

Modelagem de Derrame de Hidrocarbonetos no Mar para o Gasoduto Rota 3

Revisão 00

Julho / 2013



TETRA TECH é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

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

TETRA TECH, 2013. Modelagem de Derrame de Hidrocarbonetos no Mar para o Gasoduto Rota 3. Relatório Técnico, Revisão 00 (30 de julho de 2013). 68pp+Apêndices+Anexo.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I INTRODUÇÃO	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO	I-2
II MODELAGEM DE DERRAME DE CONDENSADO	II-1
II.1 DADOS DE ENTRADA	II-1
II.1.1 CAMPOS DE CORRENTES	II-2
II.1.2 DADOS DE VENTO	II-3
II.1.3 PONTO DE RISCO E VOLUMES DE DERRAME	II-3
II.1.4 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO UTILIZADO	II-4
II.2 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES	II-5
II.3 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	II-6
III RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DERRAME DE CONDENSADO	III-1
III.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS	III-1
III.2 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS	III-28
IV CONSIDERAÇÕES FINAIS	IV-1
V BIBLIOGRAFIA	V-1
VI EQUIPE TÉCNICA	VI-1
APÊNDICE A DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CHEMMAP	A-1
APÊNDICE B DESCRIÇÃO DO NCEP/NCAR	B-1
ANEXO A1 MODELAGEM HIDRODINÂMICA	A1-1

LISTA DE TABELAS

TABELA.....	PÁG.
Tabela II-1 - Coordenadas geográficas (SIRGAS2000) e lâmina d'água (m) do ponto de derrame.....	II-3
Tabela II-2 - Características do Condensado para a condição de vazamento (P=1,01 kgf/cm ² e T= 20,00 °C).	II-4
Tabela II-3 - Composição Flash do Condensado para a condição de vazamento (P=1,01 kgf/cm ² e T= 20,00 °C).	II-5
Tabela II-4 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas.....	II-6
Tabela III-1 - Extensão da costa com probabilidade de toque e área com probabilidade de ocorrência de condensado na água.....	III-1
Tabela III-2 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de verão e inverno com derrame de 8 m ³	III-27
Tabela III-3 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de verão e inverno com derrame de 200 m ³	III-27
Tabela III-4 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de verão e inverno com derrame de pior caso.....	III-27
Tabela III-5 - Resumo dos cenários determinísticos críticos com probabilidade de toque de condensado na costa.	III-28

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
Figura I-1 - Localização da área de estudo e do ponto de derrame do Gasoduto Rota 3.....	I-2
Figura II-1 - Grade definindo os contornos de terra (grade habitat) para a modelagem de deriva de óleo.....	II-2
Figura III-1 - Cenário P1_8_VER_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-3
Figura III-2 - Cenário P1_8_VER_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.....	III-4
Figura III-3 - Cenário P1_8_VER_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-5
Figura III-4 - Cenário P1_8_VER_30D. Massa máximo de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-6
Figura III-5 - Cenário P1_200_VER_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-7
Figura III-6 - Cenário P1_200_VER_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-8
Figura III-7 - Cenário P1_200_VER_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-9

FIGURA	PÁG.
Figura III-8 - Cenário P1_200_VER_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-10
Figura III-9 - Cenário P1_PC_VER_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.	III-11
Figura III-10 - Cenário P1_PC_VER_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.....	III-12
Figura III-11 - Cenário P1_PC_VER_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.	III-13
Figura III-12 - Cenário P1_PC_VER_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.	III-14
Figura III-13 - Cenário P1_8_INV_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-15
Figura III-14 - Cenário P1_8_INV_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.....	III-16
Figura III-15 - Cenário P1_8_INV_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.....	III-17
Figura III-16 - Cenário P1_8_INV_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-18

FIGURA	PÁG.
Figura III-17 - Cenário P1_200_INV_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-19
Figura III-18 - Cenário P1_200_INV_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.....	III-20
Figura III-19 - Cenário P1_200_INV_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-21
Figura III-20 - Cenário P1_200_INV_30D. Massa máxima de condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m ³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.	III-22
Figura III-21 - Cenário P1_PC_INV_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.....	III-23
Figura III-22 - Cenário P1_PC_INV_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.	III-24
Figura III-23 - Cenário P1_PC_INV_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.....	III-25
Figura III-24 - Cenário P1_PC_INV_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m ³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.	III-26
Figura III-25 - DET_CRIT_P1_VER_PC_30D. Massa do condensado na superfície da água e a pluma na coluna d'água (em cinza) para o cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o verão, Gasoduto Rota 3.	III-30

FIGURA	PÁG.
Figura III-26 - DET_CRIT_P1_VER_PC_30D. Perfil vertical da concentração do condensado na coluna d'água, do cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o verão, para o Gasoduto Rota 3.	III-31
Figura III-27 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_VER_PC_30, para as primeiras 50 horas após o início do vazamento.....	III-32
Figura III-28 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_VER_PC_30D, para o período total da simulação.	III-32
Figura III-29 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no início da simulação determinística crítica de pior caso, de verão. Direção Predominante: Corrente-NNE; Vento-S.....	III-33
Figura III-30 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado em instante intermediário da simulação determinística crítica de pior caso, de verão. Direção Predominante: Corrente-NNE; Vento-S.	III-33
Figura III-31 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no instante de primeiro toque na costa da simulação determinística crítica de pior caso, de verão. Direção Predominante: Corrente-NNE; Vento-S. .	III-34
Figura III-32 - DET_CRIT_P1_INV_PC_30D. Massa do condensado na superfície da água e a pluma na coluna d'água (em cinza) para o cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o inverno, Gasoduto Rota 3.	III-35
Figura III-33 - DET_CRIT_P1_INV_PC_30D. Perfil vertical da concentração do condensado na coluna d'água, do cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o inverno, para o Gasoduto Rota 3.	III-36
Figura III-34 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_INV_PC_30D, para as primeiras 50 horas após o início do vazamento.....	III-37
Figura III-35 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_INV_PC_30D, para o período total da simulação.	III-37
Figura III-36 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no início da simulação determinística crítica de pior caso, de inverno. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-SW.	III-38
Figura III-37 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado em instante intermediário da simulação determinística crítica de pior caso, de inverno. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-SW.	III-38
Figura III-38 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no instante de primeiro toque na costa da simulação determinística crítica de pior caso, de inverno. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-SW.....	III-39

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados do estudo de modelagem numérica do transporte e intemperismo de óleo condensado no mar para derrames simulados a partir do Gasoduto Rota 3, no litoral do Estado do Rio de Janeiro.

As simulações de derrame consideraram um ponto de risco, três volumes de derrame (pequeno, médio e pior caso) e duas condições sazonais (verão e inverno).

O sistema de modelos numéricos Delft3D foi selecionado como ferramenta para realizar uma modelagem hidrodinâmica na região costeira do Rio de Janeiro, enquanto o campo de ventos utilizado foi proveniente de dados de reanálise.

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar os contornos de probabilidade de condensado atingir a área de estudo, utilizando como critério de parada o tempo de 30 dias após o final do vazamento. A partir dos resultados das simulações probabilísticas, foram selecionados os cenários determinísticos críticos utilizando como critério o menor tempo de chegada do óleo na costa.

Os resultados das simulações demonstraram que todas as hipóteses acidentais apresentam probabilidades de óleo no litoral do Município Fluminense de Maricá. Observou-se, também, probabilidade de toque de óleo no Município de Saquarema para os cenários com derrames de volume médio (200 m³) e de pior caso (730 m³).

I INTRODUÇÃO

Neste relatório é apresentada a modelagem computacional do transporte e intemperismo de óleo condensado no mar proveniente de possíveis derrames no Gasoduto Rota 3, no litoral do Estado do Rio de Janeiro.

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, e (d) características físico-químicas dos constituintes presentes no produto simulado.

O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir do modelo Delft3D-FLOW (DELTARES, 2011), adaptado e implementado pelo grupo de modelagem da TETRA TECH (TETRA TECH, 2013). O campo de ventos utilizado na modelagem de derrame de condensado foi baseado em dados de reanálise do NCEP/NCAR¹.

Para o estudo do transporte e intemperismo do condensado no mar foi utilizado o modelo CHEMMAP, desenvolvido pela ASA-RPS.

O Capítulo I, além de apresentar os objetivos desse estudo, apresenta a localização do ponto de modelagem. O Capítulo II, a seguir, apresenta as características dos derrames simulados enquanto o Capítulo III apresenta os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas críticas. Por fim, no Capítulo IV são discutidos os resultados obtidos neste estudo.

Complementando, o Apêndice A apresenta a descrição do modelo CHEMMAP e o Apêndice B apresenta informações referentes ao campo de ventos do NCEP/NCAR. O modelo hidrodinâmico implementado para o presente estudo (TETRA TECH, 2013) é apresentado no Anexo A1.

Ressalta-se que a descrição das características oceanográficas e meteorológicas são apresentadas no Meio Físico do presente EIA/RIMA.

¹ *National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, disponibilizados pelo Climate Diagnostics Center (CDC) da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Obtido em <<http://www.esrl.noaa.gov/psd>>. Último acesso em 05 de janeiro de 2009.

I.1 ÁREA DE ESTUDO

As simulações de derrames de condensado foram realizadas a partir do Gasoduto Rota 3, próximo ao litoral do Rio de Janeiro, conforme mostra a Figura I-1.

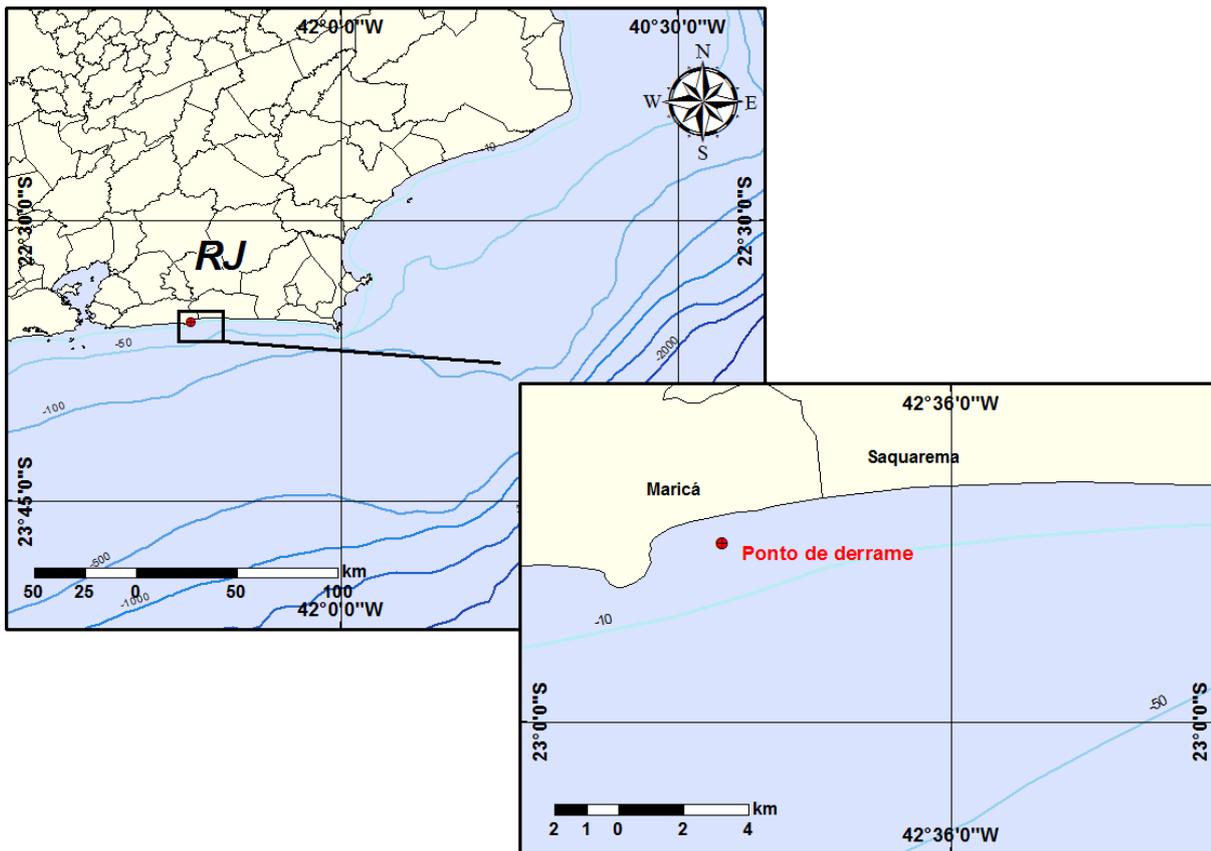


Figura I-1 - Localização da área de estudo e do ponto de derrame do Gasoduto Rota 3.

II MODELAGEM DE DERRAME DE CONDENSADO

Na modelagem de derrame de óleo condensado foi utilizado o modelo CHEMMAP, desenvolvido pela ASA-RPS. Este modelo foi desenvolvido para a previsão da trajetória e transformações biogeoquímicas de produtos químicos, incluindo as substâncias flutuantes, as que afundam e as substâncias solúveis. A descrição completa do mesmo encontra-se no Apêndice A.

II.1 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;
- ✓ Tipo de óleo;
- ✓ Grade *habitat*;
- ✓ Duração da simulação;
- ✓ Campo de correntes;
- ✓ Arquivo de dados meteorológicos;
- ✓ Parâmetros de simulação.

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

II.1.1 Campos de Correntes

Os campos de correntes utilizados na caracterização ambiental para a modelagem de derrame de condensado foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica apresentada em TETRA TECH (2013).

Para avaliar a sazonalidade das forçantes ambientais nos padrões de circulação e transporte, foram definidos dois campos hidrodinâmicos representativos dos períodos típicos de verão (1º de dezembro de 2010 a 05 de março de 2011) e inverno (1º de junho a 05 de setembro de 2010).

Por fim, para as simulações de derrame de condensado foi definida uma grade *habitat* com dimensões de 500x500 pontos (Figura II-1), com resolução de, aproximadamente, 51 m no eixo Y e 28 m no eixo X.

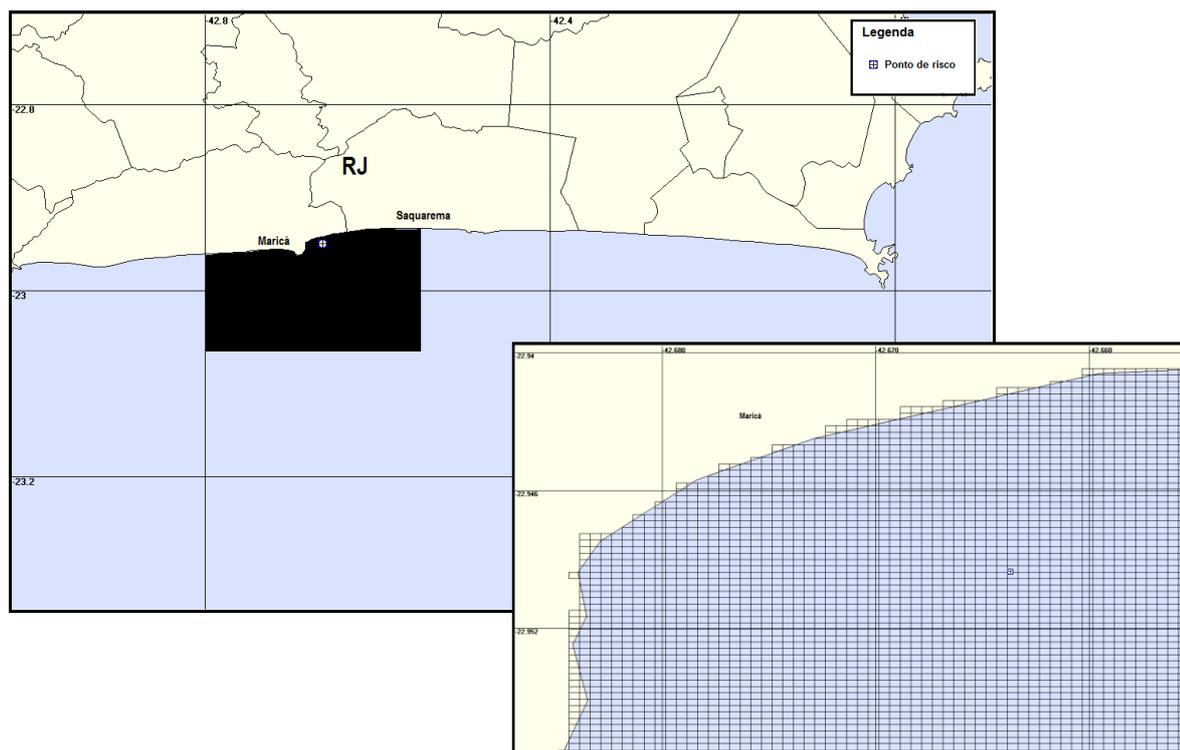


Figura II-1 - Grade definindo os contornos de terra (*grade habitat*) para a modelagem de deriva de óleo.

II.1.2 Dados de Vento

Para caracterização do regime de ventos na região de estudo foi utilizado um conjunto de dados de vento variável no tempo e no espaço, proveniente de reanálise do NCEP/NCAR. Vale ressaltar que estes dados são resultados de simulações numéricas que utilizam as técnicas mais modernas em assimilação de dados em conjunto com a mais extensa base de dados disponível. Esta base de dados tem sido aprimorada e beneficiada pela inclusão de observações (coleta de dados) realizadas em diversos países.

