

Modelagem do Descarte de Fluorene R2 Devido ao Desalagamento de Trecho de Gasoduto no Campo de Camarupim, Bacia do Espírito Santo



E&P

Revisão 00
Jul/2007



PETROBRAS

**Modelagem de Descarte de Fluorene R2
Devido ao Desalagamento de Trecho
de Gasoduto no Campo de Camarupim,
Bacia do Espírito Santo**

Revisão 00

Julho / 2007



E&P

ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I INTRODUÇÃO	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO	I-2
I.1.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO	I-3
I.1.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO DA REGIÃO	I-5
II MODELO HIDRODINÂMICO	II-1
II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL.....	II-1
II.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM	II-2
II.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS.....	II-5
II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL.....	II-6
II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	II-7
II.3.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E BATIMETRIA.....	II-7
II.3.2 DADOS DE VENTO E MARÉ	II-9
II.3.3 ESTRUTURA TERMOHALINA	II-10
III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	III-1
III.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR	III-2
III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES.....	III-2
III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA	III-6
IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE DE FLUORENE R2	IV-1
V MODELAGEM DA DILUIÇÃO E DISPERSÃO DE FLUORENE R2.....	V-1
V.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP	V-2
V.1.1 FORMULAÇÃO DO MODELO.....	V-5
V.2 DADOS DE ENTRADA.....	V-22
V.2.1 CAMPO DE CORRENTES	V-23
V.2.2 DADOS DE VENTO.....	V-23
V.2.3 CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE	V-26
V.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	V-26
V.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS.....	V-27

VI	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	VI-1
VII	BIBLIOGRAFIA.....	VII-1
VIII	EQUIPE TÉCNICA	VIII-1

TABELAS

TABELA	PÁG.
Tabela I.1-1 - Coordenadas UTM (SAD 69) e lâmina d'água (m) do ponto de descarte.	I-2
Tabela I.1.2-1 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica Barra do Itapemirim (ES). Fonte: FEMAR (2000).	I-7
Tabela II.2-1 - Resumo dos dados de entrada do <i>Parallel Ocean Climate Model</i> (POCM).	II-7
Tabela IV-1 - Parâmetros utilizados para a modelagem da pluma do descarte de Fluorene R2 no Campo de Camarupim.	IV-1
Tabela V.2.2-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o período de verão do ano de 1992, no Campo de Albacora.	V-25
Tabela V.2.2-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para período de inverno do ano de 1992, no Campo de Albacora.	V-25

FIGURAS

FIGURA	PÁG.
Figura I.1-1 - Localização do ponto de descarte no Campo de Camarupim.	I-2
Figura I.1.1-1 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão.	I-3
Figura I.1.1-2 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno.	I-4
Figura I.1.1-3 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).	I-5
Figura I.1.2-1 - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente M_2 .	I-8
Figura II.3.1-1 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da região sul-sudeste brasileira.	II-8
Figura II.3.1-2 - Base batimétrica para modelagem hidrodinâmica.	II-8
Figura II.3.1-3 - Batimetria discretizada do domínio considerado na região sul-sudeste brasileira.	II-9
Figura II.3.3-1 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS no: (a) temperatura e (b) salinidade no verão; (c) temperatura e (d) salinidade no inverno.	II-10
Figura III.1-1 - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.	III-2
Figura III.2-1 - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).	III-3
Figura III.2-2 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.	III-3
Figura III.2-3 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as calculadas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.	III-4
Figura III.2-4 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.	III-5
Figura III.3-1 - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico no ano de 1992.	III-6

FIGURA	PÁG.
Figura V.2.2-1 - Diagrama <i>stick plot</i> dos valores médios diários de dados de vento durante o período de janeiro a dezembro de 1992 (convenção vetorial).	V-23
Figura V.2.2-2 - Histograma direcional dos vetores de vento para (a) verão (Jan.-Mar.) e (b) inverno (Jun.-Ago.), Campo de Albacora.	V-24
Figura V.4-1 - Média das máximas concentrações esperadas ($\mu\text{g/L}$) para a pluma de FLUORENE R2, simulada no período de verão, após 1 hora, para o Campo de Camarupim.	V-27
Figura V.4-2 - Média das máximas concentrações esperadas ($\mu\text{g/L}$) para a pluma de FLUORENE R2, simulada no período de inverno, após 1 hora, para o Campo de Camarupim.	V-28

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do processo de dispersão da pluma proveniente do descarte de Fluorene R2 no Campo de Camarupim, Bacia do Espírito Santo, devido ao desalagamento de trecho do duto após o teste de estanqueidade.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir dos resultados de um modelo de meso-escala baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), implementado para simular as condições na plataforma continental, e o segundo baseado no *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

Para simular a diluição e dispersão da pluma do efluente foi utilizado o modelo CHEMMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** Este modelo simula a dispersão e a distribuição de produtos químicos na superfície e coluna d'água, nos sedimentos e na costa. Com os resultados das simulações é possível determinar a probabilidade de ocorrência e a concentração dos compostos químicos considerados.

Para a determinação da área de influência do descarte foram conduzidas simulações considerando a variação sazonal das forçantes meteorológicas e oceanográficas, sendo selecionados para isso os períodos de verão e inverno. Para esses períodos, foram realizadas simulações com duração de 1 hora, utilizando a vazão de 0,122 m³/s, até o máximo de 122 m³. Neste estudo foi considerado o marcador Fluorene R2, comercializado pela Nicho Tecnologia.

Os resultados das simulações mostraram que, nas condições de descarte simuladas, a aproximadamente 10 m do ponto de descarte a concentração corresponde a uma diluição de 10 vezes a concentração de lançamento. As áreas de abrangência da pluma de Fluorene R2 variaram entre 506.170 m² (inverno) e 589.520 m² (verão).

I INTRODUÇÃO

Neste relatório é apresentada a modelagem computacional da diluição e dispersão de efluente proveniente do processo de desalagamento de duto, após o teste de estanqueidade, no Campo de Camarupim, Bacia do Espírito Santo. Esse efluente é composto de água do mar filtrada, aditivada com o composto Fluorene R2, comercializado pela Nicho Tecnologia. Essa avaliação foi conduzida utilizando o sistema de modelos computacionais conhecido como CHEMMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** dos EUA.

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

Para a modelagem de dispersão da pluma de efluente foram utilizados dados de vento obtidos da bóia oceanográfica da PETROBRAS localizada no Campo de Albacora.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a partir de resultados de um modelo desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), para simular as condições na plataforma continental, e resultados do *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

A seguir, o Capítulo I apresenta os objetivos desse estudo e fornece informações sobre a área em questão. O Capítulo II descreve o modelo hidrodinâmico e o Capítulo III apresenta a calibração do mesmo, com comparações entre dados observacionais e os resultados simulados. No Capítulo IV são apresentadas as características do descarte de Fluorene R2. O Capítulo V descreve o modelo CHEMMAP utilizado na modelagem de diluição e dispersão da pluma de efluente, seus dados de entrada e os resultados. Por fim, o Capítulo VI discute os resultados obtidos neste estudo.

I.1 ÁREA DE ESTUDO

As simulações da dispersão de Fluorene R2 foram realizadas em local cerca de 50 m da costa do Espírito Santo, conforme mostra a figura I.1-1. As coordenadas do ponto de descarte foram especificadas pela PETROBRAS e se encontram listadas na tabela I.1-1.

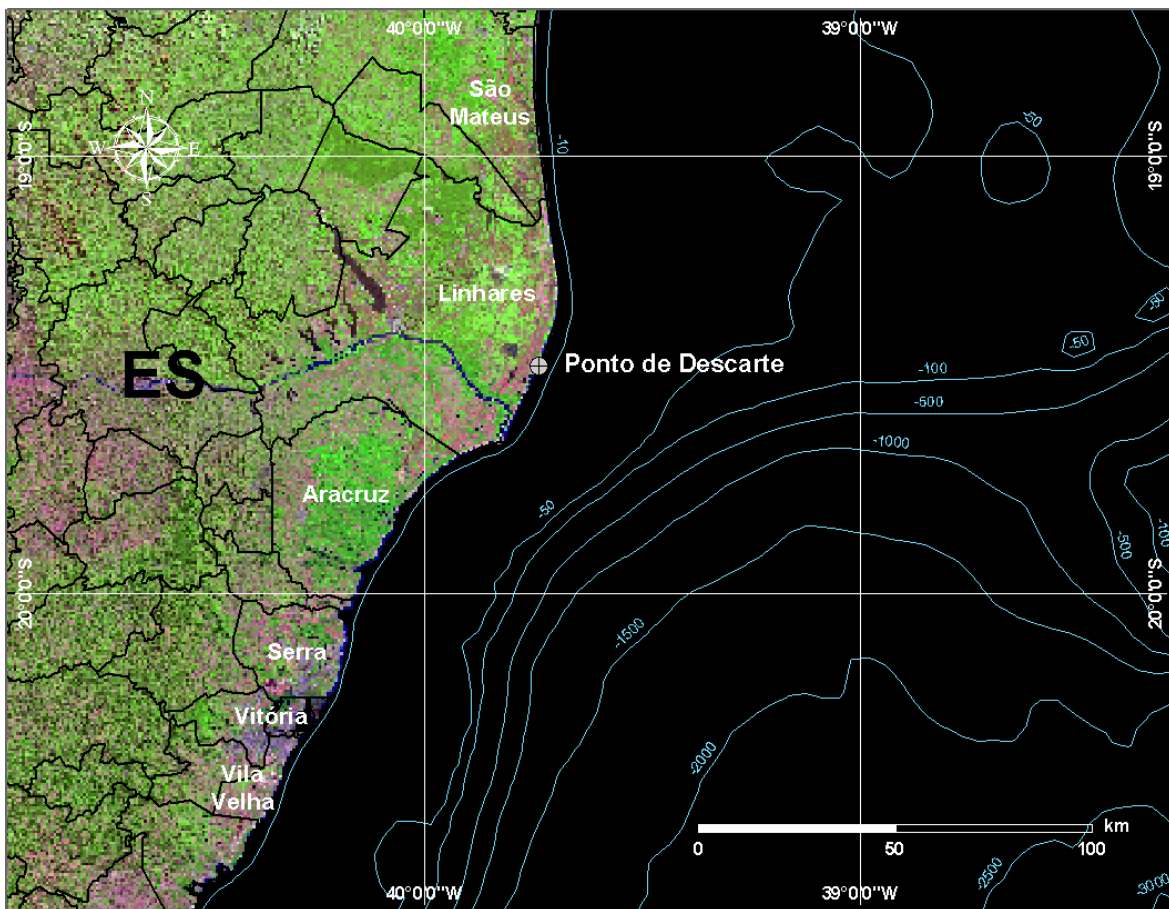


Figura I.1-1 - Localização do ponto de descarte no Campo de Camarupim.

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

Ponto de descarte	NORTE	LESTE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
P1	7.845.943,29	422.865,90	~1,5

I.1.1 Características Meteorológicas da Região

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

A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região sudeste devido ao deslocamento da ASAS é caracterizado pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste-nordeste no inverno. Este padrão é ilustrado na figura I.1.1-1 e na figura I.1.1-2, que apresentam o comportamento sazonal da circulação atmosférica obtida através da média de 12 anos (1990 – 2001) das reanálises do modelo de circulação geral do NCEP./NCAR¹ Nessa análise foram utilizados dados de vento na altura de 10 m. Observa-se a mudança do posicionamento sazonal da ASAS e o padrão de ventos gerados por esse sistema.

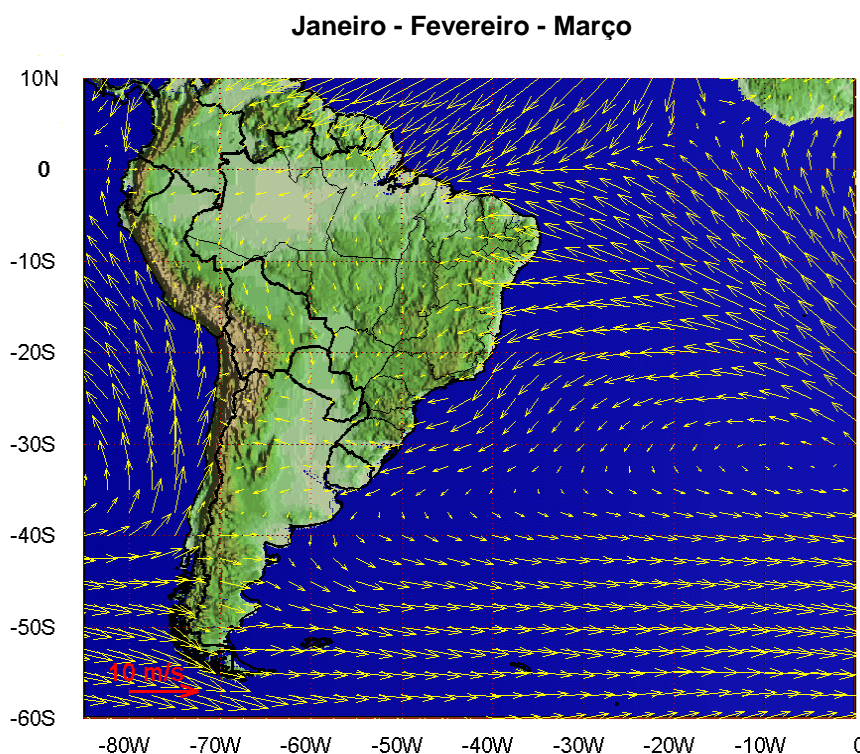


Figura I.1.1-1 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão.

¹ 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).

Junho - Julho - Agosto

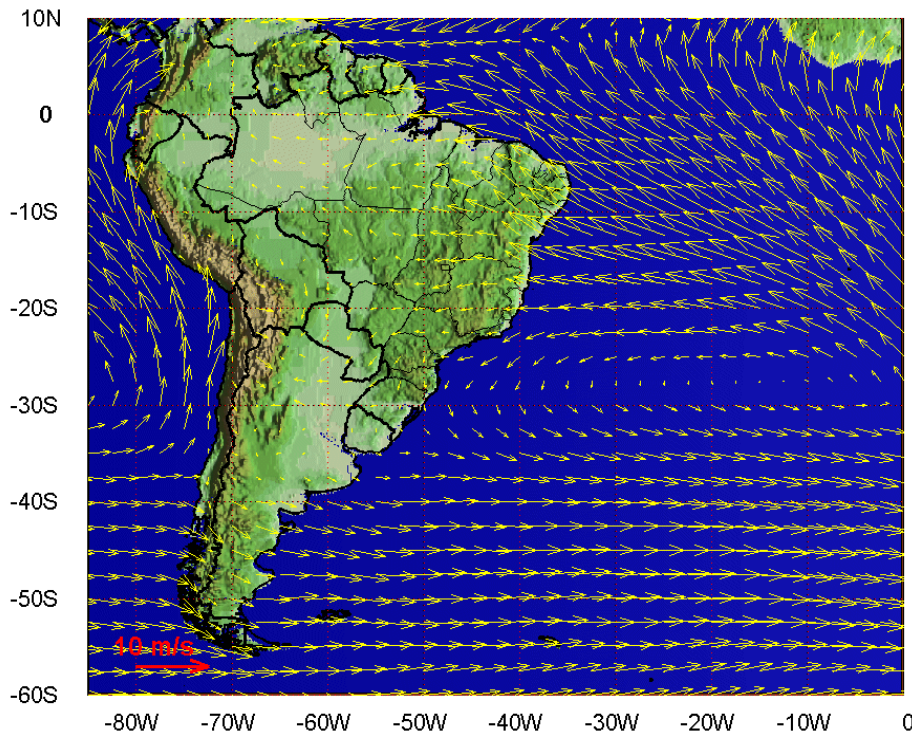


Figura I.1.1-2 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno.

Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre o Brasil com frequências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas, como se pode notar no estudo de Oliveira (1986). De acordo com o Boletim de Monitoramento e Análise Climática (Climanálise, 1996), que apresentou uma estatística de sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil entre os anos de 1975 a 1984 e 1987 a 1995, a média ficou entre 4 e 7 sistemas mensais atuando sobre a costa do sudeste brasileiro, com valores máximos nos meses de inverno e valores mínimos nos meses de verão. A figura I.1.1-3 ilustra um instantâneo do vento NCEP/NCAR a 10 m de altura para a América do Sul, em situação de deslocamento de um sistema frontal.

O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala. A intensificação ou dissipação dos mesmos está relacionada com as características atmosféricas sobre o continente. Algumas regiões do Brasil, tais como as Regiões Sul e Sudeste, são regiões frontogenéticas, ou seja, são regiões onde as frentes podem se intensificar ou se formar (Satyamurty & Mattos, 1989). Em meso e micro escalas, o escoamento de baixos níveis sobre a

plataforma continental está fortemente influenciado pelo efeito de circulações termicamente induzidas (brisas marinha e terrestre).

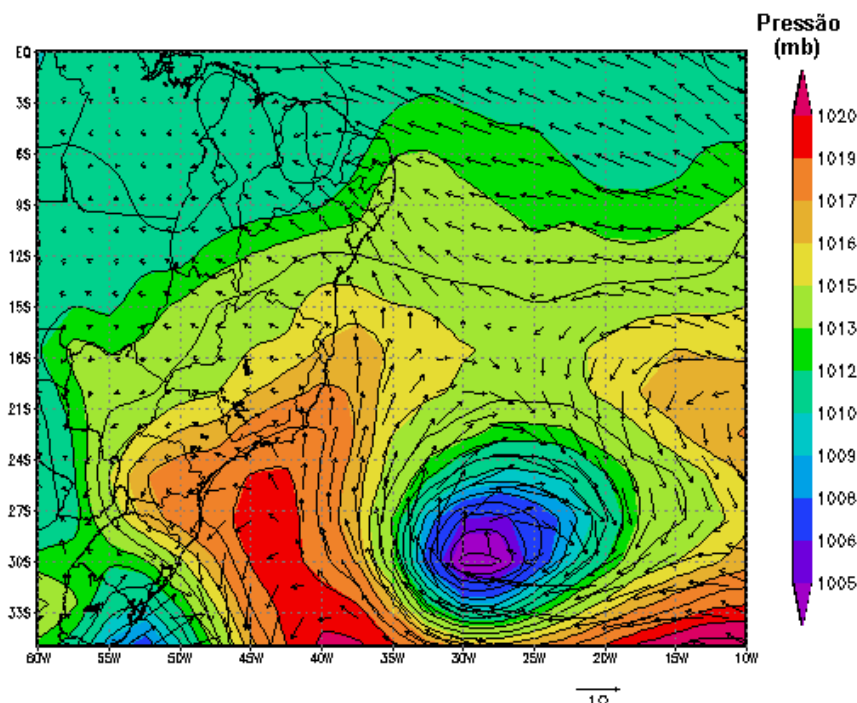


Figura I.1.1-3 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).

I.1.2 Padrões de Circulação da Região

A circulação oceânica nesta área é determinada por forçantes variadas, que se sobrepõem de modo diferenciado, dependendo de fatores morfológicos e dinâmicos locais. Sobre a plataforma há amplificação natural do sinal de maré e intensificação dos padrões meteorológicos locais, *i.e.* brisa marinha. Sobreposto a estes sinais existe a presença energética da passagem de frentes, com pronunciada causalidade remota. No oceano profundo a composição da passagem de frentes e do fluxo determinado pela Corrente do Brasil (CB) é preponderante.

A maré astronômica na região da Área Geográfica do Espírito Santo é predominantemente semidiurna, conforme indicam as constantes harmônicas para a estação maregráfica Barra do Itapemirim da FEMAR³ (21°00,4'S e 40°48,5'W), apresentadas na tabela I.1.2-1. Observa-se que as principais componentes para a região são M_2 e S_2 , com amplitudes de 42,1 cm e 19,6 cm, respectivamente. A componente M_{sf} tem amplitude de 9,7 cm e todas as demais componentes apresentam amplitude inferior a 8 cm.

A figura I.1.2-1 apresenta o mapa cotidal, com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude de maré para a costa sul-sudeste brasileira (CSR3⁵). Observa-se ser esta uma região de pequena resposta a forçante astronômica da maré, fato esperado pela relativamente pequena largura da plataforma continental. Exceção feita ao platô de Abrolhos e região interna da Bacia de Santos, onde há evidente amplificação do sinal de maré.

Com relação à Corrente do Brasil, sabe-se que parte significativa de seu fluxo passa através dos canais dos Bancos de Abrolhos e se divide em dois ramos. Um deles flui afastado da costa, além da isóbata de 3.000 m (Stramma *et al.*, 1990), enquanto o outro flui seguindo a linha de quebra da plataforma (Signorini, 1978).

As primeiras medições diretas da CB foram feitas por Evans & Signorini (1985), nas latitudes de 20°30'S e 23°S, as quais apresentaram um fluxo confinado aos primeiros 400 m de profundidade, com uma contra-corrente no sentido norte abaixo destes 400 m iniciais. Na parte norte da área, acima do Cabo de São Tomé, a direção da corrente é para 180°, variando para 220° na região de Cabo Frio. Esta mudança afeta significativamente a CB, induzindo a formação de vórtices e meandros. 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).

³ Fundação de Estudos do Mar.

⁵ Center for Space Research da Universidade do Texas (www.csr.utexas.edu).

Tabela I.1.2-1 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica Barra do Itapemirim (ES). Fonte: FEMAR (2000).

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

Nome da Estação : BARRA DO ITAPEMIRIM – ES					
Localização : No atracadouro da Vila da Barra					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 21° 00,4' S		Longitude : 40° 48,5' W			
Período Analisado : 02/09/62 a 03/10/62			Nº de Componentes : 35		
Análise Harmônica : Método Tidal Liverpool Institute					
Classificação : Maré Semidiurna.					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 19 min	Nível Médio (Zo):		73 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		135 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		96 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		12 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		51 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	1,6	148
Ssa	-	-	N ₂	6,3	107
Mm	5,9	152	NU ₂	1,2	107
Mf	-	-	M ₂	42,1	095
MTM	-	-	L ₂	3,4	070
Msf	9,7	327	T ₂	1,2	104
Q ₁	2,0	075	S ₂	19,6	104
O ₁	8,1	210	K ₂	5,3	104
M ₁	0,2	105	MO ₃	1,1	139
P ₁	2,1	173	M ₃	0,7	069
K ₁	6,3	173	MK ₃	1,4	311
J ₁	0,7	056	MN ₄	1,3	056
OO ₁	1,8	311	M ₄	3,0	096
MNS ₂	-	-	SN ₄	0,5	004
2N ₂	0,8	118	MS ₄	2,0	117
Referências de Nível: RN-2 na porta da Igreja da Vila.					
Obs: Outros Períodos: 28/09/78 a 12/10/78; 08/07/93 a 17/08/93; 08/11/94 a 10/12/94; 13/03/95 a 04/04/95.					

Código BNDO: 40290

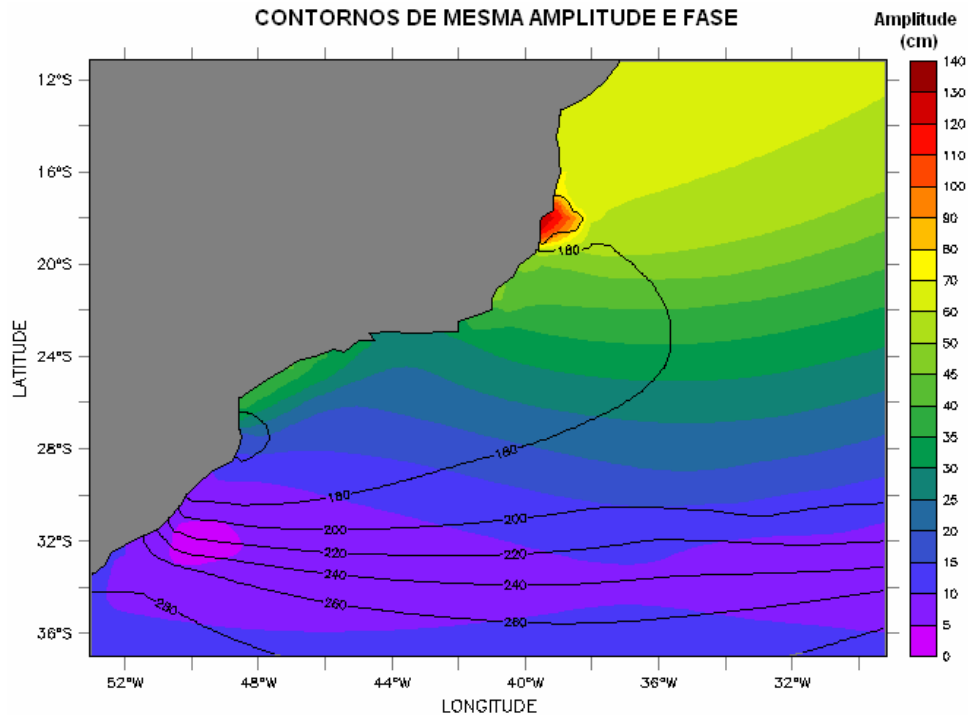


Figura I.1.2-1 - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente M_2 .

Imagens AVHRR, usadas por Garfield (1990), indicam um padrão de meandramento regular entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio, com a separação ocasional de vórtices ciclônicos. Nos primeiros 100 m da coluna d'água, em algumas regiões sobre o talude continental, a velocidade da corrente pode chegar a 1,0 m/s (Castro & Miranda, 1998).

A corrente que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos predominantes, que provêm principalmente de nordeste nessa estação, devido à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). 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). Outra consequência do predomínio dos ventos de NE é a "ressurgência" de águas frias (ACAS) em regiões costeiras. Esses eventos são muito comuns na região de Cabo Frio.

II MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta etapa do trabalho foi implementada uma estrutura numérica (*i.e.* modelos hidrodinâmicos), visando simular os campos de correntes na plataforma e talude continentais da costa sul-sudeste brasileira, englobando as bacias do Espírito Santo, Campos e Santos. Neste intuito, foi utilizado o código baseado no POM para simular as condições na plataforma continental e resultados do POCM para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

O campo de correntes obtido foi o resultado de uma soma ponderada dos vetores de velocidade obtidos a partir de simulações com o POM e o POCM, para os períodos de verão e inverno. Em região de plataforma continental foi considerado um peso maior aos resultados do POM, que diminuiu em direção à região de águas profundas, onde o peso maior foi dado aos resultados do POCM.

II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado para a simular as condições na plataforma continental foi baseado no POM, desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987), e implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**. O código fonte desse modelo é de domínio público, obtido via Internet no endereço: www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom.

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:

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

onde

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

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

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

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

II.1.1 Equações Básicas do POM

O modelo hidrodinâmico aqui descrito é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: as três componentes da velocidade (u, v e w), a temperatura (T), a salinidade (S), a energia cinética turbulenta ($q^2/2$), a escala turbulenta (l), e a elevação da superfície (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:

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

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

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

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

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

Conservação de Temperatura Potencial:

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

Conservação de Salinidade:

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

Equação de Estado:

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

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

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

Equação da Turbulência em Macro Escala:

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

sendo,

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

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

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

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 .

II.1.2 Condições de Contorno Adotadas

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

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

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

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

II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL

O modelo hidrodinâmico utilizado para fornecer o campo de correntes no talude continental e oceano profundo foi o POCM, desenvolvido pelo Office of Naval Research dos Estados Unidos. Este modelo utiliza como forçantes fluxos de calor e ventos gerados pelo ECMWF⁶.

O modelo POCM é considerado pela comunidade oceanográfica do WOCE⁷ o mais sofisticado para descrever a circulação oceânica, sendo capaz de reproduzir os fluxos da CB que afetam diretamente a região sudeste. A tabela II.2-1 apresenta um resumo dos dados de entrada utilizados pelo modelo POCM.

O modelo POCM apresenta uma resolução global média de 0,25° e já foi utilizado em vários artigos publicados, como em Tokmakian & Challenor (1999).

⁶ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

⁷ World Ocean Circulation Experiment.

Tabela II.2-1 - Resumo dos dados de entrada do Parallel Ocean Climate Model (POCM).

DADOS DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
Fluxos de Calor	Dados de reanálise do ECMWF.
Ventos	Dados de reanálise do ECMWF.
Temperatura e Salinidade da água	Interpolados da Climatologia LEVITUS ⁸ , e depois simulado por um período de 33 anos para ajuste dos campos termohalinos

II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO

II.3.1 Discretização do Domínio e Batimetria

A grade final gerada para a região sul-sudeste brasileira possui dimensão horizontal máxima de 70x100 pontos, com resolução média de aproximadamente 5 km (figura II.3.1-1). A grade geral implementada representou um compromisso entre os objetivos do projeto, a capacidade computacional para o período de execução do modelo e a descrição dos processos hidrodinâmicos relevantes para a região de interesse (forçantes de maré e ventos sobre a plataforma continental, e CB no talude continental).

Os dados de profundidade projetados no modelo hidrodinâmico e subsequentemente inseridos no modelo de óleo são provenientes de bases de dados da **ASA**, obtidas nesta região através da digitalização de cartas náuticas da DHN⁹. Para a região da plataforma continental, os pontos digitalizados foram extraídos das cartas náuticas da DHN números 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 do ETOPO 2, do NGDC/NOAA¹⁰, reamostrada para um espaçamento de 10'. Esses pontos encontram-se ilustrados na figura II.3.1-2.

