

Estudo da Diluição do Efluente do Emissário da UN-SEAL (SE)



E&P

Revisão 01
Nov/2008

 **PETROBRAS**

Estudo da Diluição do Efluente do Emissário da UN-SEAL (SE)

**Revisão 01
Novembro / 2008**



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 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO..... | I-4 |
| II ANÁLISE DE DADOS | II-1 |
| II.1 VENTOS | II-2 |
| II.2 CORRENTES | II-5 |
| II.3 MARÉS..... | II-11 |
| II.4 VAZÕES | II-15 |
| II.5 TEMPERATURA E SALINIDADE | II-17 |
| III MODELAGEM HIDRODINÂMICA..... | III-1 |
| III.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL..... | III-1 |
| III.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM | III-2 |
| III.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS..... | III-5 |
| III.2 DESCRIÇÃO DO BFHYDRO..... | III-6 |
| III.3 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO..... | III-8 |
| III.4 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA | III-10 |
| III.4.1 AVALIAÇÃO DA MARÉ | III-10 |
| III.4.2 AVALIAÇÃO DAS CORRENTES..... | III-12 |
| IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE E DA ÁGUA PRODUZIDA..... | IV-1 |
| V MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO | V-1 |
| V.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CORMIX | V-1 |
| V.1.1 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO..... | V-2 |
| VI MODELAGEM DA DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO | VI-1 |
| VI.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP | VI-1 |
| VI.1.1 FORMULAÇÃO DO MODELO..... | VI-4 |
| VI.2 DADOS DE ENTRADA..... | VI-21 |
| VI.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS | VI-22 |
| VII RESULTADOS FINAIS DA MODELAGEM DE DESCARTE DE ÁGUA PRODUZIDA..... | VII-1 |

| | | |
|-------|--|--------|
| VII.1 | RESULTADOS DA DILUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO | VII-1 |
| VII.2 | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS..... | VII-5 |
| VIII | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | VIII-1 |
| IX | BIBLIOGRAFIA..... | IX-1 |
| X | EQUIPE TÉCNICA | X-1 |

LISTA DE TABELAS

| TABELA | PÁG. |
|---|-------|
| Tabela I.1-1 - Coordenadas (WGS 84) e lâmina d'água (m) do ponto de lançamento. | I-3 |
| Tabela II.1-1 - Ocorrência conjunta de de intensidade (m/s) e direção (°) do vento NCEP para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2001, para a posição 10°30'00,00"S e 35°36'00,00"W. A direção é medida em graus a partir do norte geográfico e segue a convenção meteorológica. Intervalo de amostragem: dt=6h. | II-3 |
| Tabela II.1-2 - Ocorrência conjunta de de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (INFRAERO) no período de de 1º de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002, para a posição 10°54'12"S e 37°. A direção é medida em graus a partir do norte geográfico e segue a convenção meteorológica. Intervalo de amostragem: horária. | II-5 |
| Tabela II.2-1 - Localização e período de coleta dos dados de corrente. | II-5 |
| Tabela II.3-1 - Constantes harmônicas de maré calculadas a partir da série temporal de elevação de nível do mar para a estação maregráfica da DHN obtida no Terminal Portuário de Sergipe (10°50'00,00"S e 36°55'42,00"W) no período 18 de fevereiro a 19 de março de 1991 (Femar, 2000). | II-15 |
| Tabela II.4-1 - Nome, coordenadas e período dos dados de vazões das estações fluviométricas dos rios Sergipe, Real, Japaratuba, Piauí, São Francisco, Vaza-Barris e Japaratuba-Mirim. | II-16 |
| Tabela IV-1 - Parâmetros utilizados para a modelagem das plumas de descarte de água produzida a partir do emissário PAP-1. | IV-1 |
| Tabela IV-2 - Características da água produzida. | IV-1 |
| Tabela IV-3 - Resultado do teste de toxicidade com o equinodermo <i>Lytechinus variegatus</i> realizado com amostra da água produzida descartada a partir do emissário PAP-1. | IV-2 |
| Tabela IV-4 - Composição e concentrações limite da legislação para a água produzida descartada a partir do emissário PAP-1. | IV-3 |
| Tabela V.1.1-1 - Dados de entrada adotados no CORMIX1. | V-3 |
| Tabela VII.1-1 - Resultados das simulações do campo próximo do descarte de água produzida a partir do emissário PAP-1. | VII-1 |
| Tabela VII.1-2 - Concentrações dos compostos simulados no ponto de lançamento, concentrações limite da legislação e valores correspondentes à diluição no campo próximo para o emissário PAP-1. | VII-4 |
| Tabela VII.2-1 - Diluições médias obtidas para o efluente descartado a partir do emissário PAP-1 à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno. | VII-6 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | PÁG. |
|---|------|
| Figura I.1-1 - Localização do emissário submarino de Atalaia (PAP-1). Fonte: mosaico ortorretificado de imagens ETM+ do GeoCover Landsat 7. | I-2 |
| Figura I.1.1-1 - Variação da precipitação pluviométrica ao longo dos meses do ano para a região do litoral sergipano (Fonte SUDENE-EMDAGRO-INMET). | I-4 |
| Figura II-1 - Mapa com a localização das estações de medição de correntes, vento e nível do mar. | II-1 |
| Figura II.1-1 - Diagrama <i>stick plot</i> dos valores médios diários de dados de vento (NCEP) para o período de 1º de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2001 para a posição 10°30'00,00"S e 35°36'00,00"W (convenção vetorial). | II-2 |
| Figura II.1-2 - Diagrama <i>stick plot</i> dos valores médios diários de dados de vento (INFRAERO) para o período 1º de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002, para a posição 10°54'12,00"S e 37°04'59,00"W. | II-4 |
| Figura II.2-1 - Séries temporais das componentes E-W (u) e N-S (v) dos vetores de corrente (cm/s) medidos na profundidade de 3 m, entre os dias 27 de fevereiro e 9 de dezembro de 1990. Intervalo de amostragem: dt=30 min (PETROBRAS). | II-6 |
| Figura II.2-2 - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de velocidade da corrente COTESE (m/s), durante o período de 27 de fevereiro e 9 de dezembro de 1990, para a profundidade de 3 m. Intervalo de amostragem: dt=30 min (PETROBRAS). | II-6 |
| Figura II.2-3 - Histograma direcional dos vetores de velocidade de corrente (m/s), calculado para os dados COTESE (PETROBRAS) durante o período de 27 de fevereiro a 9 de dezembro de 1990, para a profundidade de 3 m. Os círculos concêntricos indicam a intensidade da corrente, e a barra de cores (lateral) indica o percentual de observações. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção vetorial. Intervalo de amostragem: dt=30 min. | II-7 |
| Figura II.2-4 - Espectro de amplitudes (cm/s) das componentes vetoriais E-W (azul) e N-S (vermelho) dos dados de corrente COTESE (PETROBRAS), durante o período de 27 de fevereiro a 9 de dezembro de 1990, para a profundidade de 6 m. Intervalo de amostragem: dt=30 min. | II-8 |
| Figura II.2-5 - Séries temporais das componentes E-W (u) e N-S (v) dos vetores de corrente (DHN) medidos na profundidade de 5 m, entre os dias 20 de abril e 15 de agosto de junho de 2000. Intervalo de amostragem: dt=1h. | II-9 |

| FIGURA | PÁG. |
|--|--------|
| Figura II.2-6 - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de velocidade da corrente DHN (m/s) durante o período de 2 a 30 de junho de 2000, para a profundidade de 5 m. Intervalo de amostragem: dt=1h (DHN). | II-9 |
| Figura II.2-7 - Histograma direcional dos vetores de velocidade de corrente (m/s), calculado a partir dos dados DHN, durante o período 20 de abril a 15 de agosto de 2000, para a profundidade de 5 m. Os círculos concêntricos indicam a intensidade da corrente, e a barra de cores (lateral) indica o percentual de observações. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção vetorial. Intervalo de amostragem: dt=1h. | II-10 |
| Figura II.2-8 - Espectro de amplitudes (cm/s) das componentes vetoriais E-W em azul e N-S em vermelho dos dados de corrente DHN, durante o período de 20 de abril a 15 de agosto de 2000, para a profundidade de 5 m. Intervalo de amostragem: dt=1h. | II-11 |
| Figura II.3-1 - Elevação do nível do mar (m) nas coordenadas 11°00'00,00"S e 36°59'36,00"W, no período de 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980 (DHN). | II-12 |
| Figura II.3-2 - Espectro de amplitude (m) da série temporal de elevação de nível do mar obtida nas coordenadas 11°00'00,00"S e 36°59'36,00"W, no período de 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980. Intervalo de amostragem: 1h (DHN). | II-13 |
| Figura II.3-3 - Espectro de energia da série temporal de elevação de nível do mar obtida nas coordenadas 11°00'00,00"S e 36°59'36,00"W, no período de 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980 (DHN). | II-14 |
| Figura II.4-1 - Vazões médias mensais (m ³ /s) dos rios Sergipe, Real, Japarutuba, Piauí, São Francisco, Vaza Barris e Japarutuba-Mirim. | II-16 |
| Figura II.5-1 - Perfis verticais de temperatura (°C) e salinidade (psu) para os dados coletados na Região de Produção Oceânica de Sergipe UN-SEAL, coordenadas 11°53'30,00"S e 37°01'00,00"W no dia 16 de maio de 1969 (DHN). | II-17 |
| Figura III.3-1 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Sergipe-Alagoas, com detalhe na região do emissário PAP-1. | III-9 |
| Figura III.4.1-1 - Série temporal de maré medida (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990. | III-11 |
| Figura III.4.2-1 - Série temporal da componente u da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990. | III-12 |

| FIGURA | PÁG. |
|---|--------|
| Figura III.4.2-2 - Série temporal da componente v da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990. | III-13 |
| Figura VII.1-1 - Fatores de diluição (vezes) em função da distância do ponto de descarte. | VII-2 |
| Figura VII.1-2 - Profundidade da linha central da pluma de efluentes em função da distância do ponto de descarte. | VII-2 |
| Figura VII.2-1 - Diluições médias calculadas para a pluma da água produzida, simulada no período de verão, após 168 horas. | VII-6 |
| Figura VII.2-2 - Diluições médias calculadas para a pluma da água produzida, simulada no período de inverno, após 168 horas. | VII-7 |
| Figura VII.2-3 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de naftaleno, simulada no período de verão, após 168 horas. | VII-8 |
| Figura VII.2-4 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de naftaleno, simulada no período de inverno, após 168 horas. | VII-9 |
| Figura VII.2-5 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de bário, simulada no período de verão, após 168 horas. | VII-10 |
| Figura VII.2-6 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de bário, simulada no período de inverno, após 168 horas. | VII-11 |
| Figura VII.2-7 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de ferro, simulada no período de verão, após 168 horas. | VII-12 |
| Figura VII.2-8 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de ferro, simulada no período de inverno, após 168 horas. | VII-13 |
| Figura VII.2-9 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de nitrogênio amoniacal, simulada no período de verão, após 168 horas. | VII-14 |
| Figura VII.2-10 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de nitrogênio amoniacal, simulada no período de inverno, após 168 horas. | VII-15 |
| Figura VII.2-11 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de sulfetos, simulada no período de verão, após 168 horas. | VII-16 |
| Figura VII.2-12 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de sulfetos, simulada no período de inverno, após 168 horas. | VII-17 |

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do processo de diluição da pluma proveniente do descarte de água produzida, a partir do sistema de disposição submarina de Atalaia (PAP-1) da UN-SEAL, localizada em Aracaju, no Estado de Sergipe.

A caracterização dos padrões de circulação nessa região foi obtida a partir de um modelo numérico hidrodinâmico de larga escala, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), adaptado e implementado pela **ASA SOUTH AMERICA**. Para a obtenção de um melhor detalhamento da dinâmica na região de interesse, foi também utilizado o modelo hidrodinâmico BFHYDRO desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.**

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

Para 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 estes períodos, foram realizadas simulações ao longo de 168 horas (uma semana) para o descarte da água produzida, utilizando a vazão máxima de 183 m³/h. Para representação do efluente, foi utilizado um composto conservativo.

Adicionalmente, foram considerados os parâmetros constituintes da água produzida descartada a partir do sistema de disposição submarina de PAP-1.

Para as simulações, estes foram agrupados em parâmetros orgânicos (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, naftaleno, fluoreno, fenantreno, fenóis totais, teor de óleos e graxas e carbono orgânico total) e inorgânicos (arsênio, bário, boro, cádmio, cianetos, chumbo, cobre, cromo, estanho, ferro, fluoreto, manganês, mercúrio, níquel, nitrogênio amoniacal, prata, selênio, sulfetos e zinco).

Como critério ambiental foram utilizadas as concentrações limite estabelecidas na Resolução de nº 357/05 do CONAMA, para cada parâmetro estudado e a diluição correspondente à Concentração de Efeito Não Observado (CENO) referente a água produzida descartada a partir desta unidade.

Os resultados das simulações para o campo próximo apresentaram diluições médias de 24 a 26 vezes (verão e inverno, respectivamente), a uma distância de, aproximadamente, 6 m do ponto de lançamento. Ressalta-se que o efluente não atinge uma diluição suficiente para o enquadramento na CENO dentro do campo próximo.

De acordo com a diluição fornecida pelas simulações de campo próximo, os parâmetros que atingem os limites estabelecidos pela legislação dentro deste domínio são: benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, fenóis totais, fluoreno, fenantreno, carbono orgânico total e teor de óleos e graxas (orgânicos), além do arsênio, boro, cádmio, chumbo, cianeto, cromo, estanho, fluoreto, níquel, selênio e zinco (inorgânicos).

Dessa forma, somente os parâmetros que não atingiram os valores estabelecidos pela CONAMA de nº 357/05 dentro dos limites do campo próximo foram selecionados para as simulações de campo afastado.

Os resultados das simulações para o campo afastado mostraram que, nas condições de descarte simuladas, a água produzida atinge uma diluição média de 1.000 vezes a concentração de lançamento (correspondete à CENO) a uma distância de, aproximadamente, 426 m do ponto de lançamento no verão e 595 m no inverno.

Os resultados das simulações de campo afastado para os parâmetros que não atingiram o critério ambiental dentro dos limites do campo próximo, apresentaram zonas de mistura (referentes às concentrações limite da legislação) variando de 47 m a 838 m de distância a partir do ponto de lançamento.

I INTRODUÇÃO

Neste relatório são apresentados os resultados do estudo de revisão da diluição da água produzida descartada a partir do sistema de disposição submarina de Atalaia (PAP-1) da UN-SEAL em Aracaju, SE. A revisão presente neste estudo foi solicitada pela PETROBRAS, uma vez que as concentrações dos parâmetros constituintes do efluente foram alteradas em relação ao estudo realizado em 2005 (ASA, 2005a).

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

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

A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a partir de resultados de um modelo numérico hidrodinâmico implementado pela equipe da *ASA SOUTH AMERICA*, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM). Para obter um melhor detalhamento da dinâmica na região de interesse, foi também utilizado o modelo hidrodinâmico BFHYDRO desenvolvido pela *ASA*.

O Capítulo I apresenta os objetivos desse estudo e fornece informações sobre a área em questão. O levantamento e a análise dos dados meteorológicos e oceanográficos nas imediações da região de estudo são apresentados no Capítulo II. O Capítulo III descreve o modelo hidrodinâmico e seu processo de avaliação, com comparações entre dados observacionais e os resultados simulados. O Capítulo IV apresenta as características do descarte de água produzida a partir do sistema de disposição submarina de Atalaia (PAP-1).

O Capítulo V descreve a modelagem do fator de diluição do campo próximo e o Capítulo VI descreve o modelo CHEMMAP utilizado na modelagem do campo afastado. Os resultados das simulações no campo próximo e no campo afastado são apresentados no Capítulo VII. Por fim, o Capítulo VIII discute os resultados obtidos neste estudo.

I.1 ÁREA DE ESTUDO

As simulações da diluição da pluma de água produzida foram realizadas a partir do sistema de disposição submarina (emissário submarino) de Atalaia - PAP-1, nas proximidades da cidade de Aracaju, na costa do Estado de Sergipe, conforme mostra a figura I.1-1.

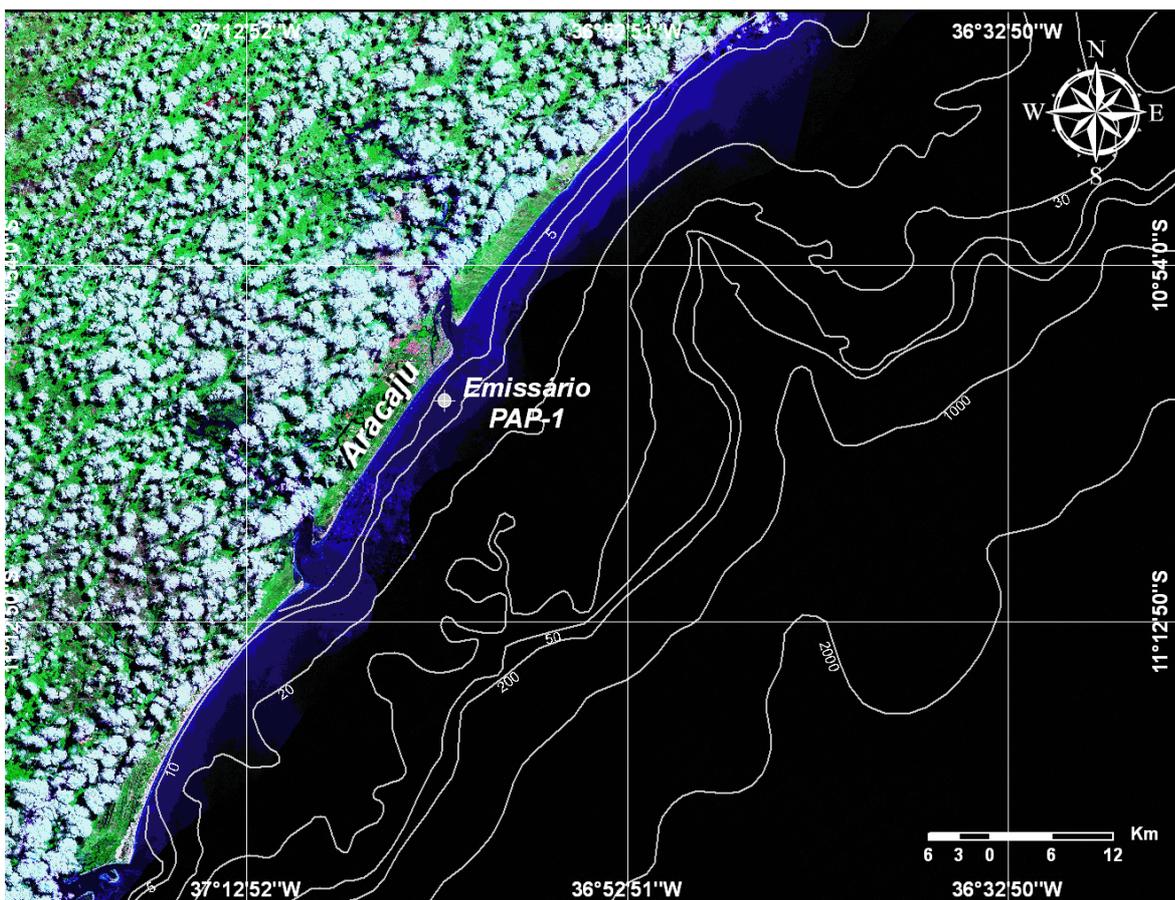


Figura I.1-1 - Localização do emissário submarino de Atalaia (PAP-1). Fonte: mosaico ortorretificado de imagens ETM+ do GeoCover Landsat 7¹

¹ Applied Research and Technology Project Office (National Aeronautics and Space Administration – NASA). Disponível em: <<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>>. Acesso em 23/01/2008.

Este emissário está instalado sobre a plataforma continental interna, aproximadamente na isóbata de 7 metros, e as coordenadas do ponto de lançamento, especificadas pela PETROBRAS, se encontram listadas na tabela I.1-1.

Tabela I.1-1 - Coordenadas (WGS 84) e lâmina d'água (m) do ponto de lançamento.

| PONTO DESCARTE | LATITUDE | LONGITUDE | LÂMINA D'ÁGUA (m) |
|----------------|---------------|---------------|-------------------|
| PAP-1 | 11°01'10,00"S | 37°02'25,00"W | 7,0 |

1.1.1 Características Meteorológicas da Região

A região Nordeste do Brasil é geralmente caracterizada por irregularidades climáticas que variam tanto no espaço como no tempo. Em situações normais, as regiões próximas ao litoral são marcadas por uma estação chuvosa bem definida e com chuvas abundantes. Os principais sistemas meteorológicos que provocam estas chuvas, que ocorrem ao longo do litoral, estão associados às frentes frias, aos distúrbios de leste, às linhas de instabilidade e aos efeitos da brisa, concentrando-se no período de abril a agosto. Especificamente para a região do litoral sergipano, o período principal das chuvas concentra-se entre os meses de abril a agosto, conforme mostra o gráfico da figura I.1.1-1. Cerca de 67% das chuvas ocorrem durante esses 5 meses.

Quanto aos ventos, a região estudada pode ser caracterizada por um regime de ventos de leste, os chamados Alíseos. A intensidade desses ventos aumenta do verão para o inverno e a direção média do vento é de 110° (Riehl, 1965). Variações sazonais podem ocorrer devido à interação entre o fluxo médio e o sistema de ventos locais, como observado por Kousky (1980).

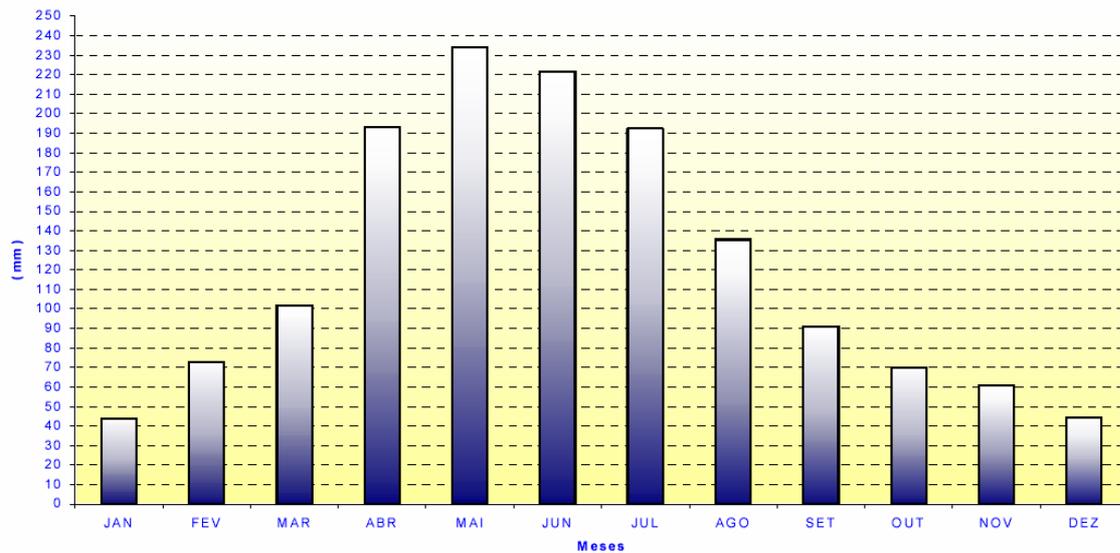


Figura I.1.1-1 - Variação da precipitação pluviométrica ao longo dos meses do ano para a região do litoral sergipano (Fonte SUDENE-EMDAGRO-INMET)².

I.1.2 Características Oceanográficas da Região

A costa do Estado de Sergipe está localizada na plataforma continental nordeste do Brasil em um trecho de costa retilínea com pequenas barras de rios, riachos e restingas. Na costa entre Alagoas e Sergipe, localiza-se o delta do Rio São Francisco, gerado por sedimentos projetados ao mar pelo rio (Ab'Saber, 2001).

Sobre a plataforma continental, ainda não existem informações conclusivas na literatura sobre os padrões de circulação. Em linhas gerais, espera-se para os padrões médios, boa correlação entre as correntes de superfície e o arrasto do vento, e interferência da circulação de talude, uma vez que a plataforma é bastante estreita, apresentando, em algumas áreas, um talude continental abrupto e recortado. Nestas áreas mais estreitas, o efeito da circulação do talude e oceano aberto deve-se fazer mais presente.

De acordo com Castro & Miranda (1998), esta é uma região pouco estudada e amostrada. Os gradientes horizontais de temperatura são pequenos, com valores típicos de 1 °C por 500 km. As temperaturas da superfície mostram fraco

² Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste / Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe / Instituto Nacional de Meteorologia

sinal sazonal, sendo mais altas no verão e começo do outono com valores entre 27 e 29 °C, e no inverno entre 26 e 28 °C. Os gradientes verticais de temperatura são pequenos, com diferenças de temperatura entre a superfície e o fundo, nas proximidades da quebra da plataforma, inferiores a 1 °C.

As variações de salinidade também são pequenas junto à quebra da plataforma, com valores típicos entre 36 e 37. Em áreas costeiras, próximas a desembocadura de rios, a salinidade decresce localmente podendo ser encontrados valores em torno de 32 e 33.

