensões (extensão e resolução) da grade *habitat* e ao número de partículas do modelo CHEMMAP, estes foram ajustados de forma a reproduzir para o instante inicial, e para a região correspondente à do campo próximo, uma diluição equivalente à estimada pelo CORMIX. A partir destes parâmetros, o CHEMMAP realiza os seus cálculos de diluição utilizando uma grade tridimensional, na qual cada elemento (célula) apresenta um determinado volume. As diluições são feitas nestes volumes de tal forma que a massa total do composto simulado é conservada.

Nas simulações do descarte de efluente de água produzida foi utilizada uma grade *habitat* com dimensão de 540x540 pontos e resolução média de 50 m (Figura VI-1).

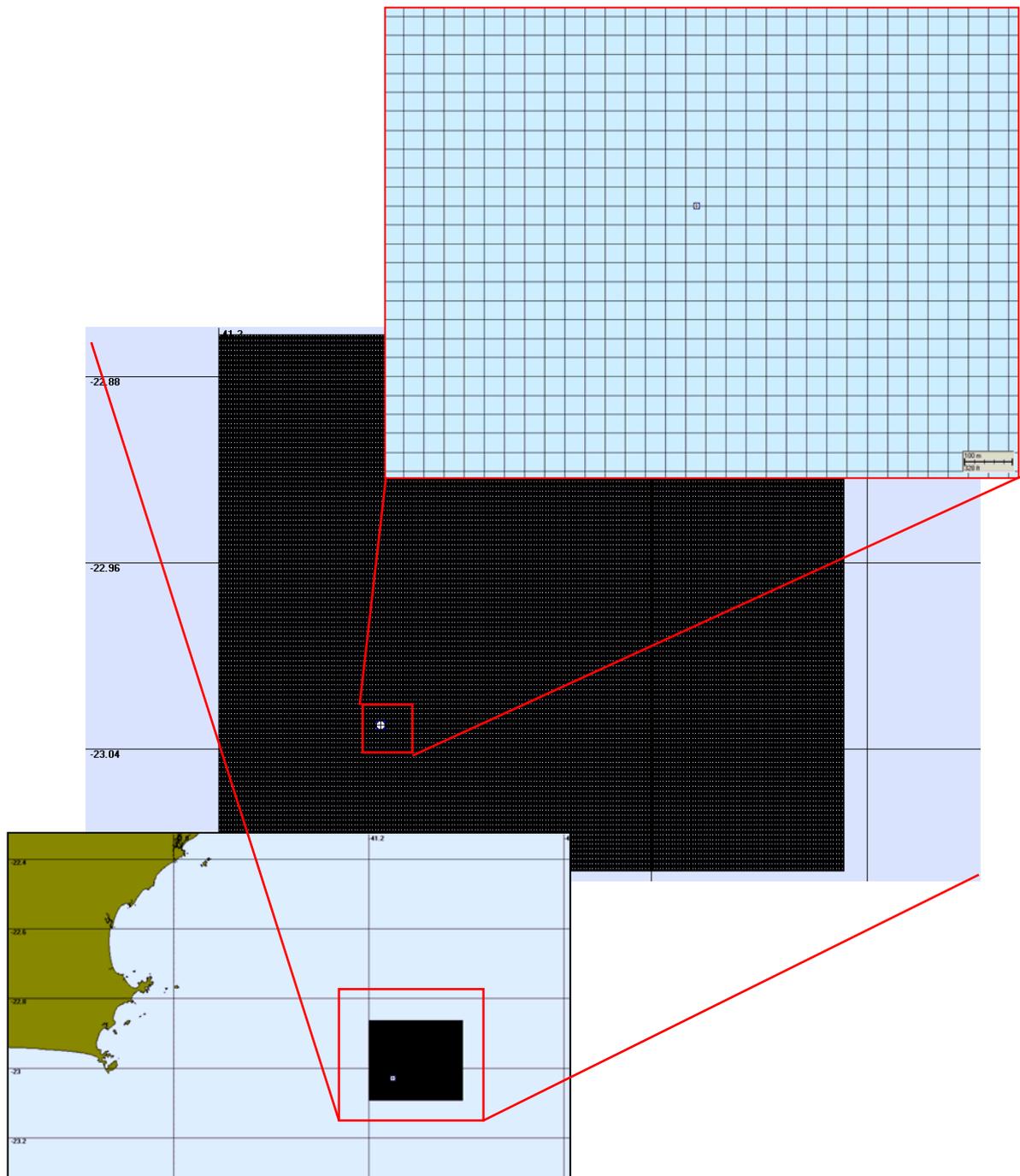


Figura VI-1 - Grade habitat utilizada nas simulações com o modelo CHEMMAP. No detalhe inferior são apresentadas a localização do ponto, da grade e o continente como referência.

Nas simulações probabilísticas, para a determinação da área de influência do descarte de água, as múltiplas trajetórias das plumas foram utilizadas para a produção de curvas de contorno para as máximas concentrações esperadas do efluente em cada ponto de grade e ao longo da coluna d'água. 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 ao longo do período simulado, e ao final de todas as 30 simulações calcula-se a média de todas as máximas obtidas. Salienta-se que as concentrações e posição das plumas observadas são correspondentes a todos os instantes a partir do início das simulações. Ao final das simulações, essas máximas concentrações foram convertidas para valores de diluição do efluente a partir do ponto de lançamento.

Na apresentação dos resultados, os contornos das plumas de efluente estendem-se até uma diluição 10.000 vezes inferior à concentração de lançamento. Esse corte foi escolhido para melhorar a visualização das plumas de probabilidade na área do empreendimento.

VI.1.2 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 atingiram as maiores distâncias a partir do ponto de lançamento. Assim, as simulações (cenários) determinísticas fornecem como resultado a maior distância atingida pelas plumas, considerando o critério ambiental adotado.

No Anexo D são apresentadas as condições meteorológicas e oceanográficas, relativas ao início das simulações críticas, utilizadas nessas simulações.

O critério de parada e de apresentação dos resultados das simulações determinísticas foram os mesmos adotados para as simulações probabilísticas.

VII RESULTADOS DA MODELAGEM DE DESCARTE DE EFLUENTES

A seguir, são apresentados os resultados das simulações de campo próximo e campo afastado para os efluentes descartados.

VII.1 RESULTADOS DA DILUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO

A Tabela VII-1 apresenta os resultados das simulações no campo próximo para o descarte de água produzida na Bacia de Campos. Observa-se que a diluição é menor no período de verão (353,7) do que no período de inverno (672,5). Considerando-se que a diluição necessária para enquadramento no critério ambiental é de 1.000 vezes (CENO), observa-se que este fator de diluição não é alcançado no campo próximo em nenhum dos períodos simulados.

Tabela VII-1 - Resultados das simulações do campo próximo para o descarte de água produzida da OGX na Bacia de Campos.