⁸ <http://ingrid.ldgo.columbia.edu/SOURCES/LEVITUS94>.

⁹ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

¹⁰ National Geophysical Data Center da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

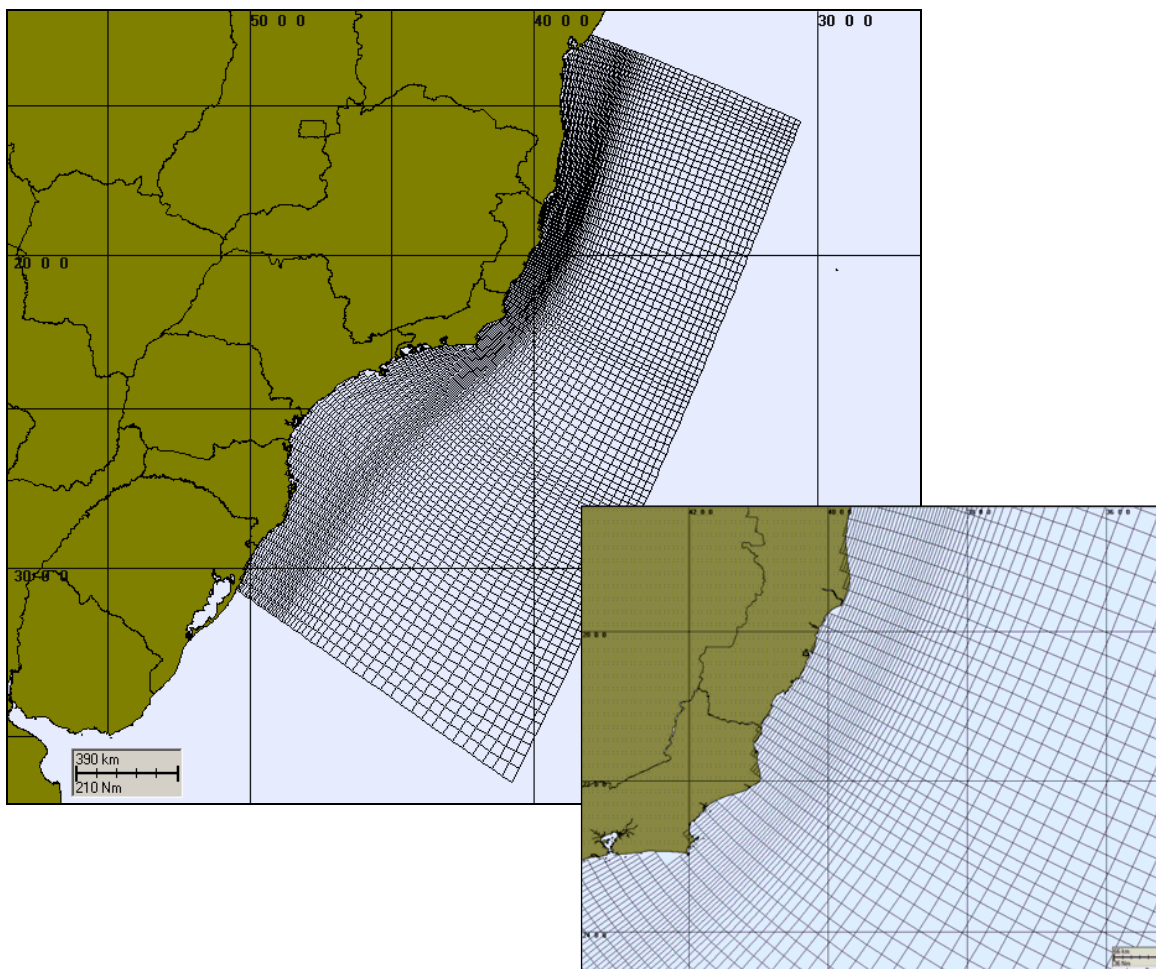


Figura II.3.1-1 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da região sul-sudeste brasileira.

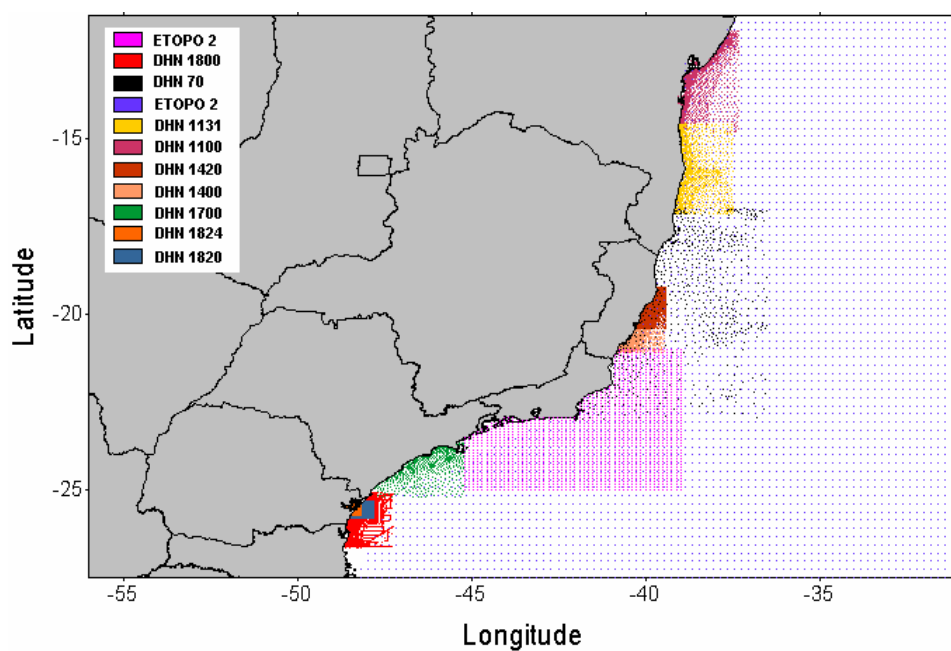


Figura II.3.1-2 - Base batimétrica para modelagem hidrodinâmica.

Em relação a discretização da batimetria no domínio modelado, agregam-se às características dinâmicas e morfológicas locais, questões relacionadas à ausência e/ou baixa qualidade de dados batimétricos/altimétricos da região. Em regiões não hidrografadas ou com baixa qualidade/resolução nos dados foram usados recursos como o georreferenciamento de fotos de satélite, relatos de navegantes, entre outros, para complementar os níveis requeridos à base de dados da **ASA SOUTH AMERICA** na região, visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa (figura II.3.1-3).

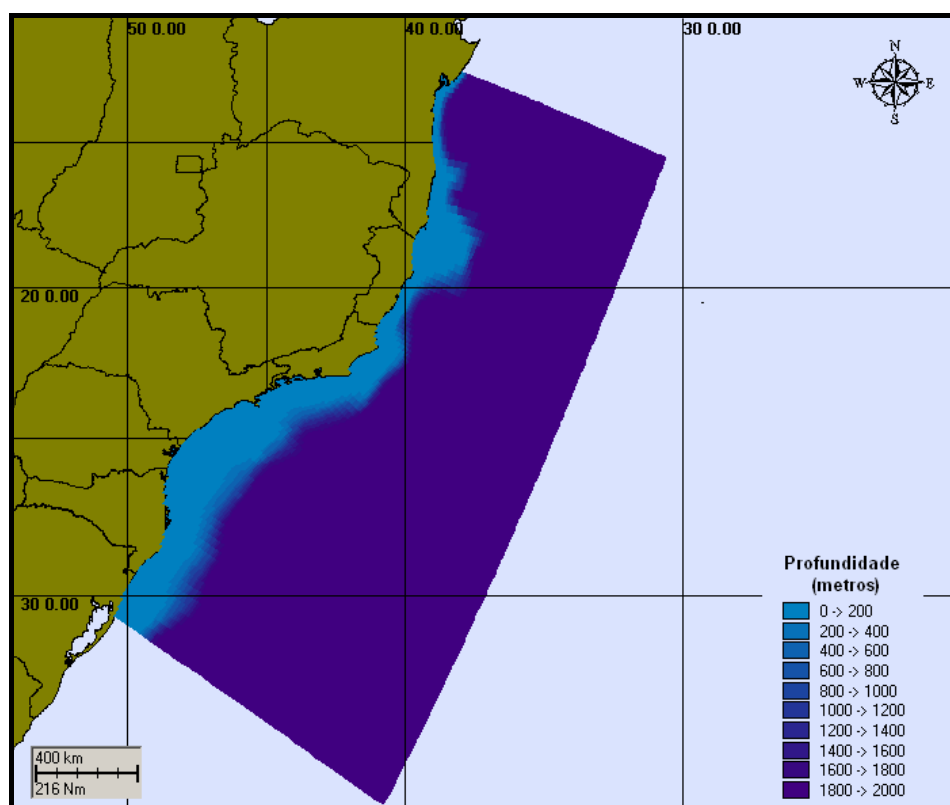


Figura II.3.1-3 - Batimetria discretizada do domínio considerado na região sul-sudeste brasileira.

II.3.2 Dados de Vento e Maré

A modelagem hidrodinâmica utilizou dados de vento provenientes de reanálises do NCEP para o ano de 1992, interpolados na grade.

Nos contornos abertos foram utilizados campos (provenientes do CSR3) 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 .

II.3.3 Estrutura Termohalina

Os campos de temperatura e salinidade usados para inicialização do campo baroclínico do POCM foram obtidos através da Climatologia LEVITUS. A figura II.3.3-1 ilustra estes dados para a superfície, nos períodos de verão e inverno.

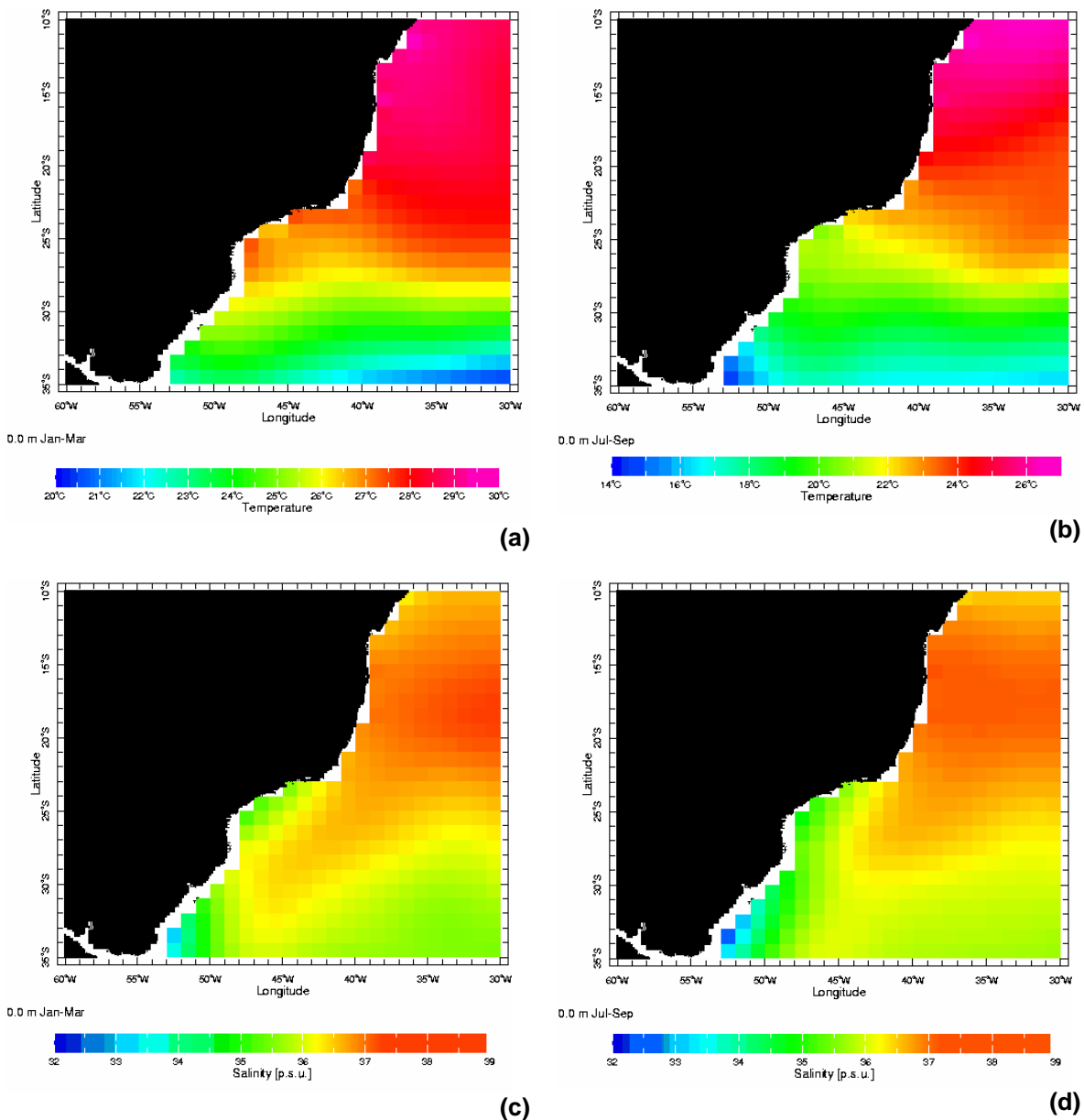


Figura II.3.3-1 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS no: (a) temperatura e (b) salinidade no verão; (c) temperatura e (d) salinidade no inverno.

III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Para comparação com os resultados do modelo foram selecionados dados de corrente coletados no Ponto C (PC), na Bacia de Campos, cujas coordenadas são 22°43'0,12"S e 41°16'0,12"W, pertencentes ao banco de dados da PETROBRAS. Esses dados abrangem o período compreendido entre 12 de julho e 2 de setembro de 1992.

Para a calibração do nível do mar foi utilizada uma série obtida através de reconstituição harmônica, a partir de constantes fornecidas pela FEMAR¹¹ para a região do Cabo de São Tomé, nas coordenadas 22°07'42"S e 41°03'12"W.

Para a calibração do modelo foi adotada a seguinte metodologia: (1) como no sinal de corrente a energia contida na baixa frequência corresponde a 83,6% da energia da corrente total, optou-se por inicialmente verificar o ajuste do modelo para a baixa frequência; (2) a seguir verificou-se o erro percentual para a corrente residual média (comparação entre as médias) e, finalmente, (3) verificou-se o ajuste do modelo para a alta frequência associada aos períodos de maré.

Por baixa frequência entendemos os sinais com período acima de 25h, incluindo assim a influência de sistemas frontais, e por alta os sinais com período entre 11h e 13h, sendo influenciado principalmente pela componente de maré.