II ANÁLISE DE DADOS

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

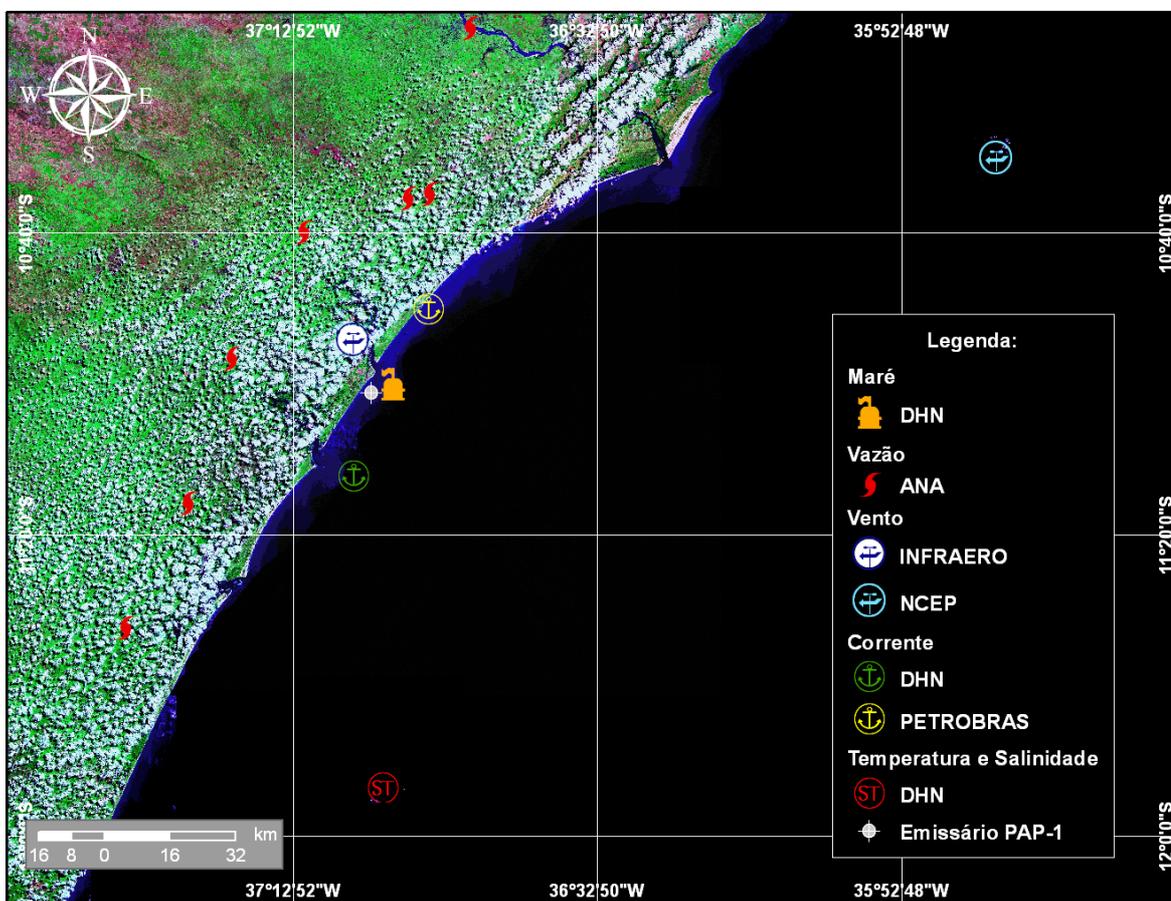


Figura II-1 - Mapa com a localização das estações de medição de correntes, vento e nível do mar.

II.1 VENTOS

Dois conjuntos de dados de ventos são apresentados, a seguir, um proveniente das reanálise dos modelos meteorológicos NCEP e NCAR³ para o ano de 2001, e outro obtido junto a INFRAERO⁴ para o período de 1º de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002.

A figura II.1-1 apresenta os valores médios diários do vento NCEP relativo ao quadrilátero de 2,5° x 2,5° em torno das coordenadas 10°30'00,00"S e 35°36'00,00"W (indicado na figura II-1), para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2001. Observa-se que os ventos seguiram um padrão onde os mais frequentes e mais intensos foram provenientes do quadrante ESE.

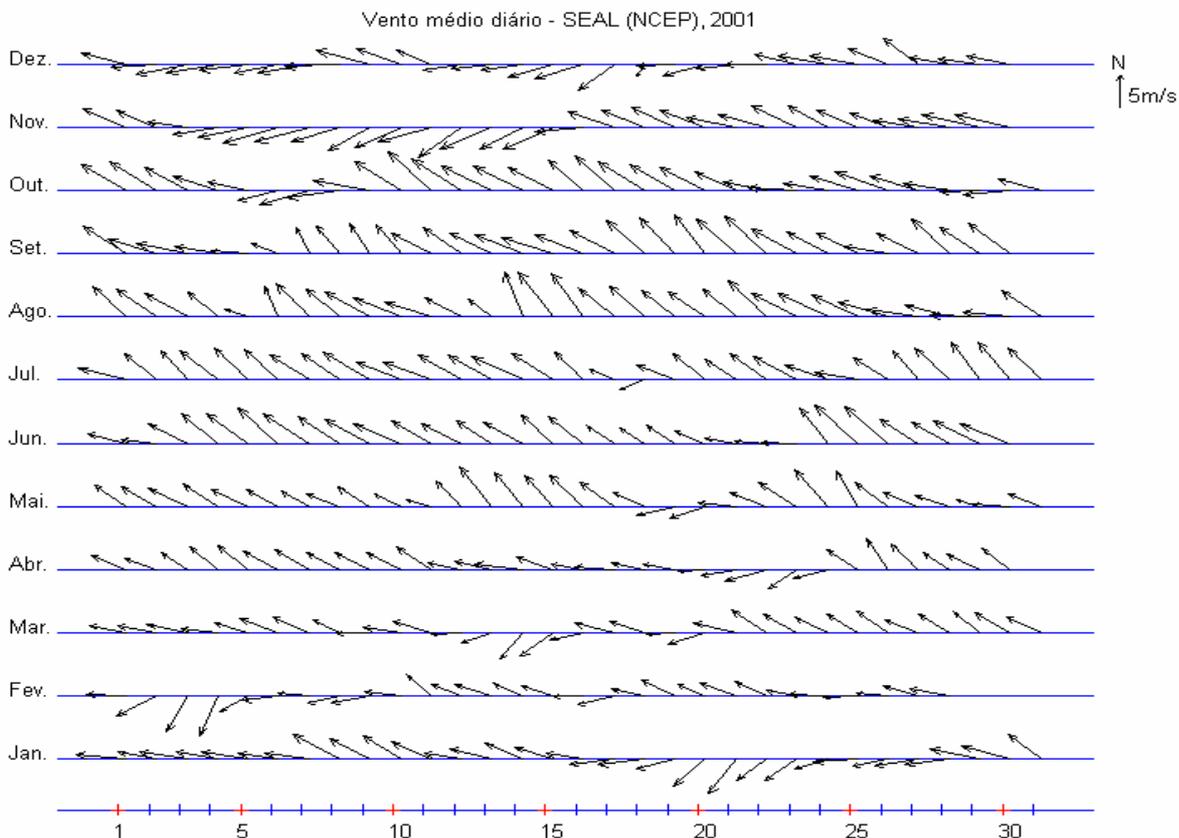


Figura II.1-1 - Diagrama stick plot dos valores médios diários de dados de vento (NCEP) para o período de 1º de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2001 para a posição 10°30'00,00"S e 35°36'00,00"W (convenção vetorial).

³ National Centers for Environmental Prediction e National Center for Atmospheric Research, disponibilizados pelo Climate Diagnostics Center (CDC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

⁴ Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária.

A tabela II.1-1 apresenta a frequência de ocorrência conjunta entre intensidade e direção dos ventos NCEP para o período de janeiro a dezembro de 2001. Observa-se que os ventos mais freqüentes vieram de ESE (40,5%), SE (30,3%) e E (20,3%). Os ventos com velocidade média máxima (6,1 m/s) vieram de SE e os ventos mais intensos registrados (9,6 m/s) vieram de ESE. Dos ventos amostrados, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 7,5 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

Tabela II.1-1 - Ocorrência conjunta de de intensidade (m/s) e direção (°) do vento NCEP para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2001, para a posição 10°30'00,00"S e 35°36'00,00"W. A direção é medida em graus a partir do norte geográfico e segue a convenção meteorológica. Intervalo de amostragem: dt=6h.

| Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----------|
| Obs.: a direção é medida em graus e para o sentido utiliza-se a convenção meteorológica (de onde o vento vem). | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | Total | Porc. | Dir. méd. |
| 0,0- 1,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | |
| 1,0- 2,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | |
| 2,0- 3,0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0,6 | 116 |
| 3,0- 4,0 | 0 | 0 | 1 | 8 | 18 | 40 | 30 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 102 | 7,0 | 114 |
| 4,0- 5,0 | 0 | 0 | 1 | 15 | 50 | 103 | 55 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 234 | 16,0 | 112 |
| 5,0- 6,0 | 0 | 0 | 4 | 20 | 75 | 142 | 99 | 11 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 352 | 24,1 | 113 |
| 6,0- 7,0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 68 | 147 | 139 | 22 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 384 | 26,3 | 119 |
| 7,0- 8,0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 61 | 129 | 85 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 291 | 19,9 | 114 |
| 8,0- 9,0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 22 | 28 | 30 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 86 | 5,9 | 113 |
| 9,0-10,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0,2 | 106 |
| Total | 0 | 0 | 6 | 66 | 297 | 592 | 443 | 53 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1461 | | |
| Porc. | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 4,5 | 20,3 | 40,5 | 30,3 | 3,6 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | |
| Vel. méd. | | | 5,1 | 5,6 | 6,0 | 6,0 | 6,1 | 5,8 | 4,9 | | | | | | | | | | |
| Vel. máx. | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 8,8 | 9,3 | 9,6 | 9,1 | 8,5 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | |
| Percnts.(0,9) | 0,0 | 0,0 | 5,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 6,5 | | | | | | | | | | |

A figura II.1-2 apresenta os valores médios diários do vento INFRAERO medido na cidade de Aracajú, nas coordenadas 10°54'12"S e 37°04'59"W (indicado na figura II-1), para o período de 1º de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002. Observa-se que os ventos seguiram um padrão onde os mais freqüentes e mais intensos foram provenientes do quadrante ESE.

Vento médio diário - Aracajú, setembro 2001 a agosto 2002

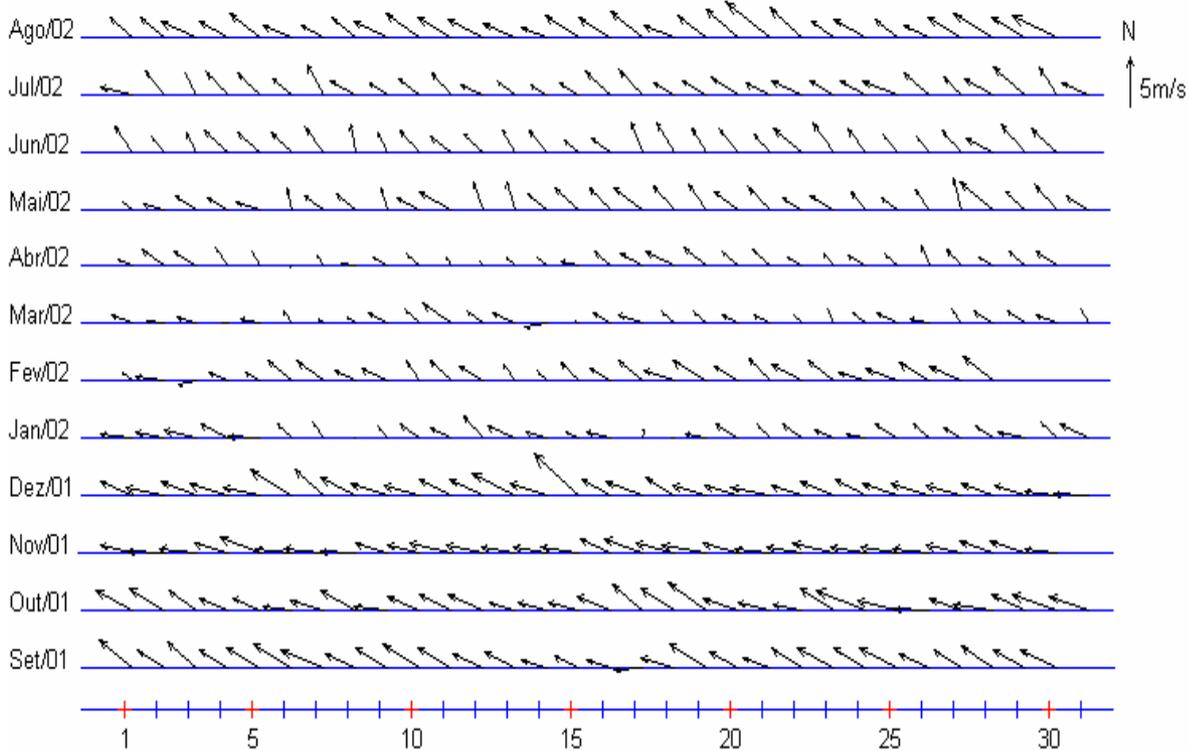


Figura II.1-2 - Diagrama stick plot dos valores médios diários de dados de vento (INFRAERO) para o período 1º de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002, para a posição 10°54'12,00"S e 37°04'59,00"W.

A tabela II.1-2 apresenta a frequência de ocorrência conjunta entre intensidade e direção dos ventos INFRAERO em Aracajú para o período de 1º de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002. Os ventos mais frequentes vieram de E (31,6%) e ESE (28,0%); os com velocidade média máxima (2,9 m/s) vieram de E e de ESE, e os ventos mais intensos registrados (7,7 m/s) vieram de ESE e SE. Dos ventos amostrados, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 4,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

Tabela II.1-2 - Ocorrência conjunta de de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (INFRAERO) no período de de 1^o de setembro de 2001 a 31 de agosto de 2002, para a posição 10°54'12''S e 37°. A direção é medida em graus a partir do norte geográfico e segue a convenção meteorológica. Intervalo de amostragem: horária.

| Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|------|-------------|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----------|
| Obs.: a direção é medida em graus e para o sentido utiliza-se a convenção meteorológica (de onde o vento vem). | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | Total | Porc. | Dir. méd. |
| 0,0- 1,0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,0 | 0 |
| 1,0- 2,0 | 8 | 105 | 63 | 177 | 371 | 228 | 146 | 95 | 102 | 54 | 37 | 59 | 159 | 101 | 17 | 1 | 1723 | 18,1 | 107 |
| 2,0- 3,0 | 8 | 58 | 38 | 329 | 1035 | 957 | 346 | 231 | 83 | 27 | 3 | 10 | 17 | 5 | 1 | 1 | 3149 | 33,0 | 107 |
| 3,0- 4,0 | 4 | 29 | 33 | 267 | 952 | 1023 | 326 | 182 | 47 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2871 | 30,1 | 107 |
| 4,0- 5,0 | 1 | 5 | 12 | 158 | 515 | 389 | 128 | 63 | 13 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1286 | 13,5 | 102 |
| 5,0- 6,0 | 0 | 2 | 2 | 38 | 133 | 66 | 10 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 262 | 2,7 | 96 |
| 6,0- 7,0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 8 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 0,2 | 98 |
| 7,0- 8,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0,0 | 115 |
| Total | 22 | 200 | 148 | 972 | 3014 | 2671 | 959 | 580 | 247 | 83 | 41 | 72 | 178 | 108 | 18 | 2 | 9315 | | |
| Porc. | 0,2 | 2,1 | 1,6 | 10,2 | 31,6 | 28,0 | 10,1 | 6,1 | 2,6 | 0,9 | 0,4 | 0,8 | 1,9 | 1,1 | 0,2 | 0,0 | | | |
| Vel. méd. | 2,0 | 1,9 | 2,2 | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,1 | 1,6 | 1,2 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,5 | | | |
| Vel. máx. | 4,1 | 6,2 | 5,1 | 6,2 | 6,2 | 7,7 | 7,7 | 5,1 | 5,1 | 4,1 | 3,1 | 4,1 | 3,1 | 3,1 | 2,1 | 2,1 | | | |
| Percts.(0,9) | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 3,0 | 2,0 | 1,4 | 2,0 | 2,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | | | |

Observando as figuras II.1-1 e II.1-2, é possível identificar dois períodos nos quais o vento apresenta comportamentos distintos. Nos meses de janeiro a março os ventos são menos intensos, com a direção variando de ESE a ENE, e nos meses de junho a agosto os ventos são mais intensos, com direção predominantemente de SE.

II.2 CORRENTES

Os conjuntos de dados de correntes apresentados a seguir, foram obtidos junto a PETROBRAS, e em fundeios realizados pela DHN⁵. As localizações, profundidades e períodos de coleta são apresentados na tabela II.2-1.

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

| DADO | LATITUDE / LONGITUDE | PROFUNDIDADE DE COLETA (m) | PERÍODO |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| PETROBRAS – COTESE | 10°50'20,40"S e 36°55'29,99"W | 3 | 27/fev a 09/dez de 1990 |
| Fundeio DHN | 11°12'13,00"S e 37°04'52,00"W | 5 | 20/abr a 15/ago de 2000 |

⁵ Diretoria de Hidrografia e Navegação.

A figura II.2-1 e a figura II.2-2 apresentam, respectivamente, as séries temporais das componentes u e v , e o diagrama *stick plot* da série temporal da corrente COTESE da PETROBRAS para o período compreendido entre 27 de fevereiro e 9 de dezembro de 1990, com intervalo amostral de 30 minutos.

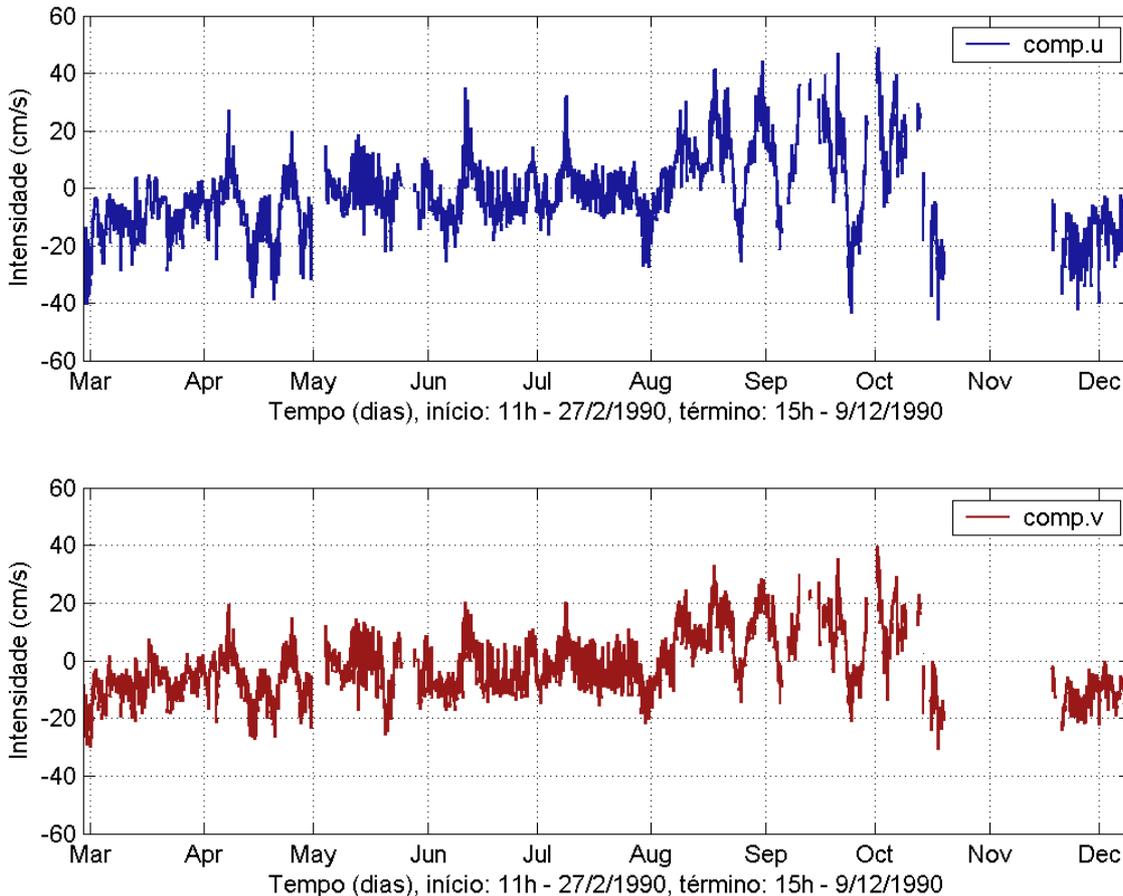


Figura II.2-1 - Séries temporais das componentes E-W (u) e N-S (v) dos vetores de corrente (cm/s) medidos na profundidade de 3 m, entre os dias 27 de fevereiro e 9 de dezembro de 1990. Intervalo de amostragem: $dt=30$ min (PETROBRAS).

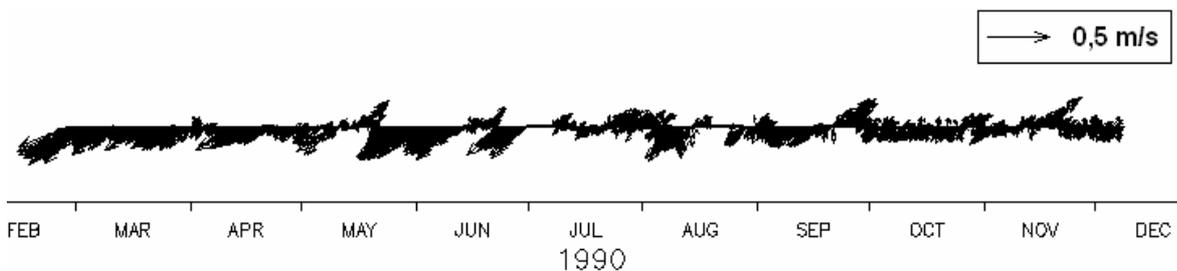
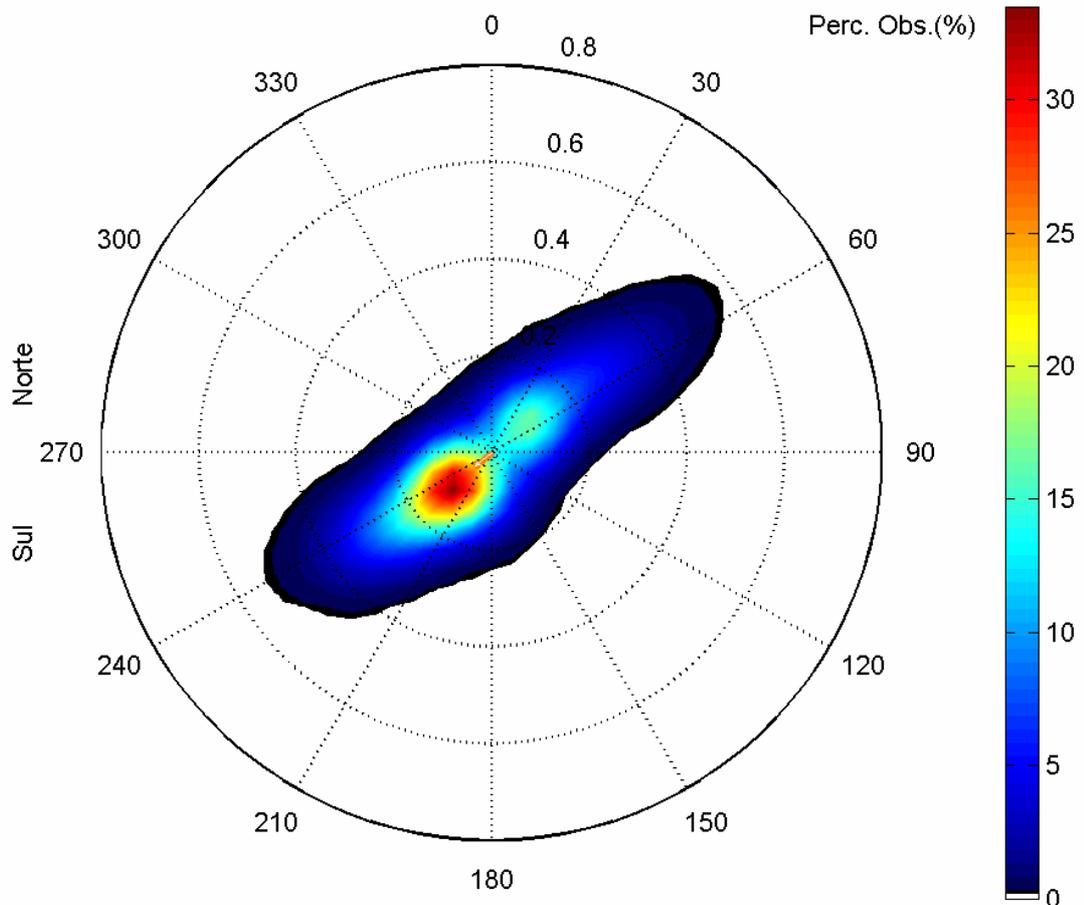


Figura II.2-2 - Diagrama *stick plot* dos vetores de velocidade da corrente COTESE (m/s), durante o período de 27 de fevereiro e 9 de dezembro de 1990, para a profundidade de 3 m. Intervalo de amostragem: $dt=30$ min (PETROBRAS).

A figura II.2-3 apresenta o histograma direcional dos dados de corrente COTESE.. Observa-se que as correntes predominantes seguiram as direções SW e NE. Durante o período de amostragem (27 de fevereiro a 9 de dezembro de 1990) o transporte residual na profundidade de amostragem, estimado a partir da velocidade média, foi no sentido sudoeste.