PARÂMETROS	VALORES	
	VERÃO	INVERNO
Diluição	353,7	672,5
Espessura da pluma (m)	8,32	20,5
Comprimento do campo próximo (m)	56,9	78,6
Profundidade terminal da pluma (m)	34,4	36,8

A Figura VII-1 e a Figura VII-2 apresentam as diluições e profundidades em relação às distâncias do ponto de lançamento, da pluma de água produzida descartada, baseado nos resultados do campo próximo calculados nos períodos de verão e inverno.

Observa-se que a diluição aumenta à medida que a pluma/jato se afasta do ponto de lançamento. A profundidade máxima que a pluma atinge é de, aproximadamente, 39 m para o período de verão, a cerca de 25 m do ponto de

descarte. Para o período de inverno, a profundidade máxima que a pluma atinge é de, aproximadamente, 42 m, a cerca de 40 m do ponto de descarte.

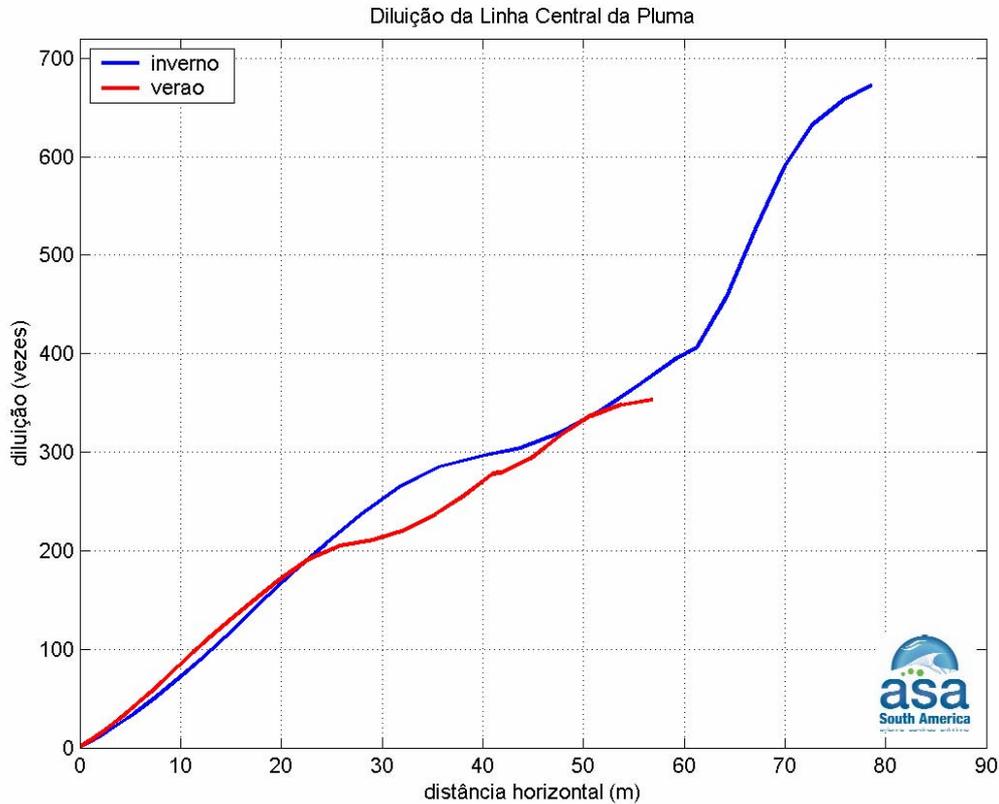


Figura VII-1 - Diluição em relação à distância do ponto de lançamento da pluma de água produzida descartada nos períodos de verão e inverno.

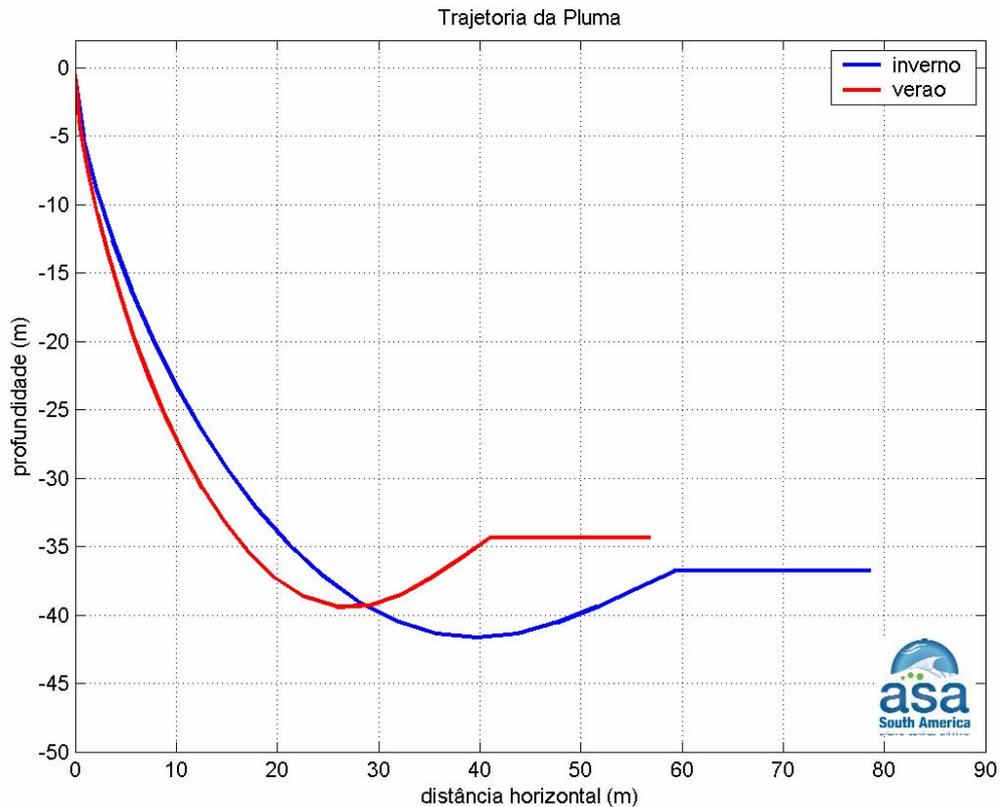


Figura VII-2 - Profundidades em relação à distância do ponto de lançamento da pluma de água produzida descartada nos períodos de verão e inverno.

A Tabela VII-2 apresenta as concentrações iniciais dos componentes presentes na água produzida, as concentrações limite da legislação (CONAMA 357/05), Concentração de Efeito Não Observado (CENO) e as concentrações correspondentes à diluição no final do campo próximo.

Pode-se observar que nenhum dos compostos selecionados atingem concentrações inferiores à CENO ao final do campo próximo. Entretanto, os componentes da água produzida têm, ao final do campo próximo, suas concentrações enquadradas no limite estabelecido pela legislação vigente (CONAMA 357/05).