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

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

onde

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

e \bar{A} é o domínio médio do dado, P = previsão e
O = observação.

¹¹ Fundação de Estudos do Mar.

III.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR

Para a calibração do nível do mar, foi realizada uma previsão a partir da tabela de constantes harmônicas da FEMAR para o Cabo de São Tomé. O coeficiente de ajuste obtido para o período de 19 a 21 de agosto de 1992 (figura III.1-1) foi de 13,70%, segundo a equação III-1.

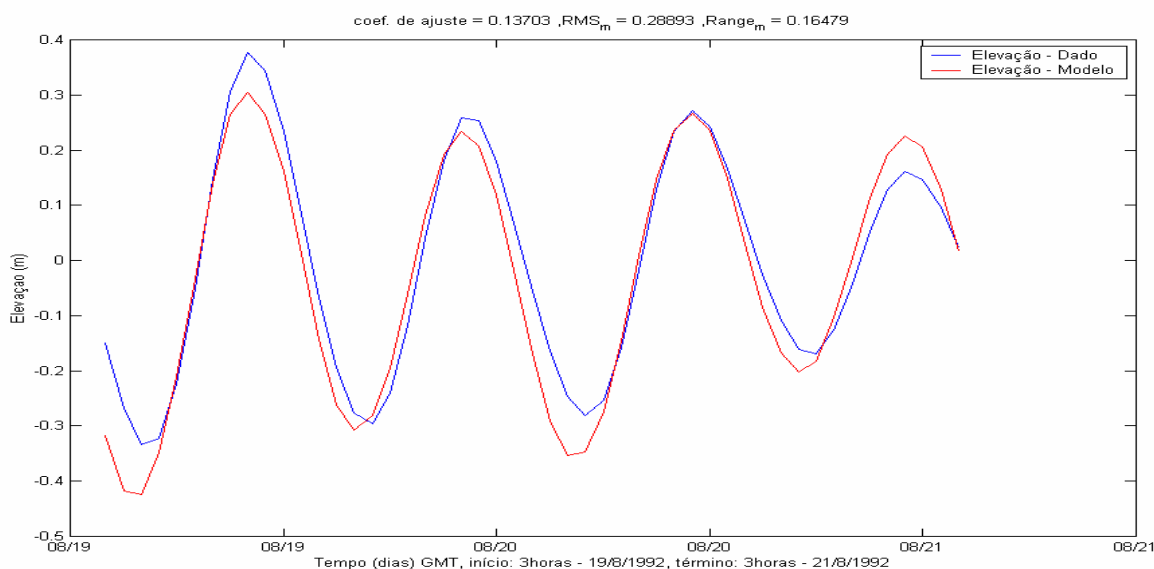


Figura III.1-1 - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.

III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES

Estão reproduzidas, na figura III.2-1, as séries temporais dos dados *versus* os resultados do modelo. São apresentados os campos de corrente (componentes u (E-W) e v (N-S)) e, também, a comparação dos resultados de elevação do modelo e a recomposição harmônica da maré.

Especificamente no ponto de medição (PC), o sinal da corrente de baixa frequência, associada à passagem de sistemas frontais, contém 83,6% da energia total do sinal. Sinais de alta frequência (maré semidiurna) são menos intensos em águas profundas, como pode ser observado na figura III.2-2.

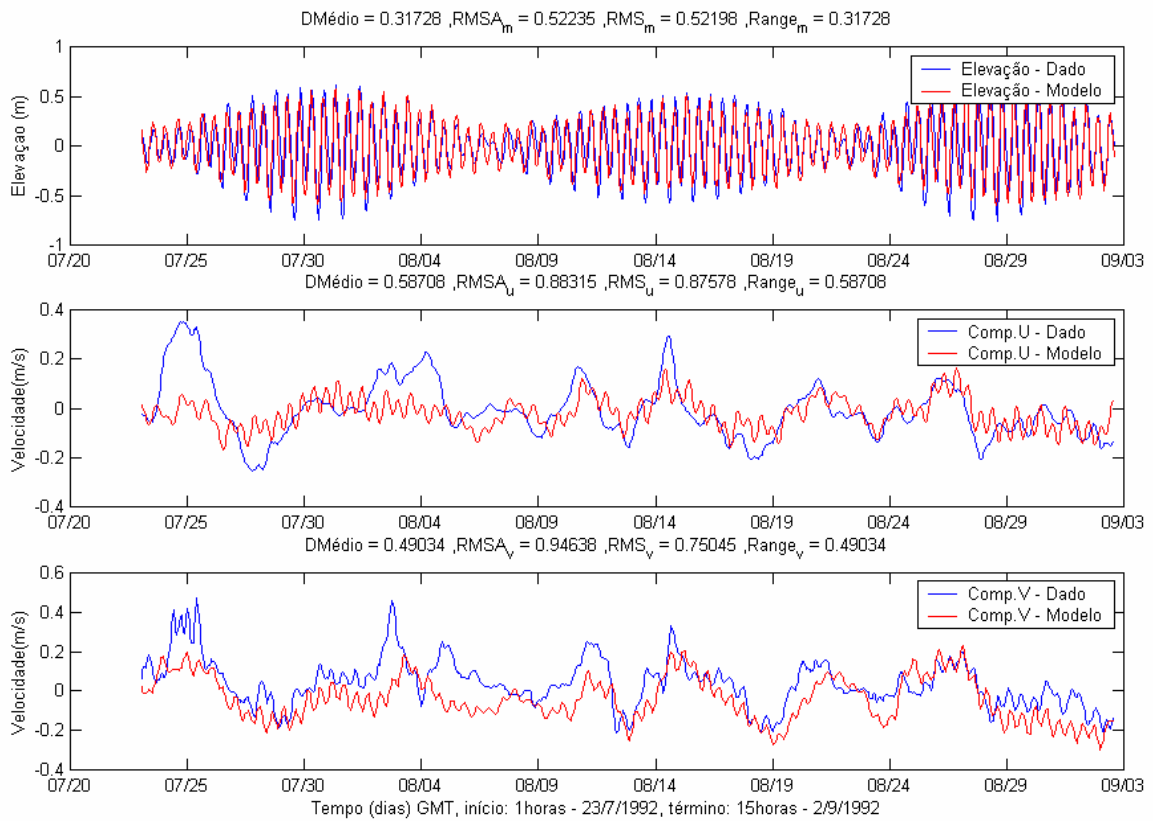


Figura III.2-1 - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).

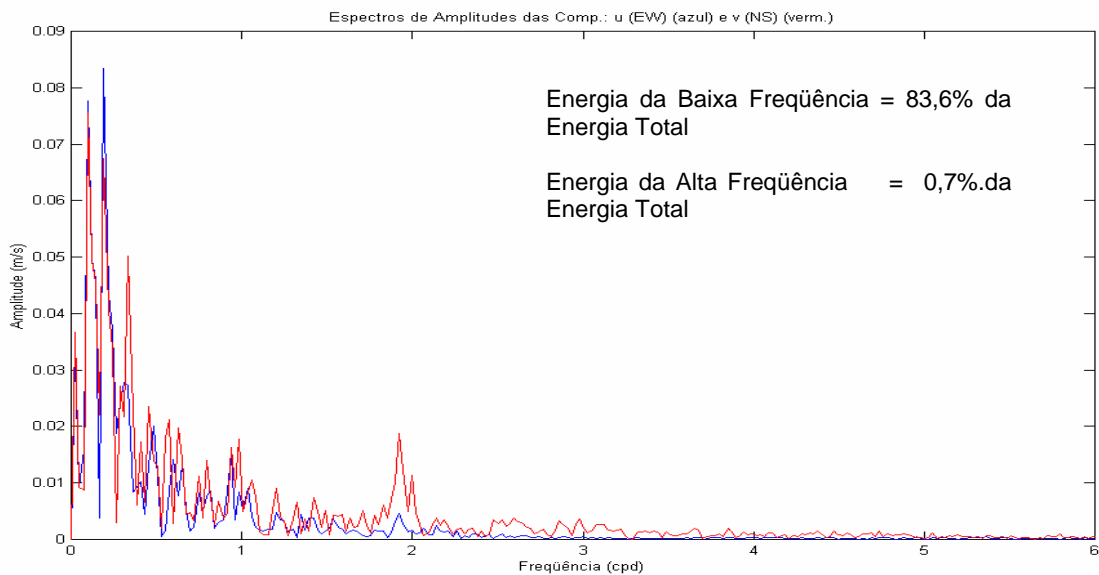
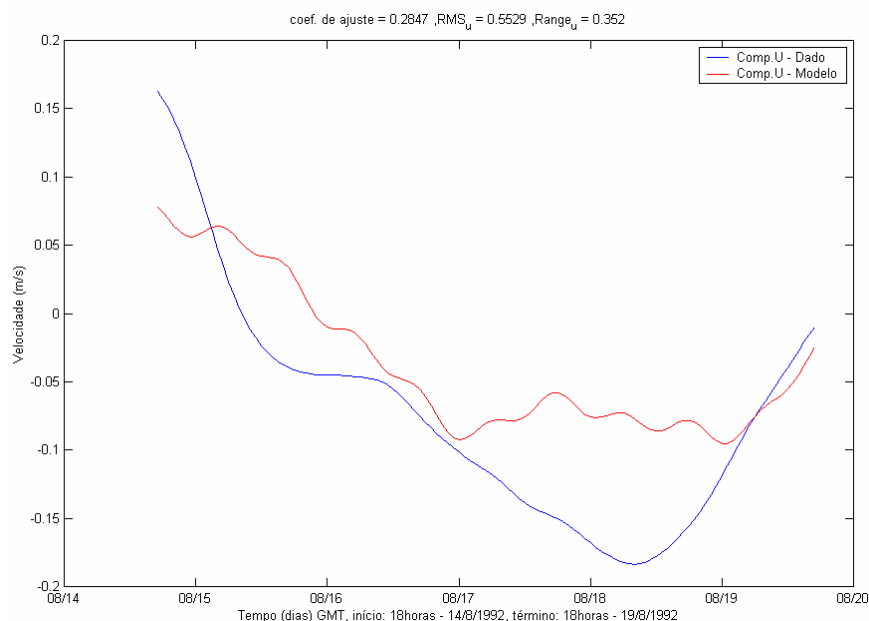
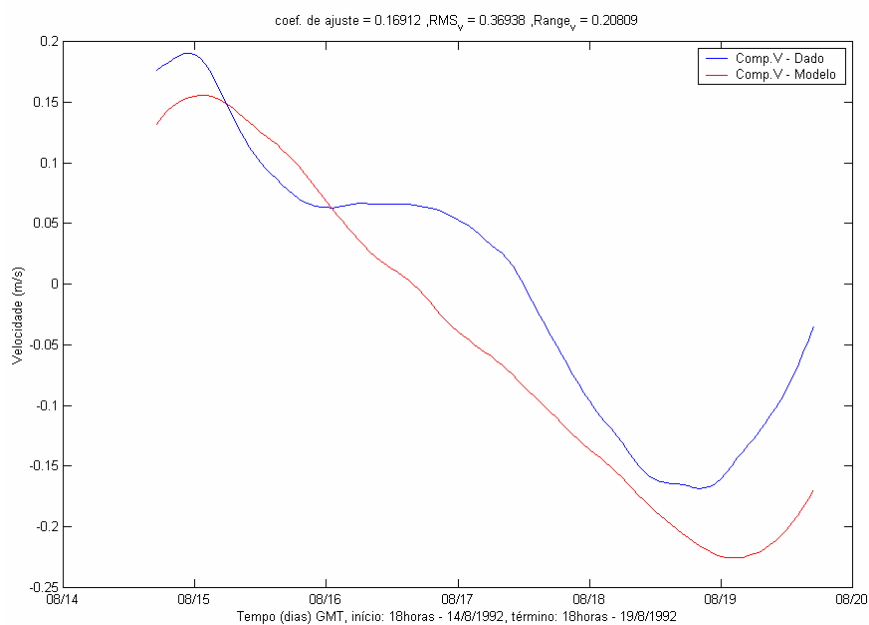


Figura III.2-2 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.

Deste modo, priorizou-se o ajuste do modelo na baixa frequência. Os coeficientes de ajuste (equação III-1) foram de 28,47% para a componente u e 16,91% para a componente v , considerando o período de 5 dias compreendido entre 14 e 19 de agosto de 1992 às 18 horas (figura III.2-3).



(a)



(b)

Figura III.2-3 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as calculadas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.

Na calibração do modelo para a corrente residual média considerou-se a diferença entre a corrente residual média do modelo e dos dados (para o período que se dispunha de dados), e calculou-se o erro percentual relativo à corrente média residual dos dados. Os ajustes obtidos foram de 1,46% para a componente zonal e 7,67% para a meridional. Tal resultado encontra-se ilustrado na figura III.2-4.

Embora com baixa energia relativa neste ponto, observa-se presença significativa do sinal da maré nos dados fornecidos. Para validar o modelo também nessa frequência, foram isolados os sinais de alta frequência (marés) dos dados e do modelo. A comparação para um período de 48 horas, compreendido entre 19 e 21 de agosto de 1992 às 3 horas, forneceu um coeficiente de ajuste de 24,18% para a componente zonal e 18,47% para a componente meridional, conforme a equação III-1.