Histograma direcional dos vetores de corrente (m/s), total de observações = 5498



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.15 m/s

Figura II.2-3 - Histograma direcional dos vetores de velocidade de corrente (m/s), calculado para os dados COTESE (PETROBRAS) durante o período de 27 de fevereiro a 9 de dezembro de 1990, para a profundidade de 3 m. Os círculos concêntricos indicam a intensidade da corrente, e a barra de cores (lateral) indica o percentual de observações. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção vetorial. Intervalo de amostragem: $dt=30$ min.

A figura II.2-4 apresenta o espectro de amplitude das correntes destes dados. Esta análise mostra que a maior parte da energia encontra-se nas baixas freqüências e estão associadas ao ciclo sazonal e a incidência de sistemas frontais. Pode-se observar, também, influência da maré com sinal semidiurno.

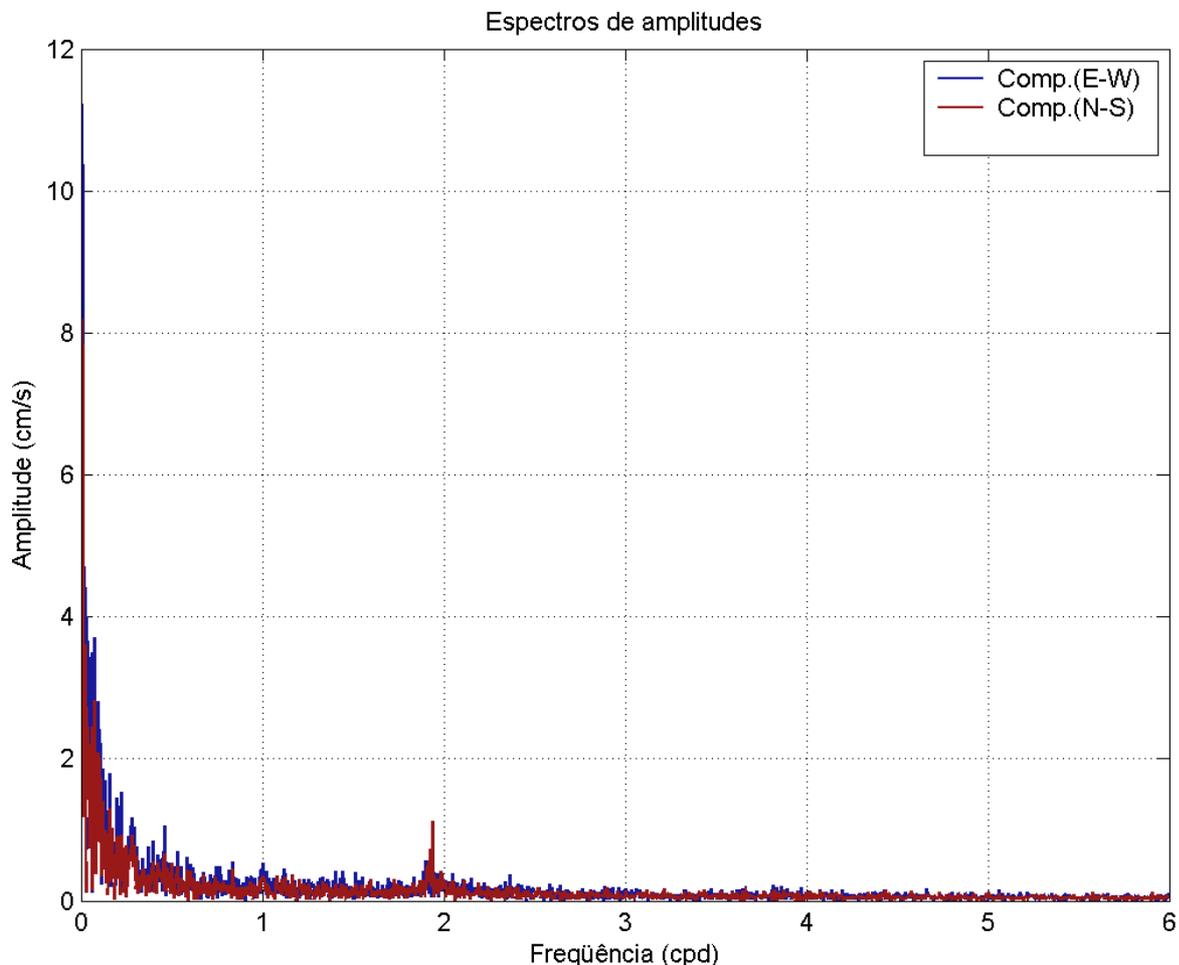


Figura II.2-4 - Espectro de amplitudes (cm/s) das componentes vetoriais E-W (azul) e N-S (vermelho) dos dados de corrente COTESE (PETROBRAS), durante o período de 27 de fevereiro a 9 de dezembro de 1990, para a profundidade de 6 m. Intervalo de amostragem: $dt=30$ min.

A figura II.2-5 e a figura II.2-6 apresentam, respectivamente, as séries temporais das componentes u e v , e o diagrama *stick plot* da série temporal da corrente de fundeios da DHN, para o período compreendido entre 20 de abril e 15 de agosto de 2000. Observa-se uma predominância das correntes nas direções NNE com intensidade média em torno de 3,0 cm/s.

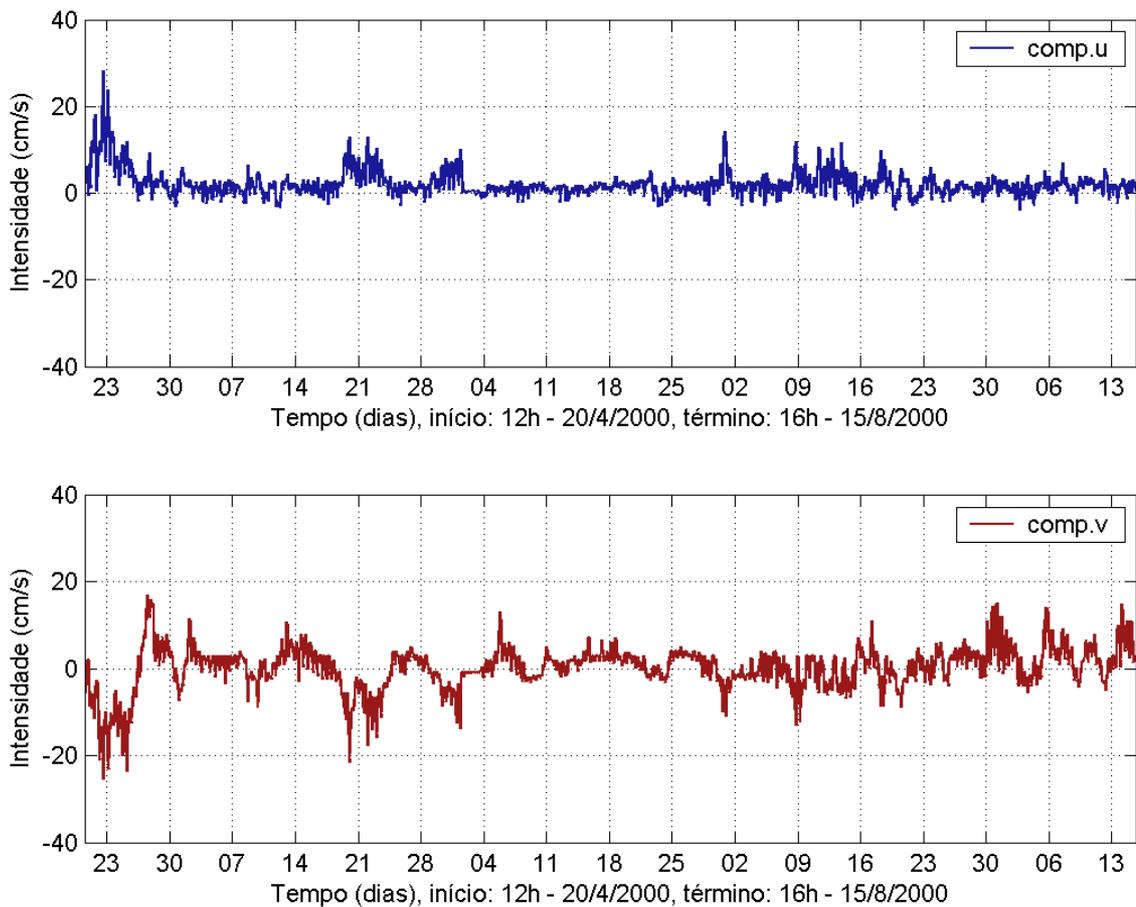


Figura II.2-5 - Séries temporais das componentes E-W (u) e N-S (v) dos vetores de corrente (DHN) medidos na profundidade de 5 m, entre os dias 20 de abril e 15 de agosto de junho de 2000. Intervalo de amostragem: dt=1h.

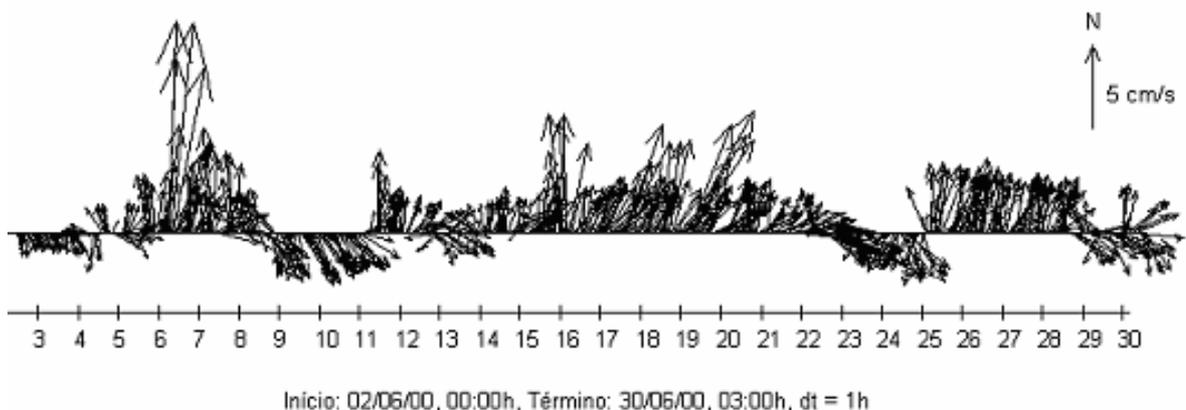
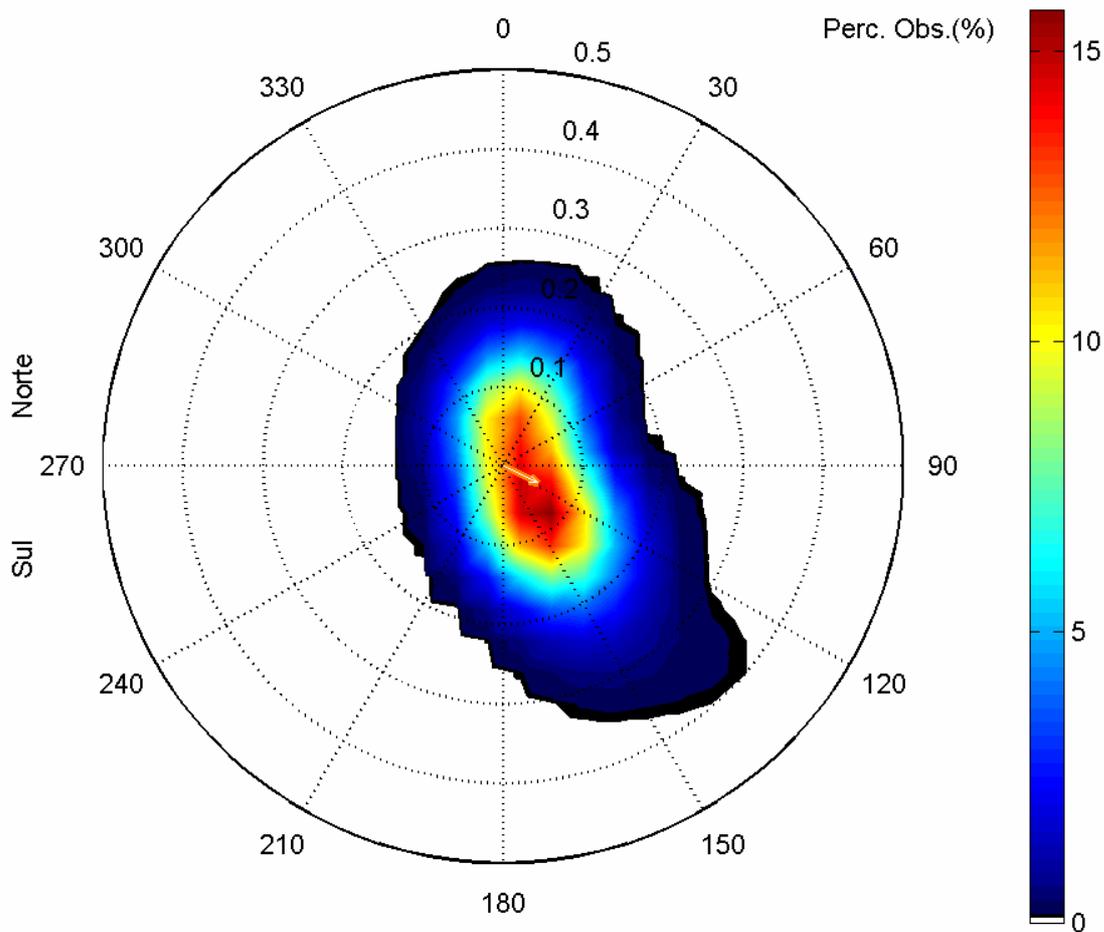


Figura II.2-6 - Diagrama stick plot dos vetores de velocidade da corrente DHN (m/s) durante o período de 2 a 30 de junho de 2000, para a profundidade de 5 m. Intervalo de amostragem: dt=1h (DHN).

A figura II.2-7 apresenta o histograma direcional dos dados de corrente descritos acima. Observa-se que o escoamento ocorre preferencialmente nas direções NNE e SE. Durante o período de amostragem o transporte residual na profundidade de 5 m, estimado a partir da velocidade média, foi no sentido sudeste.

Histograma direcional dos vetores de corrente (m/s), total de observações = 2812



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.046 m/s

Figura II.2-7 - Histograma direcional dos vetores de velocidade de corrente (m/s), calculado a partir dos dados DHN, durante o período 20 de abril a 15 de agosto de 2000, para a profundidade de 5 m. Os círculos concêntricos indicam a intensidade da corrente, e a barra de cores (lateral) indica o percentual de observações. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção vetorial. Intervalo de amostragem: $dt=1h$.

A figura II.2-8, a seguir, apresenta o espectro de amplitude das correntes destes dados. Esta análise mostra que a maior parte da energia encontra-se nas baixas frequências provavelmente associadas ao ciclo sazonal e a incidência de sistemas frontais. Pode-se observar, também, influência da maré semidiurna.

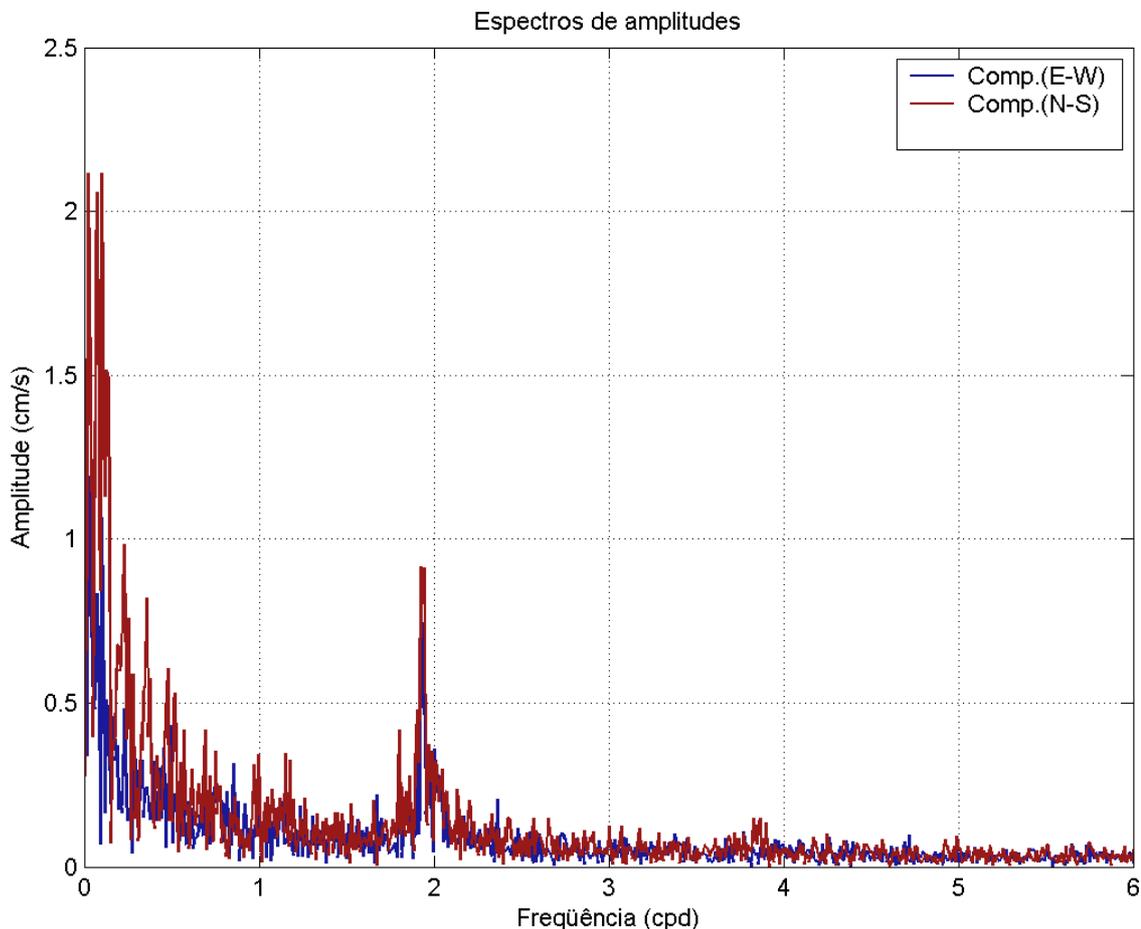


Figura II.2-8 - Espectro de amplitudes (cm/s) das componentes vetoriais E-W em azul e N-S em vermelho dos dados de corrente DHN, durante o período de 20 de abril a 15 de agosto de 2000, para a profundidade de 5 m. Intervalo de amostragem: $dt=1h$.

II.3 MARÉS

Os dados de nível foram obtidos na estação maregráfica da DHN, instalada nas coordenadas $11^{\circ}00'00,00''S$ e $36^{\circ}59'36,00''W$ (figura II-1), no período compreendido entre 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980. A figura II.3-1 apresenta a série temporal dos dados, a intervalos horários.

O espectro de amplitude de maré (figura II.3-2), calculado a partir dessa série, apresenta um pico com amplitude de, aproximadamente, 70 cm na faixa de frequência de dois ciclos por dia (cpd), correspondente à maré semidiurna. Um segundo pico, muito menor, pode ser observado na faixa de um cpd (maré diurna), com amplitude em torno de 5 cm. O mesmo pode ser observado no espectro de energia de maré (figura II.3-3), com uma concentração significativa de energia na faixa de frequência de 2 cpd, como indica o intervalo de confiança de 99% calculado para esse espectro. Observam-se, também, concentrações de energia nas faixas de frequência de 1, 4 e 6 cpd.

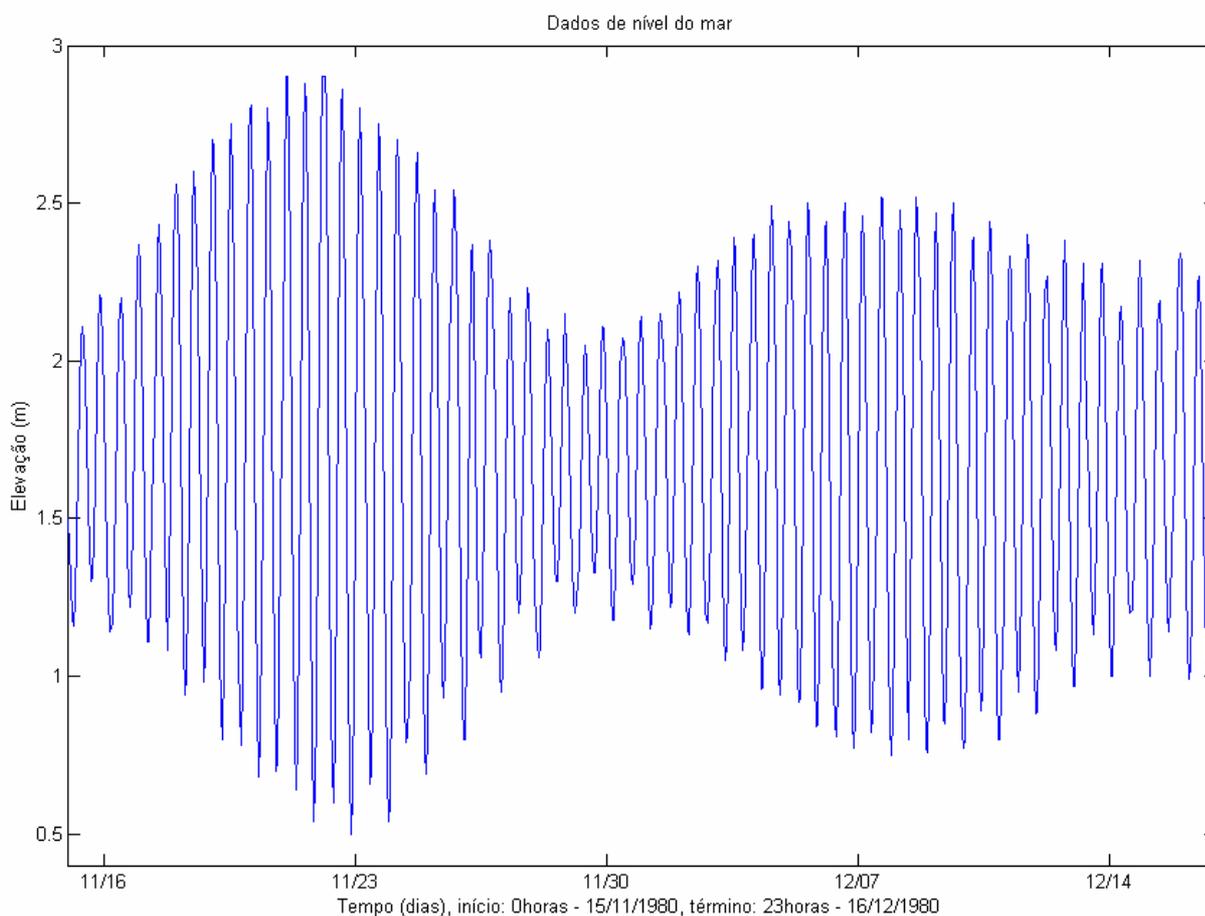


Figura II.3-1 - Elevação do nível do mar (m) nas coordenadas 11°00'00,00"S e 36°59'36,00"W, no período de 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980 (DHN).

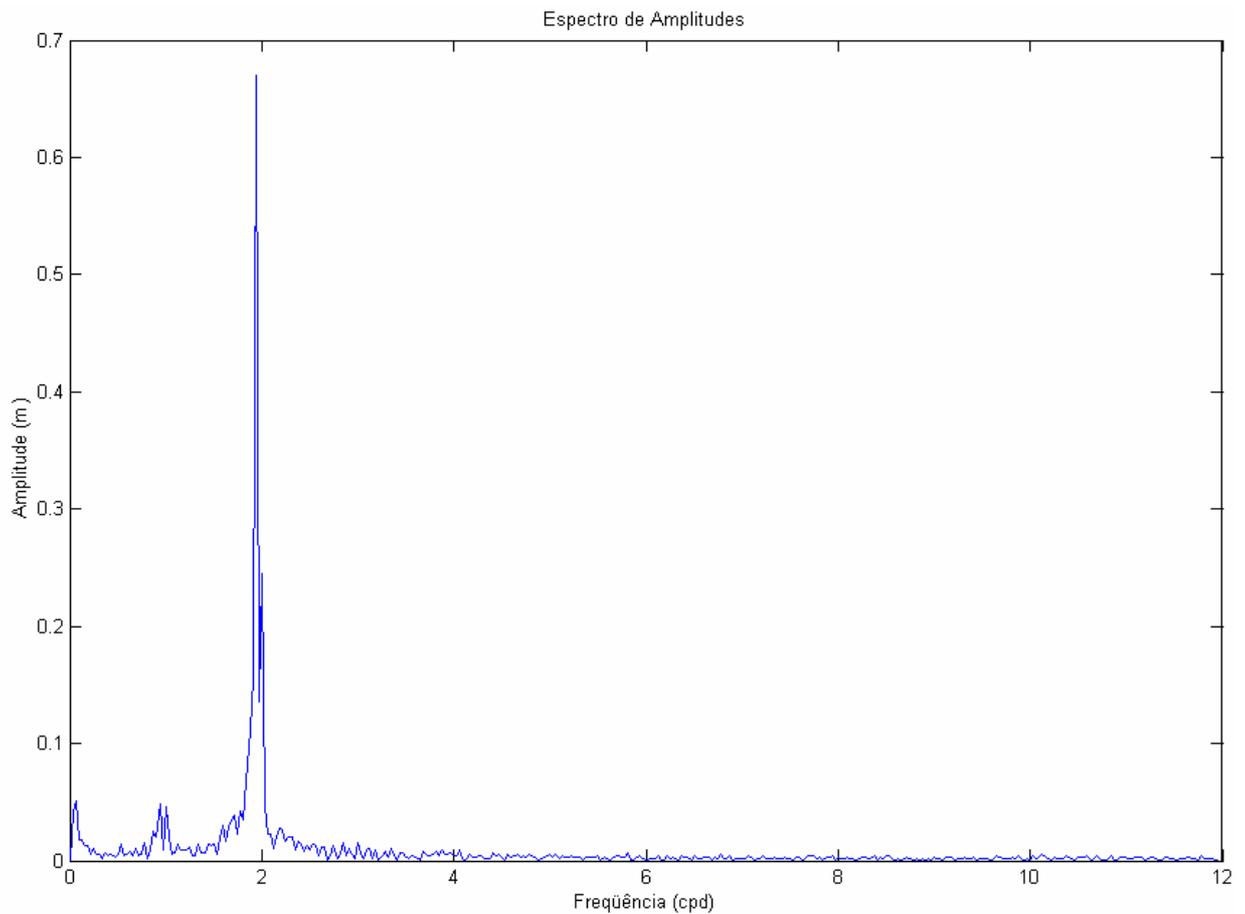


Figura II.3-2 - Espectro de amplitude (m) da série temporal de elevação de nível do mar obtida nas coordenadas $11^{\circ}00'00,00''S$ e $36^{\circ}59'36,00''W$, no período de 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980. Intervalo de amostragem: 1h (DHN).