Tabela VII-2 - Concentrações dos compostos selecionados no ponto de lançamento, concentrações limite da legislação, CENO e valores correspondentes à diluição no campo próximo para a água produzida descartada pela OGX na Bacia de Campos.

COMPONENTES	CONCENTRAÇÃO NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L)	LIMITE RESOLUÇÃO CONAMA 357/05 ART. 18 (µg/L)	CENO* (µg/L)	CONCENTRAÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO (µg/L)	
				VERÃO	INVERNO
Parâmetros orgânicos					
Benzeno	5.469,0	700,0	5,47	15,46	8,13
Tolueno	5.979,0	215,0	5,98	16,90	8,89
Fenóis totais	5.734,0	60,0	5,73	16,21	8,53
Criseno (HPA**)	3,2	0,018	0,0032	0,0091	0,0048
Parâmetros inorgânicos					
Amônia	91.000,0	400,0	91,0	257,28	135,32
Bário	45.000,0	1.000,0	45,0	127,23	66,92
Boro	80.100,0	5.000,0	80,1	226,46	119,11

*Considerando 0,1% da concentração inicial (Gabardo, 2007).

** HPA = Hidrocarboneto Policíclico Aromático.

VII.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

De acordo com os resultados da modelagem de campo próximo para água produzida, apresentados no Item VII.1, verifica-se que, em ambos os períodos simulados, a diluição necessária para o enquadramento no corpo receptor não ultrapassa o domínio do campo próximo. Porém, tanto no verão como no inverno, a diluição no campo próximo não é suficiente para que as concentrações dos componentes do efluente sejam inferior à CENO.

Dessa forma, com o objetivo de dar suporte e orientar o desenvolvimento de futuros trabalhos de monitoramento ambiental na área do empreendimento, são apresentados, a seguir, os resultados das simulações das plumas de água produzida descartada, com diluições de até 10.000 vezes. Ressalta-se que a área ilustrada nas figuras representa a média das mínimas diluições obtidas em todas as 30 simulações, e não corresponde à posição da pluma em um determinado instante de tempo.

As diluições médias obtidas para os descartes, durante os períodos de verão e inverno, são apresentadas em função das distâncias de 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento. A distância de 500 m foi escolhida por corresponder à zona de mistura estabelecida na Resolução do CONAMA de nº 393/07 (Brasil, 2007).

A Tabela VII-3, a seguir, apresenta as diluições médias obtidas para a água produzida, durante os períodos de verão e inverno, a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento. Observa-se que a diluição aumenta à medida que a pluma se afasta do ponto de lançamento.

Tabela VII-3 - Diluições médias calculadas para a água produzida descartada a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.

EFLUENTE	DILUIÇÃO (vezes) A 100 m		DILUIÇÃO (vezes) A 250 m		DILUIÇÃO (vezes) A 500 m	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
Água Produzida	469	781	1.639	2.669	3.040	5.087

A Figura VII-3 e a Figura VII-4 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para a água produzida descartada, nos períodos de verão e inverno, respectivamente.

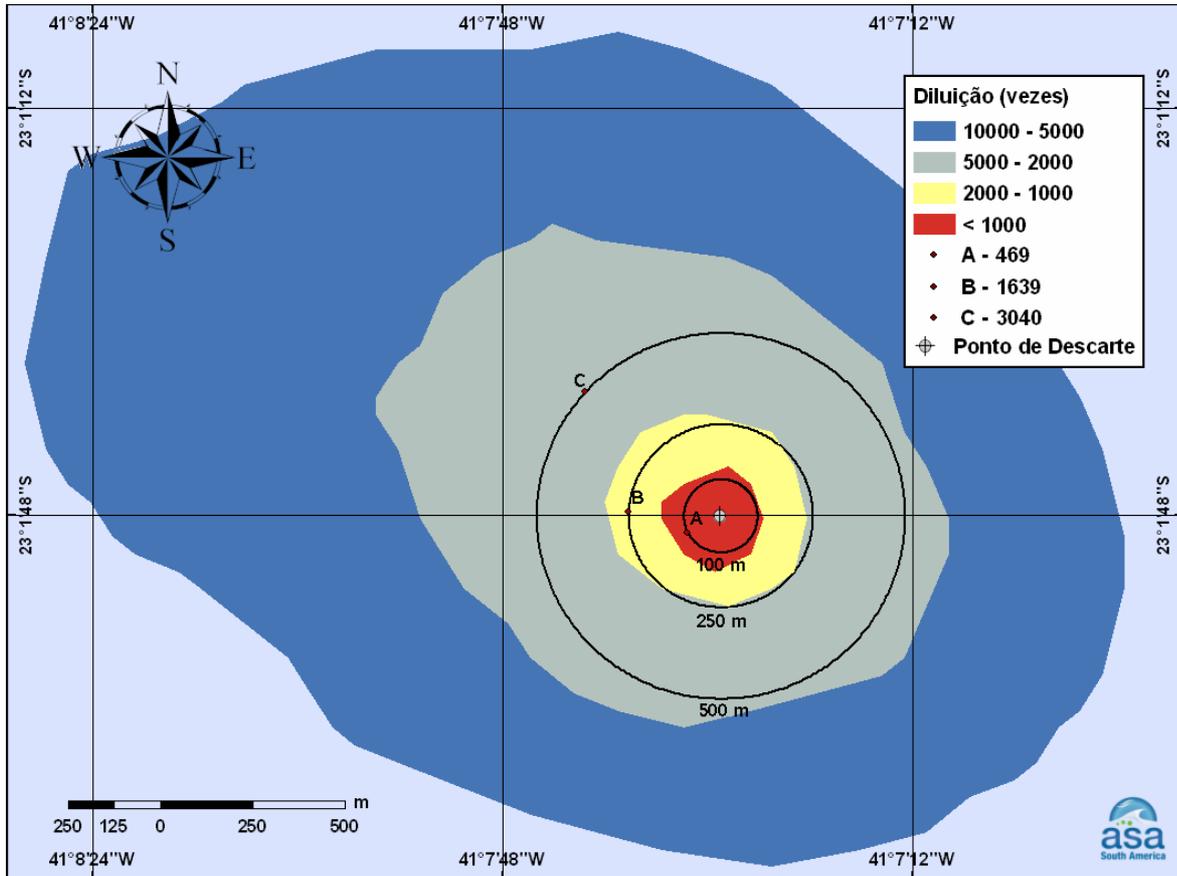


Figura VII-3 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida, simulada no período de verão, após 48 horas.