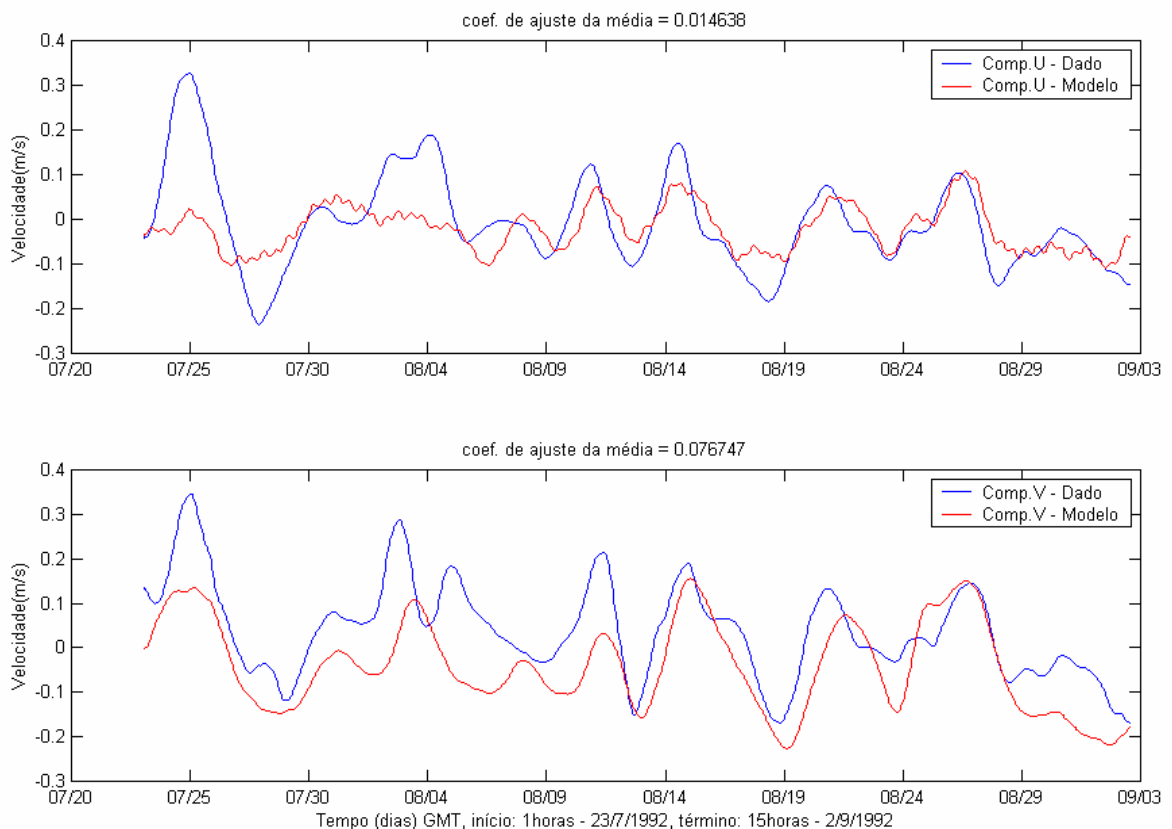


Figura III.2-4 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.

III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA

Os resultados obtidos através da simulação numérica na região sul-sudeste brasileira encontram-se resumidamente representados na figura III.3-1, que apresenta um instantâneo da corrente de superfície no período considerado para as simulações com o modelo de óleo.

Estes resultados consideram as principais forçantes locais e remotas que apresentam influência significativa nos padrões de circulação observados sobre a plataforma continental e em oceano profundo.

Eles são resumidos basicamente pelas forçantes de bordas artificiais – maré e campos médios de velocidade (efeito remoto) – e sobre o domínio completo, *i.e.* vento (superfície), campo termohalino (na coluna d'água).

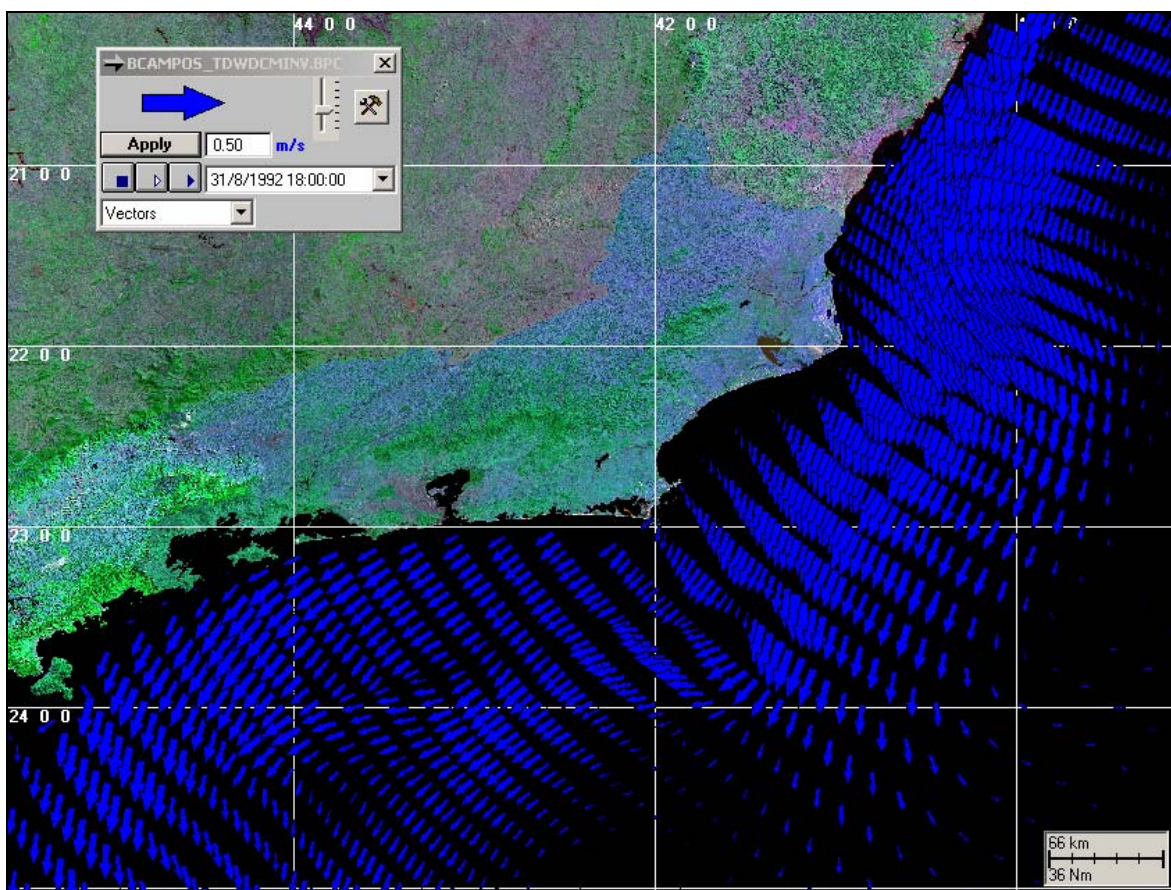


Figura III.3-1 - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico no ano de 1992.

IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE DE FLUORENE R2

Na tabela IV-1 são apresentadas as características do descarte de efluente constituído de água do mar filtrada e Fluorene R2, devido ao desalagamento de trecho do duto após o teste de estanqueidade, a ser realizado pela praia. O Fluorene R2 consiste em um marcador à base de agente corante do tipo fluoresceína sódica. Como a empresa (Nicho Tecnologia) que comercializa esse produto não dispõe de todas as propriedades físico-químicas necessárias para a modelagem, nestas simulações foram utilizadas as propriedades conhecidas do produto, fornecidas pela PETROBRAS, acrescidas das propriedades da fluoresceína sódica.

O efluente será continuamente descartado, com uma vazão de 0,122 m³/s, até atingir o volume final de 122,0 m³ (portanto, com duração de descarte de aproximadamente 7 minutos). O descarte será realizado através de uma tubulação com diâmetro de 6", posicionada em superfície, após a zona de arrebenção, em local com lâmina d'água de cerca de 1,5 m. A densidade do efluente, cuja concentração inicial é de 40 mg/L, é 1.023,97 kg/m³ no verão e de 1.025,18 kg/m³ no inverno (varia em função da densidade da água do mar em cada período simulado e da concentração de Fluorene R2).

Tabela IV-1 - Parâmetros utilizados para a modelagem da pluma do descarte de Fluorene R2 no Campo de Camarupim.

PARÂMETROS PARA MODELAGEM DA PLUMA	
Diâmetro da tubulação	6"
Orientação da tubulação	vertical
Profundidade local no ponto de descarte*	~1,5 m
Profundidade de descarte	superfície
Vazão do efluente	0,122 m ³ /s (até um total de 122 m ³)
Duração do descarte	0,277 hora
Densidade do efluente	1.023,97 kg/m ³ (verão) 1.025,18 kg/m ³ (inverno)
Concentração de lançamento do Fluorene R2	40 mg/L

V **MODELAGEM DA DILUIÇÃO E DISPERSÃO DE FLUORENE R2**

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

A configuração do sistema difusor, considerada nos estudos para a determinação do comportamento da pluma na região do campo próximo, apresenta as seguintes características:

- descarte com vazão de 0,122 m³/s,
- diâmetro da tubulação de 6 polegadas, e
- distância entre a saída da tubulação e o fundo oceânico de, aproximadamente, 1,5 m.

Os resultados da modelagem de campo próximo, realizada para os períodos de verão e inverno, indicaram que, em média, a pluma atinge o leito oceânico cerca de 1 segundo após o descarte e que diluição máxima atingida neste percurso é da ordem de 2,6 vezes.

Considerando o efeito pouco significativo no processo de diluição inicial promovido pela descarga de lançamento que ocorre na região do campo próximo, optou-se por considerar e apresentar somente os resultados diluição na região do campo afastado. Adicionalmente, deve-se considerar também que o descarte não é contínuo e que ocorre durante um período de, aproximadamente, 7 minutos.

Na modelagem da diluição e dispersão da pluma de efluente foi utilizado o modelo CHEMMAP (modelagem de campo afastado), desenvolvido pela **ASA**, para previsão da trajetória e transformações biogeoquímicas (*trajectory and fates*) de produtos químicos, incluindo as substâncias flutuantes, as que afundam e as substâncias solúveis. Adicionalmente, este modelo possui a habilidade de utilizar campos de correntes e de ventos variáveis no espaço e no tempo, além de considerar a variação espacial da profundidade.

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

V.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP

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

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

Para a elaboração de cenários de deriva deve ser definido um conjunto de duas grades computacionais, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo. Uma das grades, compreendendo apenas a região de água, define o campo de circulação, podendo neste caso ser baseada em resultados de um modelo hidrodinâmico implementado na região de estudo. A outra grade pode ser compatível com o modelo OILMAP (grade *land-water*) ou ser compatível com o

modelo SIMAP (grade *habitat/depth*) ambos desenvolvidos, também, pela **ASA**. A grade *land-water* define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definida pela linha de costa. A linha de costa é representada por uma série de blocos que limita a extensão em que a mancha de químicos pode se movimentar em uma determinada direção, dependendo do tipo de costa (costões rochosos, praias, etc.). A grade *habitat/depth* alia a mesma funcionalidade da grade *land-water*, com informações de batimetria na área definida como água e os *habitats* correspondentes aos determinados tipos de costa (bancos de corais, manguezais, etc.).

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

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

O modelo utiliza propriedades físico-químicas para simular a trajetória e o destino da pluma de efluentes descartados em superfície ou na coluna d'água. As propriedades incluem densidade, pressão de vapor, solubilidade na água, taxa de degradação, coeficientes de partição adsorvido e dissolvido (K_{ow} , K_{oc}), viscosidade e tensão superficial. Essas propriedades e outras, requeridas pelo modelo para simular o transporte e destino do material descartado, estão contidas no banco de dados químicos do CHEMMAP. O banco de dados engloba uma variedade de informações na forma de texto e descritores numéricos com o qual o usuário pode identificar e caracterizar o produto químico ou a mistura. O modelo é capaz de simular derrames de substâncias puras, produtos em soluções aquosas ou hidrofóbicas, ou substâncias em emulsões (*i.e.* mistura de material particulado em suspensão em base aquosa). Além do mais, o banco de dados inclui características que definem as misturas e as soluções.

A massa do produto químico simulado é transportada pelo campo tridimensional de correntes determinado pelo modelo hidrodinâmico,

considerando marés, vento, correntes oceânicas e o movimento vertical determinado pelo empuxo (*buoyancy*) e dispersão.

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

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

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

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

Utilizando-se o CHEMMAP no modo probabilístico é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de comportamento da pluma são realizadas através de variadas condições meteorológicas e oceanográficas dentro do período de disposição de dados ambientais. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar estocasticamente.

No modo probabilístico, várias simulações são realizadas para cada cenário de descarte. Usando séries de dados de ventos e correntes para uma locação, o modelo seleciona aleatoriamente a data do descarte e as condições ambientais associadas. Como critério de parada das simulações, o modelo permite selecionar um limite (*e.g.* CENO, limite legal) acima do qual as probabilidades e concentrações esperadas sejam registradas. Cinco tipos de resultados são produzidos para cada parcela do químico ou mistura que se encontra na

superfície da água, em linhas de costa, na coluna d'água e ou nos sedimentos, os quais podem ser apresentados em mapas de contorno:

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

V.1.1 *Formulação do Modelo*

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

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

onde

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

O modelo simula ainda a adsorção de produtos a partículas de sedimentos em suspensão, resultando na sedimentação de materiais. Neste caso, a Lei de Stokes é utilizada para calcular as velocidades verticais das partículas do químico puro, ou partículas de sedimento em suspensão adsorvidas aos químicos. Se a velocidade de subida ou de afundamento supera a mistura turbulenta, as partículas irão flutuar ou se depositar no fundo. Partículas depositadas podem ser 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 Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

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

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

onde

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

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

C_w = fator de deriva (%).

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

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

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

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

onde

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

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

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):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

onde

C_{wz} = fator de deriva do vento;

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

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

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

O espalhamento ocorre devido à dois processos, modelados separadamente por algoritmos previamente desenvolvidos para manchas de óleo: (1) o balanço entre as forças gravitacional, inércia, viscosidade e tensão superficial, que aumenta a real extensão de cada partícula (espalhamento gravitacional); e

(2) espalhamento e cisalhamento da corrente, que afastam as partículas umas das outras (Elliott, 1986; Lehr, 1996). Um conjunto teórico de equações para o espalhamento gravitacional foi desenvolvido quase que simultaneamente por Fay (1971) e por 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:

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

onde

A = área superficial da mancha (m²);

K_1 = 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, \bar{A}_{tk} (m²/s), é dada por:

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

onde

A_{th} = área superficial de uma partícula (m^2);

K_1 = taxa de espalhamento constante (s^{-1});

V_s = volume de óleo de uma partícula (m^3);

R_s = raio de uma partícula (m);

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

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

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

onde

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

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

Adicionalmente, se o produto flutuando na superfície entranha na coluna d'água, ele se dispersara 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 a um solvente hidrofóbico) é tratada como o fluxo de massa através da área superficial da pluma ou gotícula (French *et al.* 1996a,b, 1999). O modelo desenvolvido por Mackay & Leinonem (1977) é utilizado para a dissolução da pluma superficial. A pluma (partículas) é considerada como uma placa circular e achatada, com o fluxo de massa relacionado à solubilidade e à temperatura (Hines & Maddox, 1985). Este assume uma camada não estratificada, com a maior resistência à transferência de massa a uma região estagnada hipotética (camada de água) próxima à pluma. Para gotículas em subsuperfície, a dissolução é considerada como um fluxo de massa através da área superficial da gotícula (tratada como uma esfera), num algoritmo análogo ao de Mackay & Leinonem (1977).

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

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

onde

i = i -ésima componente;

A = área superficial da pluma ou partícula (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/cm^3);

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

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

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

onde

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

C_i^o = concentração da componente na fase solvente.

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

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

onde

Sh = número de Sherwood médio;

L = diâmetro da pluma superficial (m);

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

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

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

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:

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

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

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

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

onde

MW = peso molecular (g/mol).