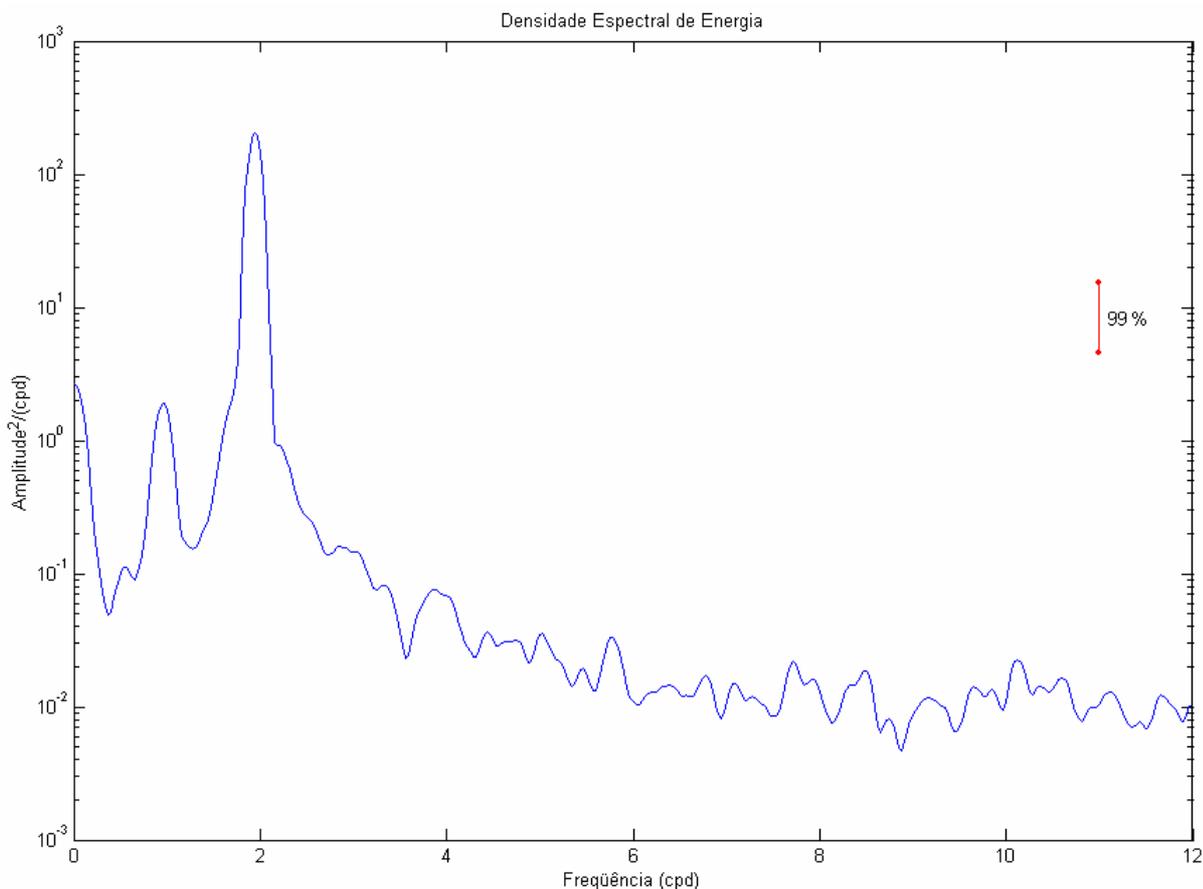


Figura II.3-3 - Espectro de energia da série temporal de elevação de nível do mar obtida nas coordenadas 11°00'00,00"S e 36°59'36,00"W, no período de 15 de novembro a 16 de dezembro de 1980 (DHN).

A tabela II.3-1 apresenta as constantes harmônicas obtidas para a estação maregráfica da DHN, no Terminal Portuário de Sergipe, instalada nas coordenadas 10°50'00,00"S e 36°55'42,00"W, a partir de uma série temporal para o período de 18 de fevereiro a 19 de março de 1991. A maré astronômica na região é predominantemente semidiurna. As principais componentes são M_2 e S_2 , com amplitude de 74,0 e 27,4 cm, respectivamente. A componente N_2 tem amplitude de 14,6 cm e todas as demais componentes apresentam amplitudes inferiores a 7,4 cm. A tabela apresenta ainda os níveis de: média das preamares de sizígia (MPS), média das baixa-mares de sizígia (MBS), média das preamares de quadratura (MPQ) e média das baixa-mares de quadratura (MBQ).

Tabela II.3-1 - Constantes harmônicas de maré calculadas a partir da série temporal de elevação de nível do mar para a estação maregráfica da DHN obtida no Terminal Portuário de Sergipe ($10^{\circ}50'00,00''S$ e $36^{\circ}55'42,00''W$) no período 18 de fevereiro a 19 de março de 1991 (FEMAR, 2000).

| COMPONENTE | AMPLITUDE | FASE |
|-----------------|-----------|------|
| Mm | 3,3 | 200 |
| Msf | 3,1 | 344 |
| Q ₁ | 2,1 | 088 |
| O ₁ | 6,4 | 120 |
| P ₁ | 1,1 | 224 |
| K ₁ | 3,2 | 233 |
| 2N ₂ | 1,9 | 086 |
| N ₂ | 14,6 | 097 |
| NU ₂ | 2,8 | 098 |
| M ₂ | 74,0 | 107 |
| L ₂ | 2,4 | 144 |
| T ₂ | 1,6 | 122 |
| S ₂ | 27,4 | 122 |
| K ₂ | 7,4 | 123 |
| M ₄ | 1,1 | 160 |
| MPS | | 225 |
| MBS | | 22 |
| MPQ | | 170 |
| MBQ | | 77 |
| Nível Médio | | 124 |

II.4 VAZÕES

Os dados de vazão foram obtidos em estações fluviométricas da ANA⁶, para os rios Sergipe, Real, Japarutuba, Piauí, São Francisco, Vaza-Barris e Japa-Mirim (tabela II.4-1). A figura II.4-1 apresenta o ciclo sazonal da vazão desses rios. Para efeito de apresentação a vazão do rio São Francisco está dividida por 100, uma vez que este apresentou valores de vazão significativamente maiores quando comparado com os demais rios. A vazão média para o período amostrado foi de 4,5 m³/s para o Rio Sergipe, 15,2 m³/s para o Rio Real, 3,2 m³/s para o Rio Japarutuba, 5,3 m³/s para o Rio Piauí, 2.396,0 m³/s para o Rio São Francisco, 11,5 m³/s para o Rio Vaza-Barris e 1,7 m³/s para o Rio Japarutuba-Mirim.

⁶ Agência Nacional de Águas.

Tabela II.4-1 - Nome, coordenadas e período dos dados de vazões das estações fluviométricas dos rios Sergipe, Real, Japarutuba, Piauí, São Francisco, Vaza-Barris e Japarutuba-Mirim.

| RIO | ESTAÇÃO | NÚMERO | LATITUDE | LONGITUDE | PERÍODO |
|------------------|-------------------------|----------|------------|------------|-------------|
| Sergipe | Santa Rosa de Lima | 50080000 | 10°39'51"S | 37°11'25"W | 1972 a 1999 |
| Real | Itanhi | 50290000 | 11°32'23"S | 37°11'25"W | 1966 a 2001 |
| Japarutuba | Japarutuba | 50040000 | 10°35'22"S | 36°57'39"W | 1969 a 2001 |
| Piauí | Estância | 50230000 | 11°15'52"S | 37°26'33"W | 1950 a 2001 |
| São Francisco | Própria (PCD INPE) | 49705000 | 10°34'50"S | 36°49'26"W | 1977 a 2002 |
| Vaza-Barris | Fazenda Belém | 50191000 | 10°56'35"S | 37°20'49"W | 1971 a 1999 |
| Japarutuba-Mirim | Fazenda Cajueiro (DNOS) | 50043000 | 10°34'50"S | 36°54'50"W | 1975 a 2001 |

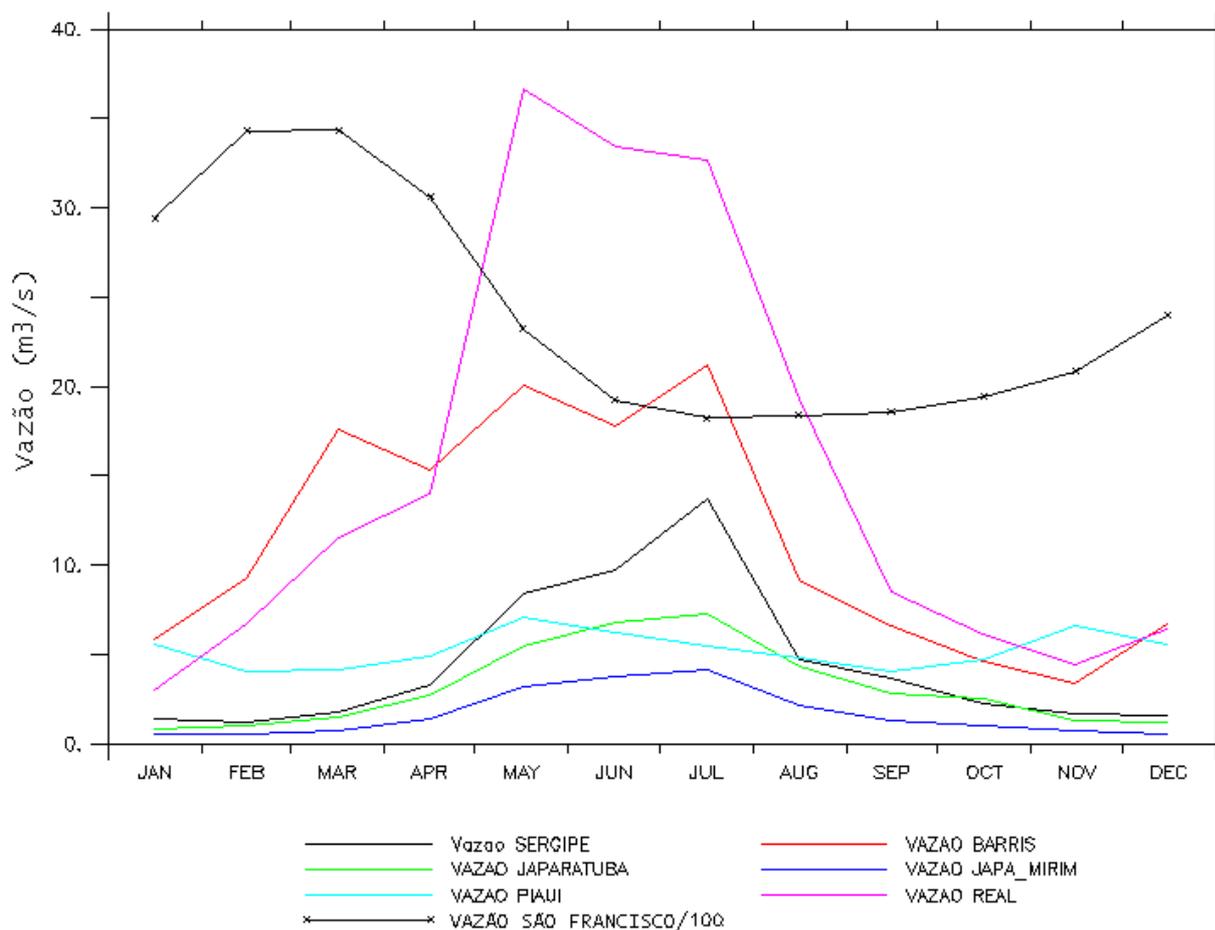


Figura II.4-1 - Vazões médias mensais (m³/s) dos rios Sergipe, Real, Japarutuba, Piauí, São Francisco, Vaza Barris e Japarutuba-Mirim.

II.5 TEMPERATURA E SALINIDADE

Os dados de temperatura e salinidade apresentados a seguir foram obtidos pela DHN, no dia 16 de maio de 1969, nas coordenadas 11°53'30,00"S e 37°01'00,00"W e coletados até a profundidade de 1.270 m.

A figura II.5-1 apresenta os perfis verticais de temperatura e salinidade para o ponto amostrado. O valor de temperatura medido nos primeiros metros da coluna d'água é de, aproximadamente, 27 °C, chegando à cerca de 3 °C no ponto mais profundo (1.270 m). A salinidade nos primeiros 50 m da coluna d'água variou entre 36,5 e 37,0 e, em pontos mais profundos (600 a 1.270 m), em torno de 34,0 e 34,5.

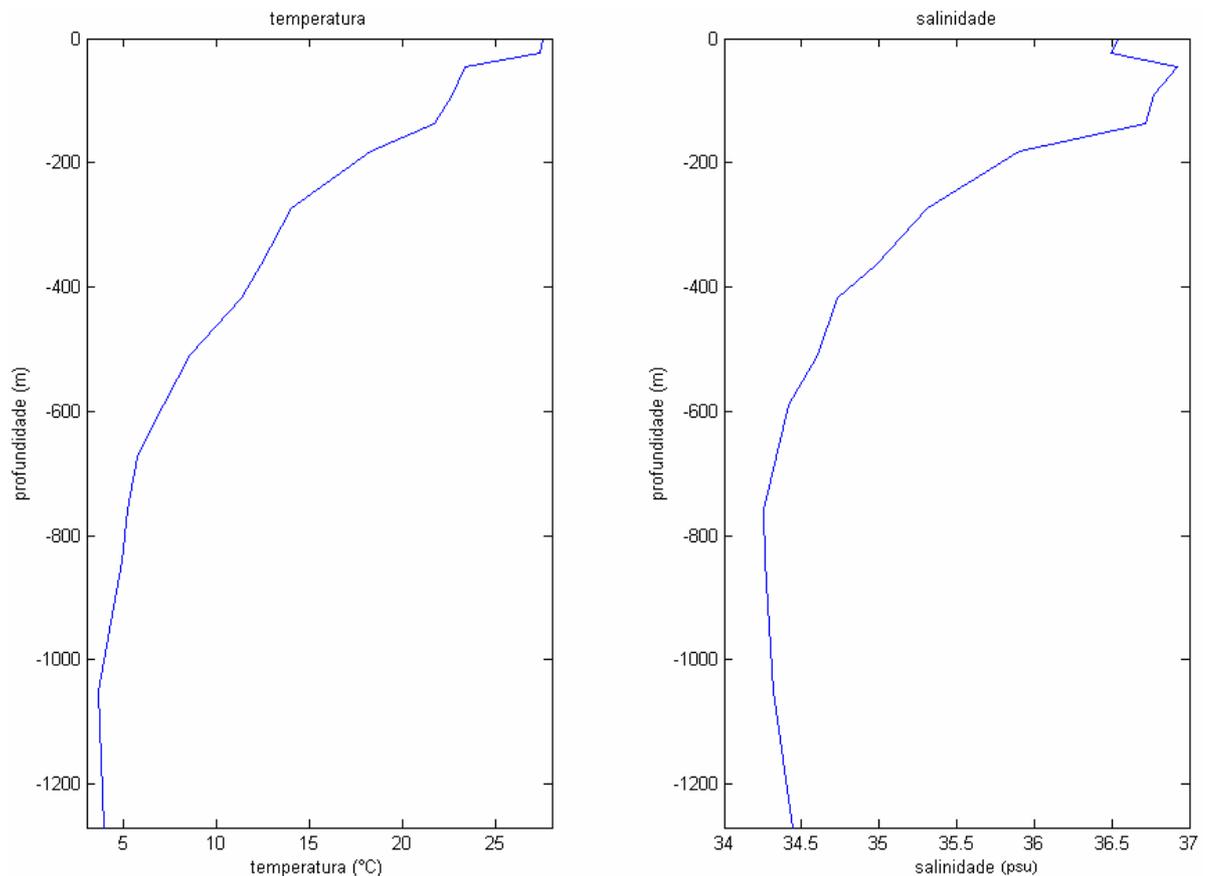


Figura II.5-1 - Perfis verticais de temperatura (°C) e salinidade (psu) para os dados coletados na Região de Produção Oceânica de Sergipe UN-SEAL, coordenadas 11°53'30,00"S e 37°01'00,00"W no dia 16 de maio de 1969 (DHN).

III MODELAGEM HIDRODINÂMICA

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

Para um melhor detalhamento da dinâmica na região, foi utilizado outro modelo mais apropriado às necessidades de resolução dos processos de menor escala. Nesta etapa foi utilizado o modelo hidrodinâmico BFHYDRO componente do WQMAP (*Hydrodynamic and Water Quality Modeling System*) desenvolvido pela **ASA**, com longo histórico de bem sucedidas aplicações em sistemas fluviais, estuarinos e costeiros (ASA, 2003; 2005b; 2006; 2007a,b). O modelo de larga escala (POM) forneceu as condições de contorno para o modelo de menor escala (BFHYDRO).

III.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado foi baseado no POM, desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987), e implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**. O código fonte desse modelo é de domínio público e disponível *on-line*⁷.

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:

⁷ <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>

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

onde

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

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

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

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

III.1.1 Equações Básicas do POM

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

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

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

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

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

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

Conservação de Temperatura Potencial:

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

Conservação de Salinidade:

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

Equação de Estado:

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

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

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

Equação da Turbulência em Macro Escala:

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

sendo,

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

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

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

onde

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

f = parâmetro de Coriolis (s^{-1});

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 ($k=0,4$);
- $F_{q^2, q^2 l}$ = termos horizontais de mistura para q^2 e $q^2 l$.

III.1.2 Condições de Contorno Adotadas

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

Nos contornos artificiais são aplicadas, ao modelo, condições de contorno para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites

oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2D), velocidades do modo interno (3D), temperatura, salinidade, velocidade vertical e energia cinética turbulenta.

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

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

III.2 DESCRIÇÃO DO BFHYDRO

Um dos mais eficientes métodos de modelagem numérica empregando a acomodação de grades numéricas aos contornos terrestres (Swanson *et al.*, 1989; Huang & Spaulding, 1995; Muin & Spaulding, 1997) foi utilizado na simulação do sistema de correntes. A acomodação da grade numérica a linha de costa permite uma apurada representação do corpo d'água em estudo. O sistema usado permite, ainda, o adensamento da grade numérica em regiões de maior interesse. O modelo pode ser aplicado em duas, ou três dimensões, dependendo da complexidade do estudo em questão.

O modelo de acomodação da grade numérica a linha de costa utiliza o acoplamento de um conjunto de equações de transformações quase-elípticas. Este procedimento permite mapear uma região horizontal multi-conectada (espaço físico arbitrário) em uma estrutura de grade regular, também no plano horizontal (Spaulding, 1984). No eixo vertical, o sistema de coordenadas sigma é utilizado. O uso de coordenadas sigma na vertical permite o escalonamento da coluna d'água local, em cada instante, desde a superfície livre até o fundo. O conjunto de equações tridimensionais (conservação de massa e conservação de quantidade de movimento) é resolvido neste "espaço transformado". A solução numérica de tal sistema de equações é feita utilizando um eficiente sistema de

algoritmos. Um sistema de algoritmos semi-implícito para o modo externo (média vertical – bidimensional) e um sistema de algoritmos explícito para a estrutura vertical (modo interno – tridimensional) (Swanson, 1986). Esta metodologia elimina a restrição temporal no eixo vertical.

As equações básicas são escritas em coordenadas esféricas, permitindo assim, uma representação adequada no caso de simulações de grandes regiões. A base do modelo é formada pelas equações de conservação de massa, quantidade de movimento (tridimensional) e termohalino (temperatura e salinidade). O fluido é assumido como sendo incompressível, com as equações hidrodinâmicas sob as aproximações de Boussinesq e hidrostática. O atrito horizontal é negligenciado.

As condições de contorno utilizadas pelo sistema WQMAP/BFHYDRO são:

- as componentes de velocidade normais aos contornos terrestres são nulas;
- a elevação da superfície livre, assim como os fluxos (*inflow*) de temperatura e de salinidade são especificadas nos contornos abertos;
- os fluxos (*outflow*) de temperatura (calor) e de salinidade são advectados para o exterior do domínio do modelo nos contornos abertos;
- a condição de cisalhamento é aplicada no fundo;
- não é permitida a transferência de temperatura (calor) na interface água-contorno terrestre (incluindo o fundo);
- a tensão de cisalhamento do vento e os termos de transferência de calor são aplicados na superfície livre;
- o balanço de calor na superfície inclui todos os mecanismos primários de interação com o ambiente. Estes mecanismos incluem: (a) transferência de calor latente e sensível na interface água-atmosfera, e (b) transferências de calor devido radiação (ondas longas e curtas) na interface água-atmosfera.

O WQMAP fornece ainda uma gama de opções para a especificação do coeficiente vertical de viscosidade, A_v (utilizado nas equações de quantidade de movimento) e do coeficiente vertical de difusividade, D_v (utilizado nas equações termohalinas). A formulação simplificada sugere o uso destes dois coeficientes como sendo constantes ao longo do eixo vertical. Tais coeficientes (A_v e D_v) podem ser, também, usados como uma função do número de Richardson local, o

qual, é uma função do gradiente vertical de densidade e do gradiente vertical da velocidade horizontal. Esta formulação mais complexa adiciona a dependência do comprimento de mistura e da energia turbulenta.

Mantendo o compromisso de acomodação de ajuste da grade aos contornos terrestres, as variáveis dependentes e independentes são então transformadas de coordenadas esféricas para coordenadas curvilíneas. O conjunto de equações governantes (com as variáveis já transformadas) é resolvido pelo modo semi-implícito. As equações de movimento são verticalmente integradas e, através da aplicação da equação de Helmholtz, são redistribuídas à superfície na forma de elevação. Desta técnica decorre a previsão da distribuição espacial da elevação de superfície para cada ponto de grade, para cada passo de tempo.

A média vertical do campo de velocidades é então determinada explicitamente usando a equação do momentum. Esta etapa constitui o modo externo. Os desvios do campo de velocidade, em relação àquele verticalmente homogêneo, são então calculados usando a técnica de tri-diagonalização matricial. Os desvios resultantes são somados ao campo de velocidade verticalmente homogêneo, obtendo o perfil vertical de velocidade para cada ponto de grade (modo interno), gerando assim, o padrão completo do sistema de correntes. Esta metodologia permite a adoção de passos de tempo advectivos, ao invés de passos de tempo relacionados à aceleração da gravidade e/ou velocidade de onda, sendo um procedimento computacionalmente eficiente (Swanson, 1986; Swanson *et al.*, 1989; Muin, 1993).

III.3 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

A grade gerada para a região costeira de Sergipe-Alagoas é um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos hidrodinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

A grade geral implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto de modelagem final e a descrição dos processos hidrodinâmicos necessariamente definidos para a região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário. Uma grade

grade curvilínea, ortogonal (figura III.3-1) e com resolução horizontal variável foi utilizada para a representação discreta do domínio definido para o modelo hidrodinâmico. A grade final gerada para Bacia de Sergipe-Alagoas possui dimensão horizontal máxima de 149x279 e 9 níveis na vertical, com resolução média de 2.000 m, e está representada na figura III.3-1, com detalhe na região do emissário submarino de Atalaia (PAP-1).