Maiores detalhes sobre os dados NCEP/NCAR são apresentados no Apêndice B, enquanto que as análises dos dados utilizados na modelagem de derrame de condensado estão em TETRA TECH (2013), no Anexo A1.

II.1.3 Ponto de Risco e Volumes de Derrame

As coordenadas do ponto de risco de vazamento de condensado a partir do Gasoduto Rota 3 foram especificadas pela PETROBRAS. A Tabela II-1 lista o ponto de modelagem, suas coordenadas geográficas (SIRGA2000), lâmina d'água local (m) e a menor distância do ponto em relação à costa.

Tabela II-1 - Coordenadas geográficas (SIRGAS2000) e lâmina d'água (m) do ponto de derrame.

PONTO DE DERRAME	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)	DISTÂNCIA EM RELAÇÃO A COSTA (m)
Rota 3	22°56'58,46"S	42°39'49,30"W	17	870

Fonte: PETROBRAS.

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos segundo a Resolução CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008):

- Pequeno: 8,0 m³;
- Médio: 200,0 m³;
- Pior caso: 730,00 m³.

O volume de pior caso foi definido como o volume resultante da ruptura plena e imediata do gasoduto. Para esta hipótese acidental, o derrame de todo o volume foi considerado contínuo ao longo de 4 horas. Nas demais simulações realizadas, considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

Todos os cenários foram simulados considerando o derrame a 17 m de profundidade, correspondendo à lâmina d'água local em que se encontra a tubulação do gasoduto na localização do ponto de risco.

II.1.4 Características do Produto Utilizado

Com base nas informações disponíveis para a área em estudo foram realizadas simulações com o condensado que será transportado pelo Gasoduto Rota 3. As características físico-químicas do condensado foram fornecidas pela PETROBRAS; a Tabela II-2 e a Tabela II-3 apresentam as características e a composição do condensado, respectivamente.

Tabela II-2 - Características do Condensado para a condição de vazamento
($P=1,01 \text{ kgf/cm}^2$ e $T=20,00 \text{ }^\circ\text{C}$).

PARÂMETRO	VALOR
Nome do Produto	Condensado
Densidade a 20°C (g/cm^3)	0,640
Viscosidade dinâmica a 25°C (cP)	0,007
Peso Molecular	75,64

Fonte: PETROBRAS

Tabela II-3 - Composição Flash do Condensado para a condição de vazamento
($P=1,01 \text{ kgf/cm}^2$ e $T=20,00 \text{ }^\circ\text{C}$).

PARÂMETRO	COMPOSIÇÃO MOLAR (%)
Etano	0,03
Propano	3,37
Isobutano	3,48
Butano	16,82
Isopentano	14,18
Pentano	26,31
Hexano	19,31
Heptano	11,90
Octano	3,36
Nonano	1,19

Fonte: PETROBRAS

II.2 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias após o final do vazamento, conforme critérios definidos na Nota Técnica nº 02/2009/CGPEC/DILIC (IBAMA, 2009).

Nos casos de derrames com volume de pior caso (derrame contínuo por 4 horas), a duração das simulações foi de 724 horas (30 dias e 4 horas). Nos demais cenários (derrames instantâneos), a duração das simulações foi de 30 dias.

Ressaltamos que para o acompanhamento da pluma do condensado na coluna d'água na coluna d'água, adotou-se como corte a concentração mínima de 67 ppb, que representa uma diluição superior a 10.000.000 de vezes. Uma vez que não existem testes de toxicidade realizados para o condensado simulado, o limite adotado refere-se ao LC50 do composto mais tóxico dentro dos compostos encontrados no condensado com uma porcentagem de massa superior a 1% (Heptano), segundo French McCay (2002).

II.3 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações probabilísticas foram realizadas através da variação aleatória do momento de início do derrame dentro do período para o qual foi elaborado o modelo hidrodinâmico, divididas em dois períodos correspondendo ao verão (1º de dezembro de 2010 a 05 de março de 2011) e ao inverno (1º de junho a 05 de setembro de 2010).

Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteorológicas e oceanográficas, foi realizada uma série de 600 simulações em cada cenário probabilístico com o modelo CHEMMAP. A Tabela II-4 apresenta os cenários simulados neste estudo.

Tabela II-4 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas.

CENÁRIO	PRODUTO (ÓLEO)	VOLUME DE DERRAME (m ³)	DURAÇÃO DO DERRAME	ESTAÇÃO DO ANO	TEMPO DE SIMULAÇÃO
P1_8_VER_30D	Condensado	8,0	Instantâneo	Verão	720 horas
P1_200_VER_30D	Condensado	200,0	Instantâneo	Verão	720 horas
P1_PC_VER_30D	Condensado	730,0	4 horas	Verão	724 horas
P1_8_INV_30D	Condensado	8,0	Instantâneo	Inverno	720 horas
P1_200_INV_30D	Condensado	200,0	Instantâneo	Inverno	720 horas
P1_PC_INV_30D	Condensado	730,0	4 horas	Inverno	724 horas

III RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DERRAME DE CONDENSADO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas críticas para potenciais derrames de condensado a partir do Gasoduto Rota 3.

Cabe ressaltar que, em nenhuma das simulações realizadas, levou-se em consideração as ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Emergência.

III.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

O modelo CHEMMAP foi utilizado para simular os cenários descritos no Item II.3 e produzir as curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de condensado em cada ponto da área de estudo.

A Tabela III-1 apresenta a extensão da costa com probabilidade de toque na costa e as áreas com probabilidade de ocorrência de condensado na água referente aos cenários probabilísticos. Observa-se probabilidade de toque na costa para todos os cenários simulados. Isto ocorreu devido à localização do ponto de risco próximo da costa. A maior extensão de toque de condensado, de aproximadamente 7,5 km, foi calculada para o cenário de verão com volume de pior caso.

Tabela III-1 - Extensão da costa com probabilidade de toque e área com probabilidade de ocorrência de condensado na água.

CENÁRIOS	EXTENSÃO DE TOQUE NA COSTA (km)	ÁREA TOTAL NA ÁGUA (km ²)
P1_8_VER_30D	1,3	4,2
P1_200_VER_30D	6,0	36,2
P1_PC_VER_30D	7,5	43,5
P1_8_INV_30D	2,8	4,6
P1_200_INV_30D	5,1	36,9
P1_PC_INV_30D	5,8	39,0

A seguir, são apresentados os resultados de forma gráfica. Cabe aqui ressaltar que, em todas as ilustrações de contornos de probabilidade de condensado na água, apresentadas a seguir, o valor correspondente ao limite superior dos intervalos da escala de cores está incluído na classe. Assim, por exemplo, no intervalo de probabilidade de 10-20% estão incluídas as probabilidades superiores a 10% e menores ou iguais a 20%.

As ilustrações dos contornos de tempo correspondem ao tempo mínimo de deslocamento de condensado na água calculado (para cada posição da grade) entre todos os cenários determinísticos que compõem o cenário probabilístico. Nestas ilustrações são apresentados os tempos de 2, 6, 12, 36 e 60 horas após o início do derrame, selecionados de acordo com o tempo máximo para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga especificados na Resolução do CONAMA nº 398/08. Para tempos superiores a estes, foram selecionados intervalos que melhor se adequaram à visualização da evolução dos derrames na área de estudo.

Da Figura III-1 até a Figura III-12 apresentam-se os resultados das simulações probabilísticas com derrames a partir do Gasoduto Rota 3, durante os meses verão (dezembro a fevereiro). Observa-se que a maior probabilidade de toque na costa é obtida na simulação de pior caso (17,2%). Ainda analisando as figuras, verifica-se que em todas as simulações existe a probabilidade de toque na costa no Município de Maricá, e para as simulações de 200 m³ e de pior caso também ocorre probabilidade de toque no Município de Saquarema; ambos os Municípios são pertencentes ao Estado do Rio de Janeiro.

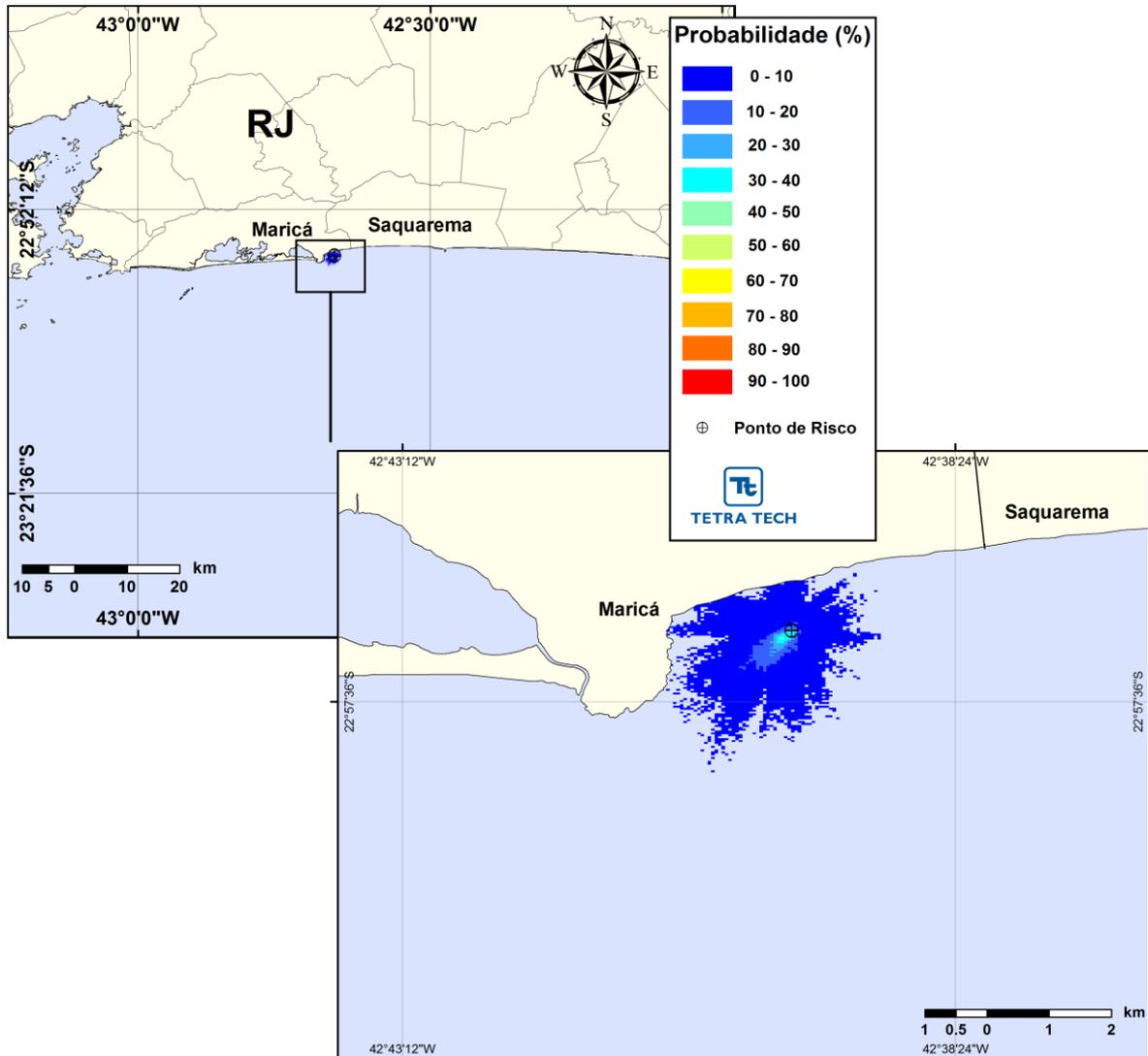


Figura III-1 - Cenário P1_8_VER_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

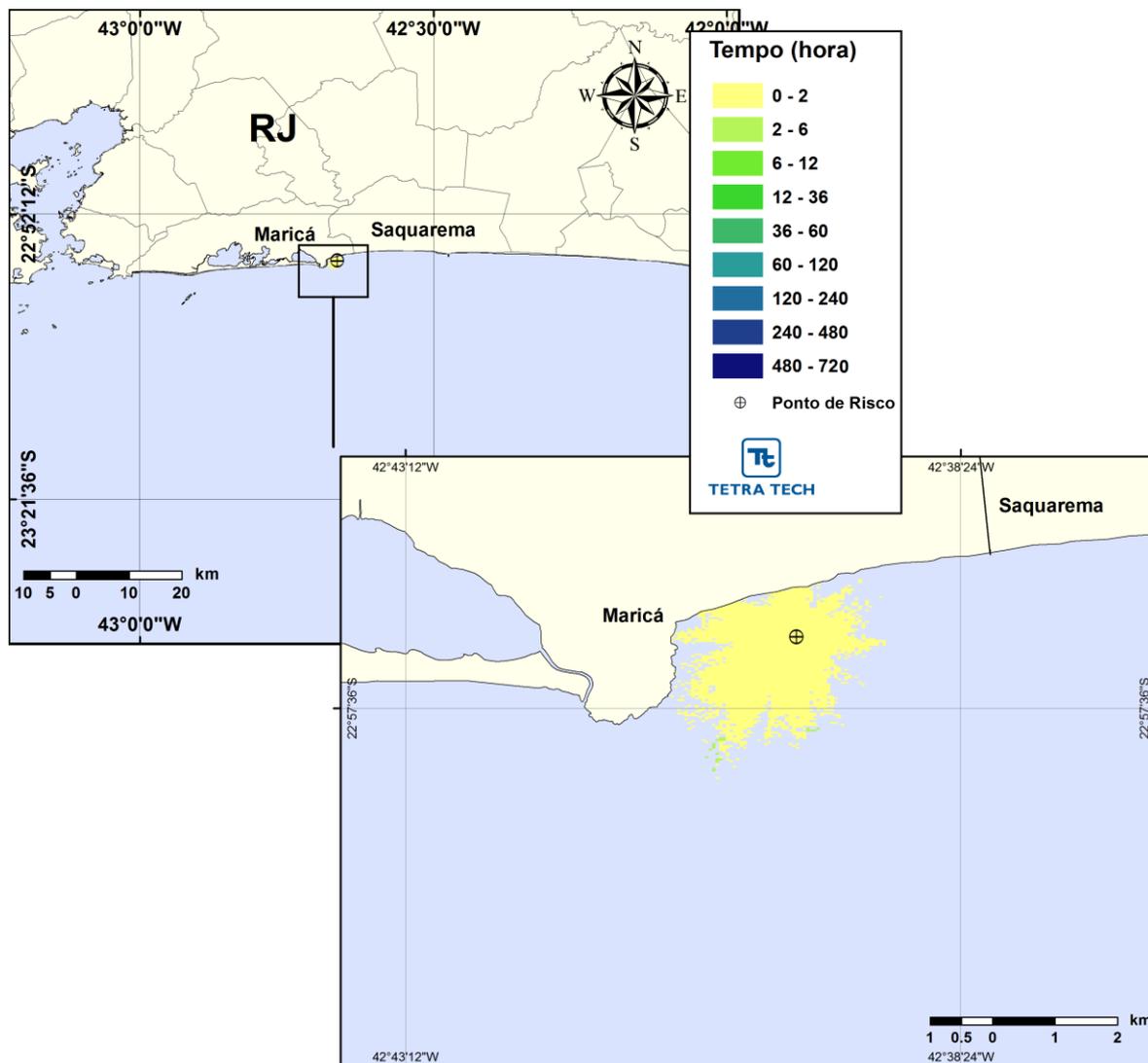


Figura III-2 - Cenário P1_8_VER_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

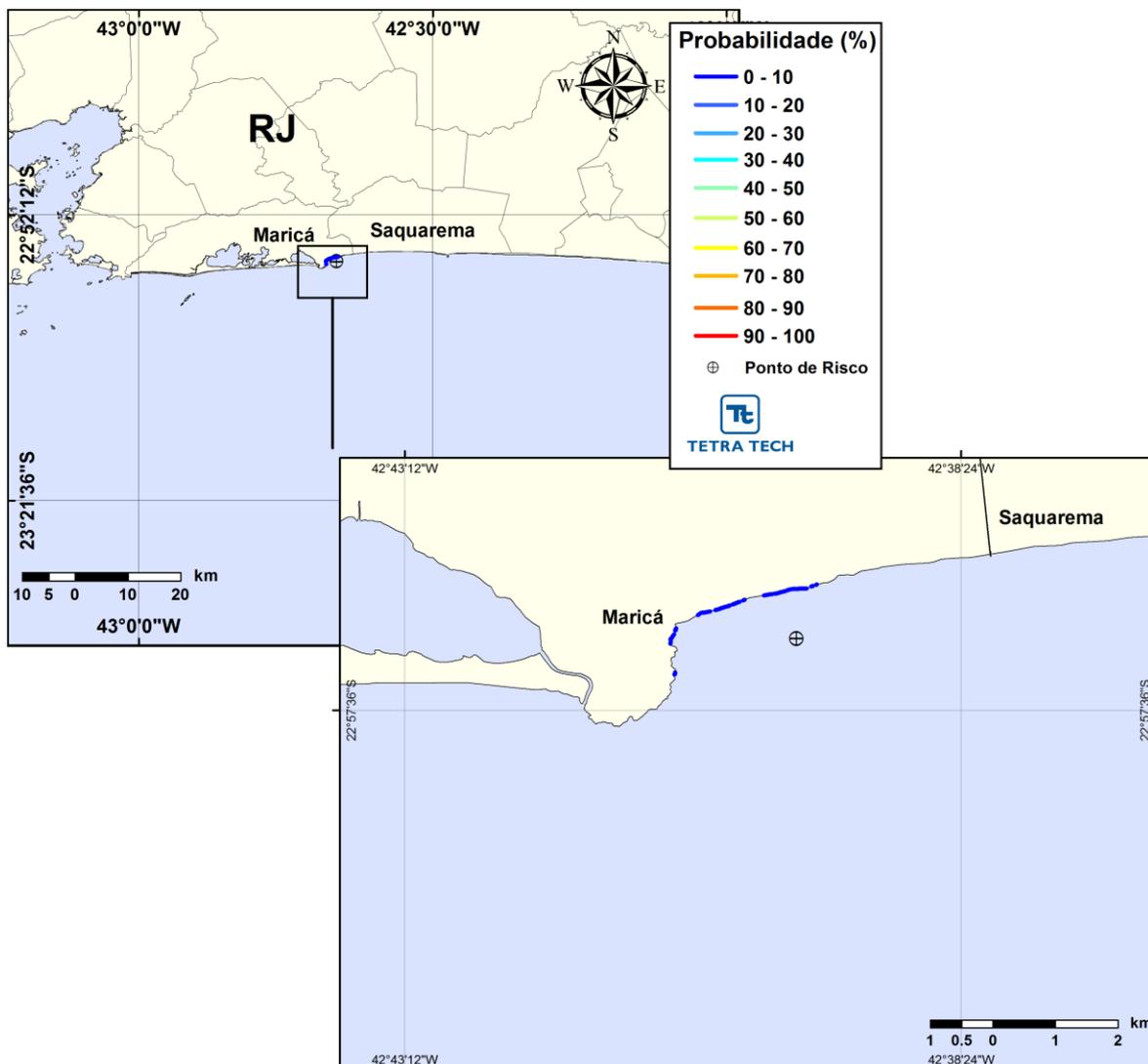


Figura III-3 - Cenário P1_8_VER_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