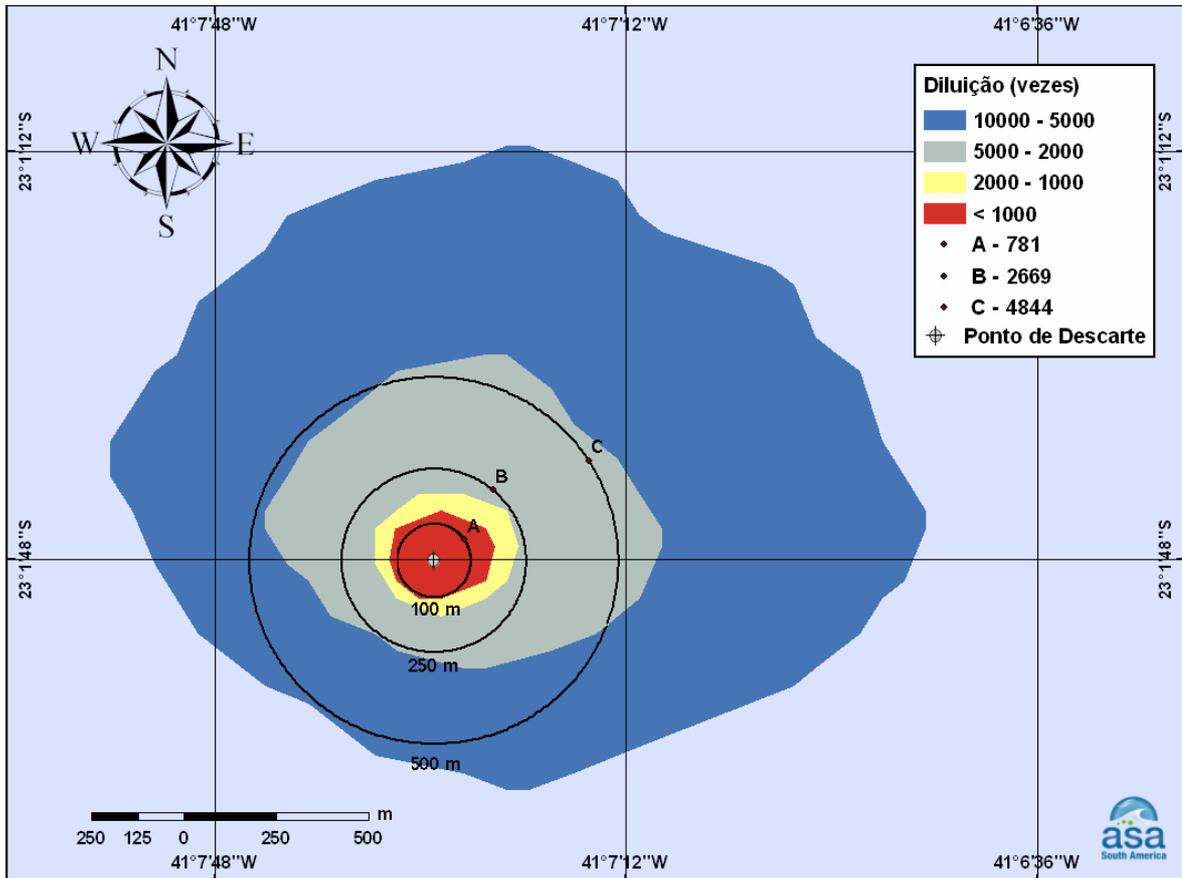


Figura VII-4 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida, simulada no período de inverno, após 48 horas.

A tabela a seguir (Tabela VII-4), mostra um resumo dos resultados das simulações probabilísticas, para o período de verão contendo a concentração inicial de cada um dos componentes do efluente e suas concentrações a 100, 250 e 500 m, considerando as diluições calculadas na modelagem do campo afastado. Enquanto a Tabela VII-5 mostra um resumo dos resultados das simulações probabilísticas, para o período de inverno.

Tabela VII-4 - Concentrações calculadas para a água produzida descartada a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, no período de verão.

Componente	Concentração no ponto de lançamento (µg/L)	Concentração (µg/L) A 100 m	Concentração (µg/L) A 250 m	Concentração (µg/L) A 500 m
		Diluição 469 vezes	Diluição 1.639 vezes	Diluição 3.040 vezes
Benzeno	5.469,0	11,66	3,34	1,80
Tolueno	5.979,0	12,75	3,65	1,97
Fenóis totais	5.734,0	12,23	3,50	1,89
Criseno (HPA**)	3,2	0,0068	0,0020	0,0011
Amônia	91.000,0	194,03	55,52	29,93
Bário	45.000,0	95,95	27,46	14,80
Boro	80.100,0	170,79	48,87	26,35

Tabela VII-5 - Concentrações calculadas para a água produzida descartada a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, no período de inverno.

Componente	Concentração no ponto de lançamento (µg/L)	Concentração (µg/L) A 100 m	Concentração (µg/L) A 250 m	Concentração (µg/L) A 500 m
		Diluição 781 vezes	Diluição 2.669 vezes	Diluição 4.844 vezes
Benzeno	5.469,0	7,00	2,05	1,13
Tolueno	5.979,0	7,66	2,24	1,23
Fenóis totais	5.734,0	7,34	2,15	1,18
Criseno (HPA**)	3,2	0,0041	0,0012	0,0007
Amônia	91.000,0	116,52	34,09	18,79
Bário	45.000,0	57,62	16,86	9,29
Boro	80.100,0	102,56	30,01	16,54

VII.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS

A seguir, são apresentados os resultados das simulações determinísticas críticas de verão e de inverno para o descarte de água produzida. Para essas simulações foram considerados como mais críticos os cenários que atingiram a maior distância do ponto de lançamento, ao final das simulações.

Nestas figuras são apresentados os contornos das plumas, utilizando o mesmo critério das simulações probabilísticas, uma seção transversal (demarcada por uma linha pontilhada sobre a pluma) com o perfil vertical de

diluições, e as mínimas diluições por camada (intervalos de profundidades) 48 horas após o instante inicial das simulações.

A Figura VII-5 e a Figura VII-6 apresentam os contornos de diluição das simulações determinísticas que atingiram as maiores distâncias em relação ao ponto de descarte, nos períodos de verão e inverno, respectivamente.