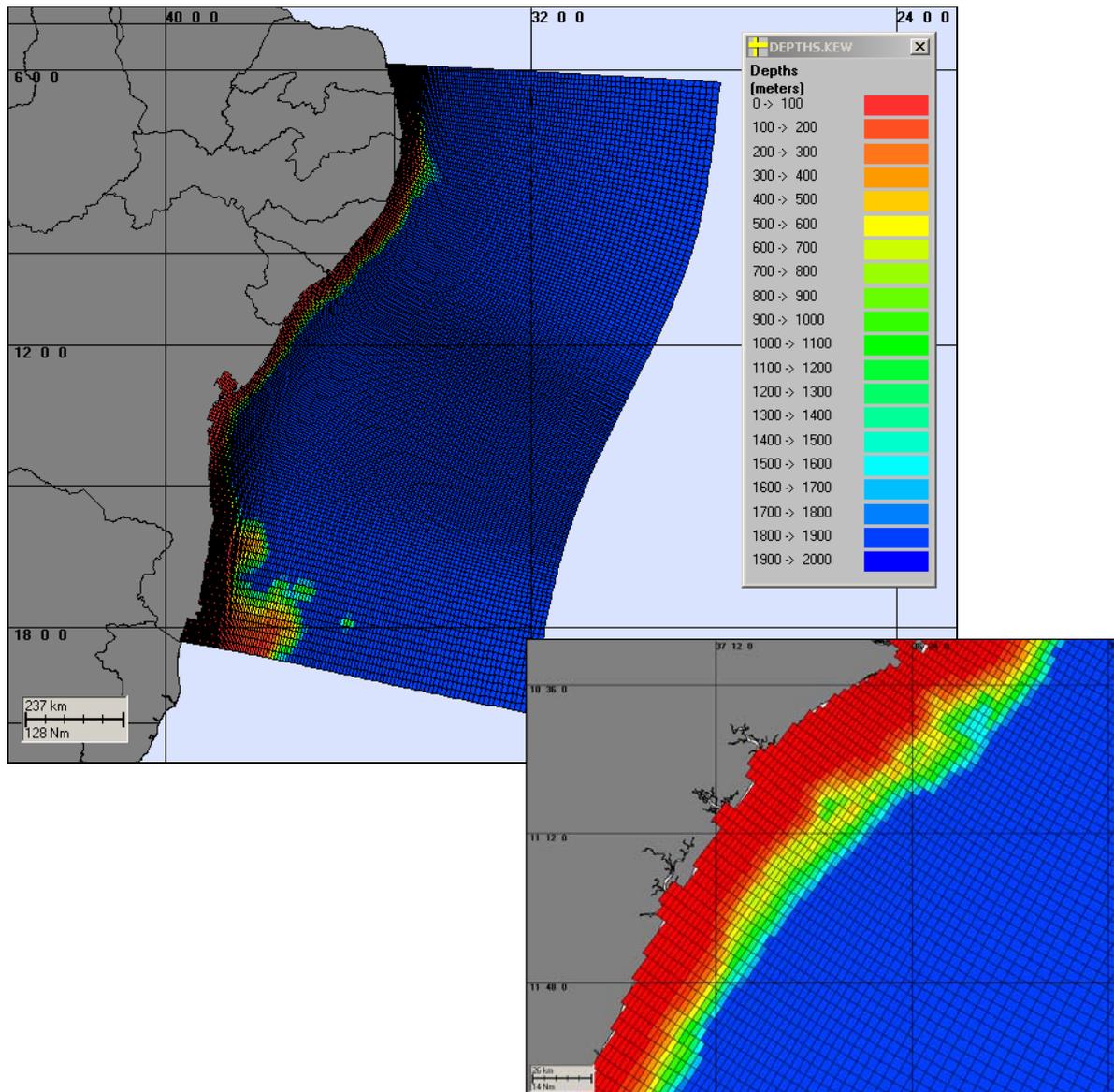


Figura III.3-1 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Sergipe-Alagoas, com detalhe na região do emissário PAP-1.

Os dados de profundidade para a região foram obtidos através da digitalização dos valores batimétricos das cartas náuticas da DHN⁸. Os pontos digitalizados foram extraídos das cartas náuticas números 60 e 1.000, suficientes para a representação da região. O conjunto de dados batimétricos foi interpolado para toda a área com uma resolução horizontal regular de, aproximadamente, 80 m.

Visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa e as camadas de sistemas de informações geográficas (SIG) utilizadas pelo modelo matemático implementado na região, foram utilizadas também informações provenientes de imagens de satélite, complementando a base de dados batimétricos da **ASA SOUTH AMERICA** na área. Os resultados finais da discretização da área, e projeção da batimetria, estão ilustrados na figura III.3-1.

III.4 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de validação fundamenta-se na avaliação do modelo hidrodinâmico quanto à sua capacidade de reprodução da circulação na região em estudo. Neste relatório são apresentadas comparações entre dados e resultados do modelo hidrodinâmico em pontos sobre a plataforma continental, onde predominam os sinais de maré e vento.

III.4.1 Avaliação da Maré

A figura III.4.1-1 apresenta uma comparação entre o resultado do processamento para a variável elevação calculada pelo modelo (vermelho) e a série de maré medida azul. Para ambas as séries foi selecionado um período de 40 horas compreendido entre os dias 9 e 11 de março de 1990. Observa-se nesta figura boa concordância, tanto na amplitude quanto na fase, entre os resultados obtidos com o modelo e os valores medidos de maré. O coeficiente de comparação obtido nesta comparação foi de 13,8%.

⁸ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha

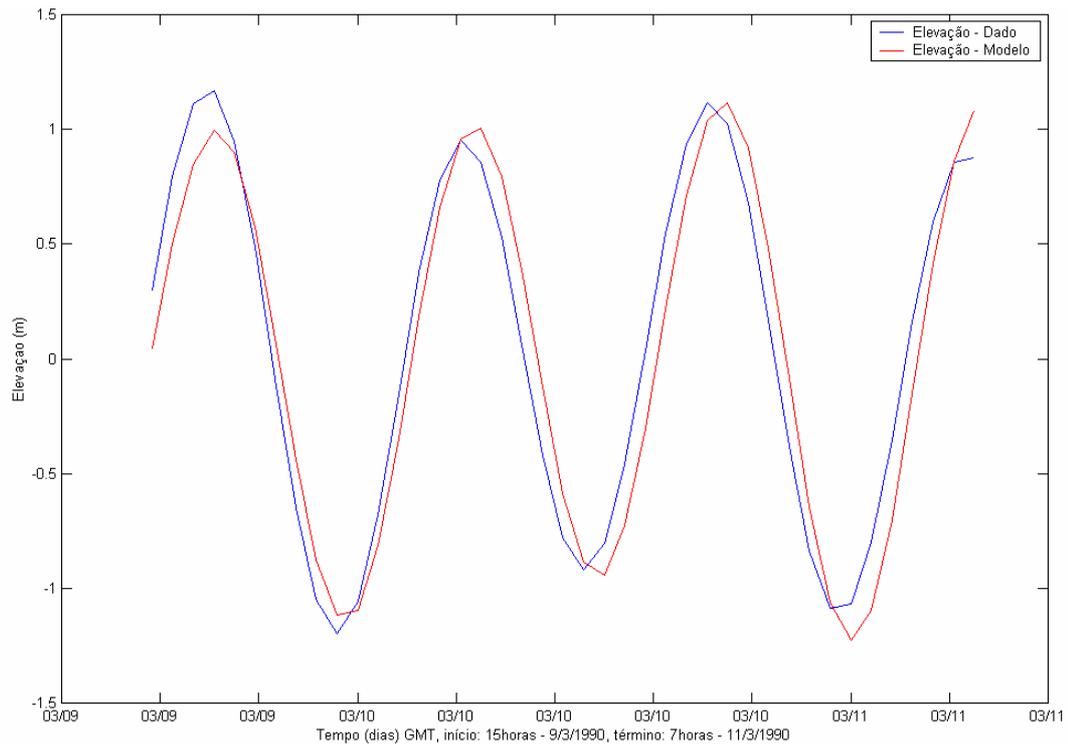


Figura III.4.1-1 - Série temporal de maré medida (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.

O coeficiente de comparação (ou erro percentual) utilizado (tanto para elevação quanto para corrente) é dado pela razão entre o desvio médio (*DM*) do erro e o dobro do desvio médio do dado (no caso, a série de maré medida):

$$\frac{DM(\text{erro})}{2 \times DM(\text{dado})} \quad (\text{III.4.1-1})$$

Aos dados de nível foi aplicado um filtro passa baixa, de forma a reduzir as variações de alta frequência (*i.e.* menores que 8 ciclos por dia), de difícil reprodução no modelo. Estas componentes de alta frequência têm características apenas perturbatórias, já que a maior parte da energia se concentra na componente semidiurna da maré.

III.4.2 Avaliação das Correntes

Foi selecionado um período de 40 horas compreendido entre os dias 9 e 11 de março de 1990, onde foram comparadas separadamente as componentes u (EW) e v (NS) dos dados coletados com a saída do modelo.

No caso da componente u , os dados medidos foram recompostos através de análise espectral utilizando-se o Método de Schuremann (Schuremann, 1941). Nesta recomposição foram utilizadas 30 componentes harmônicas. Com as estimativas das amplitudes e fases destas componentes, foram feitas previsões harmônicas para as séries temporais das componentes da velocidade, para o período correspondente à coleta de dados.

A figura III.4.2-1 apresenta a comparação entre o resultado do processamento para a série medida da componente u (azul) e o resultado do modelo (vermelho). O erro percentual obtido nesta comparação foi de 21,6%.

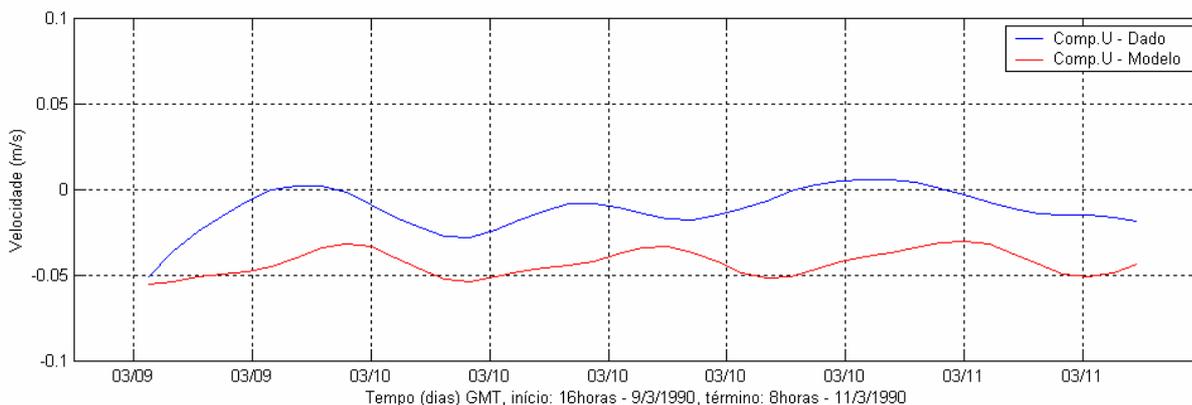


Figura III.4.2-1 - Série temporal da componente u da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.

A figura III.4.2-2 apresenta para a componente v , o mesmo tipo de comparação apresentado na figura III.4.2-1. Observa-se nesta, boa concordância tanto na amplitude quanto na fase, entre os resultados obtidos com o modelo e os valores coletados originais. O erro percentual obtido nesta comparação foi de 24,8%.

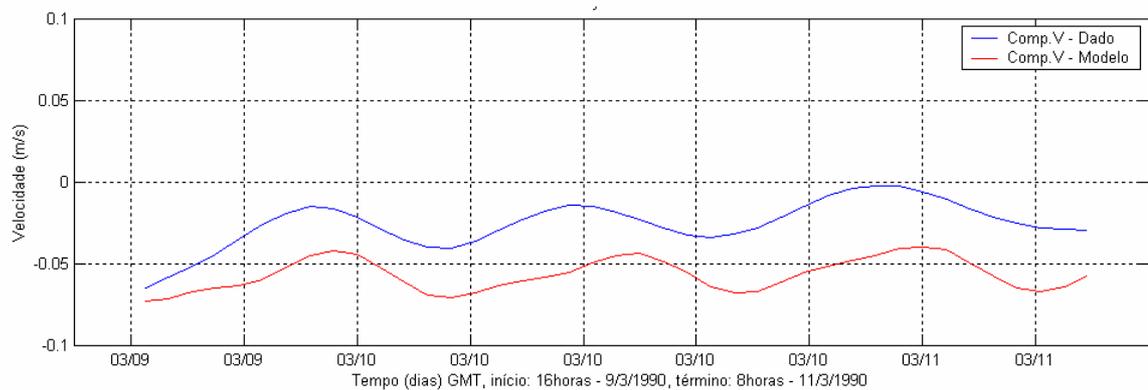


Figura III.4.2-2 - Série temporal da componente v da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.

IV CARACTERÍSTICAS DO DESCARTE E DA ÁGUA PRODUZIDA

Na tabela IV-1 são apresentadas as características do descarte de efluente de água produzida descartado a partir do emissário submarino de Atalaia (PAP-1). Este sistema possui uma extensão de, aproximadamente, 2 km em cuja extremidade final está localizado o difusor, com 8" de diâmetro. O efluente é descartado a 1,3 m acima do fundo, com uma vazão de 183 m³/h. Considerou-se como descarga do efluente um valor estimado a partir das informações fornecidas pela PETROBRAS, para os anos de 2002 e 2003. A tabela IV-2 apresenta as características desta água produzida.

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

| PARÂMETROS PARA MODELAGEM DA PLUMA | |
|--|-------------------------------|
| Posição do ponto de descarte | 11°1'10,00"S e 37°2'25,00"W |
| Comprimento do sistema | 2 km |
| Profundidade local no ponto de descarte* | ≈ 7m |
| Diâmetro da Tubulação | 8" |
| Orientação da Tubulação | Vertical |
| Profundidade de Descarte | 1,3 m acima do leito oceânico |
| Vazão do efluente | 183 m ³ /h |

Fonte: PETROBRAS.

Tabela IV-2 - Características da água produzida.

| PARÂMETROS PARA MODELAGEM DA ÁGUA PRODUZIDA | |
|---|-------------------------|
| Temperatura do efluente | 39 °C |
| Densidade do Efluente | 1.020 kg/m ³ |

Fonte: PETROBRAS.

Para avaliação da diluição da água produzida descartada a partir do emissário PAP-1, foram considerados os parâmetros orgânicos e inorgânicos. Como critério ambiental na determinação da zona de mistura do efluente (*i.e.*, região na qual as concentrações calculadas estão acima do critério adotado), foram utilizadas as concentrações correspondentes da Resolução do CONAMA

de nº 357/05, referentes à tabela IV do Art. 18 para Águas Salinas de Classe 1 (Brasil, 2005) e à Concentração de Efeito Não Observado (CENO).

A CENO referente à água produzida descartada a partir do emissário PAP-1, foi obtida em testes de toxicidade crônica (com o equinodermo *Lytechinus variegatus*). A tabela IV-3 apresenta o valor de CENO e seu fator de diluição para a água produzida descartada a partir deste emissário. A concentração ficou definida como a concentração na água produzida diluída pelo fator de diluição da CENO apresentada nesta tabela.

Tabela IV-3 - Resultado do teste de toxicidade com o equinodermo *Lytechinus variegatus* realizado com amostra da água produzida descartada a partir do emissário PAP-1.

| Efluente | CENO* | |
|----------------|-------|-------------------|
| | % | FATOR DE DILUIÇÃO |
| Água Produzida | 0,1 | 1:1.000 |

* Concentração de Efeito Não Observado

Fonte: PETROBRAS

A composição e as concentrações do efluente fornecidas pela PETROBRAS, além das concentrações da legislação referentes aos parâmetros observados na água produzida do emissário PAP-1 são apresentadas na tabela IV-4.

Ressalta-se que este estudo, é uma revisão da modelagem realizada para o efluente deste emissário (ASA, 2005a), uma vez que as concentrações dos parâmetros constituintes do efluente foram alteradas.

Dessa forma, como critério ambiental, neste relatório foram utilizadas as concentrações existentes na legislação e a CENO referente à água produzida descartada a partir do emissário PAP-1.

Uma vez que a CENO diz respeito à água produzida descartada a partir do emissário PAP-1, e não a um parâmetro específico presente neste efluente, o fator de diluição referente à CENO foi considerado somente na determinação dos contornos de diluição do efluente total (Item VII.2), simulado com um composto conservativo. Dessa forma, para os parâmetros apresentados neste estudo foram considerados apenas os limites estabelecidos na legislação (Item VII.2).

Tabela IV-4 - Composição e concentrações limite da legislação para a água produzida descartada a partir do emissário PAP-1.

| COMPONENTES | | CONCENTRAÇÃO (µg/L) PONTO DE LANÇAMENTO | CONCENTRAÇÃO (µg/L) CONAMA 357/05 |
|------------------------|-------------|---|--------------------------------------|
| ORGÂNICOS | | | |
| BTEX | Benzeno | 675,0 | 700,0 |
| | Tolueno | 702,0 | 215,0 |
| | Etilbenzeno | 25,9 | 25,0 |
| | m+p-Xilenos | 171,0 | - |
| | o-Xileno | 76,0 | - |
| HPA's | Naftaleno | 36,1 | - |
| | Fluoreno | 0,415 | - |
| | Fenantreno | 0,518 | - |
| Fenóis Totais | | 1.230,0 | 60,0 |
| Carbono Orgânico Total | | 486,0 | 3.000,0 |
| Teor de óleos e graxas | | 13.100,0 | "Virtualmente ausente" |
| INORGÂNICOS | | | |
| Arsênio | | 5,0 | 10,0 |
| Bário | | 160.500,0 | 1.000,0 |
| Boro | | 14.300,0 | 5.000,0 |
| Cádmio | | 100,0 | 5,0 |
| Chumbo | | 200,0 | 10,0 |
| Cianetos | | 10,0 | 1,0 |
| Cobre | | 170,0 | 5,0 |
| Cromo | | 180,0 | 50,0 |
| Estanho | | 2.000,0 | - |
| Ferro | | 65.470,0 | 300,0 |
| Fluoreto | | 250,0 | 1.400,0 |
| Manganês | | 15.250,0 | 100,0 |
| Mercúrio | | 5,0 | 0,2 |
| Níquel | | 100,0 | 25,0 |
| Nitrogênio Amoniacal | | 126.000,0 | 400,0 |
| Prata | | 210,0 | 5,0 |
| Selênio | | 5,0 | 10,0 |
| Sulfeto | | 3.200,0 | 2,0 |
| Zinco | | 190,0 | 90,0 |

Fonte: PETROBRAS.

V MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO

A modelagem do transporte da pluma de efluentes compreende a modelagem de dois domínios conhecidos por campo próximo e do campo afastado. O campo próximo corresponde à zona de diluição inicial onde prevalecem os efeitos oriundos da velocidade inicial de ejeção (quantidade de movimento inicial do jato) e a diferença de densidade entre o efluente e o meio. Por campo afastado entende-se a região onde passam a predominar os efeitos da dinâmica local na diluição da pluma. À medida que o efluente se afasta do ponto de lançamento diminuem os efeitos associados à velocidade inicial de ejeção e passam a predominar os efeitos associados à velocidade do ambiente. A região onde ocorre a transição entre estes dois efeitos define os limites entre estes domínios.

V.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CORMIX

O modelo CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*), da Cornell University, foi utilizado para simular o campo próximo do lançamento da água produzida descartada pelo emissário submarino de Atalaia (PAP-1). O CORMIX é um sistema de modelos computacionais desenvolvido para a análise, previsão e planejamento do lançamento de efluentes em diferentes corpos d'água (Jirka *et al.*, 1996). A ênfase do sistema se dá na previsão da geometria e das características de diluição da zona de mistura inicial, permitindo que valores aceitáveis de qualidade de água sejam calculados e discutidos.

O CORMIX é composto por três sub-sistemas:

- (a) CORMIX1, utilizado para a análise de lançamentos pontuais abaixo da superfície (*submerged single port discharges*);
- (b) CORMIX2, para a análise de múltiplos lançamentos pontuais (difusores) abaixo da superfície (*submerged multiport diffuser discharges*); e
- (c) CORMIX3, para a análise de lançamentos superficiais (*buoyant surface discharges*) de efluentes cuja densidade seja menor do que a do corpo receptor.

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

V.1.1 Descrição das Simulações de Campo Próximo

O modelo CORMIX requer três tipos de parâmetros de entrada:

- Os parâmetros ambientais, os quais descrevem as condições meteorológicas e oceanográficas esperadas para o local, podendo estes ser obtidos a partir de dados históricos ou a partir de resultados de modelagem;
- As características do efluente, os quais descrevem os parâmetros como a vazão e a densidade do efluente descartado;
- As características da descarga, descrevendo a geometria do sistema através do qual é realizado o descarte.

As características do emissário PAP-1 e de seu efluente foram descritas no Capítulo IV. As condições ambientais, por sua vez, incluem as informações de densidade, de velocidade da corrente e de velocidade do vento.

Os valores de corrente, utilizados nestas simulações, foram obtidos a partir do modelo hidrodinâmico implementado na região (Capítulo III). As informações do campo termohalino utilizadas no CORMIX foram apresentadas no Capítulo II.

Considerando a simplificação quanto às correntes assumida pelo CORMIX (*i.e.* intensidade e direção de correntes constante), o campo de velocidades das correntes nas imediações do sistema difusor de cada emissário foi analisado, e estimou-se a função densidade de probabilidade para as correntes, para os períodos estudados. A partir da função densidade de probabilidade foram calculados os percentis de 10, 50 e 95% dos valores observados no modelo

hidrodinâmico utilizado. O valor do percentil de 10% foi utilizado com base nas exigências para avaliação de plumas de efluentes da EPA⁹ dos EUA (Brandsma, 2004), de forma a fornecer a mínima diluição inicial, enquanto os demais percentis são representativos dos valores extremos e médios de velocidade.

Salienta-se que a metodologia descrita acima é uma modificação da utilizada em ASA (2005a), e representa uma melhoria na forma de calcular a diluição no campo próximo, desenvolvida pela ASA nos últimos 3 anos.

A tabela V.1.1-1 apresenta os dados de entrada adotados nas simulações de verão e inverno com o modelo CORMIX1.

Tabela V.1.1-1 - Dados de entrada adotados no CORMIX1.

| PARÂMETROS | | DADOS DE ENTRADA | | |
|--|--|------------------|--------------|-------|
| | | VERÃO | INVERNO | |
| Ambiente | Profundidade média (m) | 7 | 7 | |
| | Profundidade de descarte (m) | 7 | 7 | |
| | Velocidade ambiente (percentis - m/s) | 10% | 0,100 | 0,113 |
| | | 50% | 0,140 | 0,152 |
| | | 95% | 0,183 | 0,190 |
| | Coeficiente de Manning | 0,02 | 0,02 | |
| | Velocidade do vento (m/s) | 4 | 4 | |
| Densidade ambiente uniforme (kg/m ³) | 1.023,9 | 1.023,9 | | |
| Efluente | Vazão (m ³ /s) | 0,0508 | 0,0508 | |
| | Densidade do efluente (kg/m ³) | 1.020,0 | 1.020,0 | |
| | Tipo de poluente | conservativo | conservativo | |
| Descarte | A margem mais próxima está a | esquerda | esquerda | |
| | Distância até a margem mais próxima (m) | 2.760 | 2.760 | |
| | Diâmetro da porta (m) | 0,2032 | 0,2032 | |
| | Altura da porta (m) | 1,3 | 1,3 | |
| | Ângulo vertical THETA | 90° | 90° | |
| Zona de Mistura | Região de interesse (m) | 5.000 | 5.000 | |
| | Intervalos para apresentação de resultados | 10 | 10 | |

⁹ Environmental Protection Agency.

VI MODELAGEM DA DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO

Na modelagem do campo afastado foi utilizado o modelo CHEMMAP (*Chemical Model Application Package*), desenvolvido pela **ASA**, para previsão da trajetória e transformações biogeoquímicas 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, com um histórico de bem sucedidas aplicações em sistemas fluviais, estuarinos e costeiros (ASA, 2008a,b), é um sistema de modelos que pode ser utilizado em Análises de Riscos, Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Relatório de Controle Ambiental (RCA), e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) decorrentes de derrames acidentais de produtos químicos, do descarte de efluentes, e do descarte de água de produção associado às operações de óleo e gás (French, 2001; French *et al.*, 2002) em qualquer região do mundo.

VI.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CHEMMAP

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

atribuídos dados em formato de texto, valores numéricos ou arquivos a partir de *links* externos.

O sistema CHEMMAP inclui os seguintes modelos: um modelo tridimensional de deriva e intemperismo, um modelo de impactos biológicos e um modelo probabilístico.

Para a elaboração de cenários de deriva deve ser definido um conjunto de duas grades computacionais, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo. Uma das grades, compreendendo apenas a região de água, define o campo de circulação, podendo neste caso ser baseada em resultados de um modelo hidrodinâmico implementado na região de estudo. A outra grade pode ser 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 disso, o banco de dados inclui características que definem as misturas e as soluções.

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

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

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

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

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

Utilizando-se o CHEMMAP no modo probabilístico é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de comportamento da

pluma são realizadas através de variadas condições meteorológicas e oceanográficas dentro do período de disposição de dados ambientais. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar estocasticamente.

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

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

VI.1.1 *Formulação do Modelo*

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

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

onde

Δt = passo de tempo (s);

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

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

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

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

As velocidades difusivas são movimentos de subescala que não são explicitamente simulados pelo transporte da corrente ou pelo empuxo. A magnitude das componentes de D_t são proporcionais aos coeficientes de dispersão vertical e horizontal (Okubo, 1971) através da formulação *random walk* (Bear & Verruijt, 1987). Valores típicos de coeficientes de dispersão horizontal encontram-se dentro da faixa de 0,1 m²/s, em águas estuarinas, a valores maiores ou iguais a 10 m²/s em regiões oceânicas. O coeficiente de dispersão vertical, baseado em Thorpe (1984), é considerado em função da velocidade do vento na camada de mistura de onda, aproximadamente, 1,5 vezes a altura da onda. Esta, por sua vez, é calculada através do algoritmo de CERC (1984). Em águas profundas, valores típicos para o coeficiente de dispersão vertical são da ordem de 0,0001 m²/s, ou ainda menores.

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

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

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

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

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

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

onde

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

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

C_w = fator de deriva (%).