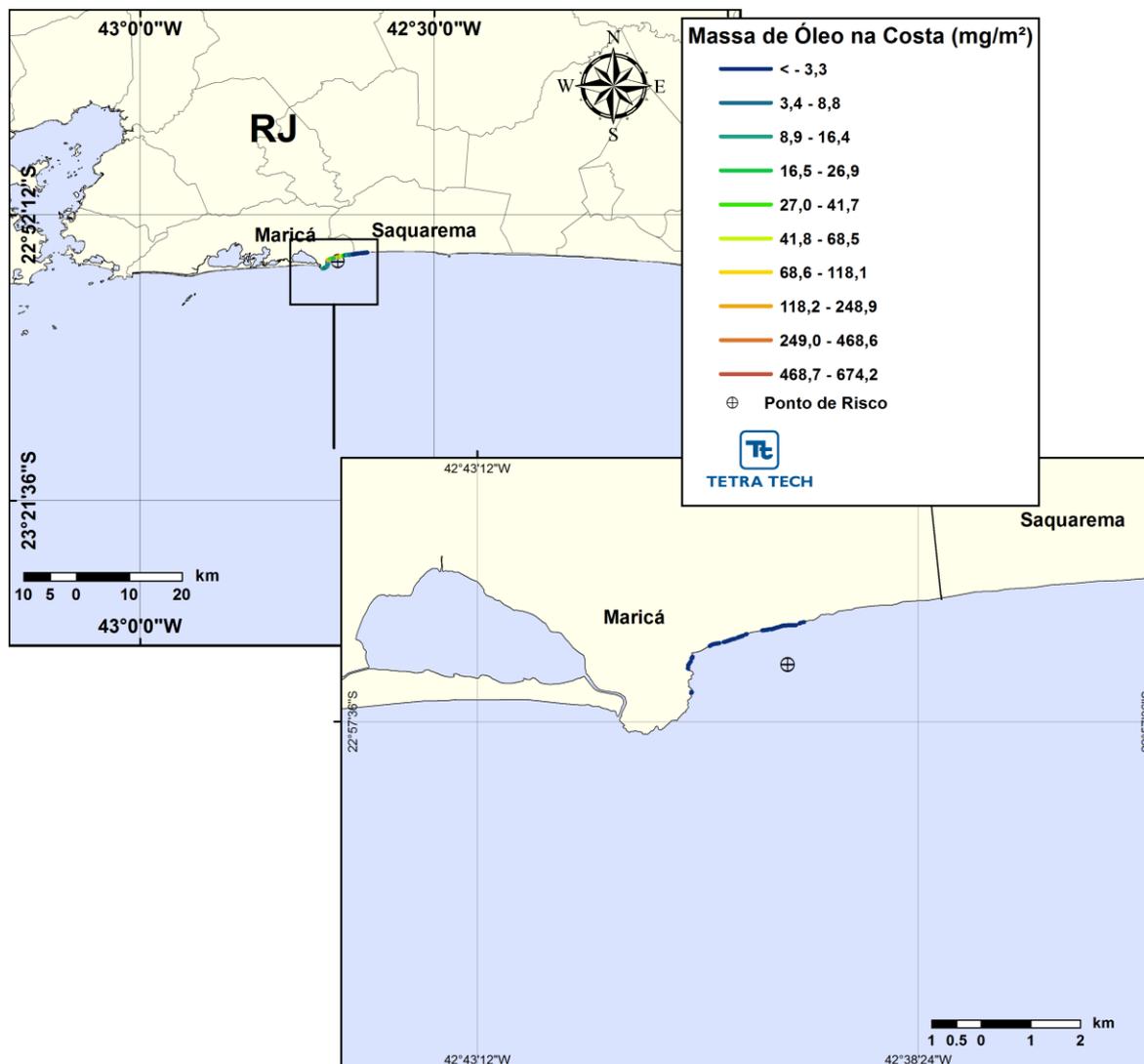


Figura III-4 - Cenário P1_8_VER_30D. Massa máximo de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

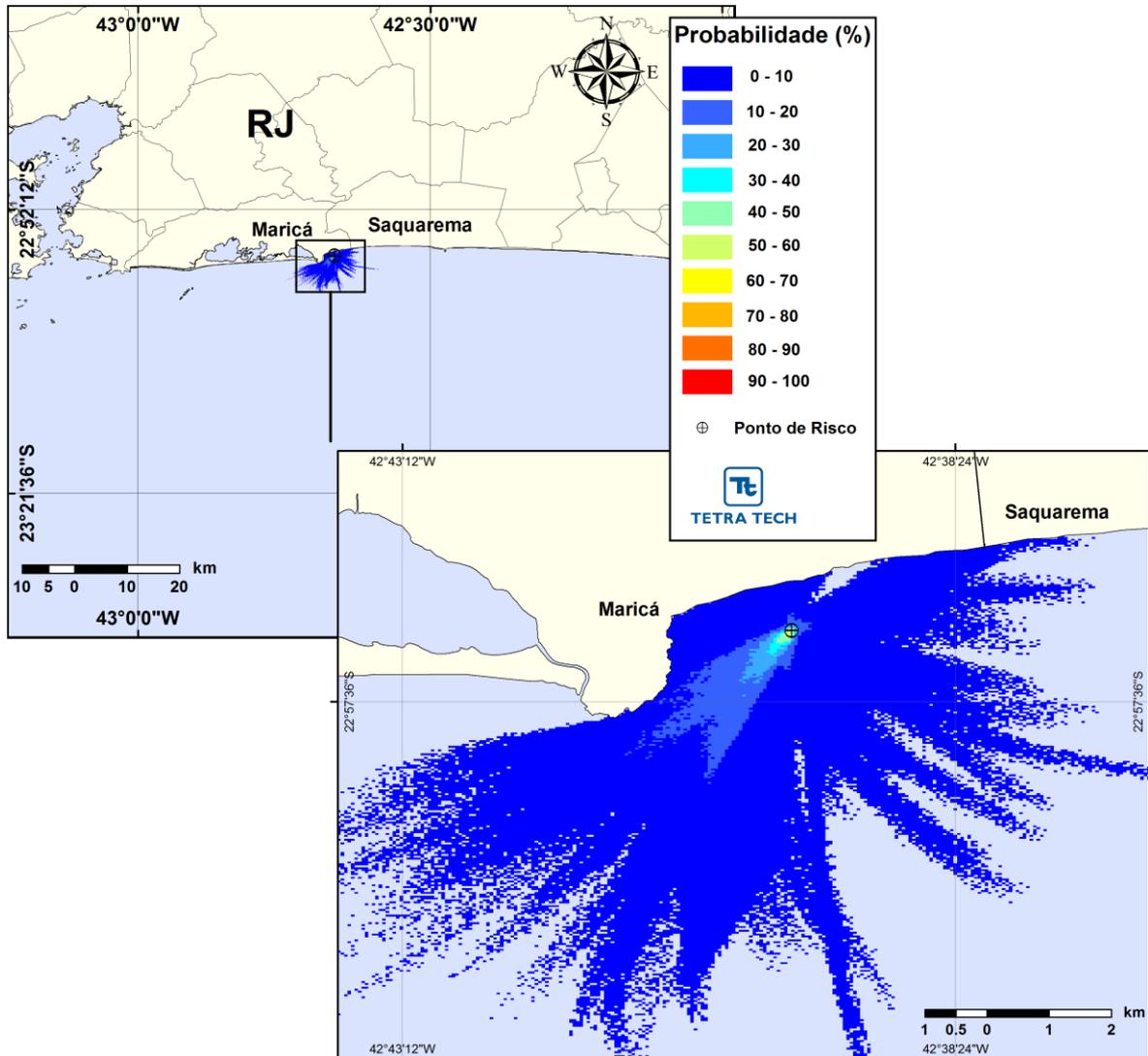


Figura III-5 - Cenário P1_200_VER_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

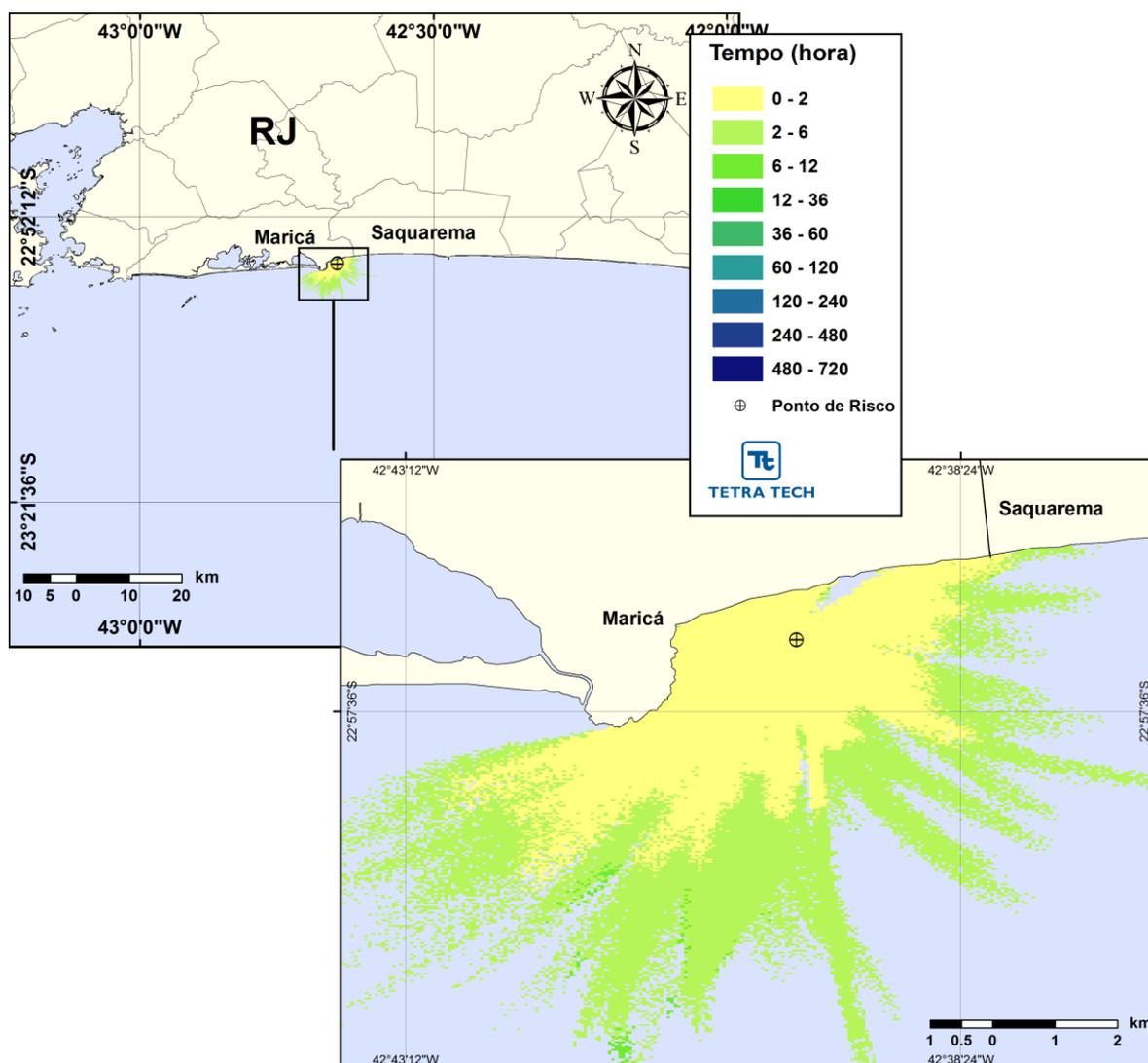


Figura III-6 - Cenário P1_200_VER_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

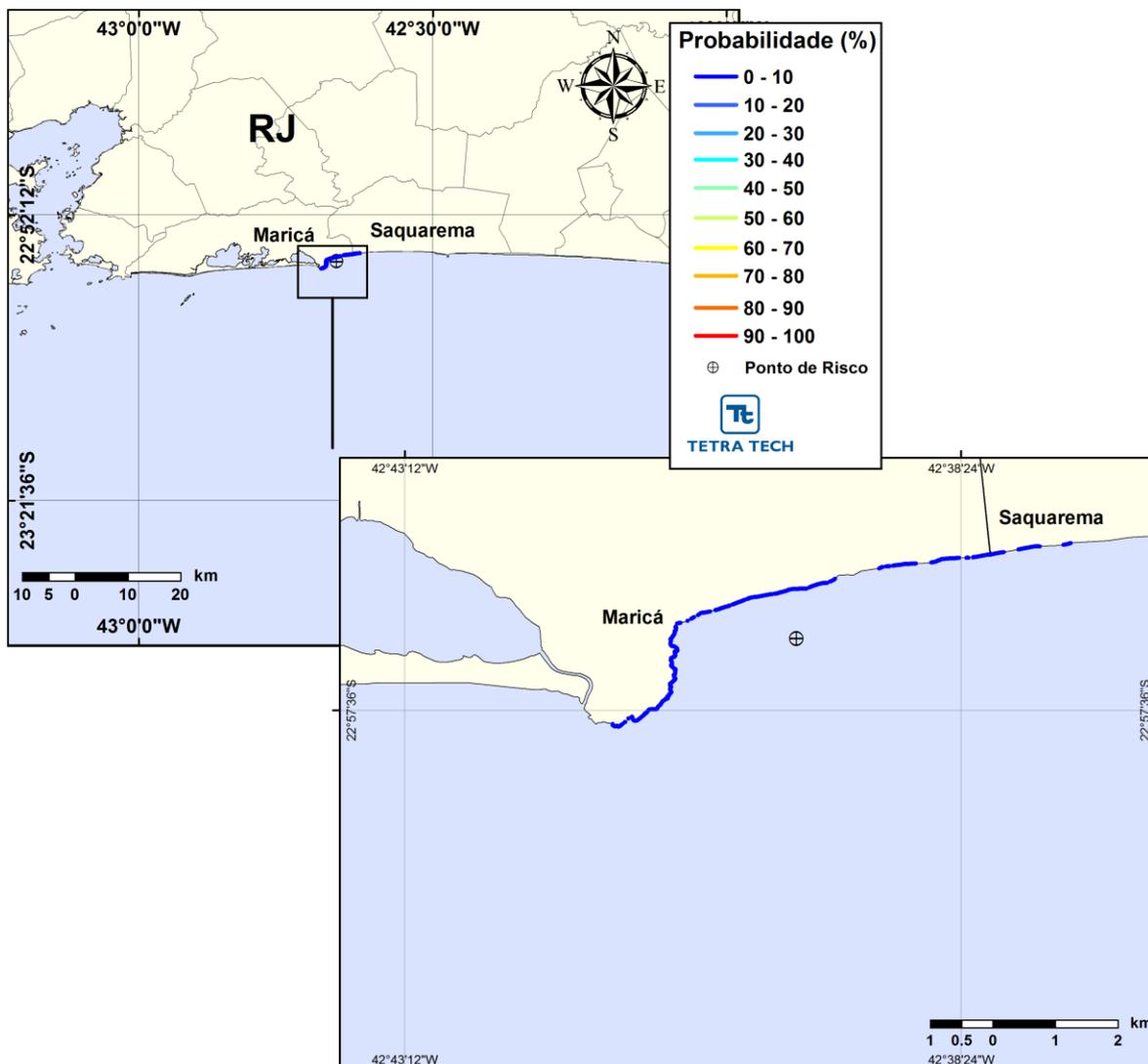


Figura III-7 - Cenário P1_200_VER_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