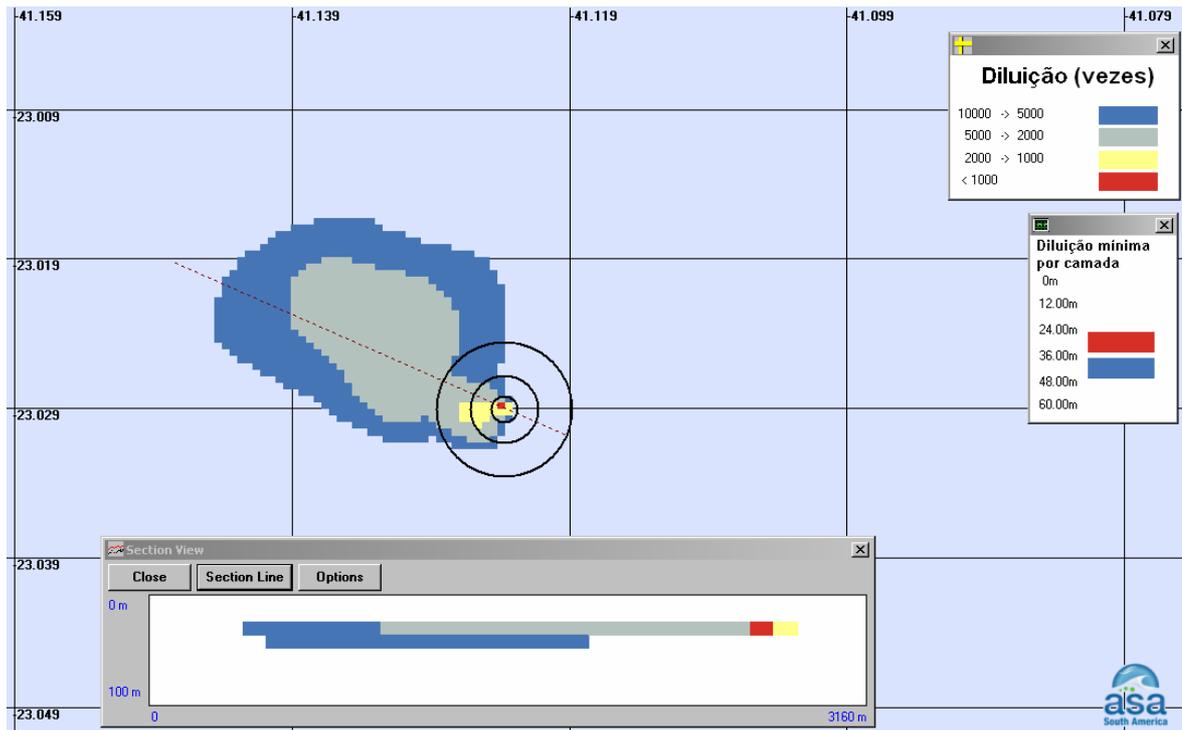


Figura VII-5 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida descartada, simulada no período de verão, após 48 horas.

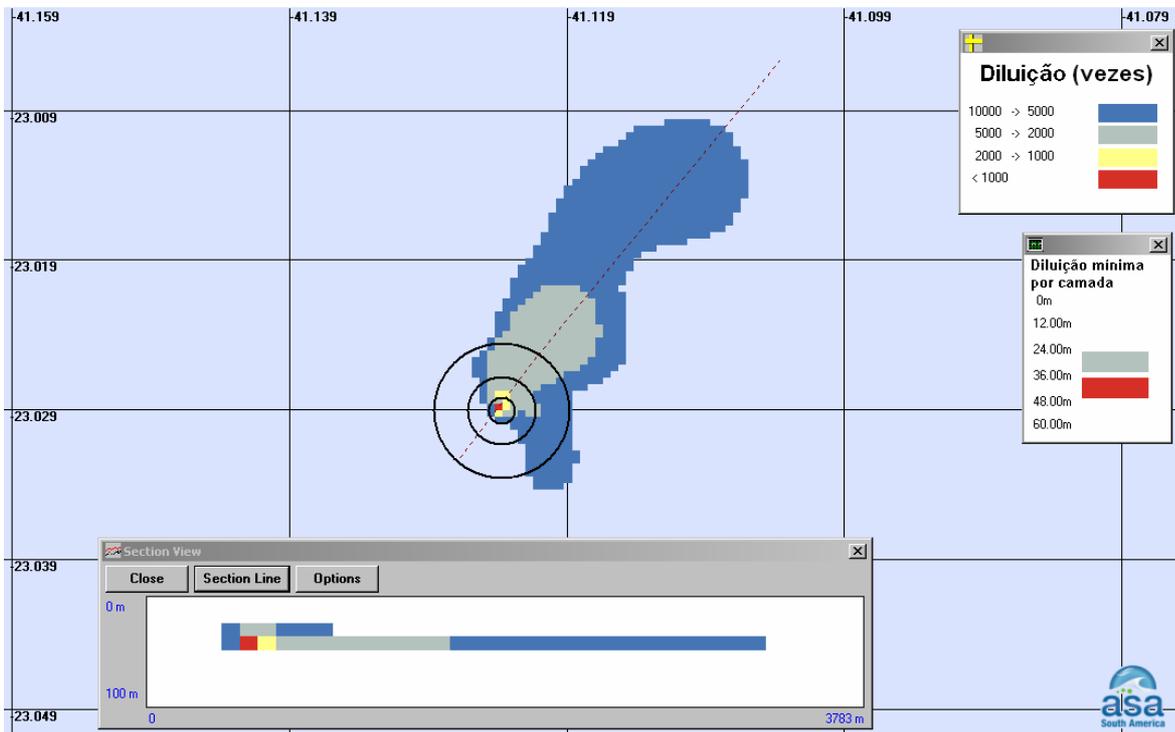


Figura VII-6 - Diluições calculadas para a pluma de água produzida, simulada no período de inverno, após 48 horas.

VIII CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório é apresentado o estudo para a determinação da dispersão das plumas provenientes do descarte de água produzida a partir dos blocos BM-C-39, BM-C-40, BM-C-41, BM-C-42 e BM-C-43 da OGX, localizados na Bacia de Campos.

Foram realizadas simulações de campo próximo e de campo afastado (simulações probabilísticas e determinísticas críticas). As simulações de campo próximo fornecem a diluição inicial do efluente e servem como parâmetros de entrada para o modelo de campo afastado CHEMMAP. As simulações probabilísticas fornecem como resultado a área de influência do efluente, além dos valores médios de diluição da pluma a partir do ponto de descarte. Para as simulações determinísticas, foram considerados como mais críticos os cenários que atingiram as maiores distâncias a partir do ponto de descarte, em cada um dos períodos simulados.

Para a determinação da área de influência do descarte foram conduzidas simulações considerando as variações sazonais das forçantes meteorológicas e oceanográficas, sendo selecionados, para isso, os períodos de verão e inverno. Para representação dos efluentes, foi utilizado um composto conservativo.

Para o descarte da água produzida foram realizadas simulações com duração de 48 horas, utilizando a vazão de 12.996 m³/dia. Como critérios ambientais foram utilizadas as concentrações existentes na Resolução do CONAMA nº 357/05, referentes ao Art. 18 para Águas Salinas de Classe 1, correspondentes aos parâmetros considerados para água produzida, e a diluição correspondente à Concentração de Efeito Não Observado (CENO).

Com o objetivo de dar suporte e orientar o desenvolvimento de futuros trabalhos de monitoramento ambiental na área do empreendimento, são apresentados neste relatório, os contornos de diluição das plumas provenientes do descarte de água produzida, até uma diluição de 10.000 vezes.