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

O número de Sherwood médio é obtido através da equação:

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

onde

Sc = número do Schmidt;

Re_L = número de Reynolds.

O número de Schmidt é definido por:

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

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

onde

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

ρ_w = densidade da água (g/cm³).

O número de Reynolds é definido por:

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

onde

U_w = velocidade do vento (m/s);

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

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

onde

Sh = número de Sherwood médio;

d = diâmetro da gotícula (m);

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

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

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

onde

Sc = número do Schmidt;

Re_d = número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula.

Com o número de Reynolds, Re_d , definido por:

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

onde

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

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

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

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

onde

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

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

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

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

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

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

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

onde

- K_e = coeficiente de transferência de massa por evaporação (m/h);
- MW = peso molecular (g/mol);
- P_{vp} = pressão de vapor (atm);
- R = constante universal dos gases ($8,206 \times 10^{-5}$ atm-m³/mol-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):

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

onde

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

O número de Schmidt para o químico no ar é obtido através da divisão da viscosidade cinemática do ar (0,15 cm²/s) pela difusividade do químico no ar, D_{ar} , baseado em Thibodeaux (1979):

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

onde

- D_{ref} = difusividade no ar de um químico de referência (cm²/s);
 MW_{ref} = peso molecular de um químico de referência (g/mol).

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

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

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

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

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

onde

P_{vp} = pressão de vapor (atm);

S = solubilidade (mg/L);

MW = peso molecular (g/mol).

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

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

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

onde

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

T = temperatura (K).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

onde

D_z = difusividade vertical (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 (1961), descrito em Csanady (1973). O coeficiente de dispersão horizontal calculado pelo modelo é função da velocidade do vento e da estabilidade do ar, definida como moderadamente estável, ligeiramente estável,

neutra, ligeiramente instável e moderadamente instável, baseadas em Turner (1970).

A massa também é dispersada para cima pela turbulência, que é dependente da velocidade do vento. A aproximação básica utiliza a teoria da camada planetária e a teoria de comprimento de mistura (descrito em vários livros de dinâmica dos fluidos, e.g. Holton, 1979). Nesta teoria, a variação vertical da velocidade e atrito é definida por uma lei logarítmica. Esta fornece a seguinte relação:

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

onde

D_z = taxa de mistura vertical;

L = comprimento de mistura;

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

Esta pode ser aproximada como:

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

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

onde

b_s = tensão do fundo;

ρ_{ar} = densidade do ar (g/cm^3).

Em resumo:

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

onde

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

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

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

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

onde

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

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

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

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

onde

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

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

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

OU

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

V.2 DADOS DE ENTRADA

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

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

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

V.2.1 Campo de Correntes

Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte e dispersão do Fluorene R2 foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica, como descrito no Capítulo II. Para avaliar a sazonalidade das forçantes ambientais nos padrões de circulação e transporte, foram definidos dois campos hidrodinâmicos de 3 meses: verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto).

V.2.2 Dados de Vento

Para a modelagem de dispersão da pluma de efluente foram utilizados dados de vento medidos por uma bóia oceanográfica localizada no Campo de Albacora, Bacia de Campos, nas coordenadas 22°30'S e 40°W. Esses dados foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), para o ano de 1992, com intervalo de amostragem de 3 horas. Há algumas lacunas nos dados, como indica a figura V.2.2-1, que apresenta o *stick plot* dos valores médios diários para os mesmos. Para sua utilização na modelagem, estes dados foram interpolados.

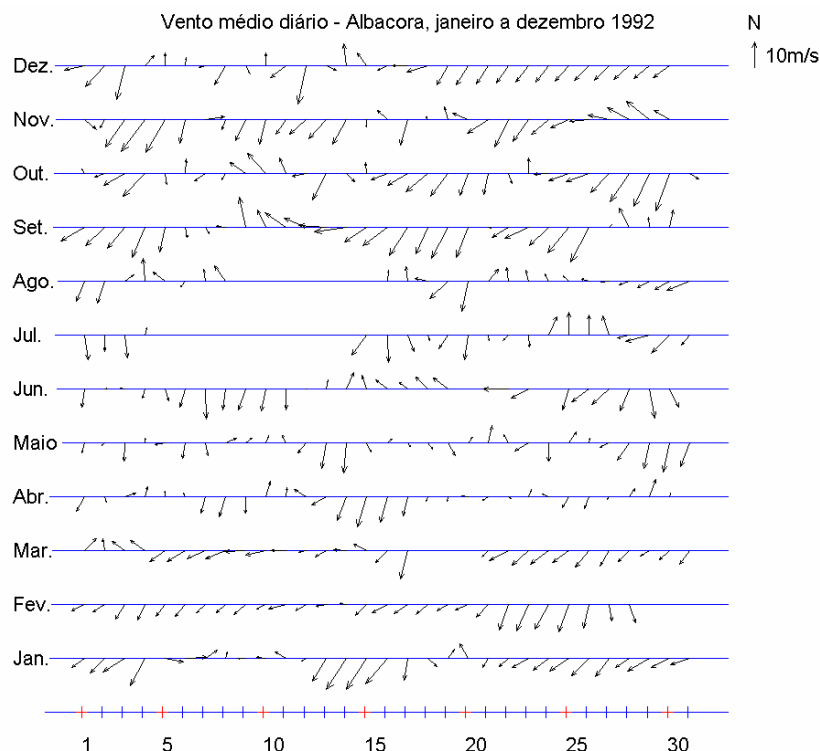


Figura V.2.2-1 - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento durante o período de janeiro a dezembro de 1992 (convenção vetorial).

A figura V.2.2-2 apresenta os histogramas direcionais dos dados de vento para os períodos de (a) verão (janeiro a março) e (b) inverno (junho a agosto). A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa o número de observações (N.Obs.). Observam-se ventos predominantes de leste-nordeste nos meses de verão, e dos quadrantes norte e leste, nos meses de inverno.

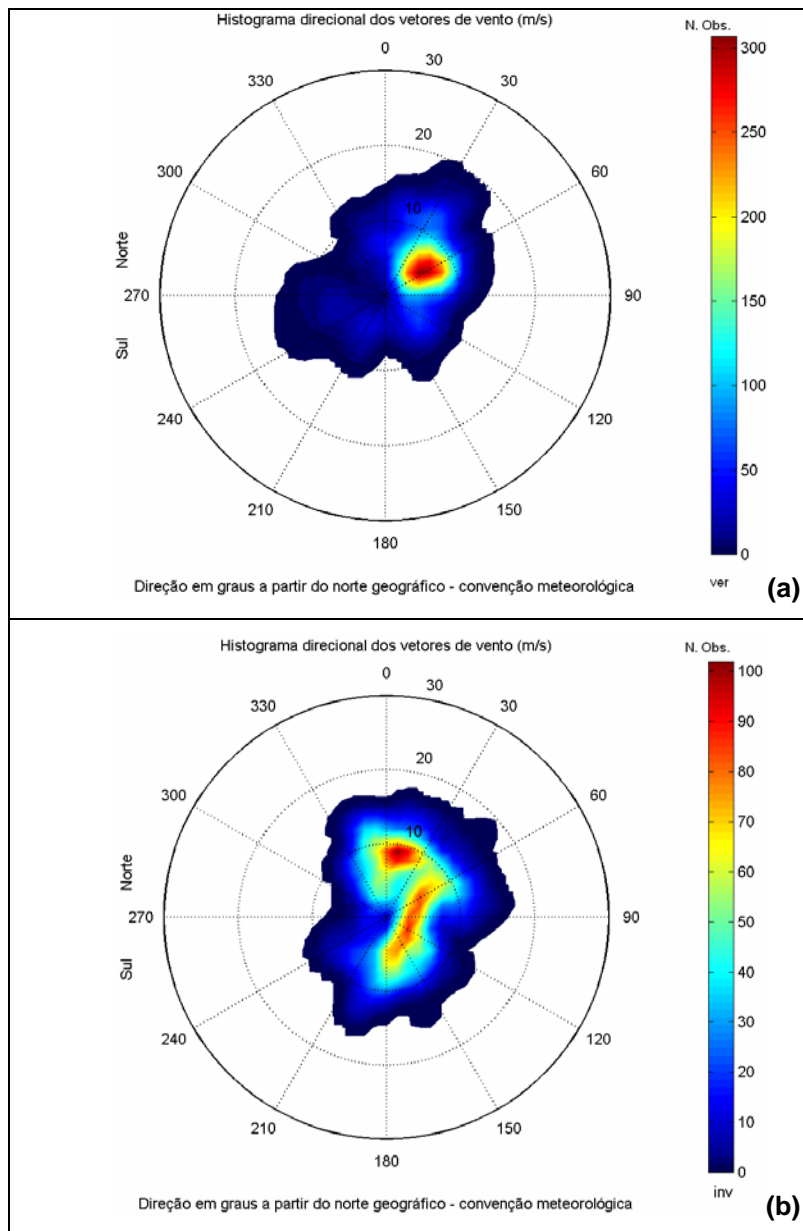


Figura V.2.2-2 - Histograma direcional dos vetores de vento para (a) verão (Jan.-Mar.) e (b) inverno (Jun.-Ago.), Campo de Albacora.

A tabela V.2.2-1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para o período de verão. As intensidades estão em (m/s) e as direções são apresentadas em graus a partir do Norte geográfico seguindo a convenção meteorológica. Observa-se que os ventos mais frequentes são provenientes das direções NNE, NE e ENE (14,8%, 24,8% e 26,9%). Os ventos mais fortes registrados foram provenientes de NNE e NE (17,5 m/s).

Tabela V.2.2-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o período de verão do ano de 1992, no Campo de Albacora.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	%	Dir. méd.
0,0- 1,0	0	1	1	1	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	8	0,4	85
1,0- 2,0	1	1	1	3	4	7	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	22	1,0	70
2,0- 3,0	1	3	5	10	14	6	2	0	2	1	1	1	2	1	2	0	51	2,3	82
3,0- 4,0	0	4	24	23	10	9	6	1	8	1	1	0	1	1	1	1	91	4,2	76
4,0- 5,0	4	26	79	38	18	13	6	9	3	17	2	5	2	0	0	4	226	10,3	64
5,0- 6,0	5	24	72	85	13	22	17	5	0	10	5	4	2	0	2	2	268	12,3	64
6,0- 7,0	27	42	51	107	18	16	17	5	0	3	6	6	5	0	3	7	313	14,3	56
7,0- 8,0	10	35	84	97	32	8	9	4	0	5	4	5	9	1	2	4	309	14,1	55
8,0- 9,0	11	25	75	126	18	6	7	0	0	8	1	6	1	2	0	4	290	13,3	57
9,0-10,0	9	24	44	50	10	2	1	1	0	0	1	2	4	0	0	8	156	7,1	44
10,0-11,0	6	27	34	28	2	0	0	2	0	0	0	3	7	0	0	6	115	5,3	35
11,0-12,0	11	38	21	10	3	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	1	88	4,0	31
12,0-13,0	12	55	17	10	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	97	4,4	29
13,0-14,0	1	7	11	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	21	1,0	30
14,0-15,0	0	4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0,6	36
15,0-16,0	0	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,4	33
16,0-17,0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,2	38
17,0-18,0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,4	35
Total	98	324	542	588	142	92	66	28	14	45	22	35	37	6	12	39	2090		
Porc.	4,5	14,8	24,8	26,9	6,5	4,2	3,0	1,3	0,6	2,1	1,0	1,6	1,7	0,3	0,5	1,8			
Vel. méd.	8,4	9,0	7,7	7,2	6,1	5,0	5,8	6,2	3,3	5,6	6,3	7,5	8,0	5,2	4,6	7,6			
Vel. máx.	13,4	17,5	17,5	12,9	11,8	9,8	9,3	11,3	4,6	8,7	11,3	13,4	12,3	8,7	7,2	11,8			
Percts. (0,9)	12,0	12,0	11,0	9,0	9,0	7,0	8,0	9,7	4,0	8,0	8,3	10,0	10,8	8,0	7,0	10,0			

A tabela V.2.2-2 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para o período de inverno. Os ventos mais frequentes foram de ENE, NNE e N (8,9%, 9,0% e 11,1%) e os ventos mais intensos observados foram provenientes de NE (16,5 m/s).

Tabela V.2.2-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para período de inverno do ano de 1992, no Campo de Albacora.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	%	Dir. méd.
0,0- 1,0	4	1	1	3	3	4	4	8	5	5	1	3	6	5	5	0	58	2,6	191
1,0- 2,0	2	3	0	3	5	5	4	3	1	2	5	11	6	4	5	4	63	2,9	256
2,0- 3,0	5	3	0	3	2	3	3	1	0	1	1	5	2	1	6	7	43	1,9	341
3,0- 4,0	10	8	4	12	34	22	30	22	4	3	1	1	0	1	4	8	164	7,4	103
4,0- 5,0	11	5	12	29	8	10	11	20	21	2	1	2	1	0	6	11	150	6,8	97
5,0- 6,0	13	5	15	25	9	4	15	9	24	6	7	1	0	0	5	8	146	6,6	96
6,0- 7,0	26	10	16	22	8	10	19	9	22	5	8	1	0	0	1	14	171	7,7	77
7,0- 8,0	16	17	10	8	1	4	14	12	14	5	8	3	0	0	0	14	126	5,7	79
8,0- 9,0	42	44	26	26	3	1	8	16	24	11	4	2	0	0	5	20	232	10,5	37
9,0-10,0	45	53	25	22	9	0	6	13	11	2	0	0	0	0	0	11	197	8,9	36
10,0-11,0	28	17	21	20	8	0	2	3	9	7	0	1	0	0	0	16	132	6,0	35
11,0-12,0	13	7	4	14	4	0	1	0	3	5	0	0	0	0	0	8	59	2,7	36
12,0-13,0	21	16	5	4	1	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	13	64	2,9	11
13,0-14,0	9	4	3	5	4	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	3	32	1,4	33
14,0-15,0	0	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,4	34
15,0-16,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0
16,0-17,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0	49
Total	245	199	144	197	100	64	117	117	138	60	36	30	15	11	37	137	1647		
Porc.	11,1	9,0	6,5	8,9	4,5	2,9	5,3	5,3	6,3	2,7	1,6	1,4	0,7	0,5	1,7	6,2			
Vel. méd.	8,4	8,8	8,2	7,3	5,9	4,1	5,3	5,7	6,7	7,4	5,5	3,3	1,3	1,1	3,6	7,8			
Vel. máx.	13,9	14,4	16,5	14,9	14,4	12,3	11,3	13,9	11,8	13,9	8,7	10,3	4,6	3,1	8,7	13,9			
Percts. (0,9)	12,0	12,0	10,1	11,0	10,5	6,1	8,0	9,0	9,0	11,5	7,9	7,5	2,0	2,4	8,0	12,0			

V.2.3 Características do Descarte

As informações sobre o descarte, utilizadas nas simulações do campo afastado, foram descritas no Capítulo IV.