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

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

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

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

onde

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

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

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);
- K₁ = taxa de espalhamento constante (s⁻¹);
- V = volume da superfície da mancha (m³);
- t = tempo (s).

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

A taxa de mudança da área superficial de uma única partícula, \vec{A}_{tk} (m²/s), é dada por:

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

onde

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

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

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

R_s = raio de uma partícula (m);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

onde

i = i -ésima componente;

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

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

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

C_i^s = solubilidade do produto puro da componente i (mols/cm³);

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

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

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

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

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

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, op. cit.). O coeficiente de transferência de dissolução da massa, $K_{d_{ss}}$ (m/s), é definido por:

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

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 (velocidade vertical) é de aproximadamente 3 m/dia na água do mar (densidade de 1,024 g/cm^3) e águas calmas.

Assume-se que a 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 fluando 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 ($8,206 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$);
- T = temperatura (K).

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

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

onde

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

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

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

onde

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

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

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

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

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

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

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:

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

onde

Dz = taxa de mistura vertical;

L = comprimento de mistura;

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

Esta pode ser aproximada como:

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

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

onde

bs = tensão do fundo;

ρ_{ar} = densidade do ar (g/cm^3).

Em resumo:

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

onde

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

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

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

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

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

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

VI.2 DADOS DE ENTRADA

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

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

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

VI.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações para a determinação da diluição da pluma de água produzida, descartada a partir do emissário submarino de Atalaia (PAP-1), no campo afastado foram realizadas utilizando-se o modelo CHEMMAP no modo probabilístico. Como neste modo é considerada a variabilidade das forçantes ambientais, as simulações de comportamento da pluma são realizadas através da variação das condições meteorológicas e oceanográficas, divididas em duas condições principais correspondendo aos períodos de verão (janeiro a março) e inverno (julho a setembro). O campo hidrodinâmico de cada período, utilizado para as simulações do comportamento da pluma foram obtidos a partir do modelo hidrodinâmico apresentado no Capítulo III, e os dados de vento utilizados foram apresentados no Capítulo II.

Para incorporar essas variabilidades, cada cenário probabilístico foi composto por duas séries de 20 simulações com o modelo CHEMMAP, com duração de 168 horas (sete dias, como solicitado pela PETROBRAS), divididas em dois períodos: verão e inverno.

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

Nas simulações do descarte água produzida a partir do emissário PAP-1, considerou-se um composto conservativo para a representação do mesmo, uma vez que este sofre apenas os processos físicos da diluição, sem sofrer os efeitos dos processos bioquímicos.

Adicionalmente, foram considerados os parâmetros presentes no efluente do PAP-1. Para as simulações estes foram agrupados em parâmetros orgânicos e inorgânicos. Dentre os orgânicos verificam-se hidrocarbonetos aromáticos voláteis (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos – BTEX) e semivoláteis (naftaleno, fluoreno e fenantreno – HPAs¹⁰), fenóis totais, teor de óleos e graxas e carbono orgânico total. Dentre os inorgânicos: arsênio, bário, boro, cádmio, cianetos, chumbo, cobre, cromo, estanho, ferro, fluoreto, manganês, mercúrio, níquel, nitrogênio amoniacal, prata, selênio, sulfetos e zinco.

Destes agrupamentos, foram selecionados para as simulações os que apresentaram maiores concentrações no efluente e que não atingiram o critério ambiental dentro do campo próximo. São eles: o tolueno (como representativo do BTEX) e naftaleno (como representativo dos HPAs), além do bário, ferro, fenóis totais, teor de óleos e graxas, carbono orgânico total, cianetos, fluoreto, nitrogênio amoniacal e sulfetos.

Nas simulações probabilísticas, para a determinação da área de influência do descarte de água produzida a partir do emissário PAP-1, as múltiplas trajetórias das plumas foram utilizadas para a produção de curvas de contorno para as máximas concentrações esperadas do efluente em cada ponto de grade e ao longo da coluna d'água. Ou seja, ao final de cada uma das simulações, registra-se o máximo valor de concentração na coluna d'água para cada ponto de grade ao longo do período simulado, e ao final de todas as 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.

No caso específico das simulações com o conservativo (efluente total), ao final das 20 simulações, as máximas concentrações foram convertidas para valores de diluição do efluente a partir do ponto de lançamento.

Na apresentação dos resultados, os contornos das plumas de água produzida estendem-se até uma diluição 2.000 vezes inferior à concentração de lançamento. Esse corte foi escolhido para melhorar a visualização das plumas de probabilidade na área do empreendimento.

¹⁰ Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

VII RESULTADOS FINAIS DA MODELAGEM DE DESCARTE DE ÁGUA PRODUZIDA

A seguir, são apresentados os resultados das simulações de campo próximo e campo afastado para a água produzida descartada a partir do emissário submarino de Atalaia (PAP-1).

VII.1 RESULTADOS DA DILUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO

As simulações de campo próximo, realizadas para os diferentes percentis de velocidade da corrente, permitiram a determinação das condições médias do lançamento de efluente do emissário PAP-1. Ressalta-se que os resultados relativos ao diâmetro e profundidade terminal da pluma do efluente foram utilizados como dados de entrada das simulações de campo afastado no CHEMMAP.

A tabela VII.1-1 apresenta os resultados médios das simulações de verão e inverno no campo próximo. Observa-se que, ao final do campo próximo, o efluente possui uma diluição média maior no período de inverno (26 vezes) do que no período de verão (24 vezes).

Tabela VII.1-1 - Resultados das simulações do campo próximo do descarte de água produzida a partir do emissário PAP-1.

| PARÂMETROS | VALORES | |
|------------------------------------|---------|---------|
| | VERÃO | INVERNO |
| Diluição | 23,5 | 25,8 |
| Espessura da pluma (m) | 2,0 | 2,1 |
| Comprimento do campo próximo (m) | 5,1 | 5,7 |
| Profundidade terminal da pluma (m) | 1,0 | 1,0 |

A figura VII.1-1 e a figura VII.1-2 apresentam os resultados médios das diluições e profundidades, respectivamente, da pluma de água produzida descartada a partir do emissário PAP-1, em relação às distâncias do ponto de lançamento, baseado nos resultados do campo próximo calculado para os períodos de verão e inverno. Observa-se que a diluição aumenta à medida que a pluma/jato se afasta do ponto de lançamento. A profundidade mínima, e terminal,

que a pluma atinge é de, aproximadamente, 1 m para ambos os períodos, a cerca de 3 a 4 m do ponto de descarte.

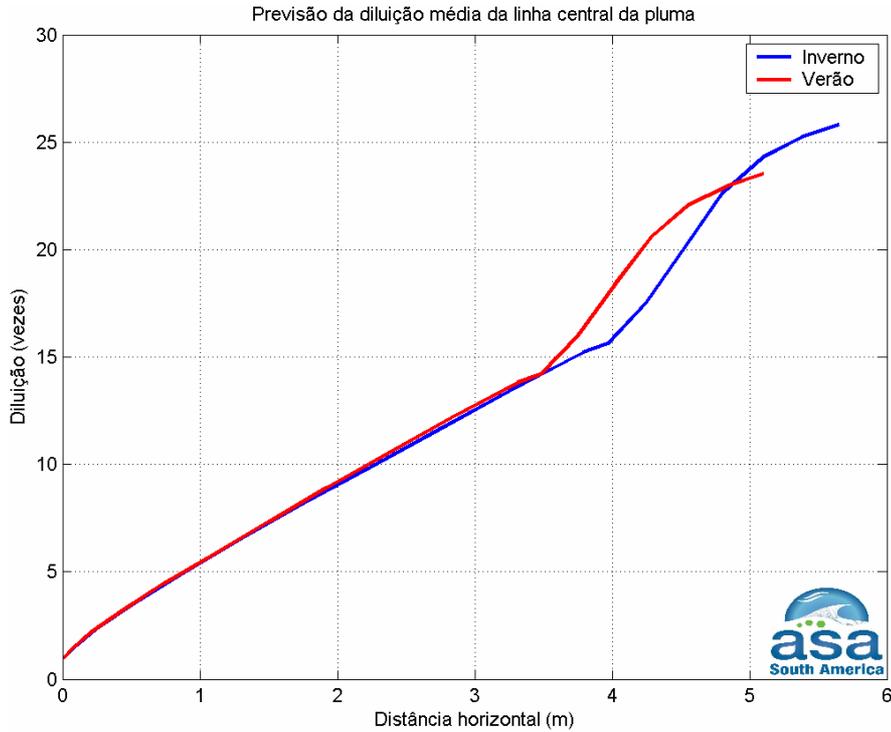


Figura VII.1-1 - Fatores de diluição (vezes) em função da distância do ponto de descarte.

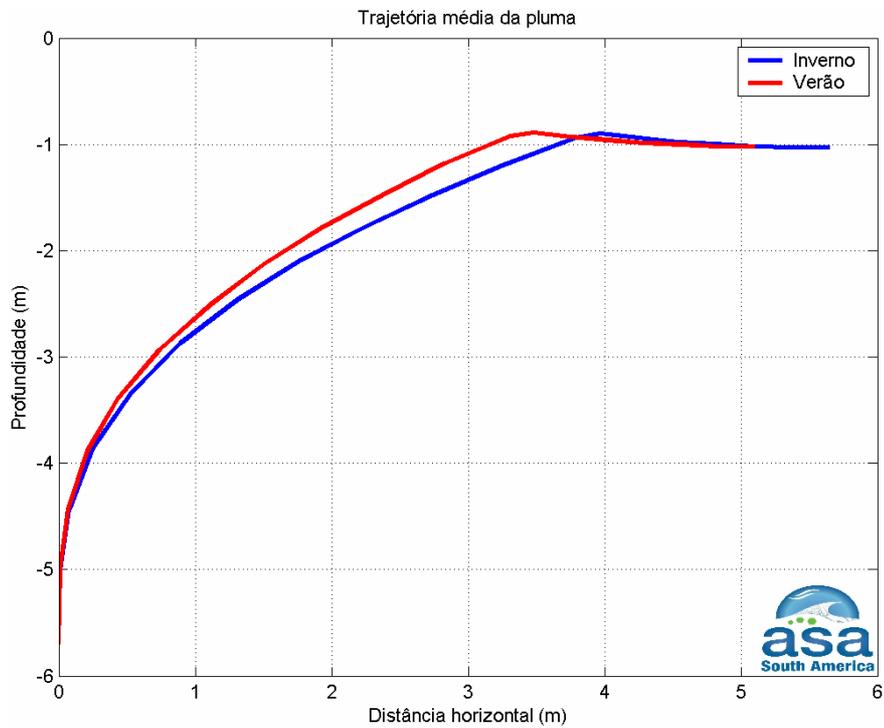


Figura VII.1-2 - Profundidade da linha central da pluma de efluentes em função da distância do ponto de descarte.

Conforme se observa, estes valores de diluição não são suficientes para que o efluente alcance a diluição correspondente à diluição da CENO dentro dos limites do campo próximo.

A tabela VII.1-2 apresenta as concentrações iniciais dos componentes presentes na água produzida, as concentrações limite da legislação e as concentrações correspondentes à diluição no final do campo próximo.

Para alguns dos parâmetros considerados neste estudo (*i.e.* estanho, naftaleno, fluoreno, fenantreno, xileno e teor de óleos e graxas) não são estabelecidos limites na legislação. Para o estanho e o xileno foram considerados os valores de REL/PEL¹¹ estabelecidos pelos órgãos OSHA e NIOSH¹² de 2 mg/L (NIOSH, 2004) e 100 mg/L (NIOSH, 2002a,b,c), respectivamente.

Para o naftaleno, fluoreno e fenantreno, foram considerados os padrões de qualidade de água para a proteção da vida aquática estabelecidos pelo CCME¹³ (1999). Dessa forma, os limites para estes parâmetros ficaram definidos como 1,1 µg/L para o naftaleno, 3 µg/L para o fluoreno e 0,4 µg/L para o fenantreno.

Para o teor de óleos e graxas (TOG) a legislação não estabelece um valor limite específico, apenas que este parâmetro deve estar “virtualmente ausente” no corpo d’água. Para tornar este limite subjetivo em um critério ambiental passível de estudo, foram consideradas como “virtualmente ausente” as concentrações inferiores a 1 mg/L, baseado nos limites de detecção das metodologias analíticas para a determinação do TOG (ASA, 2007c).

¹¹ *Recommended Exposure Limit e Permissible Exposure Limit.*

¹² *Occupational Safety & Health Administration* (<http://www.osha.gov/>) e *National Institute for Occupational Safety and Health* (<http://www.cdc.gov/niosh/>) dos Estados Unidos.

¹³ *Canadian Council of Ministers of the Environment.*

Tabela VII.1-2 - Concentrações dos compostos simulados no ponto de lançamento, concentrações limite da legislação e valores correspondentes à diluição no campo próximo para o emissário PAP-1.

| PARÂMETRO | CONCENTRAÇÃO NO PONTO DE LANÇAMENTO (µg/L) | LIMITE RESOLUÇÃO CONAMA 357/05 ART. 18 (µg/L) | CONCENTRAÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO (µg/L) | |
|------------------------|---|--|---|----------|
| | | | VERÃO | INVERNO |
| ORGÂNICOS | | | | |
| Benzeno | 675,00 | 700,00 | 32,77 | 37,50 |
| Tolueno | 702,00 | 215,00 | 34,08 | 39,00 |
| Etilbenzeno | 25,90 | 25,00 | 1,26 | 1,44 |
| m,p-Xilenos | 171,00 | 100.000,00* | 8,30 | 9,50 |
| o-Xileno | 76,00 | 100.000,00* | 3,69 | 4,22 |
| Fenóis totais | 1.230,00 | 60,00 | 52,34 | 47,67 |
| Naftaleno | 36,10 | 1,10 ^x | 1,75 | 2,01 |
| Fluoreno | 0,415 | 3,00 ^x | 0,02 | 0,02 |
| Fenantreno | 0,518 | 0,40 ^x | 0,03 | 0,03 |
| Teor de óleos e graxas | 13.100,00 | 1.000,00 ⁺ | 635,92 | 727,78 |
| Carbono Orgânico Total | 486,00 | 3.000,00 | 23,59 | 27,00 |
| INORGÂNICOS | | | | |
| Arsênio | 5,00 | 10,00 | 0,24 | 0,28 |
| Bário | 160.500,00 | 1.000,00 | 7.791,26 | 8.916,67 |
| Boro | 14.300,00 | 5.000,00 | 694,17 | 794,44 |
| Cádmio | 100,00 | 5,00 | 4,85 | 5,56 |
| Chumbo | 200,00 | 10,00 | 9,71 | 11,11 |
| Cianetos | 10,0 | 1,0 | 0,49 | 0,56 |
| Cobre | 170,00 | 5,00 | 8,25 | 9,44 |
| Cromo | 180,00 | 50,00 | 8,74 | 10,00 |
| Estanho | 2.000,00 | 2.000,00* | 97,09 | 111,11 |
| Ferro | 65.470,00 | 300,00 | 3.178,16 | 3.637,22 |
| Fluoreto | 250,0 | 1.400,0 | 12,14 | 13,89 |
| Manganês | 15.250,00 | 100,00 | 740,29 | 847,20 |
| Merúrio | 5,00 | 0,20 | 0,24 | 0,28 |
| Níquel | 100,00 | 25,00 | 4,85 | 5,56 |
| Nitrogênio amoniacal | 126.000,00 | 400,00 | 6.116,50 | 7.000,00 |
| Prata | 210,00 | 5,00 | 10,19 | 11,67 |
| Selênio | 5,00 | 10,00 | 0,24 | 0,28 |
| Sulfetos | 3.200,00 | 2,00 | 155,34 | 177,78 |
| Zinco | 190,00 | 90,00 | 9,22 | 10,56 |

* Padrões estabelecidos pelo OSHA e NIOSH.

^x Padrões estabelecidos pelo CCME.

⁺ "Virtualmente ausente": para efeitos de estudo considerou-se o limite de detecção dos métodos analíticos para a determinação do TOG.

Conforme se observa na tabela VII.1-2, a diluição inicial no campo próximo é suficiente para que os seguintes parâmetros atinjam as concentrações limites do critério ambiental adotado:

- Orgânicos: benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, fenóis totais, fluoreno, fenantreno, carbono orgânico total e teor de óleos e graxas;
- Inorgânicos: arsênio, boro, cádmio, chumbo, cianeto, cromo, estanho, fluoreto, níquel, selênio e zinco.

Dos parâmetros previamente selecionados no Subitem VI.3.1 (maiores concentrações no efluente), a diluição inicial no campo próximo, não é suficiente para que os seguintes parâmetros atinjam as concentrações limites utilizadas neste estudo, sendo selecionados portanto, para as simulações de campo afastado:

- Orgânicos: naftaleno;
- Inorgânicos: bário, ferro, nitrogênio amoniacal e sulfetos.

VII.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

A seguir, são apresentadas as curvas de contorno das plumas para os valores de diluição do efluente de água produzida descartada a partir do emissário PAP-1. Os contornos das plumas estendem-se até uma diluição 2.000 vezes inferior à concentração de lançamento.

Ressalta-se que a área ilustrada nas figuras representa a média das mínimas diluições obtidas em todas as 20 simulações, e não corresponde à posição da pluma em um determinado instante de tempo. São apresentadas ainda, tabelas com os valores das diluições mínimas obtidas para essas simulações, às distâncias de 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento. Adicionalmente, nas mesmas figuras a zona de mistura, correspondente à diluição média de 1.000 vezes a concentração de lançamento (referente à CENO deste efluente), é representada em vermelho.

A tabela VII.2-1, a seguir, apresenta as diluições médias obtidas para o efluente de água produzida, durante os períodos de verão e inverno, a 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento. A distância de 500 m foi escolhida por corresponder à zona de mistura estabelecida na Resolução da CONAMA de

nº 393/07 (Brasil, 2007). Observa-se que, em média, a diluição aumenta à medida que a pluma se afasta do ponto de lançamento.

Tabela VII.2-1 - Diluições médias obtidas para o efluente descartado a partir do emissário PAP-1 à 100, 250 e 500 m do ponto de lançamento, nos períodos de verão e inverno.

| COMPONENTES | DILUIÇÃO (vezes) A 100 m | | DILUIÇÃO (vezes) A 250 m | | DILUIÇÃO (vezes) A 500 m | |
|----------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO |
| Água Produzida | 209 | 225 | 592 | 600 | 1.072 | 906 |

A figura VII.2-1 e a figura VII.2-2 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para a água produzida, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Observa-se que a zona de mistura possui cerca de 426 m no período de verão e 595 m no de inverno.

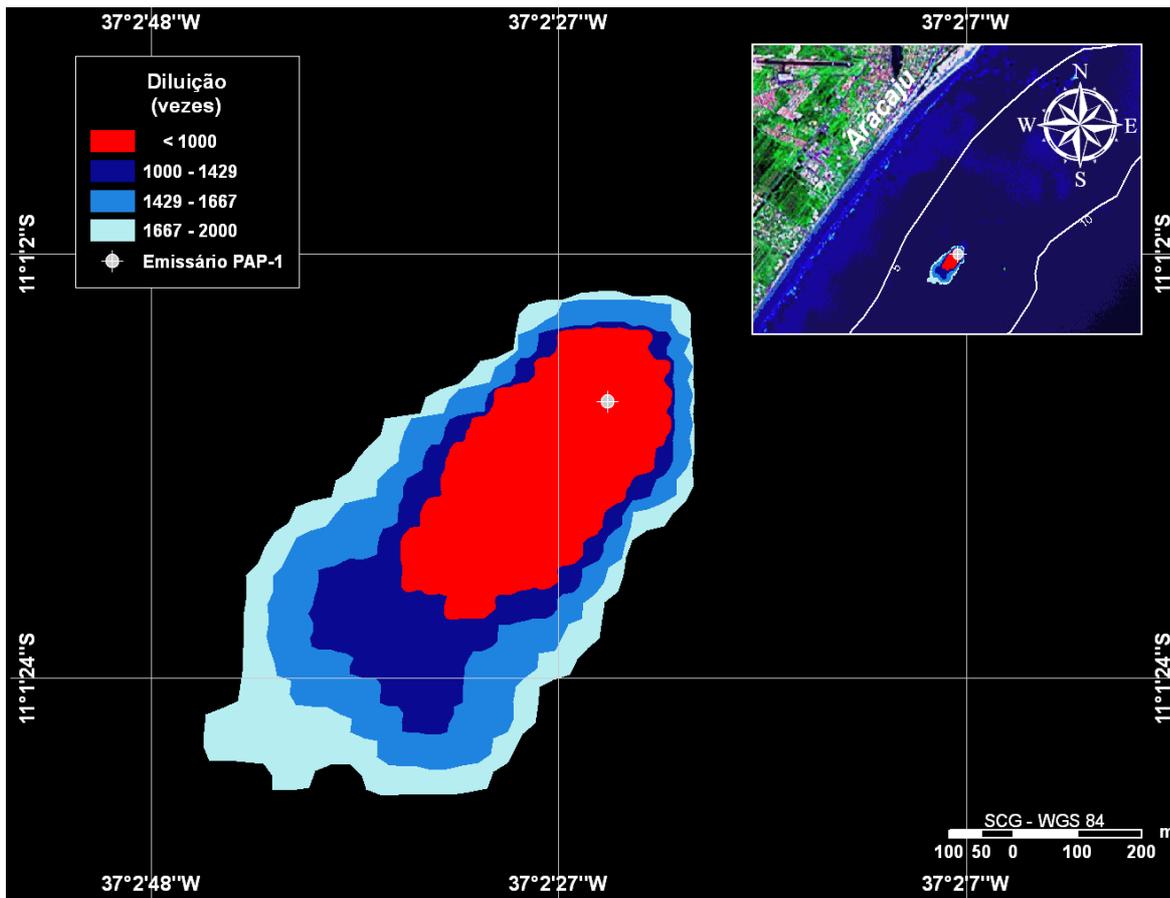


Figura VII.2-1 - Diluições médias calculadas para a pluma da água produzida, simulada no período de verão, após 168 horas.

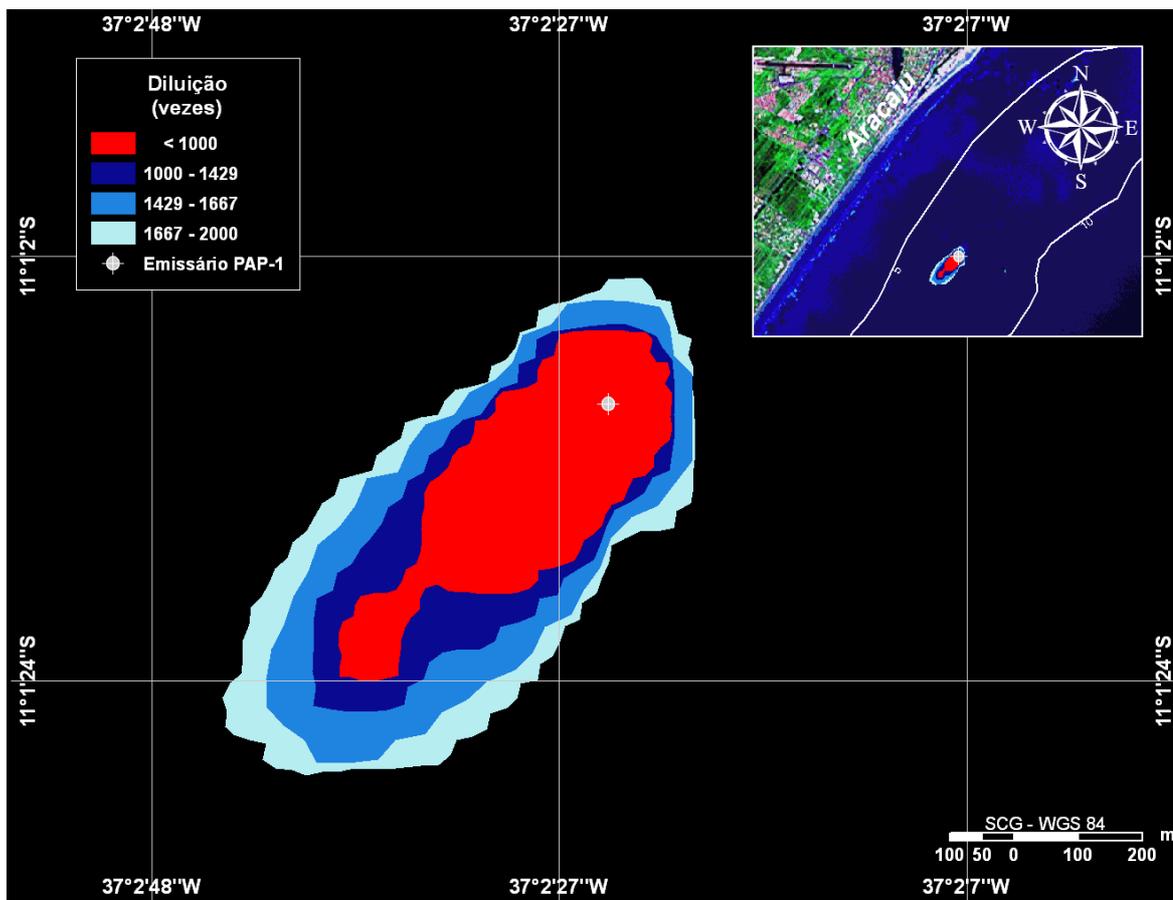


Figura VII.2-2 - Diluições médias calculadas para a pluma da água produzida, simulada no período de inverno, após 168 horas.