Os resultados das simulações do descarte de água produzida mostraram que nenhum dos compostos selecionados atingem concentrações inferiores à CENO ao final do campo próximo. Entretanto, todos os componentes da água produzida



têm suas concentrações enquadradas no limite estabelecido pela legislação vigente (CONAMA 357/05), ainda no domínio do campo próximo. Tendo como base a CENO, utilizando o valor mais crítico obtido por Gabardo (2007) para efluentes da Bacia de Campos, o enquadramento do descarte de água produzida é alcançado em distância inferior a 160 m do ponto de lançamento.

Os resultados para água produzida mostram, portanto, que o descarte deste tipo de efluente na Bacia de Campos, pela OGX, estão enquadrados em todos os critérios ambientais considerados, em uma distância inferior ao estabelecido como a máxima distância permitida para a zona de mistura na Resolução do CONAMA de nº 393/07 (*i.e.* 500 m).

IX BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, K. M., 2005. Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-14056-TDI/1067). 185pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2007. Modelagem do Descarte de Água Produzida nas Bacias de Campos e Ceará. Relatório Técnico, Revisão 01 (16 de março de 2007). 199pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2008a. Modelagem da Dispersão de Efluente Líquido Industrial da Fosfertil Lançado no Rio Grande, Uberaba (MG). Relatório Técnico, Revisão 00 (24 de outubro de 2008). 114pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2008b. Modelagem do Descarte de Água Produzida a partir dos Emissários da UTPF de Guamaré (RN). Relatório Técnico, Revisão 01 (16 de janeiro de 2008). 87pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2009. Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para a Concessão BM-C-36 no Bloco Exploratório Aruanã, Bacia de Campos. Relatório Técnico, Revisão 00 (junho de 2009). 152pp+Anexo.

BRANDSMA, M.G. 2004. Modeling of Cooling Water, ORV Cold-Water and Cavern Leaching Brine Plumes from Main Pass Energy Hub. Technical Report. Ecology and Environmental, Inc; 23 February 2004. 83pp.

BRASIL, 2005. Resolução CONAMA no 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 18 mar. 2005.

BRASIL, 2007. Resolução CONAMA no 393, de 08 de agosto de 2007. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 09 ago. 2007.

BRYAN, K., 1969: A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *J. Comput. Phys.*, 4(3), 347-376.

CASTRO FILHO, B.M.C. & L.B. MIRANDA, 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°N and 34°S. *The Sea*. John Wiley & Sons, Inc. 11: p. 209-251.

COX, M.D., 1984. A primitive equation 3-dimensional model of the ocean. GFDL Ocean Group Technical Report No. 1. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/NOAA, Princeton University, Princeton, N.J. 08542, U.S.A. 143 pp.

EPA (Environmental Protection Agency), 2000. Hydrodynamic and Water Quality Model of Christina River Basin. Region III, Philadelphia, PA. Final Report. December 5, 2000.

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

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

GABARDO, I.T., 2007. Caracterização Química e Toxicológica da Água Produzida Descartada em Plataformas de Óleo e Gás na Costa Brasileira e seu Comportamento Dispersivo no Mar. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, Brasil.

- GODOI, S. S. de, 2005.** Dinâmica Quase-Geostrófica do Sistema Corrente do Brasil no Embaiamento de São Paulo. Tese de doutorado apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- HESS, K.W. & K.T. BOSLEY, 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.
- 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.
- OLIVEIRA, A. S, 1986.** Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-4008-TDL/239). 134pp.
- PACANOWSKI, R.C., K. DIXON & A. ROSATI, 1990.** The GFDL Modular Ocean Model users guide, version 1.0. GFDL Ocean Group Technical Report No. 2. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/ NOAA, Princeton University, Princeton, N.J. 08542, U.S.A., 18 pp.
- PACANOWSKI, R.C., 1995.** MOM 2 documentation, user's guide and reference manual. GFDL Ocean Group Technical Report N° 3. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/ NOAA, Princeton University, Princeton, N.J. 08542, U.S.A., 232 pp.
- SATYAMURTI, P. & L.F. MATTOS, 1989.** Climatological lower trophospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 108:410-520.

SCHUREMANN, P., 1941. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Washington, D.C., U.S. *Coast & Geodetic Surv.*, S.P. n. 98, 317p.

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.

SILVEIRA, C.A. da, A.C.K. SCHMIDT, E.J.D. CAMPOS, S.S. de GODOI, & Y. IKEDA, 2000. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. *Rev. Bras. Oceanogr.*, 48(2): p. 171-183.

STRAMMA L. & M. England, 1999. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, no C9, 20863-20883.

STRAMMA, L.; Y. IKEDA & R.G. PETERSEN, 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, *Deep-Sea. Res.*, 37(12): p. 1875-1886.

SEMTNER, A.J., 1974. A general circulation model for the World Ocean. Technical Report No. 9. Department of Meteorology, University of California, Los Angeles. 99 pp.

TOMCZAK, M. & J.S. GODFREY, 1994. Regional Oceanography: An Introduction. Pergamon. 422pp.

ANEXO A DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

O modelo numérico hidrodinâmico *Princeton Ocean Model* (POM) foi desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987). O código fonte desse modelo é de domínio público e disponível *on-line*¹⁶.

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 σ 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 σ , 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, η a elevação da superfície e H a profundidade média local:

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

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.

¹⁶ <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>

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*).

A.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 (η).

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:

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

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

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

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

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{A.1-4})$$

Conservação de Temperatura Potencial:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_{(H)} \quad (\text{A.1-5})$$

Conservação de Salinidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (\text{A.1-6})$$

Equação de Estado:

$$\rho = \rho(S, \Theta, P) \quad (\text{A.1-7})$$

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + U \frac{\partial q^2}{\partial x} + V \frac{\partial q^2}{\partial y} + W \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_o} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \quad (\text{A.1-8})$$

Equação da Turbulência em Macro Escala:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x}(q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y}(q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z}(2q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_q \frac{\partial}{\partial z}(q^2 l) \right] \\ + l E_1 K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (\text{A.1-9})$$

sendo,

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial y} \right) \quad (\text{A.1-10})$$

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

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

onde,

 U, V, W = componentes do vetor velocidade (m/s); f = parâmetro de Coriolis (s^{-1}); ρ_0 = densidade de referência (kg/m^3); ρ = 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); Θ = 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 .

A.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, as condições necessárias e suficientes para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para as seguintes propriedades: 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, η é a elevação da superfície livre 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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ (condição análoga aplicada à salinidade)} \quad (\text{A.2-1})$$

Para prescrever os valores de elevação da superfície, velocidade barotrópica, temperatura e salinidade, nas bordas abertas, foi utilizada uma climatologia elaborada a partir dos resultados de uma simulação de 14 anos do OCCAM para o Atlântico Sul (grade regular com $\frac{1}{4}$ de grau de resolução e 36 níveis, sendo 20 m de espessura próximo à superfície e 255 m em 5.500 m). O procedimento de tratamento dos dados para elaboração desta climatologia envolveu: o agrupamento de todos os instantes para cada variável em um único arquivo; a geração de 1 ano climatológico com passo de tempo de 6 horas, a conversão das variáveis com estrutura vertical para níveis sigma, e uma interpolação, para obter uma resolução espacial adequada para projeção dos dados na grade do modelo.