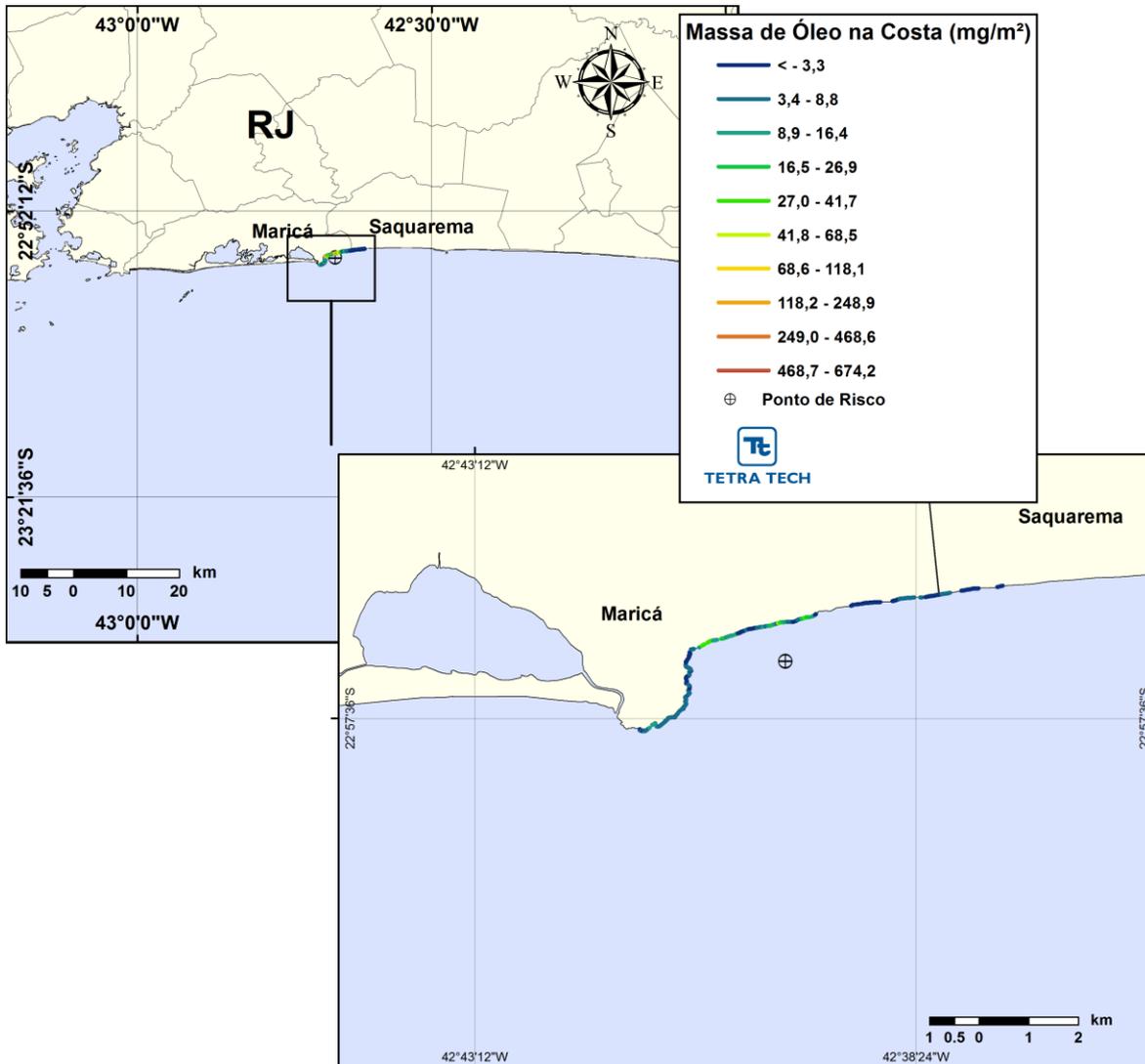


Figura III-8 - Cenário P1_200_VER_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

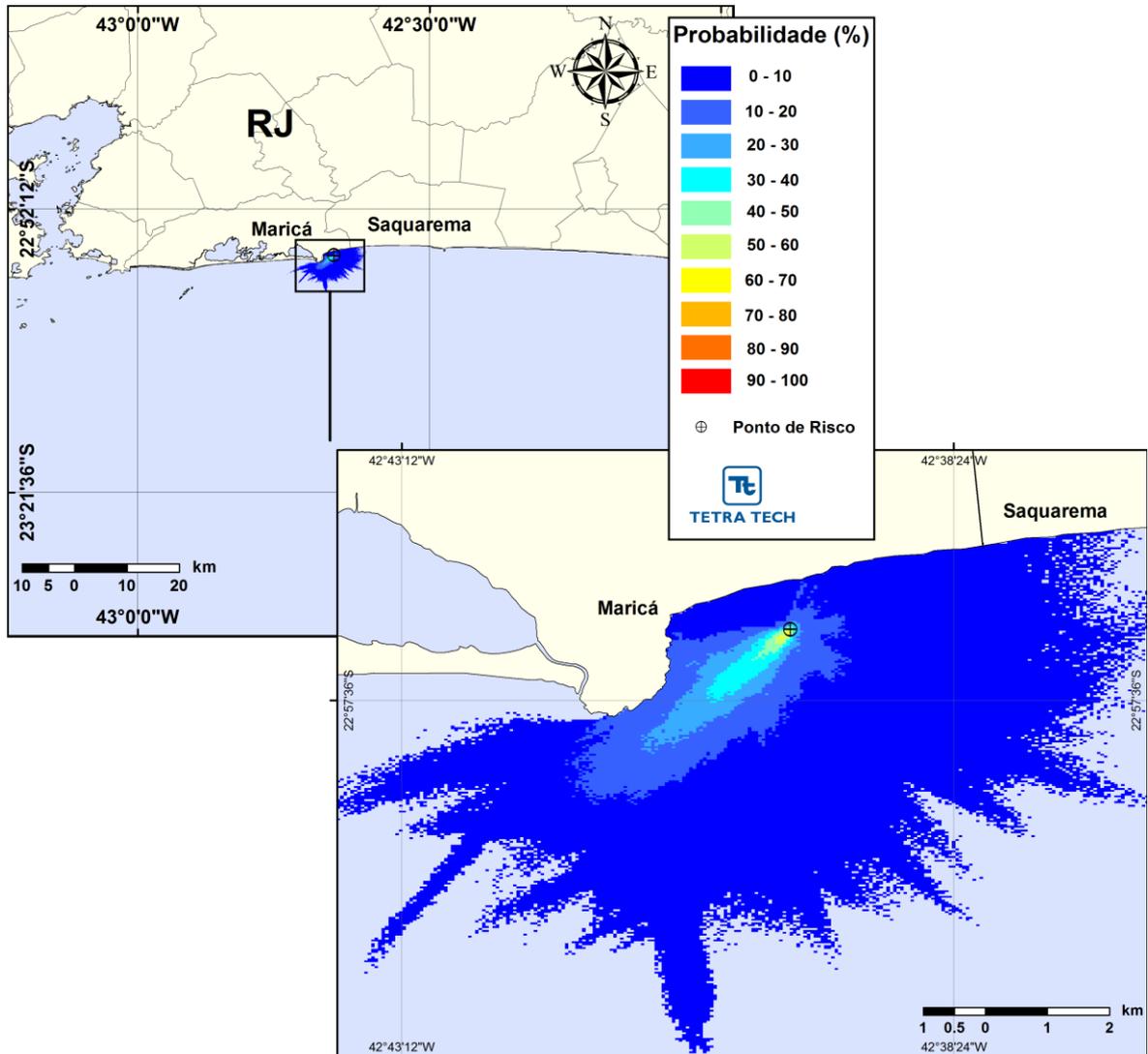


Figura III-9 - Cenário P1_PC_VER_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

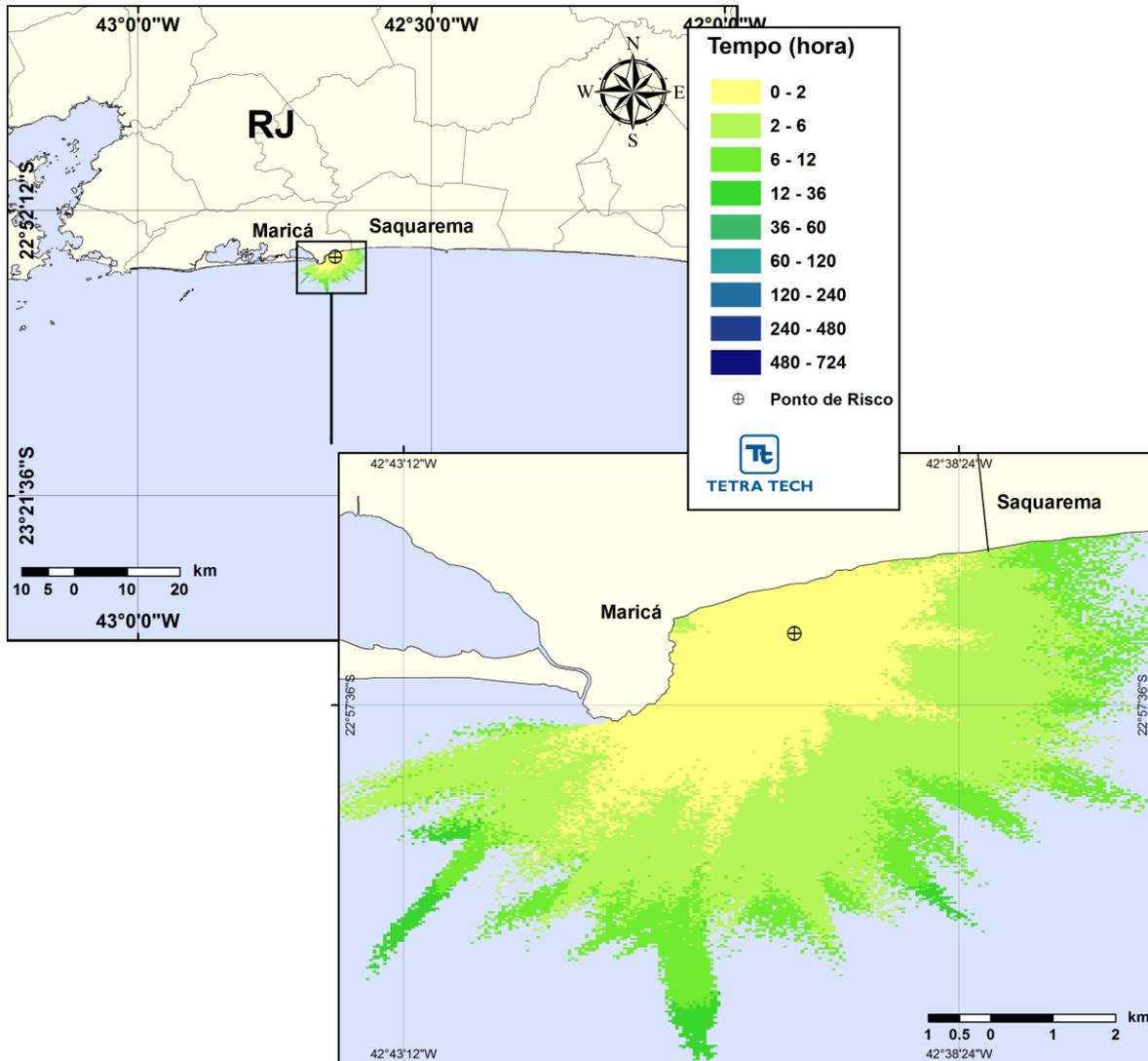


Figura III-10 - Cenário P1_PC_VER_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

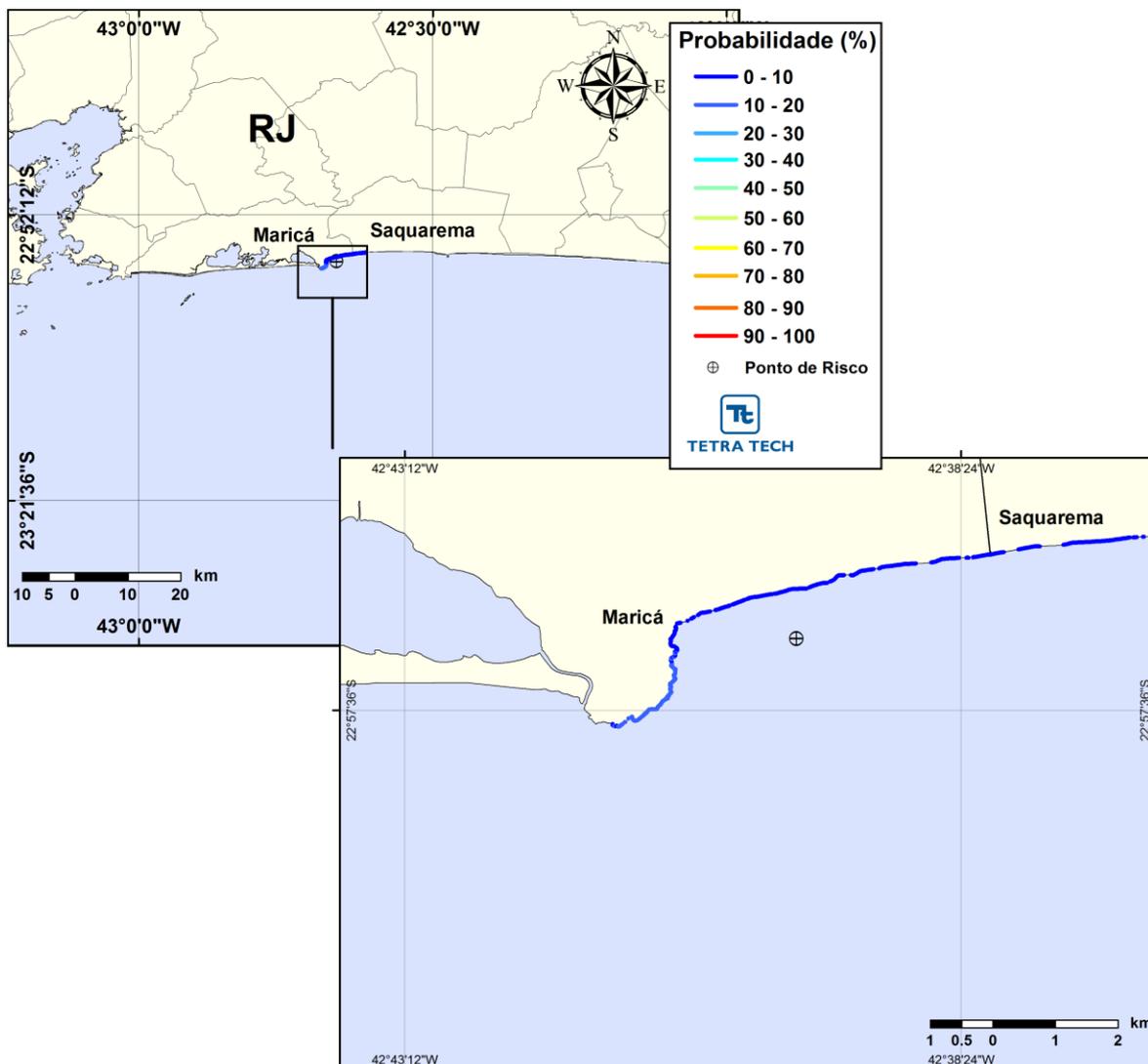


Figura III-11 - Cenário P1_PC_VER_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

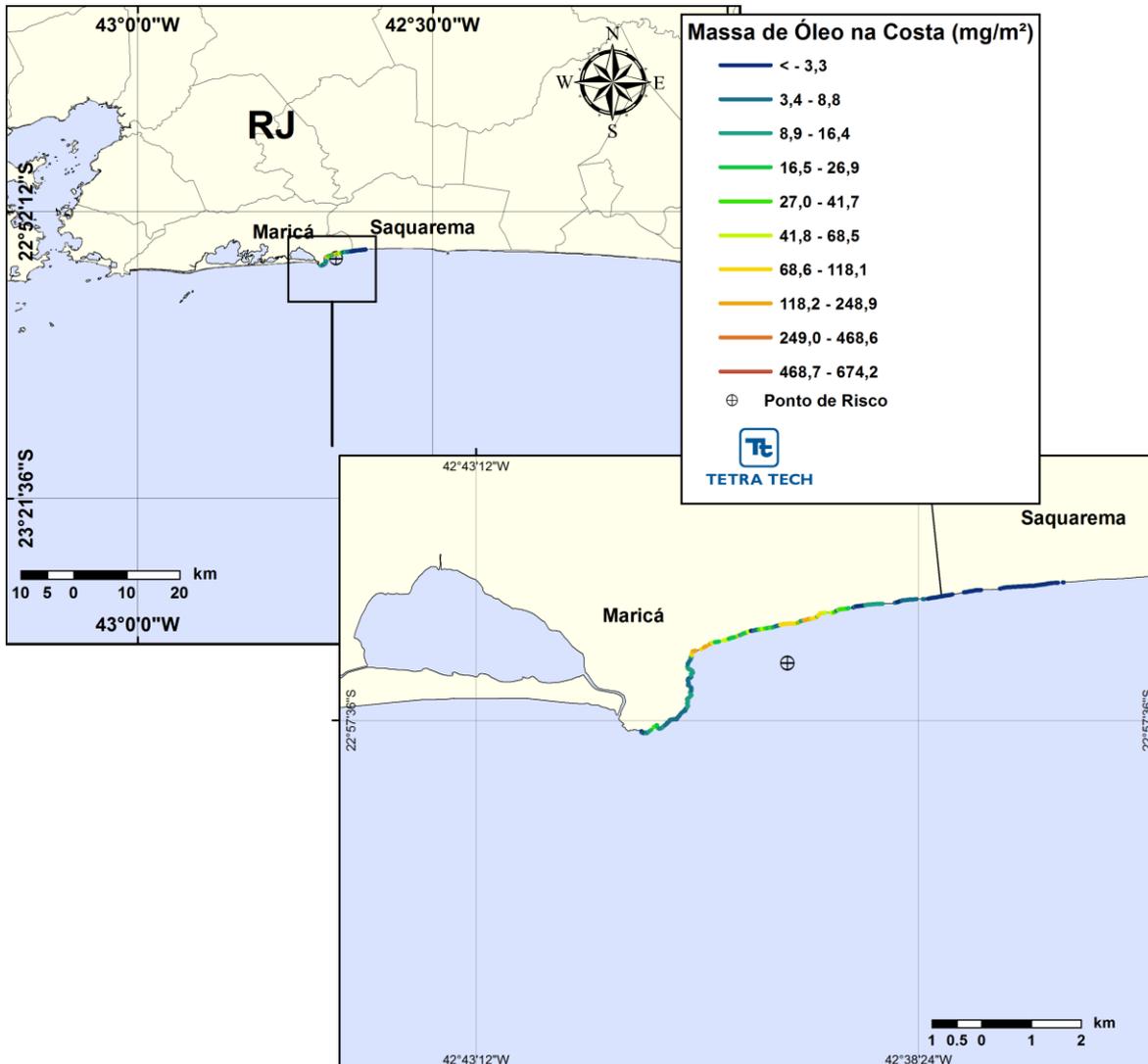


Figura III-12 - Cenário P1_PC_VER_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de verão (dezembro a fevereiro), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

Da Figura III-13 até a Figura III-24 apresentam-se os resultados das simulações probabilísticas com derrames a partir do Gasoduto Rota 3, durante os meses inverno (junho a agosto). Observa-se que a maior probabilidade de toque na costa é obtida na simulação de pior caso (20%). Ainda analisando as figuras, verifica-se que em todas as simulações existe a probabilidade de toque na costa no Município de Maricá. E, similarmente ao observado nos resultados de verão, as simulações de 200 m³ e de pior caso também apresentaram probabilidade de toque no Município de Saquarema.