V.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações para a determinação da dispersão e diluição do efluente contendo Fluorene R2 no campo afastado foram realizadas utilizando-se o modelo CHEMMAP no modo probabilístico. Como neste modo é considerada a variabilidade das forçantes ambientais, as simulações de comportamento da pluma são realizadas através da variação das condições meteorológicas e oceanográficas, divididas em duas condições principais correspondendo aos períodos de verão e inverno.

Para incorporar essas variabilidades, cada cenário probabilístico foi composto por uma série de 20 simulações com o modelo CHEMMAP, com duração de 1 hora, ambas divididas em dois períodos: verão e inverno. O comportamento da pluma de efluentes descartada na região foi estudado através de simulações realizadas com uma vazão constante de 0,122 m³/s, até a obtenção do volume total descartado (122 m³), ao longo de, aproximadamente, 0,277 hora (~7 minutos).

Nas simulações probabilísticas, para a determinação da área de influência do descarte de Fluorene R2, 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. 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 20 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.

V.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

As figuras V.4-1 e V.4-2, a seguir, mostram as curvas de contorno das plumas de dispersão para as médias das máximas concentrações de Fluorene R2 nos períodos de verão e inverno, após 1 hora de simulação.

A figura V.4-1 apresenta os resultados para o período de verão. Observa-se que a pluma possui 1.400 m de comprimento e 620 m de largura, com área total de abrangência de 589.520 m².

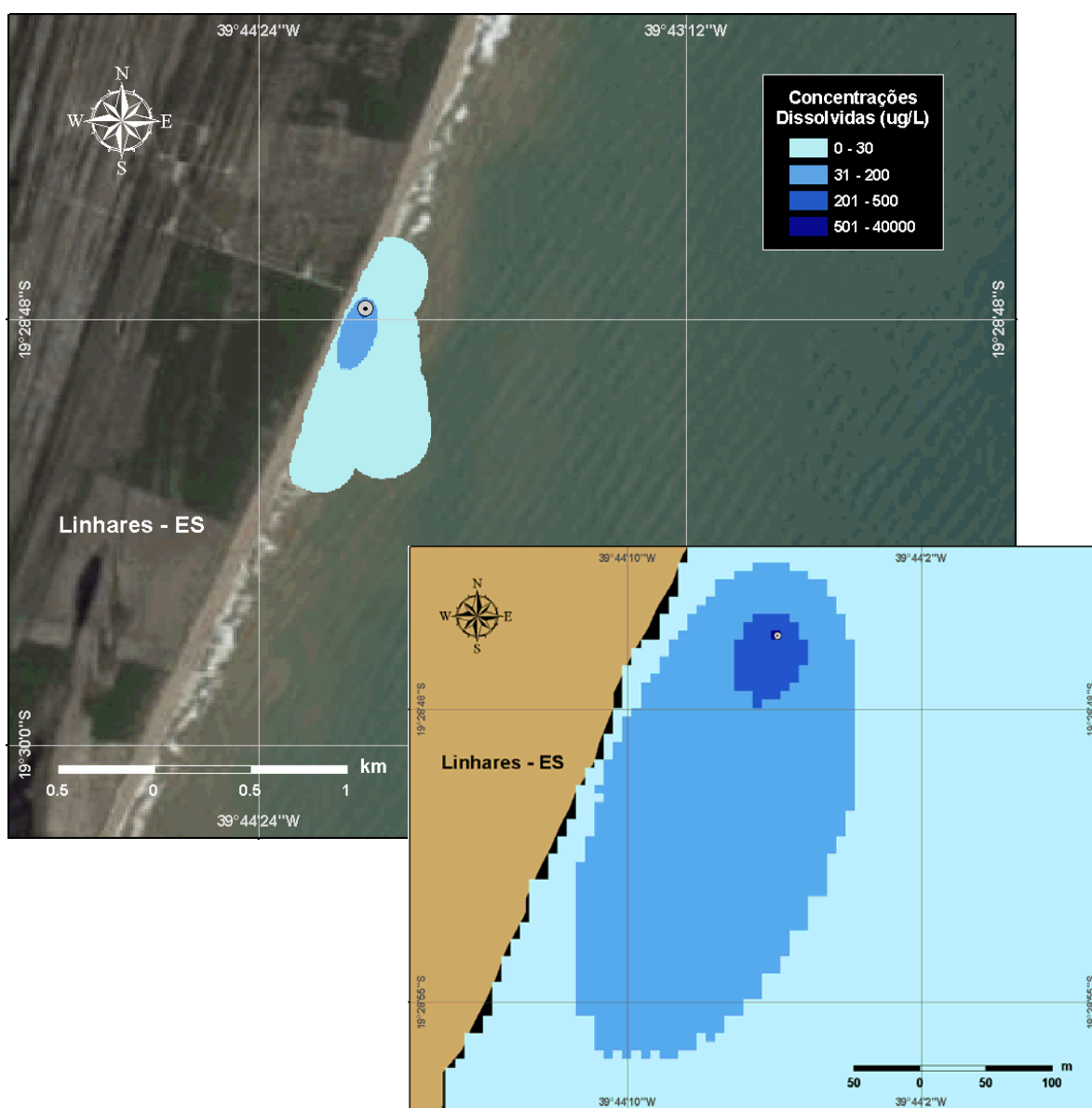


Figura V.4-1 - Média das máximas concentrações esperadas (µg/L) para a pluma de FLUORENE R2, simulada no período de verão, após 1 hora, para o Campo de Camarupim.

A figura V.4-2 apresenta os resultados para o período de inverno. Observa-se que a pluma possui 1.300 m de comprimento e 515 m de largura, com área total de abrangência de 506.170 m².

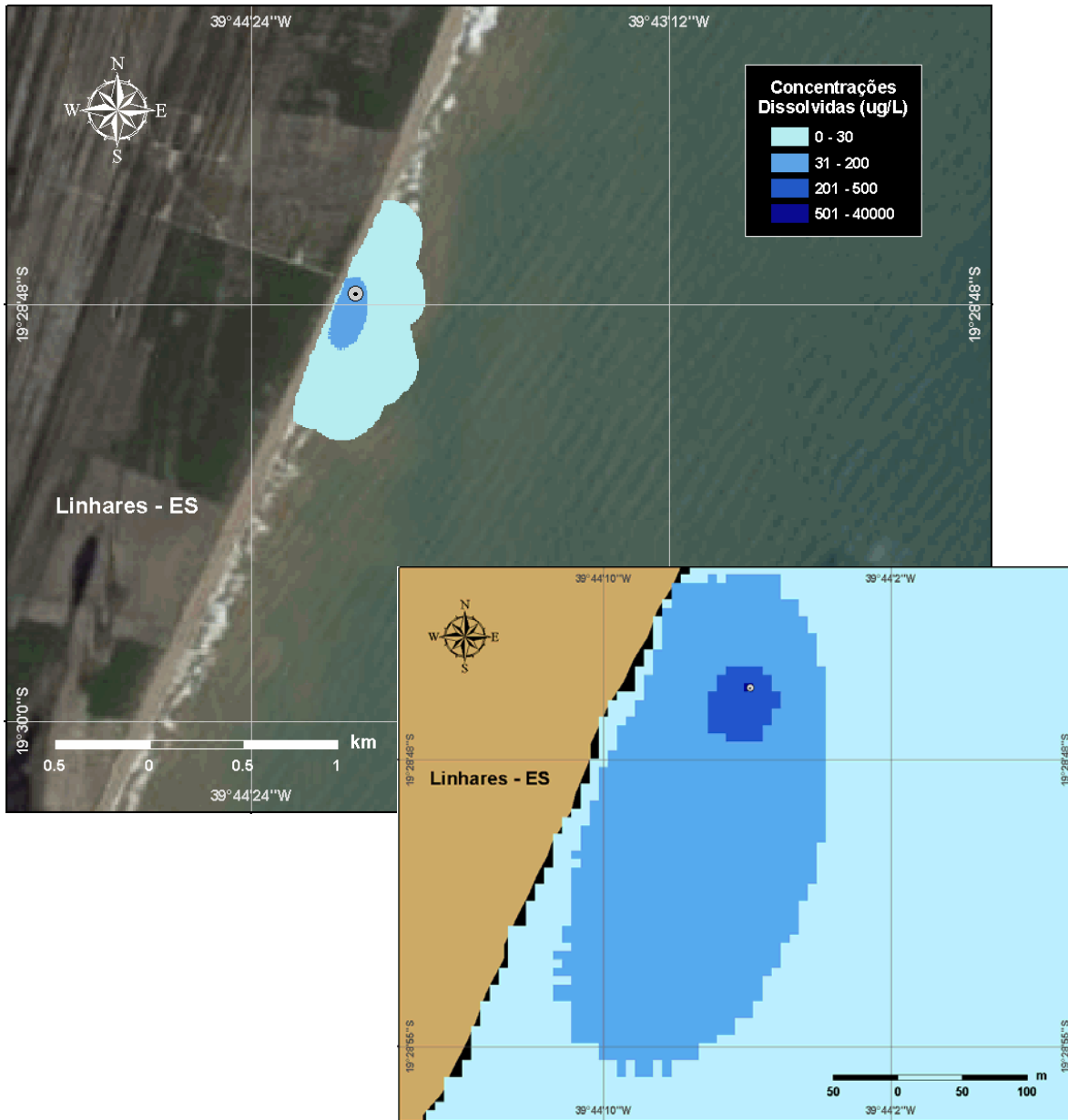


Figura V.4-2 - Média das máximas concentrações esperadas ($\mu\text{g/L}$) para a pluma de FLUORENE R2, simulada no período de inverno, após 1 hora, para o Campo de Camarupim.

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório é apresentado o estudo realizado para a determinação da diluição e dispersão da pluma do descarte do marcador Fluorene R2 devido ao desalagamento de trecho do duto após o teste de estanqueidade no Campo de Camarupim, Bacia do Espírito Santo.

Para tanto foram realizadas simulações probabilísticas. As simulações probabilísticas fornecem como resultado a área de influência do efluente, além dos valores de concentrações médias máximas a partir do ponto de descarte.

As simulações foram conduzidas considerando a variação sazonal das forçantes meteorológicas e oceanográficas, sendo selecionados para isso os períodos de verão e inverno. Para estes períodos, foram realizadas simulações utilizando a vazão de 0,122 m³/h, até o máximo de 122 m³ (ao longo de, aproximadamente, 7 minutos), com durações de 1 hora. Para representação do efluente foi utilizado o Fluorene R2 da Nicho Tecnologia.

Os resultados das simulações mostraram que, nas condições de descarte simuladas, o efluente atinge concentrações médias máximas de 10 vezes a, aproximadamente, 10 m do ponto de descarte. A 100 m do ponto de descarte as diluições são superiores a 100 vezes a concentração de lançamento. As áreas de abrangência da pluma de Fluorene R2 variaram entre 506.170 m² (inverno) e 589.520 m² (verão).

VII BIBLIOGRAFIA

- ASA (APPLIED SCIENCE ASSOCIATES, INC.). 2002. CHEMMAP Technical Manual, Narragansett, RI.
- BEAR, J. & A. VERRUIJT, 1987. Modeling groundwater flow and pollution with computer programs for sample cases. **Kluwer Academic Publishers**.
- BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Ed.), Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models. **American Geophysical Union**, p. 1-16.
- CASTRO FILHO, B.M.C. & MIRANDA, L.B. 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4° N and 34° S. The Sea. **John Wiley & Sons**, Inc. 11: p. 209-251.
- CERC, 1984. Shore protection manual, Vol. I. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, p. 115-134 apêndices.
- CLIMANÁLISE. 1996. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. **Edição comemorativa de 10 anos**. Outubro.
- CSANADY, G.T., 1973. Turbulent diffusion in the environment. **D. Reidel Publishing Company**, Dordrecht, Holland, 74p.
- DELVIGNE, G.A.L. & SWEENEY, C.E. 1988. Natural dispersion of oil. **Oil & Chemical Pollution 4** (1988): p. 281-310.
- ELLIOTT, A.J. 1986. Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea. **Dt. Hydrog**: p.113-137.
- EVANS, D.L. & SIGNORINI, S.R. 1985. Vertical structure of the Brazil Current. **Nature**, 315, p. 48-50.

- FAY, J.A. 1971. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. In: **Proceedings at Joint Conference and Control of Oil Spills**, Washington, D.C., June 15-17.
- FEMAR. 2000. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro. 281pp.
- FRENCH, D., 2001. Chemical Spill Model (CHEMMAP) for Forecasts/Hindcasts and Environmental Risk Assessment. In: Proceedings of the 24th Arctic and Marine Oilspill (AMOP) Technical Seminar, Edmonton, Alberta, Canada, June 12-14, 2001, Environment Canada, pp.825-846.
- FRENCH, D., M. REED, K. JAYKO, S. FENG, H.M. RINES, S. PAVIGNANO, T. ISAJI, S. PUCKETT, A. KELLER, F.W. FRENCH III, D. GIFFORD, J. MCCUE, G. BROWN, E. MACDONALD, J. QUIRK, S. NATZKE, R. BISHOP, M. WELSH, M. PHILLIPS & B.S. INGRAM, 1996a. The CERCLA type A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments (NRDAM/CME), Technical Documentation, Vol.I - V. Final Report, submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior, Washington, DC, April, 1996, Contract No. 14-0001-91-C-11.
- FRENCH, D.P., H.M. RINES, T. OPISHINSKI & J. MCCUE, 1996b. Validation and Sensitivity Analysis: The CERCLA Type A Natural Resource Damage Assessment Models for Coastal and Marine Environments (NRDAM/CME) and for the Great Lakes Environments (NRDAM/GLE) Final Report, Submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior, Washington, DC, April, 1996. Contract N°. 14-01-0001-91-C-11.
- FRENCH, D., H. SCHUTTENBERG, & T. ISAJI, 1999. Probabilities of oil exceeding thresholds of concern: examples from an evaluation for Florida Power and Light. In: **Proceedings: AMOP 99 Technical Seminar**, June 2-4, 1999, Calgary, Alberta, Canada, pp. 243-270.