A.3 BIBLIOGRAFIA

BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 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, pp. 1-16.

MELLOR, G.L. & T. YAMADA, 1982. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, nº 4, 851-875.

ANEXO B DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CORMIX

O CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*), da *Cornell University*, é um sistema de modelos computacionais desenvolvido para a análise, previsão e planejamento do descarte 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 descartes pontuais abaixo da superfície (*submerged single port discharges*);
- (b) CORMIX2, para a análise de múltiplos descartes pontuais abaixo da superfície (*submerged multiport diffuser discharges*); e
- (c) CORMIX3, para a análise de descartes superficiais (*buoyant surface discharges*) de efluentes cuja densidade seja menor do que a do corpo receptor.

Embora a metodologia do CORMIX considere condições ambientais estacionárias (descarte contínuo, profundidade constante, intensidade e direção de correntes constante), o sistema representa uma ferramenta adequada de previsões qualitativas (*e.g.*, classificação de fluxos) e quantitativas (*e.g.*, taxas de diluição, trajetórias de plumas) dos processos de misturas resultantes de diferentes configurações de descartes, e em vários tipos de corpos d'água, incluindo rios, lagos, reservatórios, estuários e águas costeiras. No presente estudo foi utilizado o subsistema CORMIX2 da versão 4.1G do CORMIX.



B.1 BIBLIOGRAFIA

JIRKA, G.H.; R.L. DONEKER & S.W. HINTON, 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.

ANEXO C DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CHEMMAP

O CHEMMAP, desenvolvido pela **ASA**, é um sistema de modelos que pode ser utilizado em Análises de Riscos, 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 produzida associado às operações de óleo e gás (French, 2001; French *et al.*, 2002) em qualquer região do mundo.

C.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP

O CHEMMAP foi projetado em uma configuração modular na forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, possam 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 um 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, 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 uma grade *land-water* ou uma grade *habitat/depth*. 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, deposição, 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/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 disso, 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, assim como a dispersão.

O modelo também é capaz de simular a adsorção de produtos a partículas de sedimentos em suspensão, resultando na deposição 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 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.

C.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 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:

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

onde

Δt = 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 m²/s, em águas estuarinas, a valores maiores ou iguais a 10 m²/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 m²/s, ou ainda menores.

O termo responsável pelo empuxo (R_t), tanto positivo quanto negativo, é causado pela diferença relativa da densidade (e da 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 menor a partícula, mais rápido a pluma se aproxima da superfície. Em contrapartida, quanto mais denso o químico 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 deposição 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 ressuspensas, 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 zonal e meridional) são, respectivamente:

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

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

onde

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

v_w = componente meridional (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:

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

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

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);

θ = 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):

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

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):

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

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:

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

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

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

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

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

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 Hoult (1972), com uma abordagem similar. Mackay *et al.* (1980) modificaram o modelo de Fay-Hoult 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 m²/s, é definida por:

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

onde

- A = área superficial da mancha (m²);
- K₁ = taxa de espalhamento constante (s⁻¹);
- V = volume da superfície da mancha (m³);
- 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, \vec{A}_{tk} (m²/s), é dada por:

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

onde

A_{th} = área superficial de uma partícula (m²);

K_1 = taxa de espalhamento constante (s⁻¹);

V_s = volume de óleo de uma partícula (m³);

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, op. cit.) é dado por:

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

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 dispersará verticalmente para baixo, em uma água que se move a uma velocidade mais lenta devido a resposta das forçantes 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:

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

onde

i = i -ésima componente;

A = área superficial da pluma ou partícula (cm^2);

K_d = coeficiente de transferência de dissolução da massa (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/cm³);

C_i^w = concentração do componente i na fase aquosa (mols/cm³).

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

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

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, op. cit.). O coeficiente de transferência de dissolução da massa, K_{d_s} (m/s), é:

$$K_{d_s} = \frac{ShD_{AB}}{L} \quad (\text{C.1.1-18})$$

onde

Sh = número de Sherwood médio;

L = diâmetro da pluma superficial (m);

D_{AB} = coeficiente de difusão a 25 °C (m²/s).

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

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

onde

R = constante universal dos gases ($8,206 \times 10^{-5}$ atm-m³/mol-K);

T = temperatura (K);

μ_w = viscosidade da água a 25 °C (cP);

V'_B = volume molar de Le Bas (cm³/mols).

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

$$\mu_w = \exp \left[-24,71 + \left(\frac{4,209}{T} \right) + 0,04527T - 0,00003376T^2 \right] \quad (\text{C.1.1-20})$$

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

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

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

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:

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

onde

Sc = número do Schmidt;

Re_L = número de Reynolds.

O número de Schmidt é definido por:

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

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

onde

γ = viscosidade cinemática da água (m²/s);

ρ_w = densidade da água (g/cm³).

O número de Reynolds é definido por:

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

onde

U_w = velocidade do vento (m/s);

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

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

onde

Sh = número de Sherwood médio;

d = diâmetro da gotícula (m);

D_{AB} = coeficiente de difusão a 25 °C (m²/s).

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

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

onde

Sc = número do Schmidt;

Re_d = número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula.

Com o número de Reynolds, Re_d , definido por:

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

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:

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

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 deposição V_s . Assume-se que o químico se adsorve a partículas de silte de 50 μm e densidade de 1,0512 g/cm^3 . Através da Lei de Stokes, a taxa de deposição (velocidade vertical) é de aproximadamente 3 m/dia na água do mar (densidade de 1,024 g/cm^3) e águas calmas.

Assume-se que a deposição 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:

$$E = \frac{K_e MW P_{vp}}{RT} \quad (\text{C.1.1-31})$$

onde

K_e = coeficiente de transferência de massa por evaporação (m/h);

MW = peso molecular (g/mol);

P_{vp} = pressão de vapor (atm);

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

T = temperatura (K).

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

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

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):

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

onde

D_{ref} = difusividade no ar de um químico de referência (cm^2/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):

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

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'):

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

onde

R = constante universal dos gases ($8,206 \times 10^{-5}$ atm-m³/mol-K);

T = temperatura (K).

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

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

onde

D_z = difusividade vertical (m^2/s);

Δt = 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, 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:

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

onde

Dz = taxa de mistura vertical;

L = comprimento de mistura;

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

Esta pode ser aproximada como:

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

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

onde

bs = tensão do fundo;

ρ_{ar} = densidade do ar (g/cm^3).