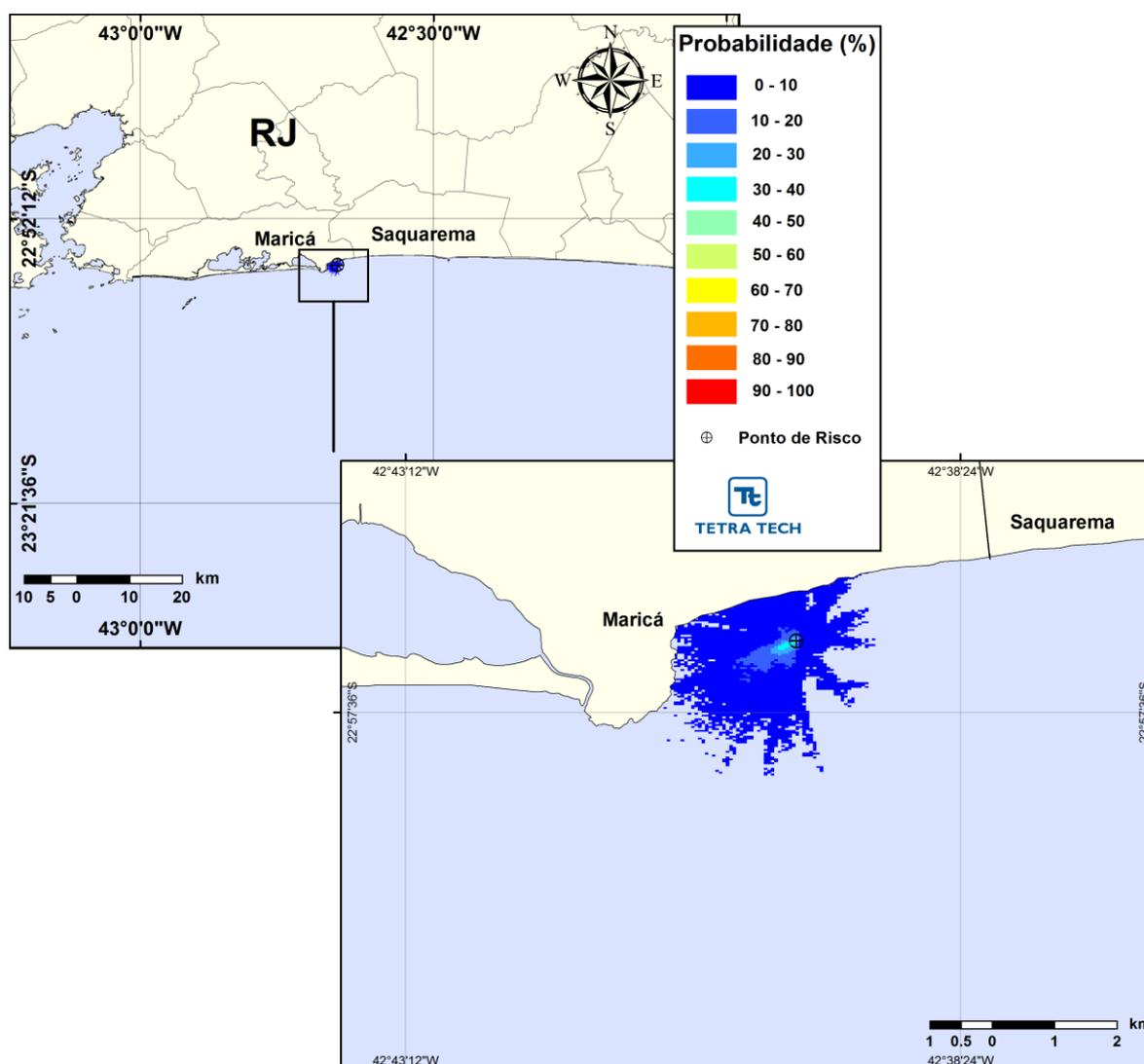


Figura III-13 - Cenário P1_8_INV_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Baía de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

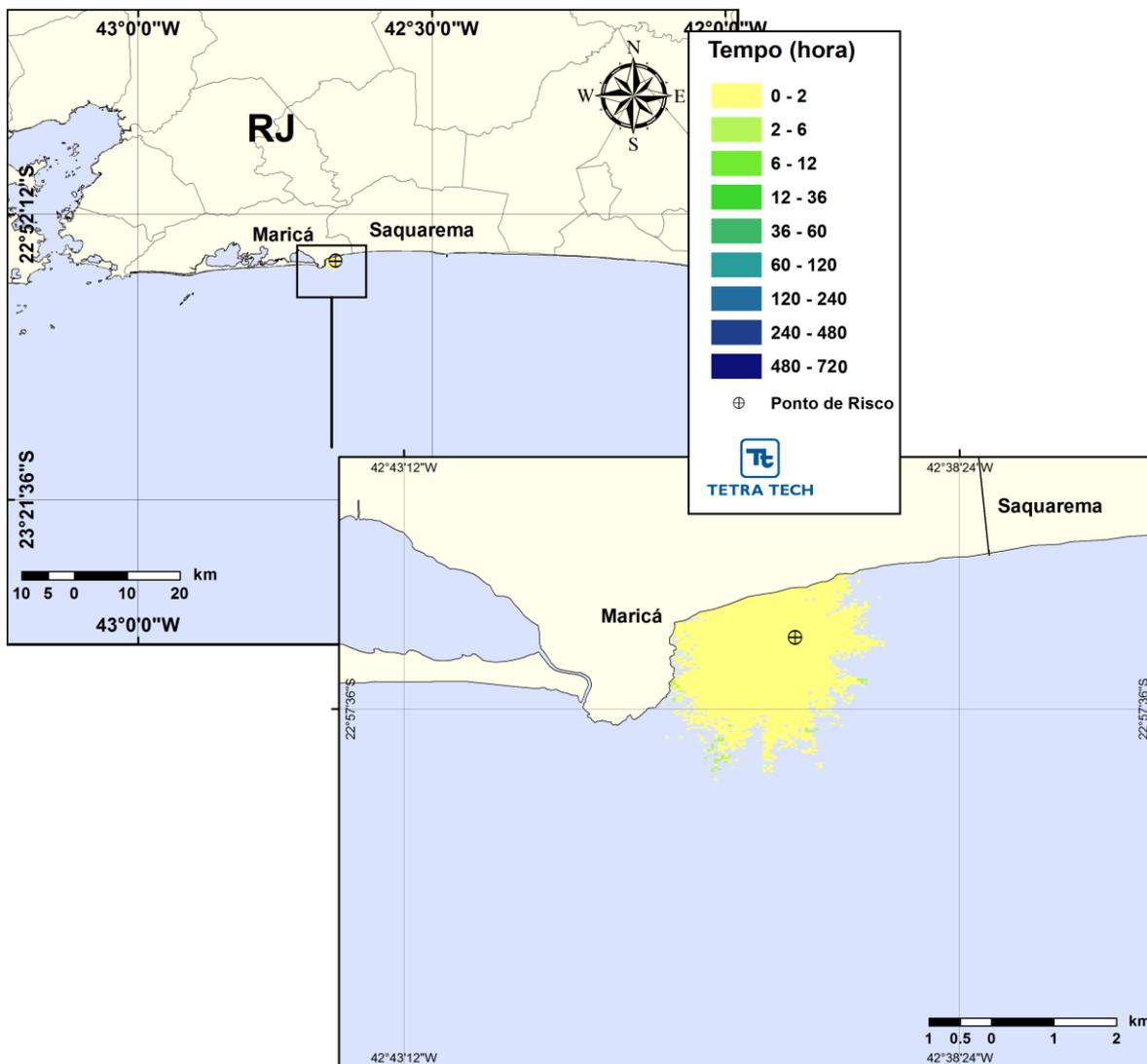


Figura III-14 - Cenário P1_8_INV_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

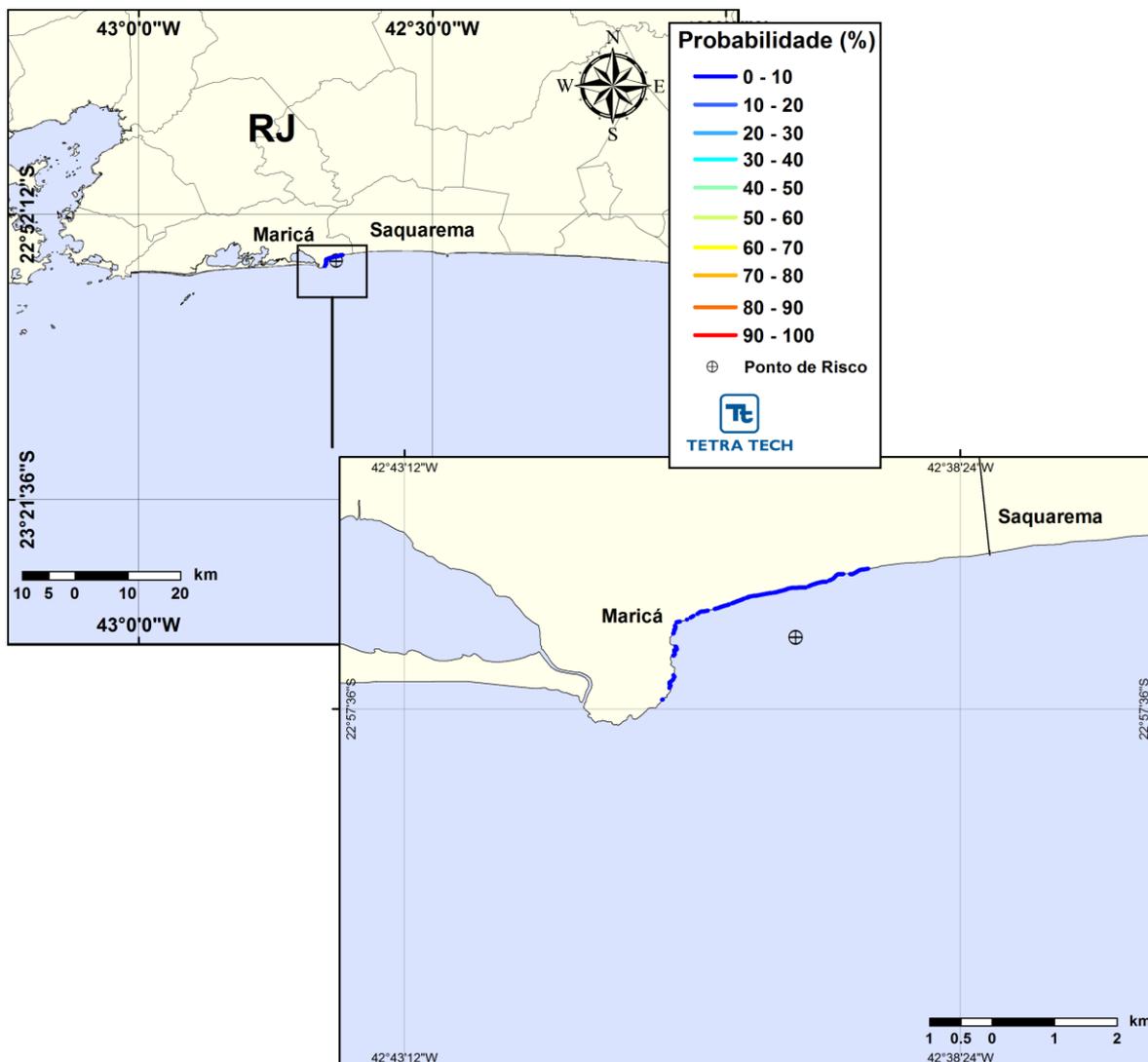


Figura III-15 - Cenário P1_8_INV_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

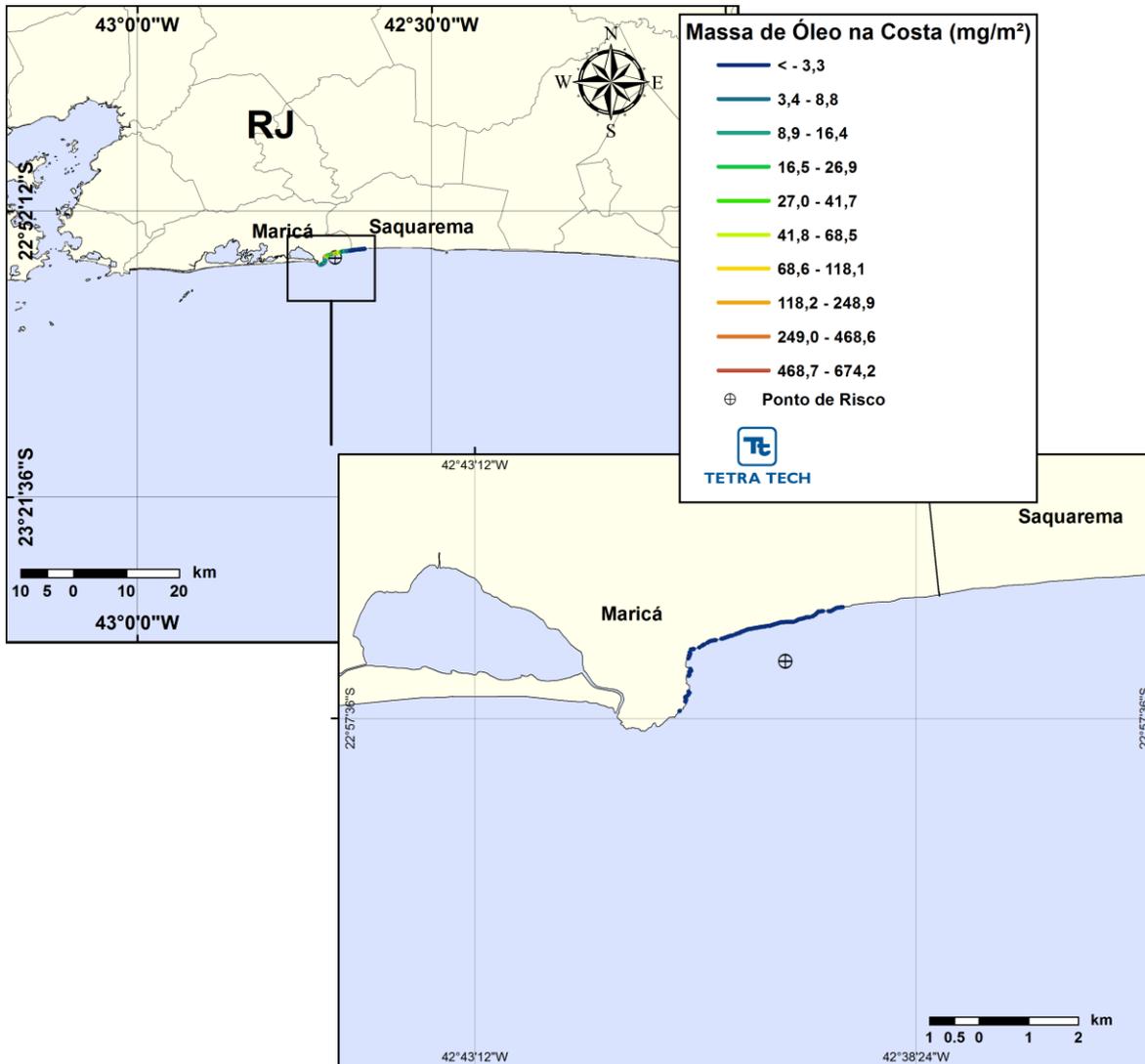


Figura III-16 - Cenário P1_8_INV_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