A seguir, são apresentadas as curvas de contorno das plumas para os valores de concentração dos parâmetros descartados a partir do emissário PAP-1, selecionados para simulação de campo afastado. Os contornos das plumas estendem-se até uma concentração correspondente à uma diluição 2.000 vezes inferior à concentração de lançamento.

Ressalta-se que a área ilustrada nas figuras representa a média das máximas concentrações obtidas em todas as 20 simulações, e não corresponde à posição da pluma em um determinado instante de tempo. Adicionalmente, nas mesmas figuras a zona de mistura, correspondente à concentração limite da legislação, é representada em vermelho.

A figura VII.2-3 e a figura VII.2-4 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para o naftaleno, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. A zona de mistura calculada foi de, aproximadamente, 48 m em ambos os períodos simulados.

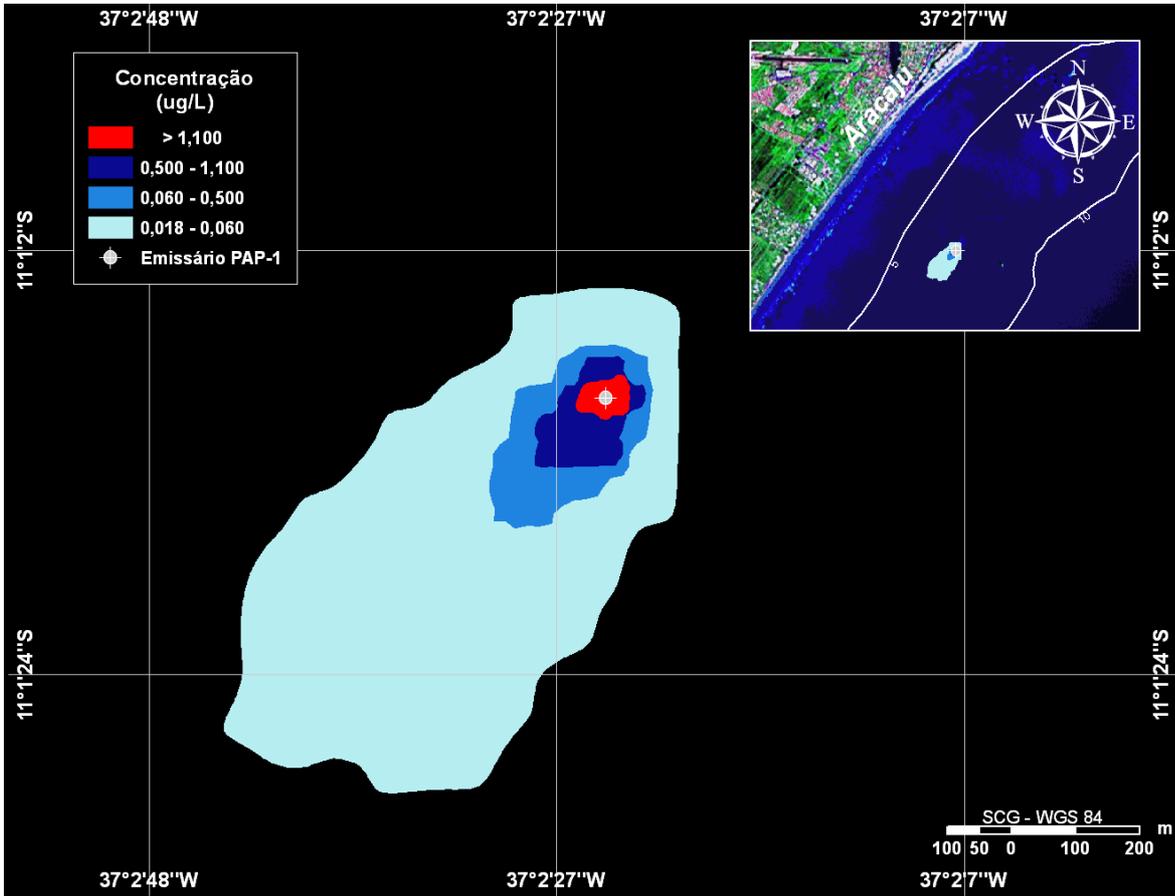


Figura VII.2-3 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de naftaleno, simulada no período de verão, após 168 horas.

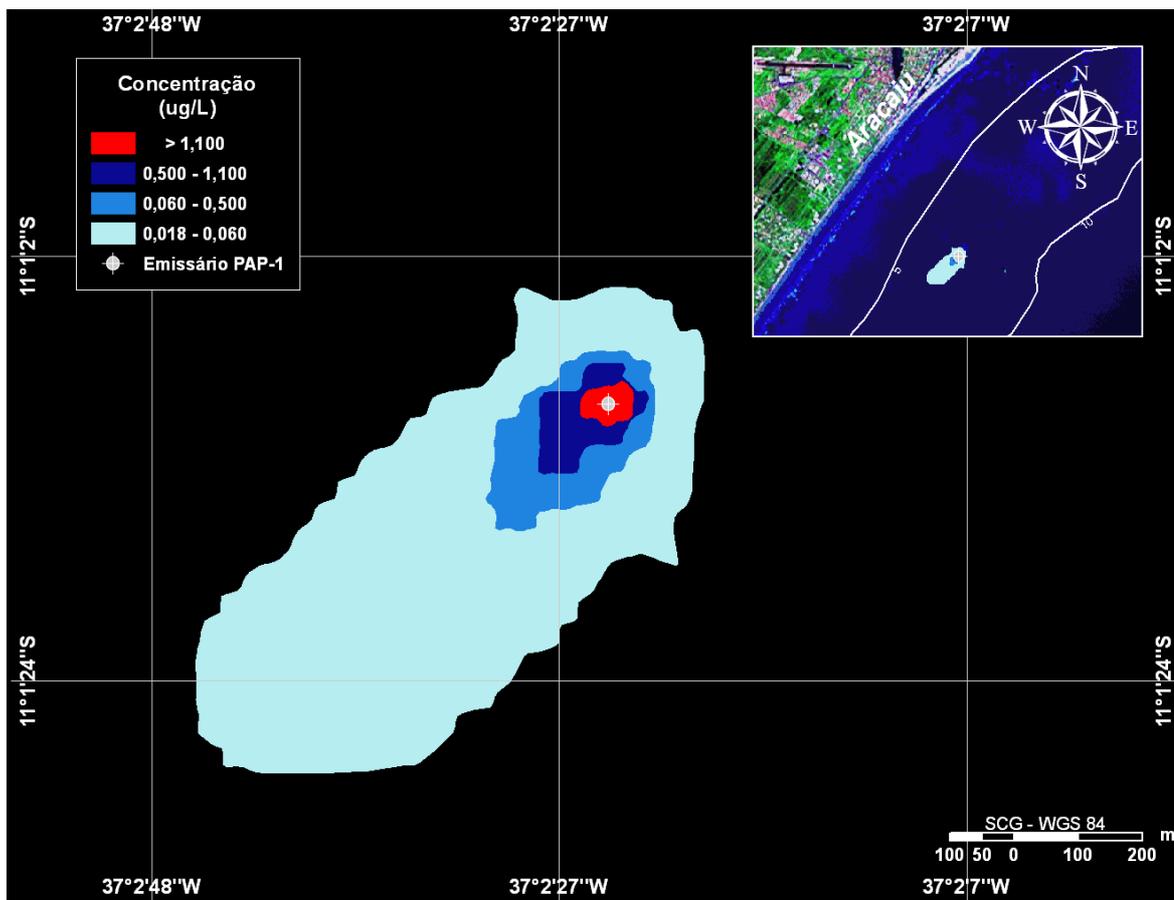


Figura VII.2-4 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de naftaleno, simulada no período de inverno, após 168 horas.

A figura VII.2-5 e a figura VII.2-6 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para o bário, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Nestes períodos a zona de mistura foi de 48 m e 47 m, respectivamente.

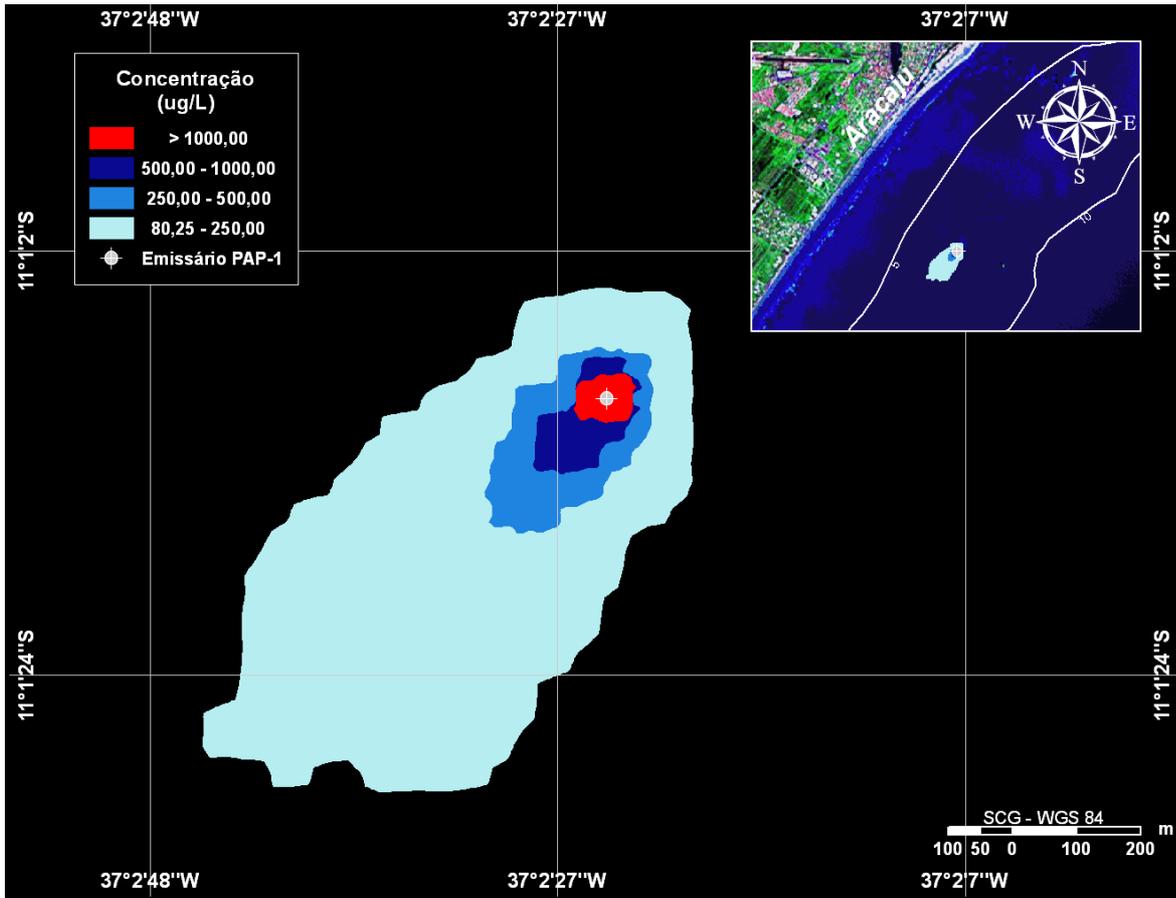


Figura VII.2-5 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de bário, simulada no período de verão, após 168 horas.

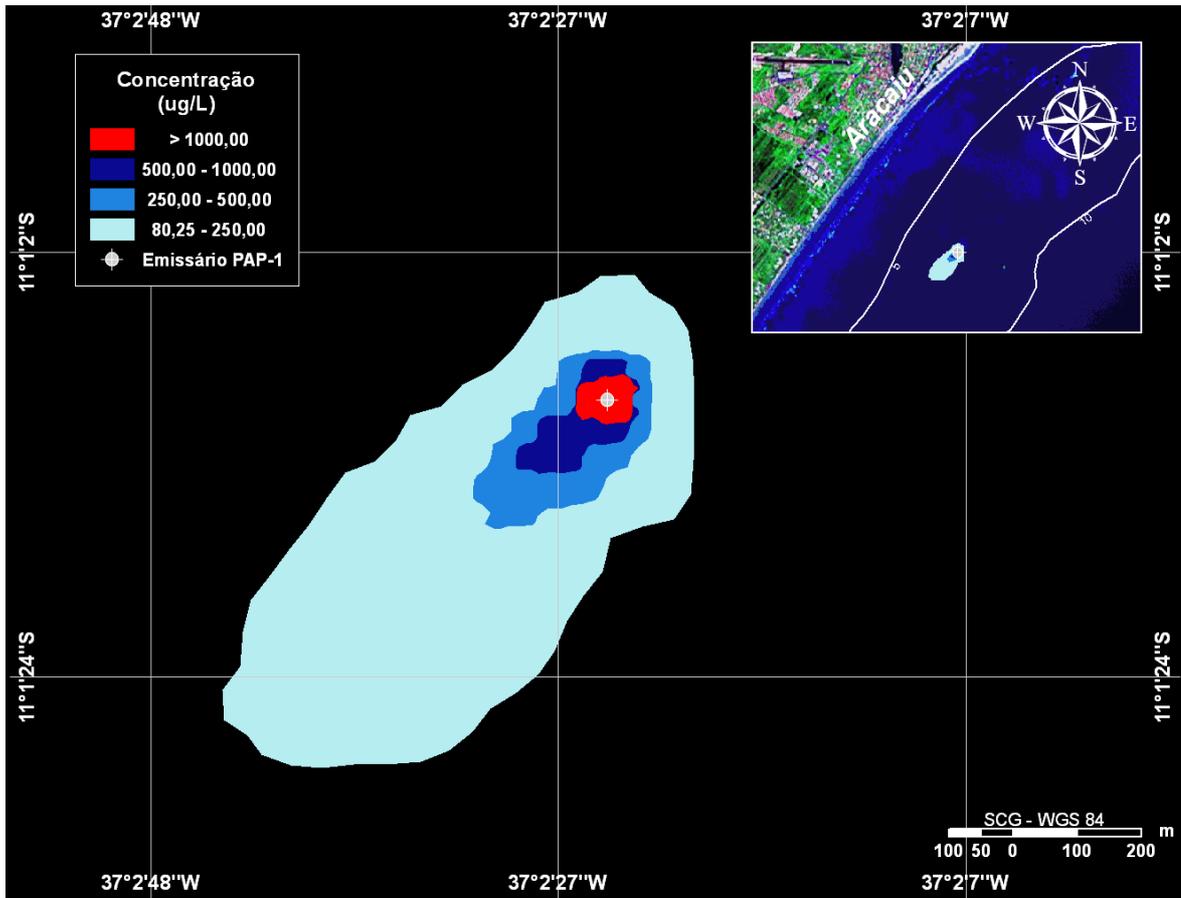


Figura VII.2-6 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de bário, simulada no período de inverno, após 168 horas.

A figura VII.2-7 e a figura VII.2-8 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para o ferro, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Nestes períodos a zona de mistura foi de 151 m e 69 m, respectivamente.

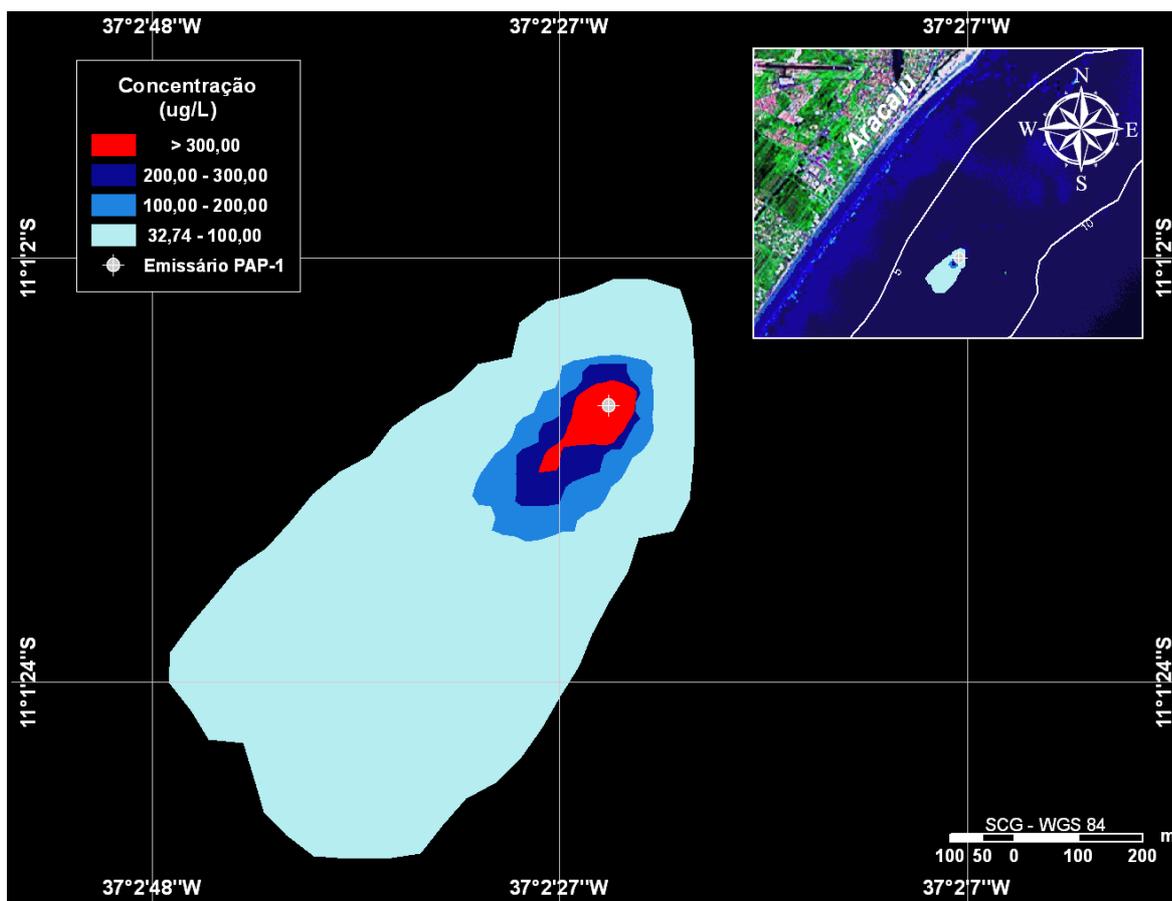


Figura VII.2-7 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de ferro, simulada no período de verão, após 168 horas.

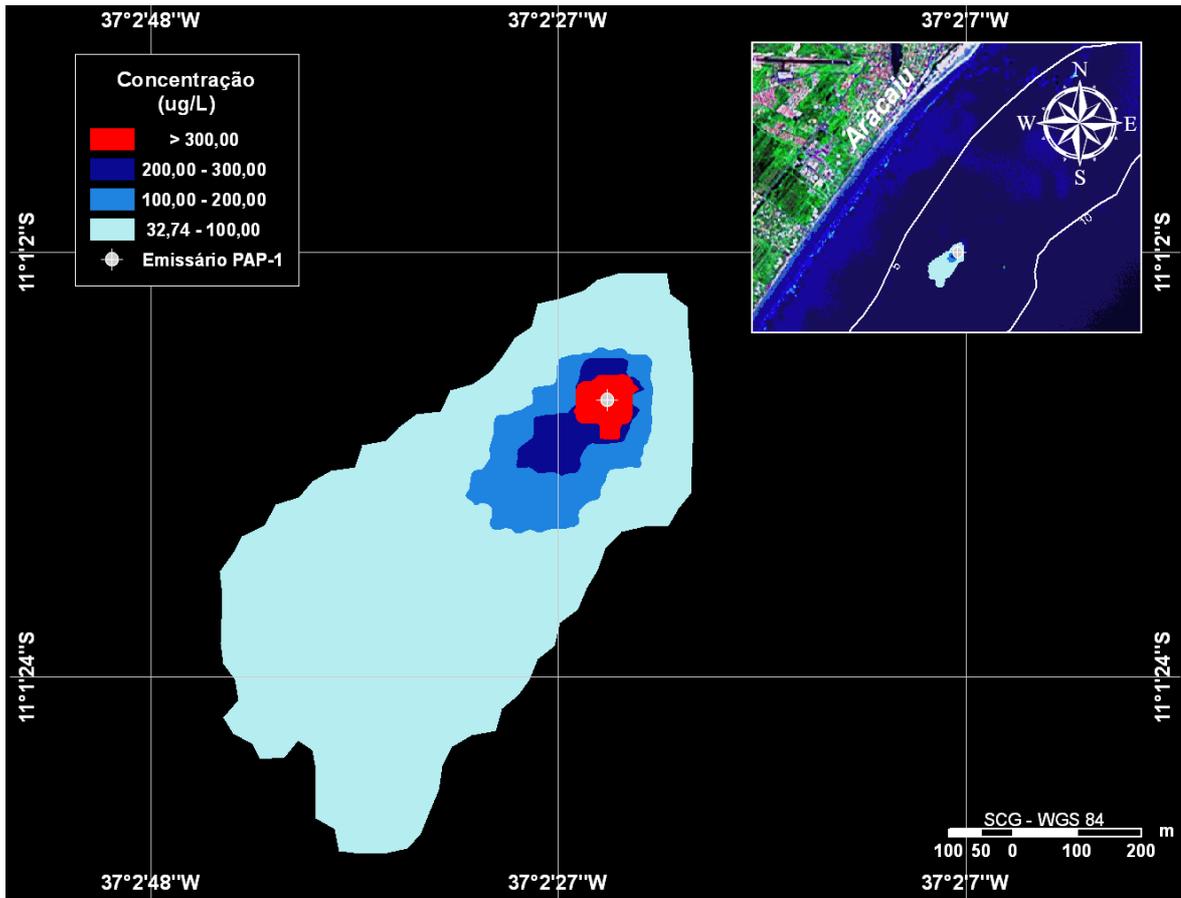


Figura VII.2-8 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de ferro, simulada no período de inverno, após 168 horas.

A figura VII.2-9 e a figura VII.2-10 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para o nitrogênio amoniacal, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Nestes períodos a zona de mistura foi de 151 m e 176 m, respectivamente.

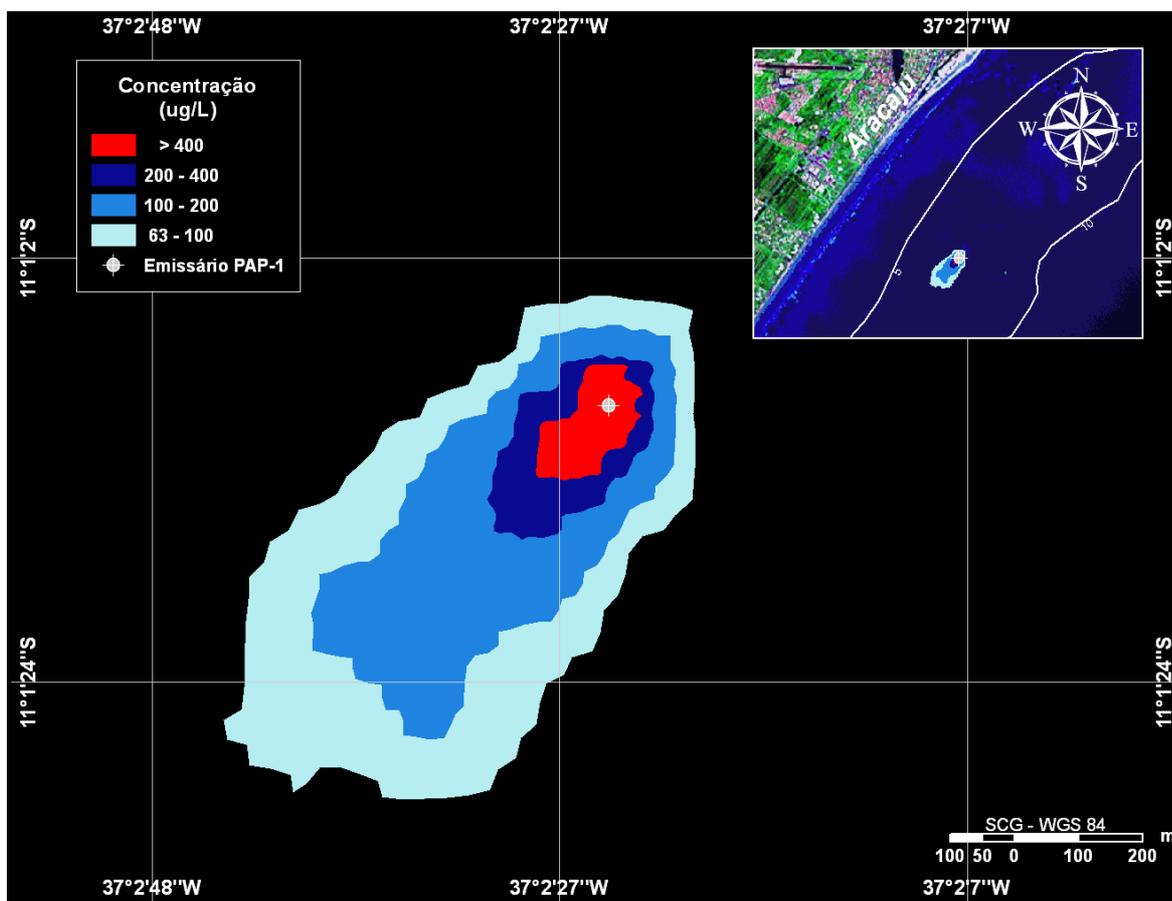


Figura VII.2-9 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de nitrogênio amoniacal, simulada no período de verão, após 168 horas.