Em resumo:

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

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:

$$D_z * d(dC / dz) / dz \quad (C.1.1-45)$$

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 depositado, 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:

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

onde

t = tempo (dias);

M_t = massa remanescente no instante t ;

M_0 = massa descartada no instante 0;

k = taxa de decaimento instantâneo (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:

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

ou

$$k = 0,693 / t(1/2) \quad (C.1.1-48)$$

C.2 DADOS DE ENTRADA

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

- ✓ localização geográfica do ponto de descarte;
- ✓ data e horário;
- ✓ duração do descarte;
- ✓ volume descartado;
- ✓ 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.

C.3 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.

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.

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

DELVIGNE, G.A.L. & C.E. SWEENEY, 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.

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.

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 Nº. 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.

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.

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.

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.

OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. *Deep Sea Research*, v. 8, p. 789-802.

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.

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.

ANEXO D CONDIÇÕES DOS INSTANTES INICIAIS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS

As figuras D-1 e D-2 apresentam as condições meteorológicas e oceanográficas referentes aos instantes iniciais das simulações determinísticas críticas do descarte de água produzida, apresentadas neste estudo.

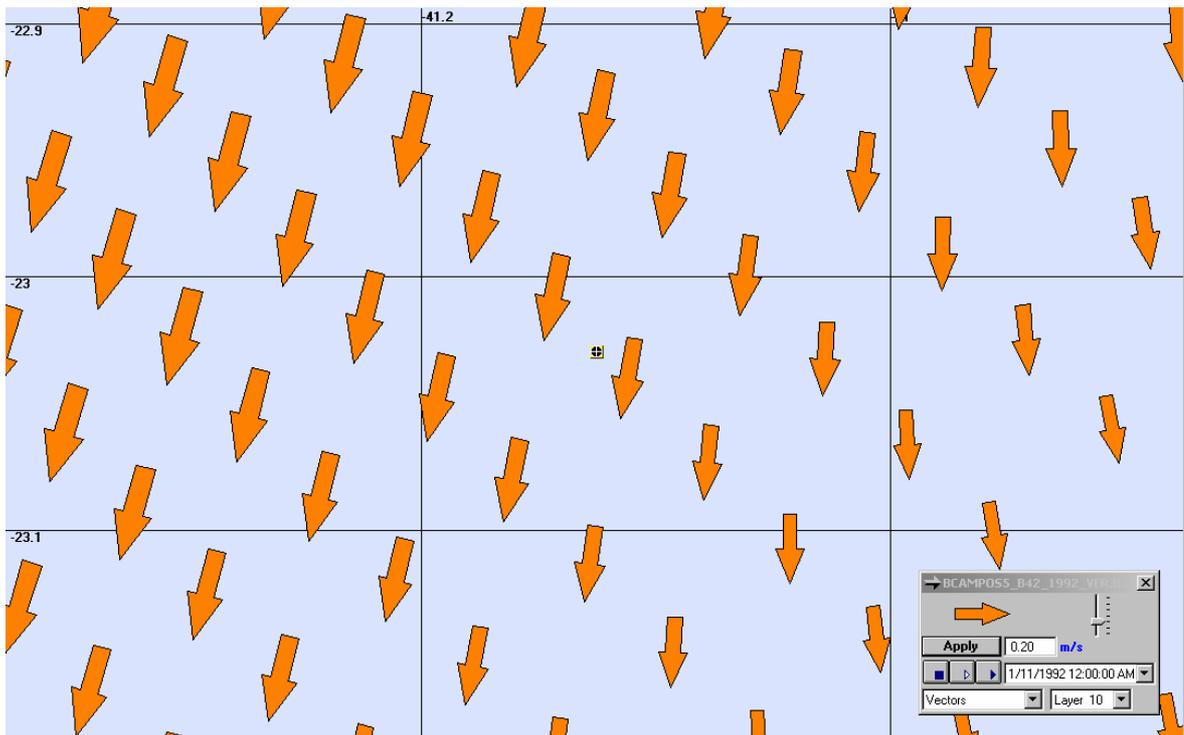


Figura D-1 - Condições utilizadas na simulação de VERÃO (maior distância a partir do ponto de lançamento): corrente S.

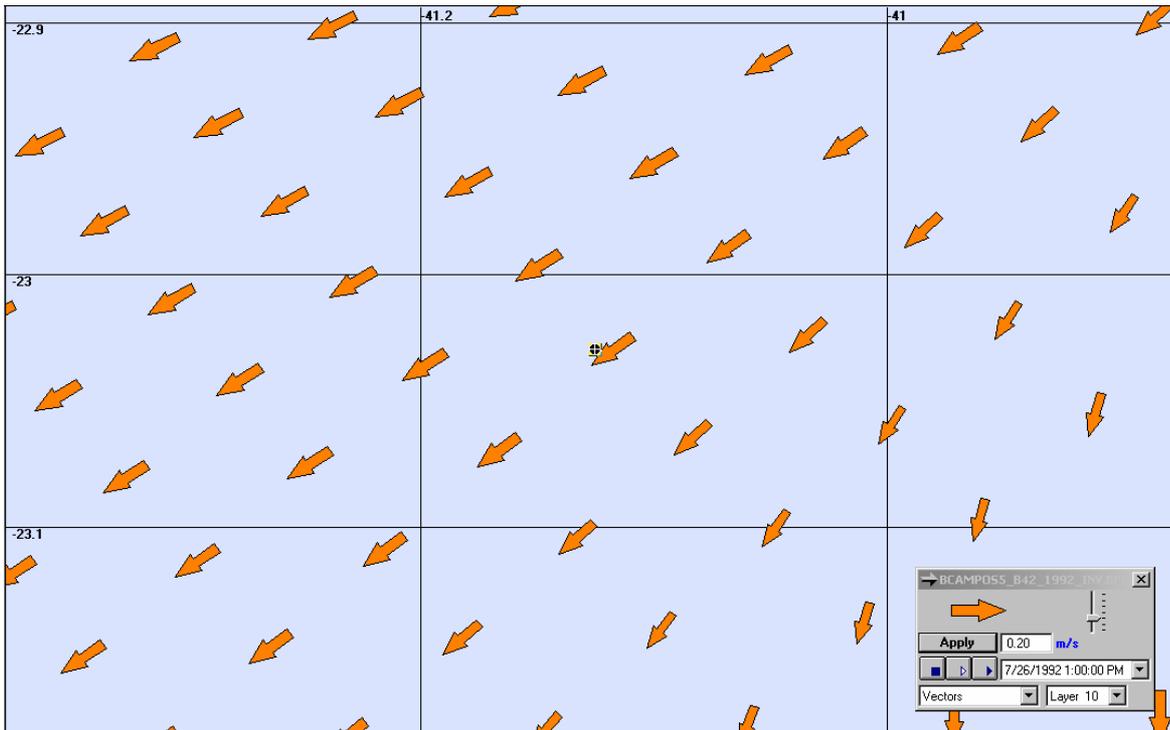


Figura D-2 - Condições utilizadas na simulação de INVERNO (maior distância a partir do ponto de lançamento): corrente SW.