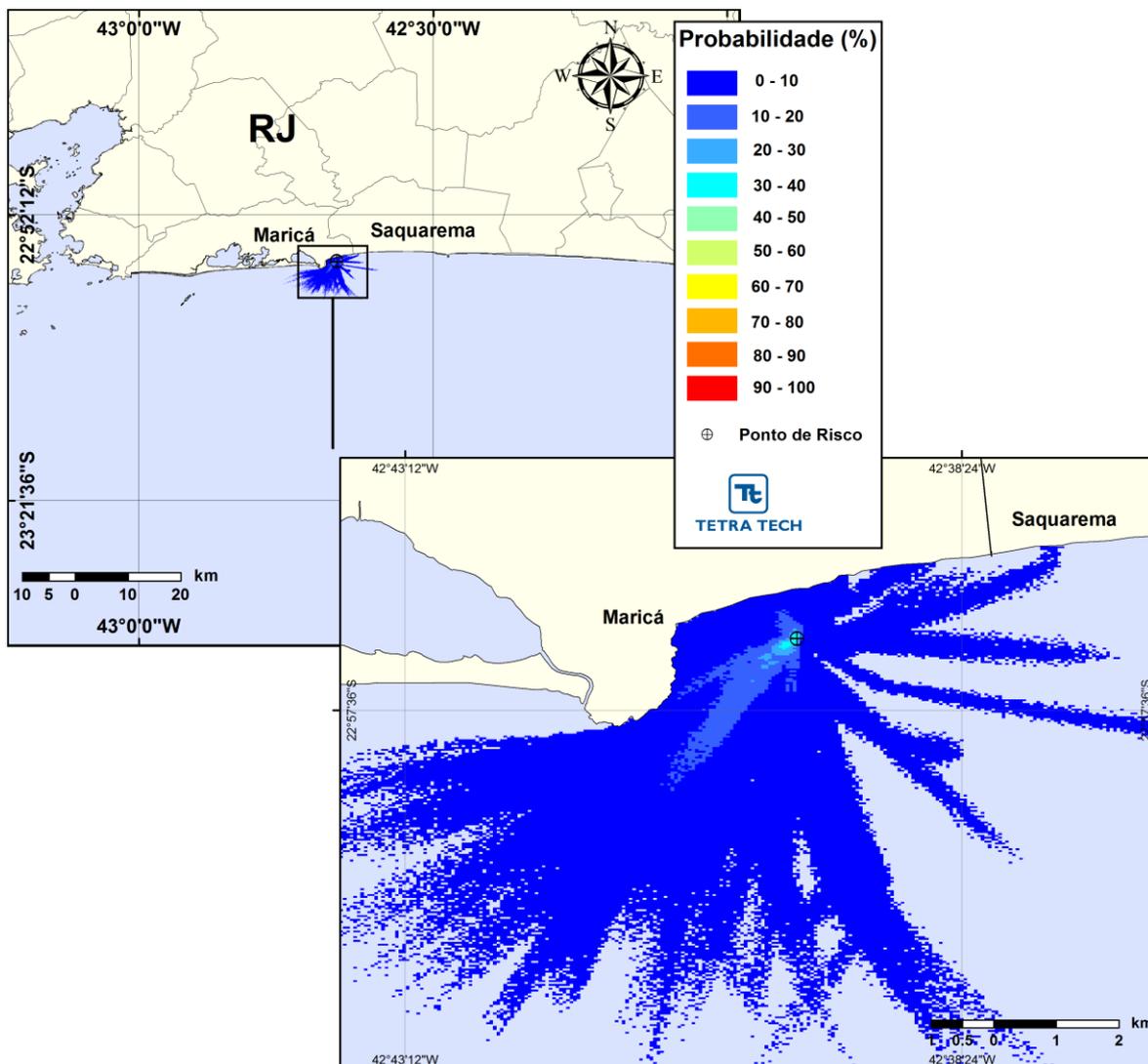


Figura III-17 - Cenário P1_200_INV_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

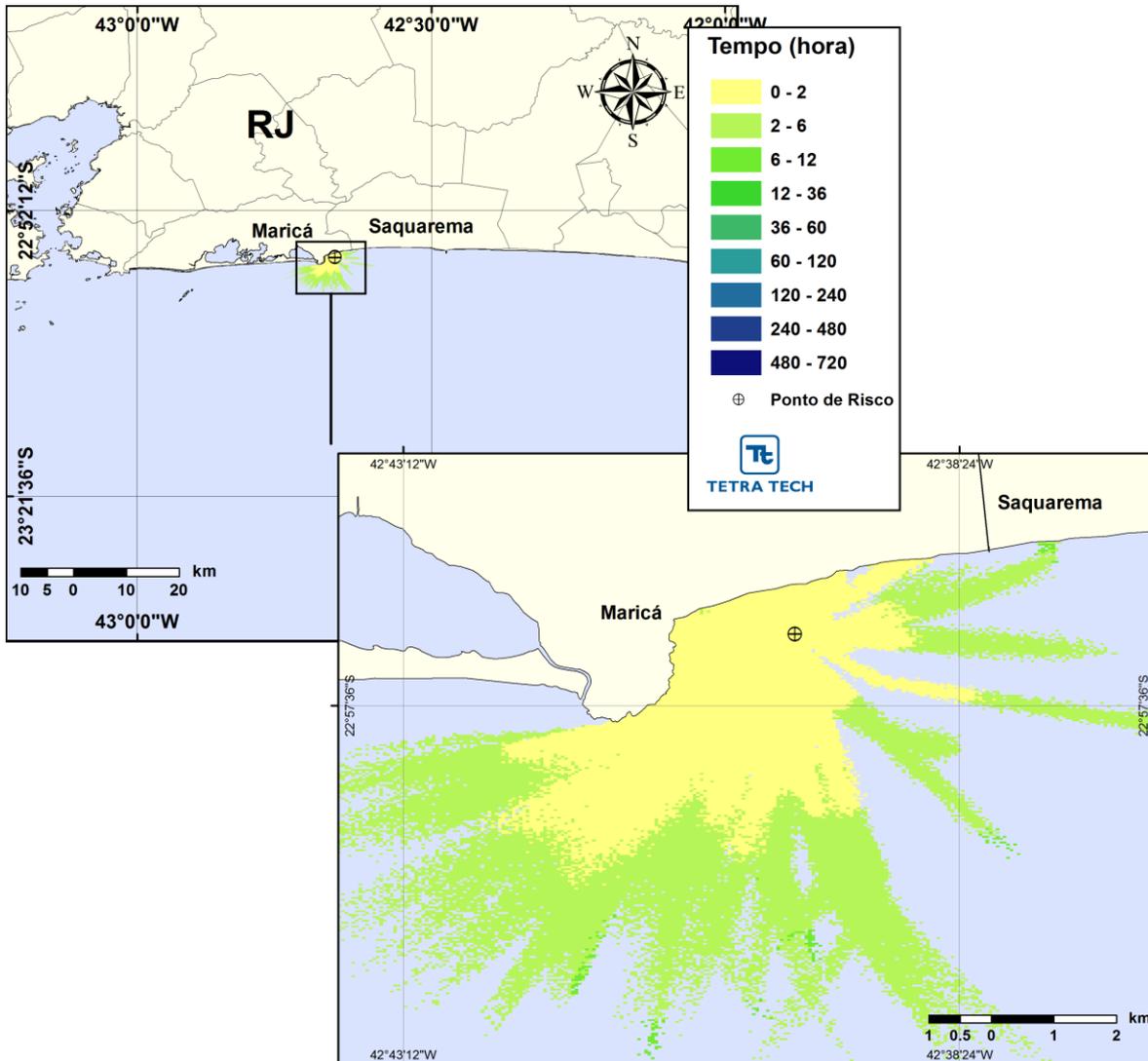


Figura III-18 - Cenário P1_200_INV_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

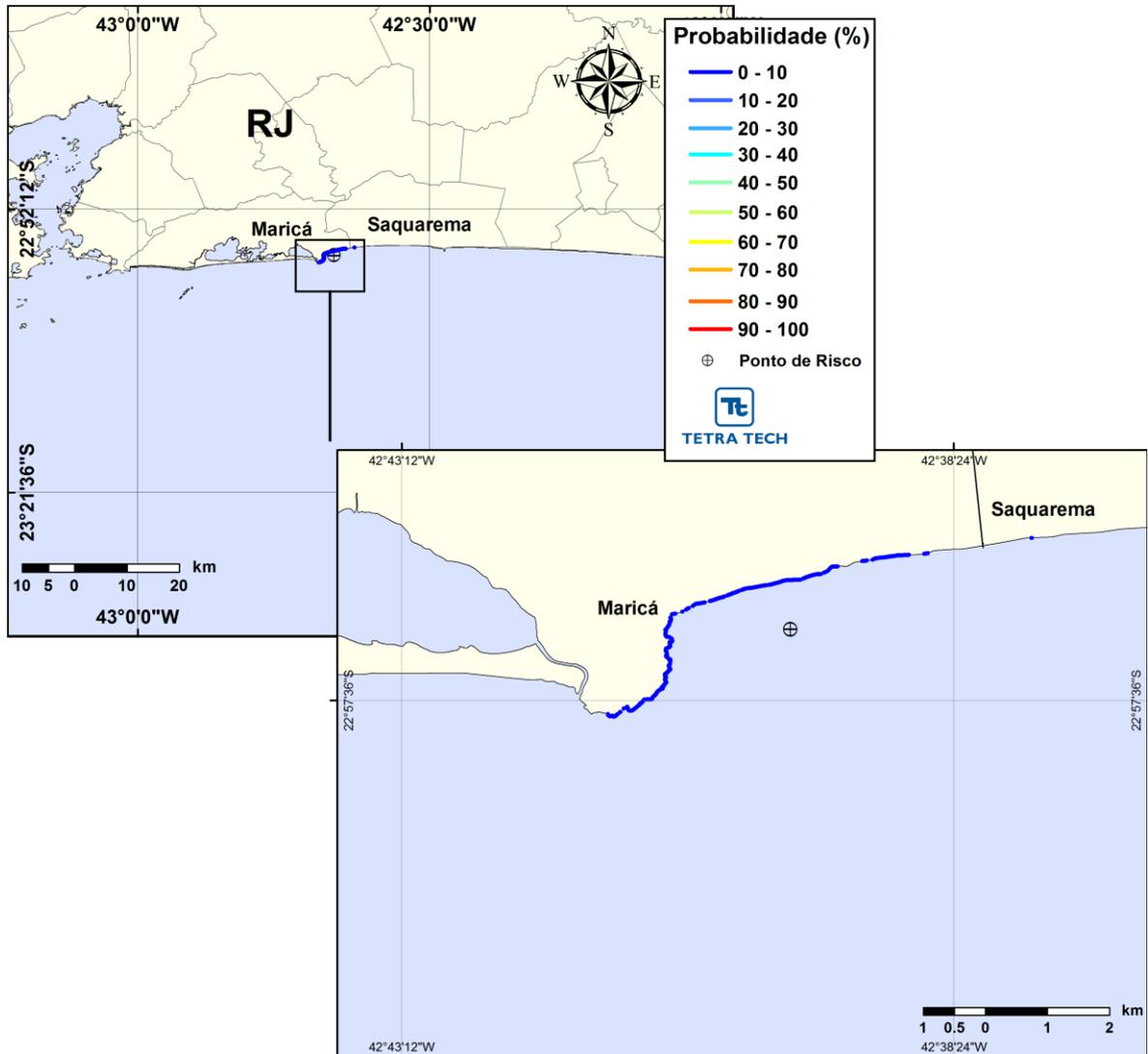


Figura III-19 - Cenário P1_200_INV_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

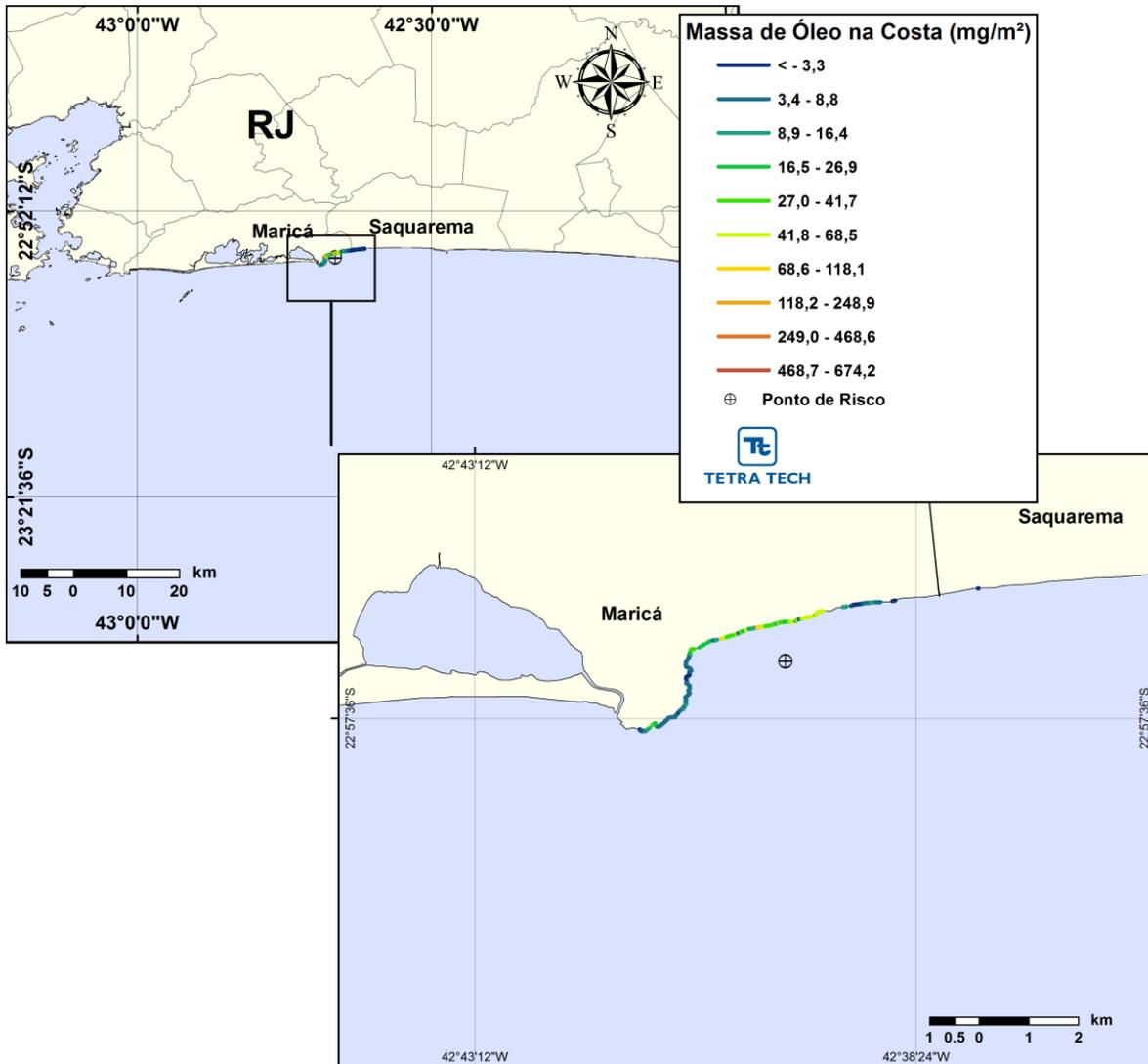


Figura III-20 - Cenário P1_200_INV_30D. Massa máxima de condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