- FRENCH, D., N. WHITTIER, M. WARD, & C. SANTOS, 2002. Spill Hazard Evaluation for Chemicals Shipped in Bulk Using Modeling. In: **Proceedings, Sixth International Marine Environmental Seminar**, Trondheim, Norway, September 2-4, 2002.
- GARFIELD III, N., 1990. The Brazil Current at subtropical latitudes. Tese de Doutorado, University of Rhode Island. 121pp.
- GIFFORD, F.A., 1961. **Nuclear Safety** 2:47.
- HESS, K.W. & BOSLEY, K.T. 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. **Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling**, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.
- HINES, A.L. & R.N. MADDOX, 1985. Mass transfer fundamentals and application, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 542p.
- HOLTON, J.R., 1979. An Introduction to Dynamic Meteorology. **International Geophysics Series**, Vol 23, Academic Press NY.
- HOULT, D. P., 1972. Oil spreading on the sea. **Ann. Rev. Fluid Mech.**, p.341-368.
- KAWAMURA, P. & D. MACKAY, 1987. The evaporation of volatile liquids. **J Hazardous Materials**, 15:343-364.
- KOLLURU, V.S., 1992. Influence of Number of Spilllets on Spill Model Predictions. Applied Science Associates Internal Report, 1992.
- LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978. Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. **Journal of Physical Oceanography**, v. 8, p. 142-150.

- LEHR, W., 1996. Progress in Oil Spread Modeling, in Proceedings of the 19th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Environment Canada, pp. 889-894.
- LIMA, J.A.M. 1997. Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Break and Continental Slope at 22°S. Tese de doutorado. University of New South Wales, Austrália.
- LYMAN, C.J., W.F. REEHL, & D.H. ROSENBLATT, 1982. **Handbook of Chemical Property Estimation Methods**. McGraw-Hill Book Co., New York, 960p.
- MACKAY, D. & R.S. MATSUGU, 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 51, pp. 434-439.
- MACKAY, D. & P.J. LEINONEN, 1977. Mathematical model of the behavior of oil spills on water with natural and chemical dispersion. Prepared for Fisheries and Environment Canada. Economic and Technical Review Report EPS-3-EC-77-19, 39p.
- MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980. A Mathematical Model Of Oil Spill Behavior. Department of Chemical and Applied Chemistry, University of Toronto, Canada
- MACKAY, D., W.Y. SHIU, & K.C. MA, 1992. **Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals**, Vol. I-IV. Lewis Publ., Chelsea, Michigan.
- MELLOR, G.L. & YAMADA, T. 1982. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys. Space Phys.**, 20, n. 4, p. 851-875.
- OLIVEIRA, A.S., 1986. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. INPE-4008-TDL/239.

- OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. **Deep Sea Research**, v. 8, p. 789-802.
- SATYAMURTI, P. & MATTOS, L.F. 1989. Climatological lower trophospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Mon. Wea. Rev.**, 108:410-520.
- SIGNORINI, S.S. 1978. On the Circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of São Tomé and Guanabara Bay. **Deep Sea Res.**, 25, p. 481-490.3.
- STRAMMA, L.; IKEDA Y. & PETERSEN, R.G. 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, **Deep-Sea. Res.**, 37(12): p. 1875-1886.
- THIBODEAUX, L.J. 1979. **Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil**. John Wiley & Sons, NY 501p.
- THORPE S. A., 1984. On the determination of K_v in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. **American Meteorological Society**, pp. 861-863.
- TOKMAKIAN. R.T. & P.G CHALLENGOR, 1999. On the joint estimation of model and satellite sea surface height anomalies. **Ocean Modelling**, 1, 39-52.
- 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.

VIII EQUIPE TÉCNICA

Equipe da Empresa Consultora Applied Science Consultoria Ltda.

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

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



Profissional	José Edson Pereira
Empresa	ASA Consultoria Ltda
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	326336
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	I a III
Assinatura	_____

Profissional	Maria Regina Fonseca Guimarães
Empresa	ASA Consultoria Ltda
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	434231
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	I a III
Assinatura	_____



Profissional	Marco Antonio Corrêa
Empresa	ASA Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	434236
Responsável pela(s) Capítulo (s)	V
Assinatura	_____

Profissional	Maurício Person Lammardo
Empresa	ASA Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	272165
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	V
Assinatura	_____


CADASTRO TÉCNICO FEDERAL
EQUIPE ASA SOUTH AMERICA

 Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 			
CADASTRO TÉCNICO FEDERAL CERTIFICADO DE REGULARIDADE			
Nr. de Cadastro:	CPF/CNPJ:	Emitido em:	Válido até:
325047	216.695.528-29	05/07/2007	05/10/2007
Nome/Razão Social/Endereço Ana Carolina da Rocha Lammardo R. Canuto Saraiva, 358 - apto43 Mooça SAO PAULO/SP 03113-010			
Este certificado comprova a regularidade no <p style="text-align: center;">Cadastro de Instrumentos de Defesa Ambiental</p> <p>Consultor Técnico Ambiental - Classe 5.0</p> <p>Controle da Poluição Gestão Ambiental</p>			
Observações: 1 - Este certificado não habilita o interessado ao exercício da(s) atividade(s) descrita(s), sendo necessário, conforme o caso de obtenção de licença, permissão ou autorização específica após análise técnica do IBAMA, do programa ou projeto correspondente: 2 - No caso de encerramento de qualquer atividade especificada neste certificado, o interessado deverá comunicar ao IBAMA, obrigatoriamente, no prazo de 30 (trinta) dias, a ocorrência para atualização do sistema. 3 - Este certificado não substitui a necessária licença ambiental emitida pelo órgão competente. 4 - Este certificado não habilita o transporte de produtos ou subprodutos florestais e faunísticos.		A inclusão de Pessoas Físicas e Jurídicas no Cadastro Técnico Federal não implicará por parte do IBAMA e perante terceiros, em certificação de qualidade, nem juízo de valor de qualquer espécie. <p style="text-align: center;">Autenticação</p> <p style="text-align: center;">769d.u6pk.ys9r.2219</p>	



[Imprimir tela](#) [Fechar janela](#)

 <p>Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis</p>  <p>CADASTRO TÉCNICO FEDERAL CERTIFICADO DE REGULARIDADE</p>			
Nr. de Cadastro:	CPF/CNPJ:	Emitido em:	Válido até:
94066	094.409.448-11	06/07/2007	06/10/2007
<p>Nome/Razão Social/Endereço EDUARDO AYRES YASSUDA R. Purpurina, 155 cj 95 Vila Madalena SAO PAULO/SP 05435-030</p>			
<p>Este certificado comprova a regularidade no</p> <p style="text-align: center;">Cadastro de Instrumentos de Defesa Ambiental</p> <p>Consultor Técnico Ambiental - Classe 5.0</p> <p>Gestão Ambiental Recursos Hídricos Qualidade da Água</p>			
<p>Observações:</p> <p>1 - Este certificado não habilita o interessado ao exercício da(s) atividade(s) descrita(s), sendo necessário, conforme o caso de obtenção de licença, permissão ou autorização específica após análise técnica do IBAMA, do programa ou projeto correspondente.</p> <p>2 - No caso de encerramento de qualquer atividade especificada neste certificado, o interessado deverá comunicar ao IBAMA, obrigatoriamente, no prazo de 30 (trinta) dias, a ocorrência para atualização do sistema.</p> <p>3 - Este certificado não substitui a necessária licença ambiental emitida pelo órgão competente.</p> <p>4 - Este certificado não habilita o transporte de produtos ou subprodutos florestais e faunísticos.</p>		<p>A inclusão de Pessoas Físicas e Jurídicas no Cadastro Técnico Federal não implicará por parte do IBAMA e perante terceiros, em certificação de qualidade, nem juízo de valor de qualquer espécie.</p> <p style="text-align: center;">Autenticação</p> <p style="text-align: center;">rcmy.3msj.bd6h.blzh</p>	



[Imprimir tela](#) [Fechar janela](#)

 Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 			
CADASTRO TÉCNICO FEDERAL CERTIFICADO DE REGULARIDADE			
Nr. de Cadastro:	CPF/CNPJ:	Emitido em:	Válido até:
326336	075.522.238-55	06/07/2007	06/10/2007
Nome/Razão Social/Endereço José Edson Rodrigues Pereira Rua Purpurina, 155 - cj.95 Vila Madalena SAO PAULO/SP 05435-030			
Este certificado comprova a regularidade no <p style="text-align: center;">Cadastro de Instrumentos de Defesa Ambiental</p> <p>Consultor Técnico Ambiental - Classe 5.0</p> <p>Gestão Ambiental</p>			
Observações: 1 - Este certificado não habilita o interessado ao exercício da(s) atividade(s) descrita(s), sendo necessário, conforme o caso de obtenção de licença, permissão ou autorização específica após análise técnica do IBAMA, do programa ou projeto correspondente. 2 - No caso de encerramento de qualquer atividade especificada neste certificado, o interessado deverá comunicar ao IBAMA, obrigatoriamente, no prazo de 30 (trinta) dias, a ocorrência para atualização do sistema. 3 - Este certificado não substitui a necessária licença ambiental emitida pelo órgão competente. 4 - Este certificado não habilita o transporte de produtos ou subprodutos florestais e faunísticos.		A inclusão de Pessoas Físicas e Jurídicas no Cadastro Técnico Federal não implicará por parte do IBAMA e perante terceiros, em certificação de qualidade, nem juízo de valor de qualquer espécie. <p style="text-align: center;">Autenticação</p> <p style="text-align: center;">ty98.sfng.9q8f.ij3p</p>	



[Imprimir tela](#) [Fechar janela](#)

 Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 			
CADASTRO TÉCNICO FEDERAL CERTIFICADO DE REGULARIDADE			
Nr. de Cadastro:	CPF/CNPJ:	Emitido em:	Válido até:
434231	118.305.938-89	05/07/2007	05/10/2007
Nome/Razão Social/Endereço Maria Regina Fonseca Guimarães Rua Purpurina, 155 - cj 95 Vila Madalena SAO PAULO/SP 05435-030			
Este certificado comprova a regularidade no <p style="text-align: center;">Cadastro de Instrumentos de Defesa Ambiental</p> <p>Consultor Técnico Ambiental - Classe 5.0</p> Controle da Poluição Ecossistemas Terrestres e Aquaticos Educação Ambiental Qualidade da Água Recursos Hídricos			
Observações: 1 - Este certificado não habilita o interessado ao exercício da(s) atividade(s) descrita(s), sendo necessário, conforme o caso de obtenção de licença, permissão ou autorização específica após análise técnica do IBAMA, do programa ou projeto correspondente. 2 - No caso de encerramento de qualquer atividade especificada neste certificado, o interessado deverá comunicar ao IBAMA, obrigatoriamente, no prazo de 30 (trinta) dias, a ocorrência para atualização do sistema. 3 - Este certificado não substitui a necessária licença ambiental emitida pelo órgão competente. 4 - Este certificado não habilita o transporte de produtos ou subprodutos florestais e faunísticos.		A inclusão de Pessoas Físicas e Jurídicas no Cadastro Técnico Federal não implicará por parte do IBAMA e perante terceiros, em certificação de qualidade, nem juízo de valor de qualquer espécie. <p style="text-align: center;">Autenticação</p> <p style="text-align: center;">iqeg.bwi1.q9gd.w6as</p>	

[Imprimir tela](#) [Fechar janela](#)

 Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 			
CADASTRO TÉCNICO FEDERAL CERTIFICADO DE REGULARIDADE			
Nr. de Cadastro:	CPF/CNPJ:	Emitido em:	Válido até:
434236	096.540.398-00	10/07/2007	10/10/2007
Nome/Razão Social/Endereço MARCO ANTONIO CORREA AV. ENG. HEITOR ANTONIO EIRAS GARCIA 943 JARDIM BONFIGLIOLI SAO PAULO/SP 05588-001			
Este certificado comprova a regularidade no <p style="text-align: center;">Cadastro de Instrumentos de Defesa Ambiental</p> <p>Consultor Técnico Ambiental - Classe 5.0</p> <p>Controle da Poluição Ecosistemas Terrestres e Aquaticos Qualidade da Água Recursos Hídricos</p>			
Observações: 1 - Este certificado não habilita o interessado ao exercício da(s) atividade(s) descrita(s), sendo necessário, conforme o caso de obtenção de licença, permissão ou autorização específica após análise técnica do IBAMA, do programa ou projeto correspondente: 2 - No caso de encerramento de qualquer atividade especificada neste certificado, o interessado deverá comunicar ao IBAMA, obrigatoriamente, no prazo de 30 (trinta) dias, a ocorrência para atualização do sistema. 3 - Este certificado não substitui a necessária licença ambiental emitida pelo órgão competente. 4 - Este certificado não habilita o transporte de produtos ou subprodutos florestais e faunísticos.		A inclusão de Pessoas Físicas e Jurídicas no Cadastro Técnico Federal não implicará por parte do IBAMA e perante terceiros, em certificação de qualidade, nem juízo de valor de qualquer espécie. <p style="text-align: center;">Autenticação</p> <p style="text-align: center;">1212.6129.rtc2.4lkf</p>	

[Imprimir tela](#) [Fechar janela](#)

 <p>Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis</p>  <p>CADASTRO TÉCNICO FEDERAL CERTIFICADO DE REGULARIDADE</p>			
Nr. de Cadastro:	CPF/CNPJ:	Emitido em:	Válido até:
272165	266.829.718-42	06/07/2007	06/10/2007
<p>Nome/Razão Social/Endereço</p> <p>Maurício Person Lammardo R. Canuto Saraiva, 358 apto43 Mooca SAO PAULO/SP 03113-010</p>			
<p>Este certificado comprova a regularidade no</p> <p style="text-align: center;">Cadastro de Instrumentos de Defesa Ambiental</p> <p>Consultor Técnico Ambiental - Classe 5.0</p> <p>Controle da Poluição Ecosistemas Terrestres e Aquáticos Gestão Ambiental Recursos Hídricos Qualidade da Água</p>			
<p>Observações:</p> <p>1 - Este certificado não habilita o interessado ao exercício da(s) atividade(s) descrita(s), sendo necessário, conforme o caso de obtenção de licença, permissão ou autorização específica após análise técnica do IBAMA, do programa ou projeto correspondente;</p> <p>2 - No caso de encerramento de qualquer atividade especificada neste certificado, o interessado deverá comunicar ao IBAMA, obrigatoriamente, no prazo de 30 (trinta) dias, a ocorrência para atualização do sistema.</p> <p>3 - Este certificado não substitui a necessária licença ambiental emitida pelo órgão competente.</p> <p>4 - Este certificado não habilita o transporte de produtos ou subprodutos florestais e faunísticos.</p>		<p>A inclusão de Pessoas Físicas e Jurídicas no Cadastro Técnico Federal não implicará por parte do IBAMA e perante terceiros, em certificação de qualidade, nem juízo de valor de qualquer espécie.</p> <p style="text-align: center;">Autenticação</p> <p style="text-align: center;">m3we.nn4e.gqzp.1sh1</p>	

[Imprimir tela](#) [Fechar janela](#)