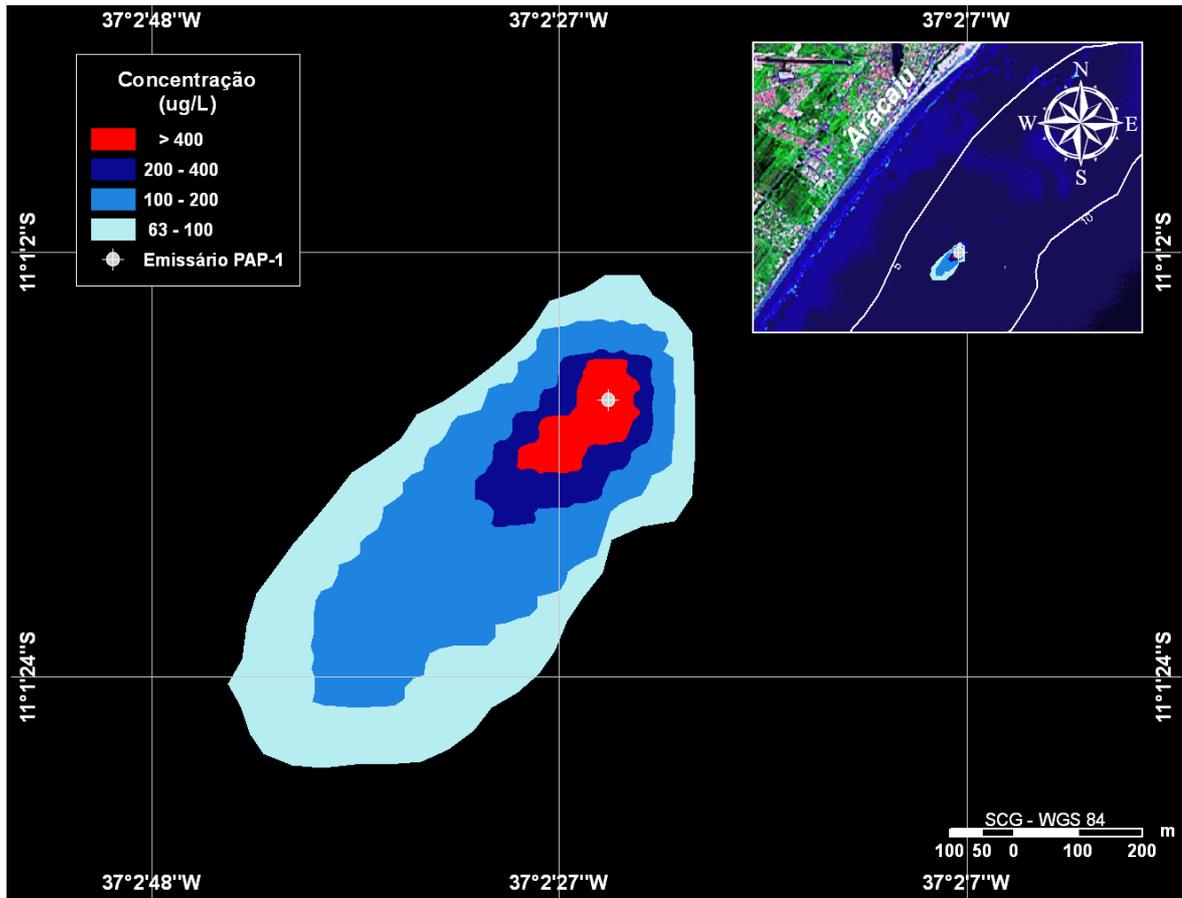


Figura VII.2-10 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de nitrogênio amoniacal, simulada no período de inverno, após 168 horas.

A figura VII.2-11 e a figura VII.2-12 apresentam os contornos de diluição das simulações probabilísticas para os sulfetos, nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Nestes períodos a zona de mistura foi de 838 m e 807 m, respectivamente.

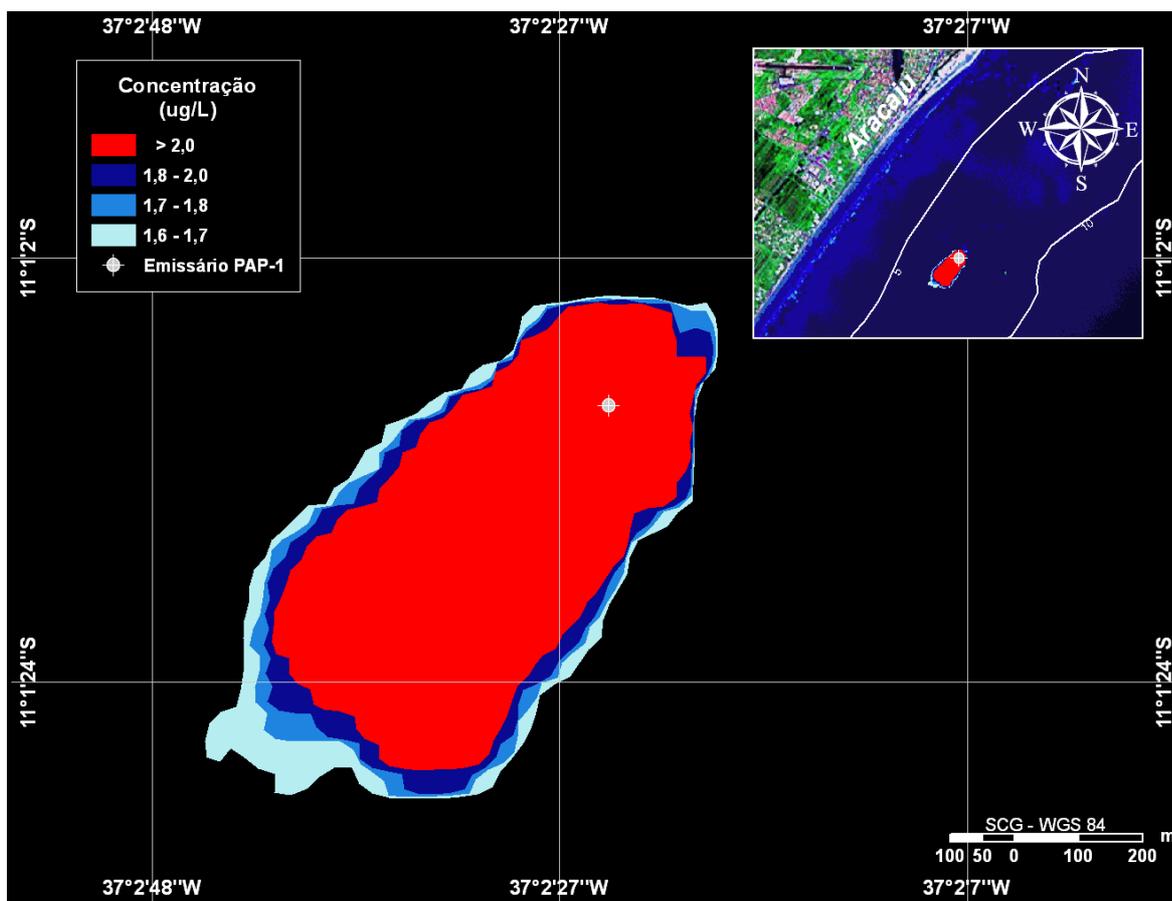


Figura VII.2-11 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de sulfetos, simulada no período de verão, após 168 horas.

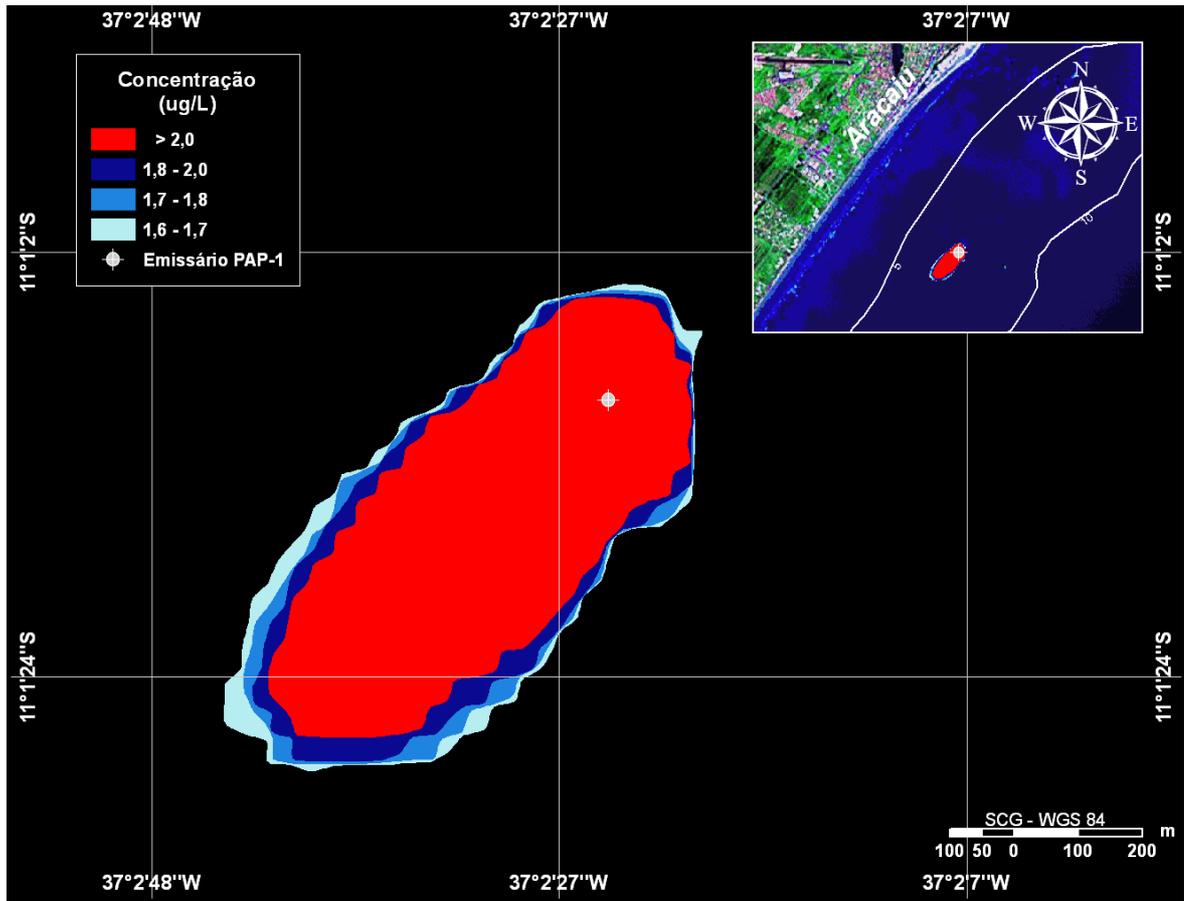


Figura VII.2-12 - Médias das máximas concentrações calculadas para a pluma de sulfetos, simulada no período de inverno, após 168 horas.

VIII CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório são apresentados os resultados da revisão dos estudos realizados para a determinação da área de influência das plumas de água produzida descartada a partir do sistema de disposição submarina de Atalaia (PAP-1) da UN-SEAL, localizada em Aracaju, no Estado de Sergipe.

A revisão presente neste estudo foi solicitada pela PETROBRAS, uma vez que as concentrações dos parâmetros constituintes do efluente foram alteradas em relação ao estudo realizado para este sistema em 2005 (ASA, 2005a).

A partir do melhor entendimento técnico-científico da dinâmica local, foi possível definir a área de influência das plumas de água produzida descartadas a partir deste sistema de disposição (emissário submarino). Para tanto, foram realizadas simulações de campo próximo e simulações probabilísticas de campo afastado.

As simulações de campo próximo fornecem a diluição inicial do efluente, e servem como parâmetros de entrada para o modelo de campo afastado CHEMMAP. As simulações probabilísticas, por sua vez, fornecem como resultado a área de influência do efluente, além dos valores médios de diluição e concentração da pluma a partir do ponto de lançamento.

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 com duração de 168 horas (uma semana) para o descarte da água produzida, utilizando a vazão de 183 m³/h. Para representação do efluente, foi utilizado um composto conservativo. Adicionalmente, foram considerados os parâmetros constituintes da água produzida descartada a partir deste emissário, agrupados em:

- parâmetros orgânicos - benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, naftaleno, fluoreno, fenantreno, fenóis totais, teor de óleos e graxas e carbono orgânico total;
- parâmetros inorgânicos - arsênio, bário, boro, cádmio, cianetos, chumbo, cobre, cromo, estanho, ferro, fluoreto, manganês, mercúrio, níquel, nitrogênio amoniacal, prata, selênio, sulfetos e zinco.

Como critério ambiental na determinação da zona de mistura do efluente (*i.e.*, região na qual as concentrações calculadas estão acima do critério ambiental adotado), foram utilizadas as concentrações estabelecidas na Resolução do CONAMA de nº 357/05, para cada parâmetro estudado, e à Concentração de Efeito Não Observado (CENO) referente ao efluente de água produzida descartada a partir do emissário PAP-1.

Na apresentação dos resultados de campo afastado, os contornos das plumas de água produzida estendem-se até uma diluição de 2.000 vezes a concentração de lançamento. Esse corte foi escolhido para melhorar a visualização das plumas de probabilidade na área do empreendimento.

Os resultados das simulações para o campo próximo mostraram diluições médias de 24 vezes no período de verão e 26 vezes no de inverno, com profundidade terminal da pluma de 1 m em ambos os períodos. O comprimento do campo próximo varia entre 5 e 6 m. Ressalta-se que o efluente não atinge uma diluição suficiente para o enquadramento no critério ambiental (CENO) dentro do domínio do campo próximo.

De acordo com os resultados das simulações de campo próximo, a diluição inicial neste domínio é suficiente para que os seguintes parâmetros atinjam as concentrações limites do critério ambiental (CONAMA 357/05) adotado:

- Orgânicos: benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, fenóis totais, fluoreno, fenantreno, carbono orgânico total e teor de óleos e graxas;
- Inorgânicos: arsênio, boro, cianeto, cromo, estanho, fluoreto, níquel, selênio e zinco.

Para as simulações de campo afastado foram selecionados os parâmetros que apresentaram as maiores concentrações no efluente, e cuja diluição inicial no campo próximo não é suficiente para que estes atinjam as concentrações limites utilizadas neste estudo:

- Orgânicos: naftaleno;
- Inorgânicos: bário, ferro, nitrogênio amoniacal e sulfetos.

Os resultados das simulações para o campo afastado mostraram que, nas condições de descarte simuladas, a água produzida atinge uma diluição média de 1.000 vezes a concentração de lançamento (correspondete à CENO) a uma

distância de, aproximadamente, 426 m do ponto de lançamento no verão e 595 m no inverno.

Os resultados das simulações de campo afastado, para os parâmetros que não atingiram o critério ambiental dentro dos limites do campo próximo, mostram zonas de mistura (referentes às concentrações limite da legislação) variando de 47 m a 838 m de distância a partir do ponto de lançamento.

As diferenças verificadas neste estudo, quando comparadas com o estudo anterior realizado em 2005 (ASA, 2005a), são devidas a um conjunto de fatores que devem ser levados em consideração para a correta interpretação de seus resultados.

Dentre estes fatores destaca-se que a metodologia adotada para a modelagem do campo próximo foi desenvolvida ao longo dos últimos 3 anos para calcular de forma mais eficiente a diluição neste domínio. Considerando a simplificação quanto às correntes assumida pelo CORMIX (*i.e.* intensidade e direção de correntes constante), calcularam-se os percentis de 10, 50 e 95% dos valores observados no modelo hidrodinâmico nas imediações do sistema difusor do emissário. Esta modificação foi implementada de forma a utilizar intensidades representativas dos valores extremos e médios de velocidade, além de fornecer a mínima diluição inicial.

Além disso, realizou-se uma implementação mais eficiente dos resultados das simulações de campo próximo na modelagem de campo afastado. Para uma melhor compreensão desta implementação, devem-se considerar as diferenças entre os modelos de campo próximo e campo afastado. O modelo CORMIX faz uma série de simplificações para o cálculo do fator de diluição do campo próximo, entre elas: profundidade constante, intensidade e direção de correntes constante, descarte contínuo. O CHEMMAP, por sua vez, 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 modelo CORMIX calcula para cada passo de tempo (e para cada posição) um valor de diluição e os parâmetros: profundidade terminal e espessura da pluma. Estes parâmetros são, então, utilizados pelo CHEMMAP como parâmetros de entrada das simulações. Quanto à diluição, o *setup* do modelo CHEMMAP é preparado ajustando-se o passo de tempo, as dimensões (extensão e resolução)

da grade e o número de partículas, de forma a reproduzir para o instante inicial e para a região correspondente à do campo próximo, uma diluição equivalente à estimada pelo CORMIX. A partir destes parâmetros, o CHEMMAP realiza os seus cálculos de diluição utilizando uma grade tridimensional, na qual cada elemento (célula) apresenta um determinado volume. As diluições são feitas nestes volumes de tal forma que a massa total do composto simulado é conservada.

Adicionalmente, o modelo CHEMMAP passou, ao longo do tempo, por melhorias que permitem que este calcule de forma mais eficiente as concentrações dos parâmetros simulados. Estas melhorias fazem com que o modelo seja capaz de realizar o cálculo das concentrações em menores escalas temporais nas proximidades do ponto de lançamento, região de maior importância por se tratar, geralmente, da região na qual se verifica a zona de mistura de lançamento de efluentes.

Por último, destaca-se o crescente conhecimento adquirido pela **ASA SOUTH AMERICA** ao longo dos anos através de bem sucedidas aplicações do modelo CHEMMAP em modelagens de descarte de efluentes em sistemas fluviais, estuarinos e costeiros (ASA, 2008a,b). Nestes, através da validação dos resultados das modelagens realizadas com dados medidos em campo, foi possível estabelecer quais os melhores parâmetros do modelo (e.g., coeficientes de dispersão horizontal), que resultam em melhores resultados para as necessidades dos determinados ambientes simulados.

IX BIBLIOGRAFIA

AB'SABER, A. N., 2001. Litoral do Brasil, Ed. Metalivros.

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

ASA (Applied Science Associates South America), 2003. Cenários de Acidentes com Petróleo na Refinaria de Presidente Bernardes – RPBC (SP). Relatório Técnico (Dezembro de 2003). 47pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2005a. Estudo de Simulação Dinâmica da Dispersão do Efluente do Emissário da UN-SEAL (SE). Relatório Técnico – Rev.01 (7 de junho de 2005). 78pp.

ASA (Applied Science Associates, Inc & South America), 2005b. Hydrothermal Modeling of the Cooling Water Discharge from the Rafael Urdaneta Thermo Power Plant to the Maracaibo System. Relatório Técnico (Janeiro de 2005). 66pp.

ASA (Applied Science Associates, Inc & South America), 2006. Preliminary Modeling of the Discharge Plume from the Rahima Sewage Treatment Plant into Tarut Bay. Relatório Técnico (Abril de 2006). 59pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2007a. Modelagem de Diluição e Dispersão de Plumões de Efluentes Industriais a partir do Emissário Submarino do Terminal Aquaviário de São Sebastião Almirante Barroso no Canal de São Sebastião, SP. Relatório Técnico (Agosto de 2007). 111pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2007b. Estudo de Deriva para Acidentes com Produtos Derivados de Petróleo no Terminal da Gerência da Baía de Ilha Grande - GEBIG. Relatório Técnico, Revisão 03 (Agosto de 2007). 204pp.

- ASA (Applied Science Associates South America), 2007c. Modelagem do Descarte de Água Produzida nas Bacias de Campos e Ceará. Relatório Técnico, Revisão 01 (16 de março de 2007). 199pp.
- ASA (Applied Science Associates South America), 2008a. Modelagem da Dispersão de Efluente Líquido Industrial da Fosfertil Lançado no Rio Grande, Uberaba (MG). Relatório Técnico, Revisão 00 (24 de outubro de 2008). 114pp.
- ASA (Applied Science Associates South America), 2008b. Modelagem do Descarte de Água Produzida a partir dos Emissários da UTPF de Guamaré (RN). Relatório Técnico, Revisão 01 (16 de janeiro de 2008). 87pp.
- 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.
- BRANDSMA, M.G. 2004. Modeling of Cooling Water, ORV Cold-Water and Cavern Leaching Brine Plumes from Main Pass Energy Hub. Technical Report. Ecology and Environmental, Inc; 23 February 2004. 83pp.
- BRASIL, 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 18 mar. 2005.
- BRASIL, 2007. Resolução CONAMA nº 393, de 08 de agosto de 2007. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 09 ago. 2007.
- CASTRO FILHO, B.M.C. & MIRANDA, L.B. 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 40° N and 34° S. The Sea. **John Wiley & Sons**, Inc. 11: p. 209-251.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 1999. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Technical Report. 13pp.

- CERC, 1984. Shore protection manual, Vol. I. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, p. 115-134 apêndices.
- CSANADY, G.T., 1973. Turbulent diffusion in the environment. **D. Reidel Publishing Company**, Dordrecht, Holland, 74p.
- DELVIGNE, G.A.L. & 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.
- 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.
- 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.
- HUANG, W. & SPAULDING, M.L., 1995. A three dimensional numerical model of estuarine circulation and water quality induced by surface discharges. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, 121(4):300-311. April 1995.
- JIRKA, G.H.; DONEKER, R.L. & HINTON, S.W. 1996. User's manual for CORMIX. A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. **U.S. Environmental Protection Agency**. 152pp.

- KAWAMURA, P. & D. MACKAY, 1987. The evaporation of volatile liquids. **J Hazardous Materials**, 15:343-364.
- KOLLURU, V.S., 1992. Influence of Number of Spilllets on Spill Model Predictions. Applied Science Associates Internal Report, 1992.
- KOUSKY, V.E., 1980: Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. Mon. **Weather Rev**, 108, 488-498.
- LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978. Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. **Journal of Physical Oceanography**, v. 8, p. 142-150.
- LEHR, W., 1996. Progress in Oil Spread Modeling, in Proceedings of the 19th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Environment Canada, pp. 889-894.
- MACKAY, D. & R.S. MATSUGU, 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 51, pp. 434-439.
- MACKAY, D. & P.J. LEINONEN, 1977. Mathematical model of the behavior of oil spills on water with natural and chemical dispersion. Prepared for Fisheries and Environment Canada. Economic and Technical Review Report EPS-3-EC-77-19, 39p.
- MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980. A Mathematical Model Of Oil Spill Behavior. Department of Chemical and Applied Chemistry, University of Toronto, Canada
- MACKAY, D., W.Y. SHIU, & K.C. MA, 1992. **Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals**, Vol. I-IV. Lewis Publ., Chelsea, Michigan.

- 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.
- MUIN, M., 1993. A three-dimensional boundary-fitted circulation model in spherical coordinates, Ph.D. dissertation, Univ. of Rhode Island, Narragansett Bay Campus, Narragansett, RI.
- MUIN, M. & SPAULDING, M.L., 1997. A 3-D boundary-fitted circulation model. **Journal of Hydraulic Engineering**, 123(1).
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). 2002a. o-Xylene – International Chemical Safety Cards #0084. August 03, 2002. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0084.html>>. Acesso em: 03/11/2008.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). 2002b. m-Xylene – International Chemical Safety Cards #0085. August 03, 2002. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0085.html>>. Acesso em: 03/11/2008.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). 2002c. p-Xylene – International Chemical Safety Cards #0086. August 03, 2002. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0086.html>>. Acesso em: 03/11/2008.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). 2004. Tin – International Chemical Safety Cards #1535. October 28, 2004. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng1535.html>>. Acesso em: 03/11/2008.
- OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. **Deep Sea Research**, v. 8, p. 789-802.

- RIEHL, H., 1965. Meteorologia Tropical. Ao Livro Técnico S.A.
- SCHUREMANN, P., 1941. Manual of harmonic analysis and prediction of tides. Washington, D.C., U.S. **Coast & Geodetic Surv.**, S.P. n. 98, 317p.
- SPAULDING, M.L., 1984. A vertically averaged circulation model using boundary fitted coordinates. **Journal of Physical Oceanography**, p.973-982.
- SWANSON, J.C., 1986. A three-dimensional numerical model system of coastal circulation and water quality, Ph.D. Dissertation, Univ. of Rhode Island, Kingston, R.I.
- SWANSON, J.C.; SPAULDING, M.; MATHISEN, J-P. & JENSSEN, O.O., 1989. A three dimensional boundary fitted coordinate hydrodynamic model, Part I: development and testing. **Dt. hydrog**, Z.42, 1989, p.169-186.
- THIBODEAUX, L.J. 1979. **Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil**. John Wiley & Sons, NY 501p.
- THORPE S. A., 1984. On the determination of K_v in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. **American Meteorological Society**, pp. 861-863.
- TURNER, D.B. 1970. Workbook of atmospheric dispersion estimates. Report PB-191 482. Research Triangle Park, North Carolina: Office of Air Programs, U.S. Environmental Protection Agency.
- YOUSSEF, M., 1993. The behavior of the near ocean surface under the combined action of waves and currents in shallow water. PhD Dissertation, Department of Ocean Engineering, University of Rhode Island, Narragansett, RI.
- YOUSSEF, M. & M.L. SPAULDING, 1993. Drift current under the action of wind waves. In: **Proceedings of the 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar**, Calgary, Alberta, Canada, p. 587-615.

X 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) | TODOS |
| 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) | TODOS |
| Assinatura | |

| | |
|--|----------------------|
| Profissional | Gabriel Clauzet |
| Empresa | ASA Consultoria Ltda |
| Registro no Conselho de Classe | |
| Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental | 1031373 |
| Responsável pela(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 pelo(s) Capítulo(s) | TODOS |
| 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) | TODOS |
| Assinatura | |