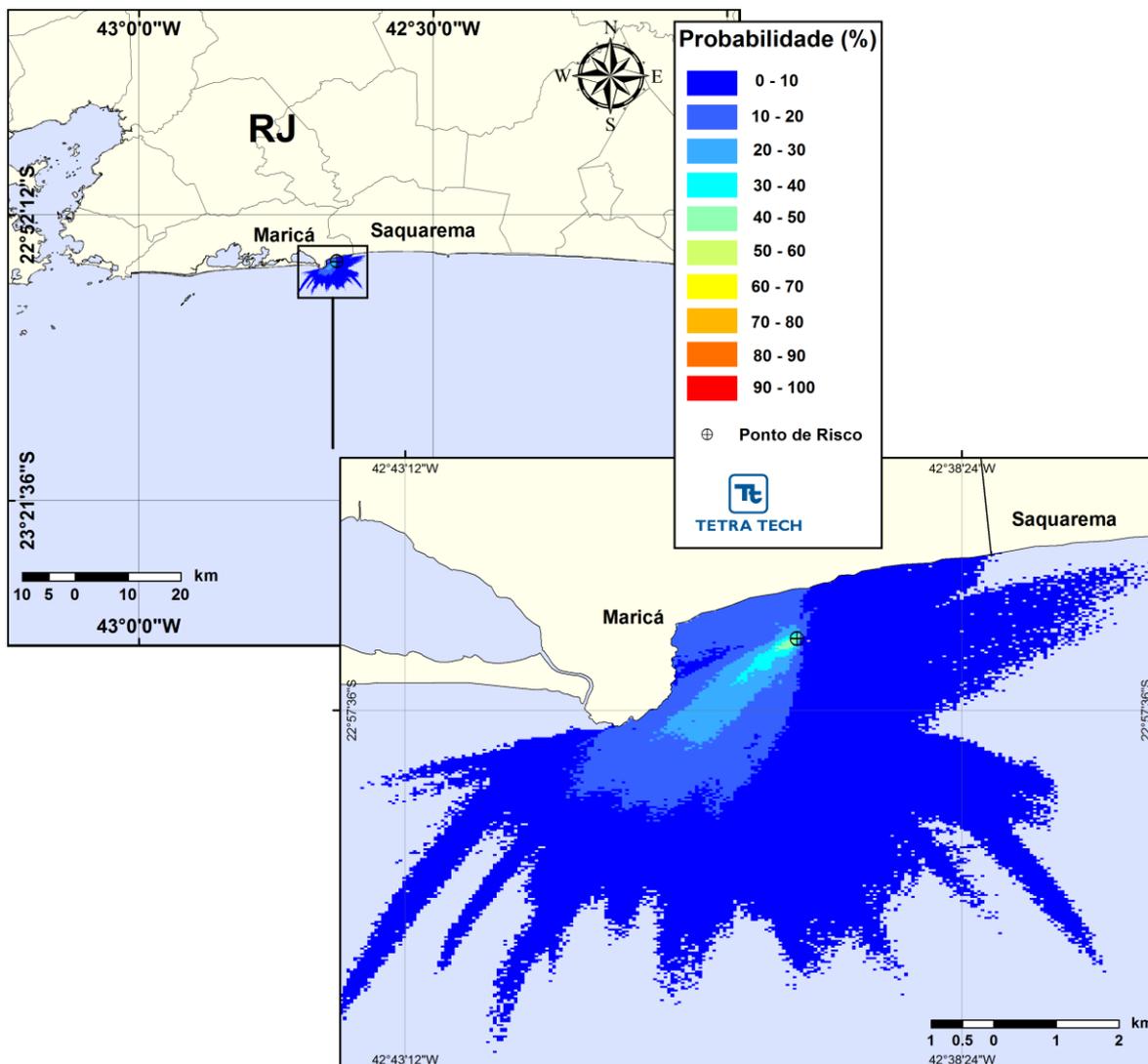


Figura III-21 - Cenário P1_PC_INV_30D. Contornos de probabilidade de condensado na água para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

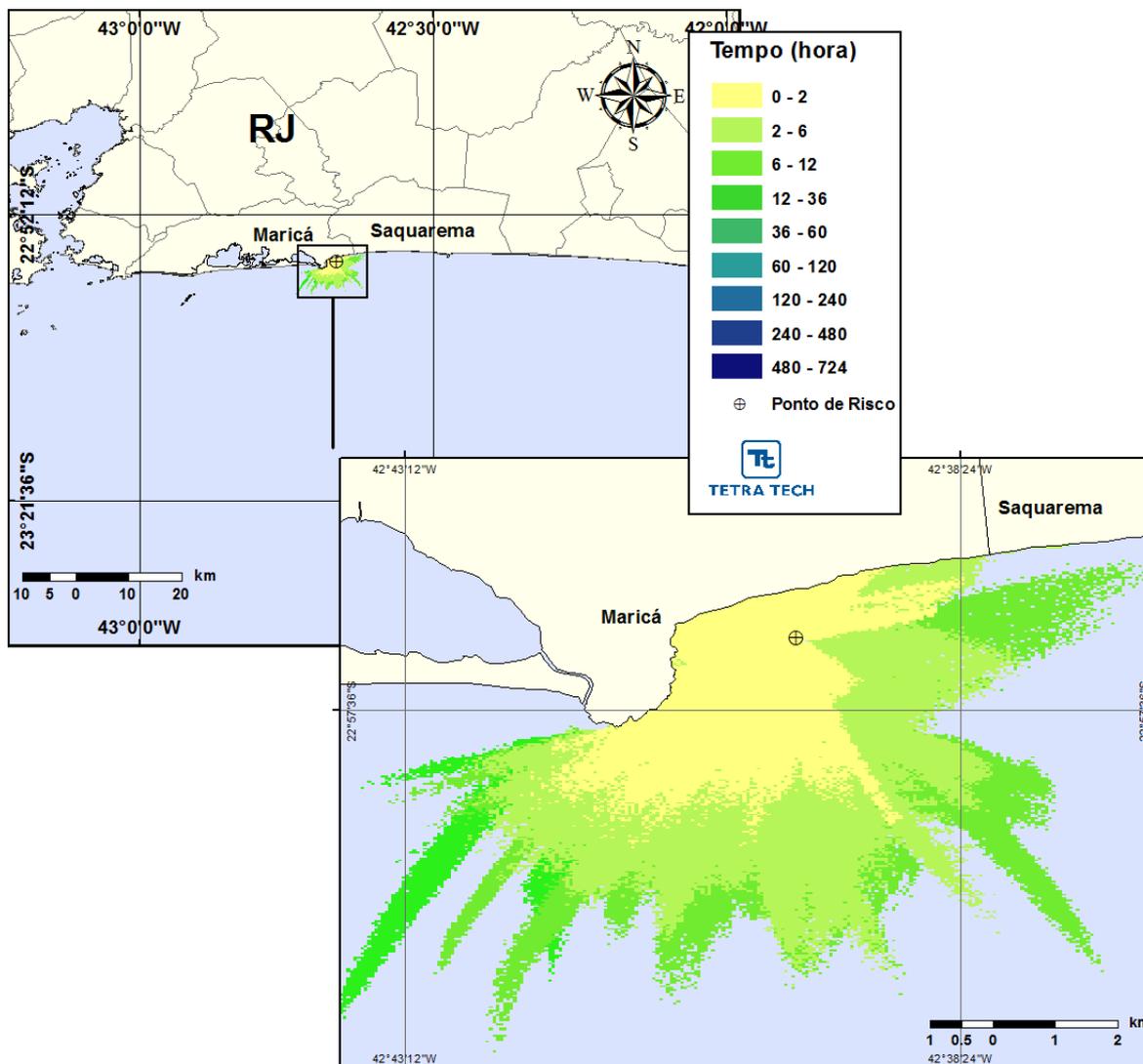


Figura III-22 - Cenário P1_PC_INV_30D. Contornos do tempo de deslocamento do condensado na para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

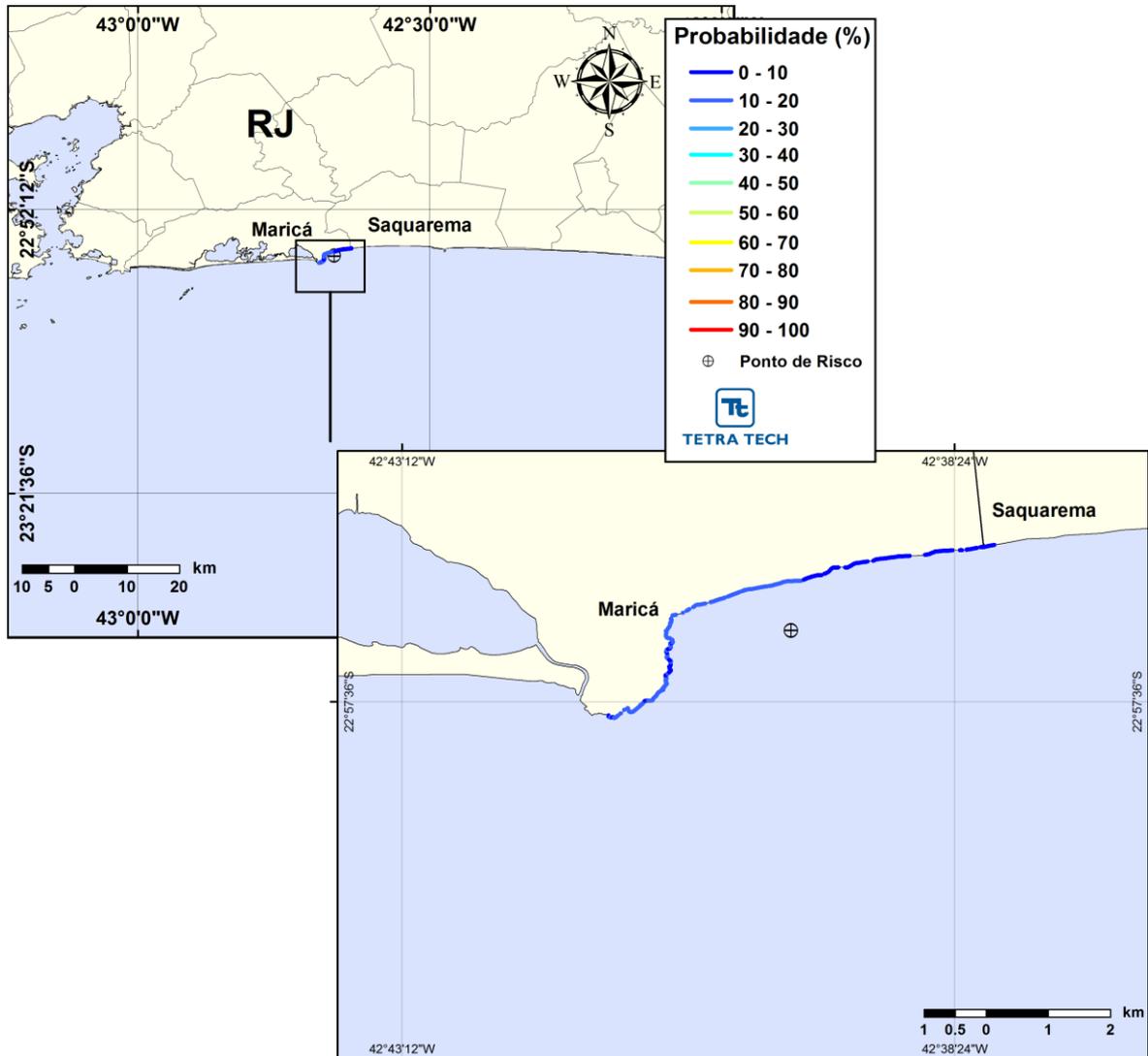


Figura III-23 - Cenário P1_PC_INV_30D. Probabilidade de toque de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Baía de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

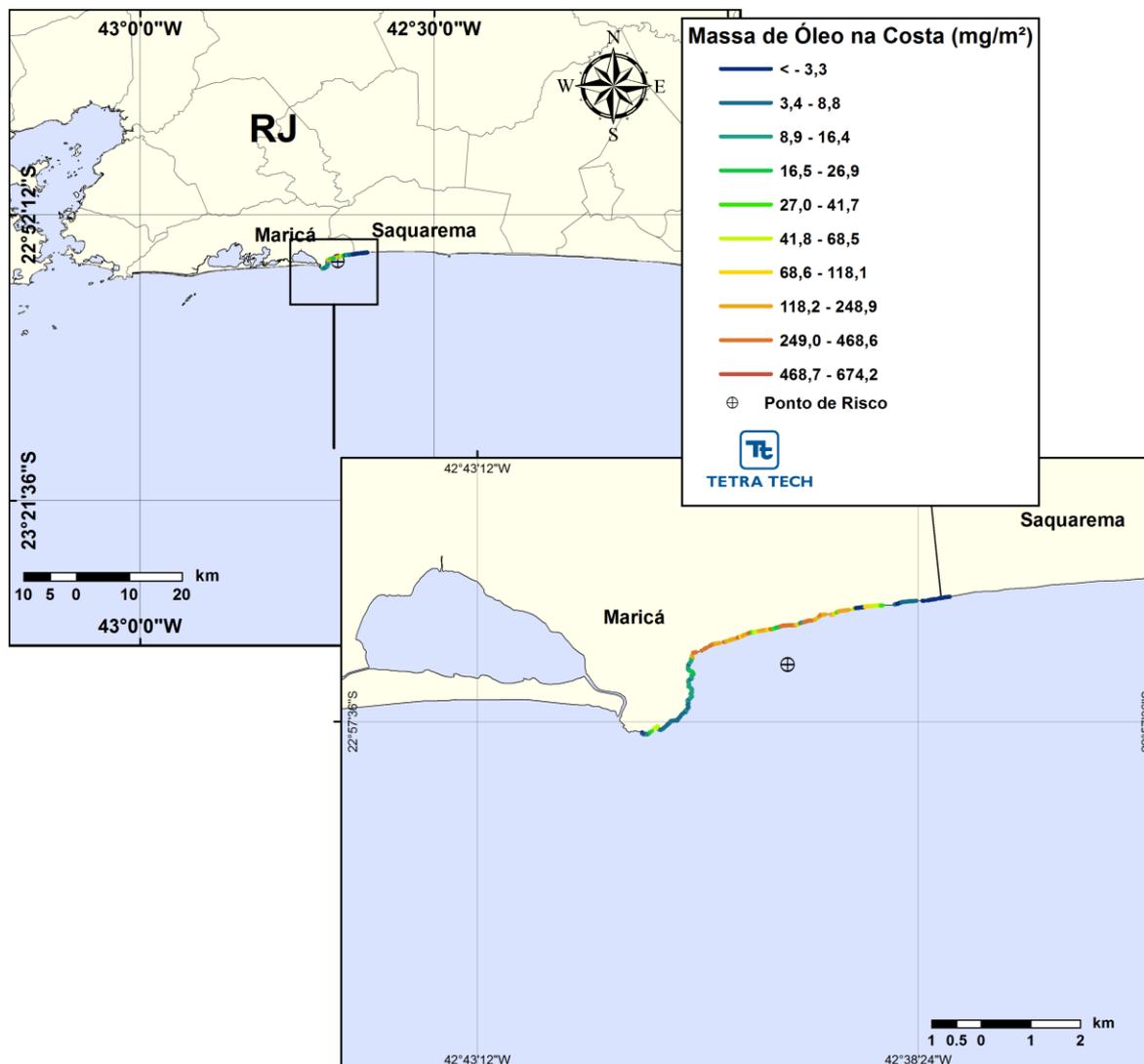


Figura III-24 - Cenário P1_PC_INV_30D. Massa máxima de condensado na costa para um acidente a partir do Gasoduto Rota 3, Bacia de Campos, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 730 m³ (ao longo de 4 horas), após 30,16 dias de simulação.

As Tabelas III-2, III-3 e III-4 apresentam as probabilidades de toque, os tempos mínimos de toque na linha de costa e os valores máximos de massa (mg/m²) na costa para os municípios com probabilidade de toque, resultante das simulações probabilísticas de verão e inverno, com derrames de 8 m³, 200 m³ e de pior caso (730 m³), respectivamente.

Observa-se que todas as simulações indicam que o menor tempo de toque de condensado na costa ocorre no Município de Maricá (RJ). Com relação às probabilidades de toque na costa, no período de verão não há probabilidade superior a 17,2% em nenhum cenário. Já nos cenários de inverno, foram calculadas probabilidades de até 20%. Independente da condição sazonal, estas maiores probabilidade são associadas aos cenários de pior caso e restritas à costa do Município de Maricá.

Tabela III-2 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de verão e inverno com derrame de 8 m³.

MUNICÍPIO		PROBABILIDADE DE OLEO NA COSTA (%)		TEMPO MINIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)		MASSA MÁXIMA NA COSTA (mg/m ²)	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
RJ	Maricá	2,2	6,1	0,6	0,6	0,61	1,34

Tabela III-3 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de verão e inverno com derrame de 200 m³.

MUNICÍPIO		PROBABILIDADE DE OLEO NA COSTA (%)		TEMPO MINIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)		MASSA MÁXIMA NA COSTA (mg/m ²)	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
RJ	Maricá	10	10	0,6	0,6	46,67	104,38
	Saquarema	4,0	1,6	5,3	3,6	5,42	0,19

Tabela III-4 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de verão e inverno com derrame de pior caso.

MUNICÍPIO		PROBABILIDADE DE OLEO NA COSTA (%)		TEMPO MINIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)		MASSA MÁXIMA NA COSTA (mg/m ²)	
		VER	INV	VER	INV	VER	INV
RJ	Maricá	17,2	20	0,6	0,5	172,73	674,24
	Saquarema	3,3	1,6	2,2	2,3	2,51	1,72

III.2 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS

A análise dos resultados das simulações probabilísticas realizadas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos resultantes da hipótese acidental de pior caso, de verão e inverno. Em cada período, de todas as 600 simulações realizadas, foram considerados como mais críticos os cenários que apresentaram o menor tempo para o primeiro toque do condensado na costa.

A Tabela III-5 apresenta um resumo dos cenários determinísticos simulados. Observa-se que o cenário de inverno apresentou o menor tempo de chegada à costa (30 minutos).

Ressalta-se que, ao final da simulação, o modelo indica que não existe mais a presença do condensado na costa. Isto ocorre devido às características físico-químicas deste produto, que ocasiona em uma perda de massa por evaporação extremamente alta.

Desta forma, buscando apresentar resultados que melhor contribuam para a interpretação da dinâmica do transporte e intemperismo do óleo na ocorrência dos derrames simulados, informa-se que ao longo de toda a simulação determinística o maior volume de óleo na costa calculado pelo modelo foi de, aproximadamente, 700 m³ no verão e de 7,3 m³ no inverno.

Tabela III-5 - Resumo dos cenários determinísticos críticos com probabilidade de toque de condensado na costa.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO DA SIMULAÇÃO	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (MINUTOS)	MUNICÍPIO DO PRIMEIRO TOQUE	VOLUME FINAL DE CONDENSADO NA COSTA (m ³)
P1_PC_VER_30D	28/02/2011 – 14:00 h	40	Maricá - RJ	0,0
P1_PC_INV_30D	15/08/2010 – 12:00 h	30	Maricá - RJ	0,0

Os resultados das simulações determinísticas críticas são apresentados na forma de três figuras. Uma das figuras apresenta a massa do condensado na superfície da água no instante em que se encontra mais próximo à costa e a respectiva pluma do mesmo na coluna d'água (cor cinza). Devido à sobreposição dos resultados, nesta figura não é possível visualizar a totalidade da pluma do condensado na coluna d'água.

Na figura subsequente é apresentada novamente a pluma do condensado na coluna d'água e o perfil vertical de concentração da mesma ao longo de uma seção transversal (demarcada por uma linha sobre a pluma). A última figura apresenta um gráfico com o balanço de massa (condensado na superfície, evaporado e na coluna d'água).

Adicionalmente, são apresentadas figuras com as condições meteorológicas e oceanográficas atuantes nos cenários determinísticos críticos. Nestas, apresenta-se o campo de correntes apenas na região de influência do condensado. Ressalta-se que o campo de correntes mostrado nestas figuras representa as correntes atuantes na profundidade em que a pluma do condensado encontra-se na coluna d'água.

A seguir, apresentam-se os resultados determinísticos críticos de verão, onde se observa que o perfil vertical da pluma do condensado na coluna d'água (Figura III-26) não demonstra a presença de condensado em todas as camadas. Associa-se isto ao fato de que, neste instante de tempo, a pluma do condensado encontra-se abaixo da concentração de corte (67 mg/m^3 ou 67 ppb) nestas camadas.

Também pode ser observado no gráfico de balanço de massa (Figura III-27 e Figura III-28) que o condensado, ao atingir a superfície, evapora rapidamente.

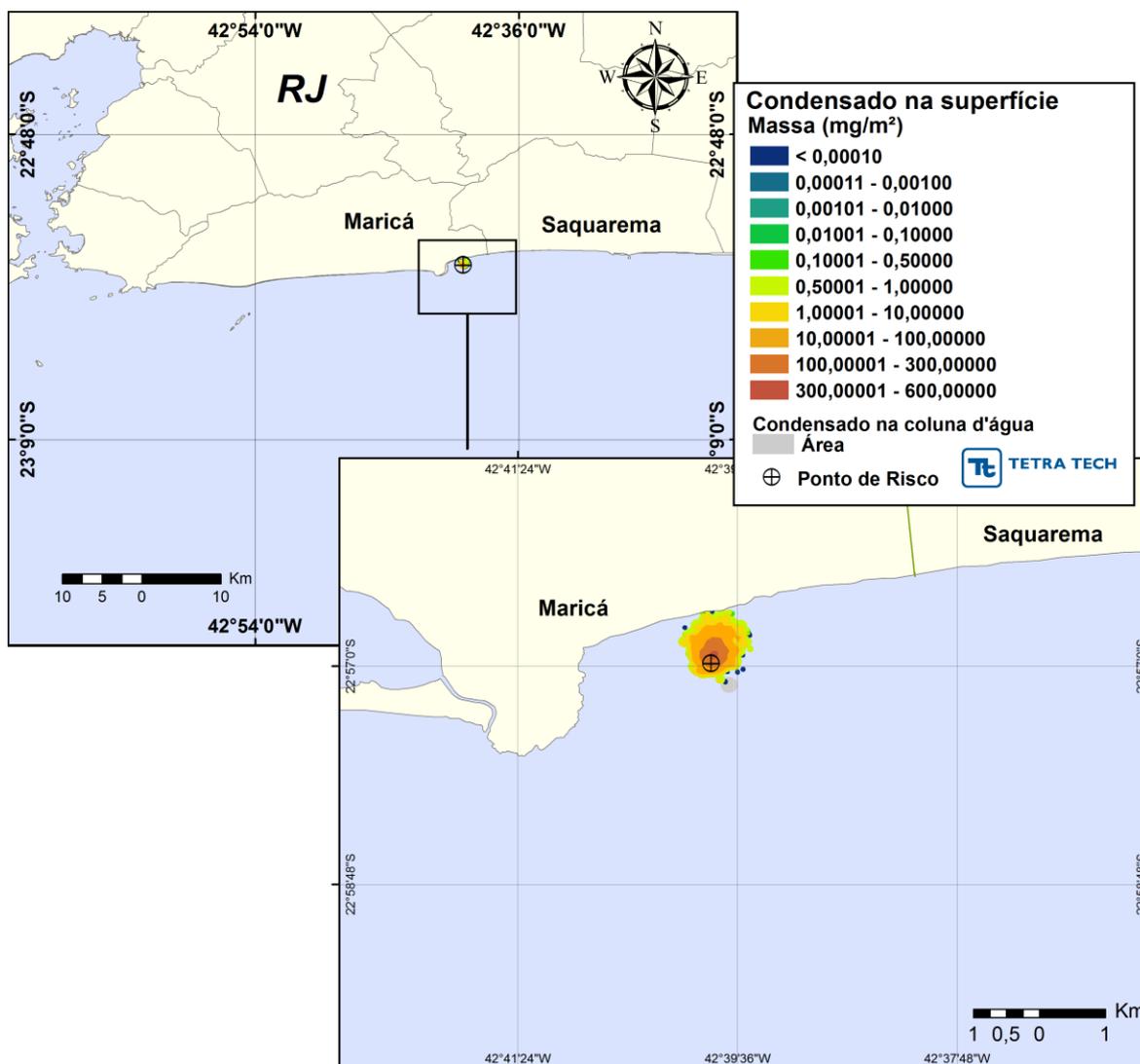


Figura III-25 - DET_CRIT_P1_VER_PC_30D. Massa do condensado na superfície da água e a pluma na coluna d'água (em cinza) para o cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o verão, Gasoduto Rota 3.

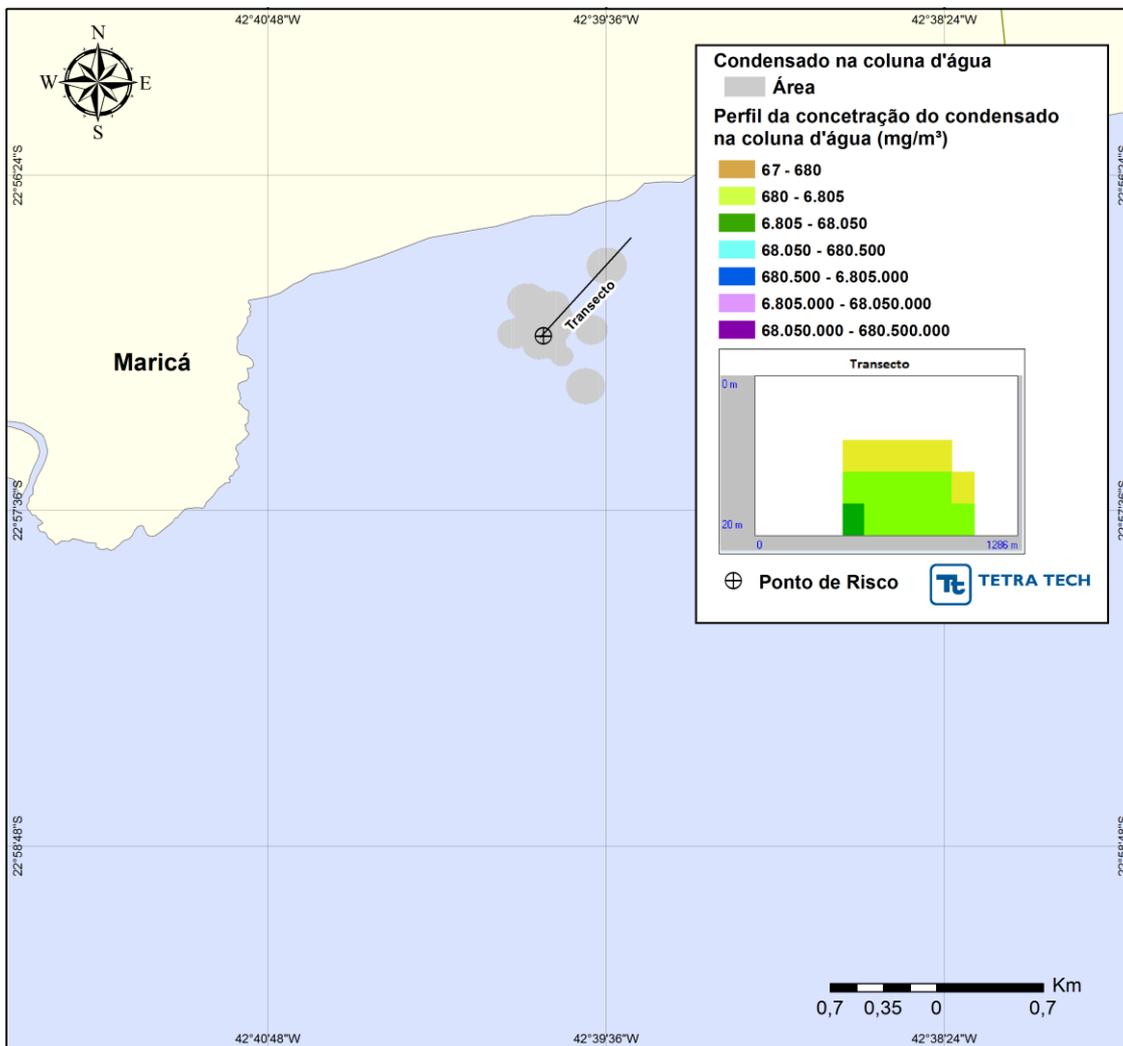


Figura III-26 - DET_CRIT_P1_VER_PC_30D. Perfil vertical da concentração do condensado na coluna d'água, do cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o verão, para o Gasoduto Rota 3.

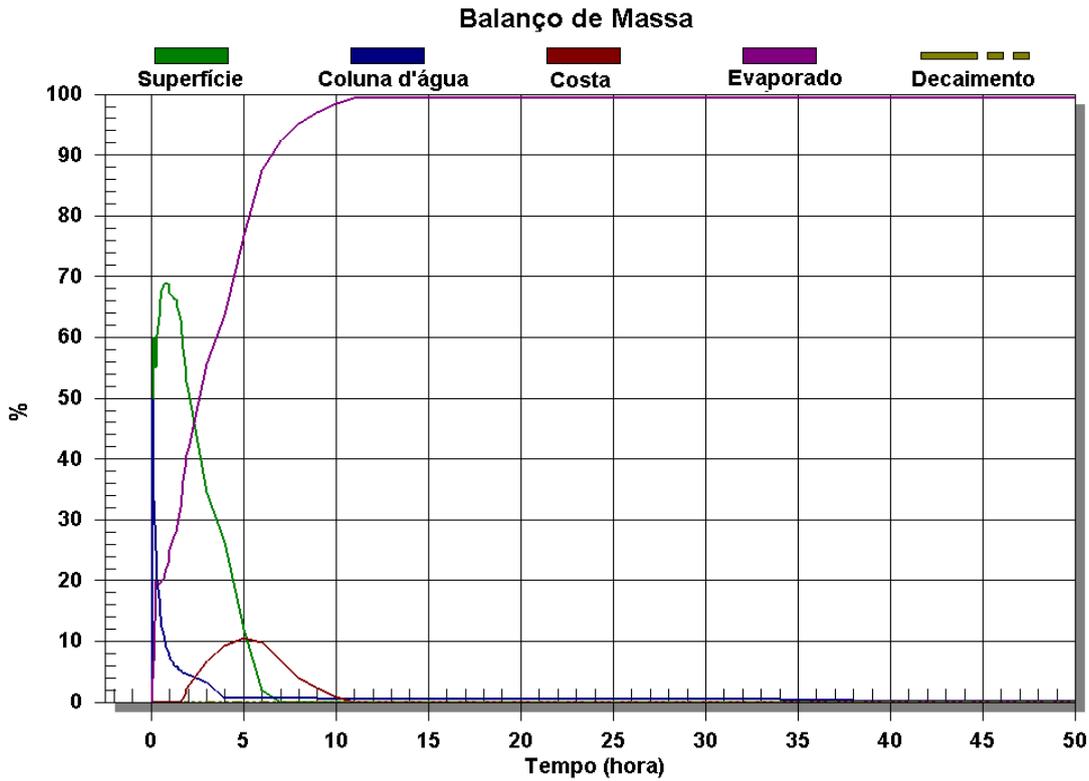


Figura III-27 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_VER_PC_30, para as primeiras 50 horas após o início do vazamento.

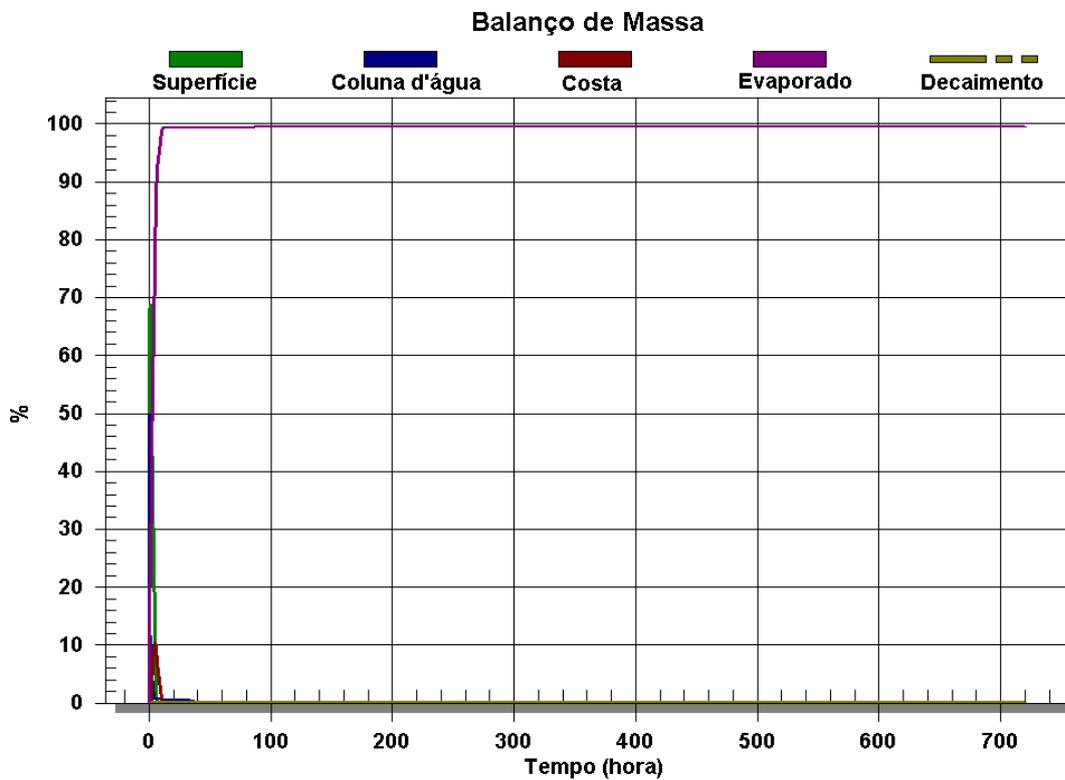


Figura III-28 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_VER_PC_30D, para o período total da simulação.

As Figuras III-29 a III-31 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de verão com derrame de pior caso, desde o início do derrame até o instante em que atinge o litoral de Maricá (RJ).

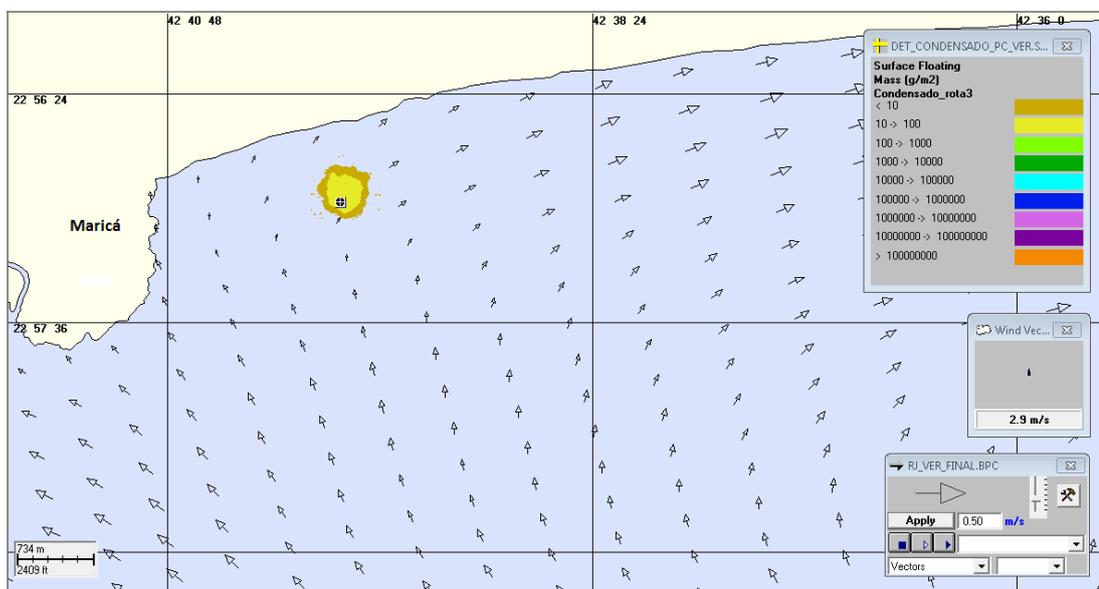


Figura III-29 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no início da simulação determinística crítica de pior caso, de verão. Direção Predominante: Corrente-NNE; Vento-S.

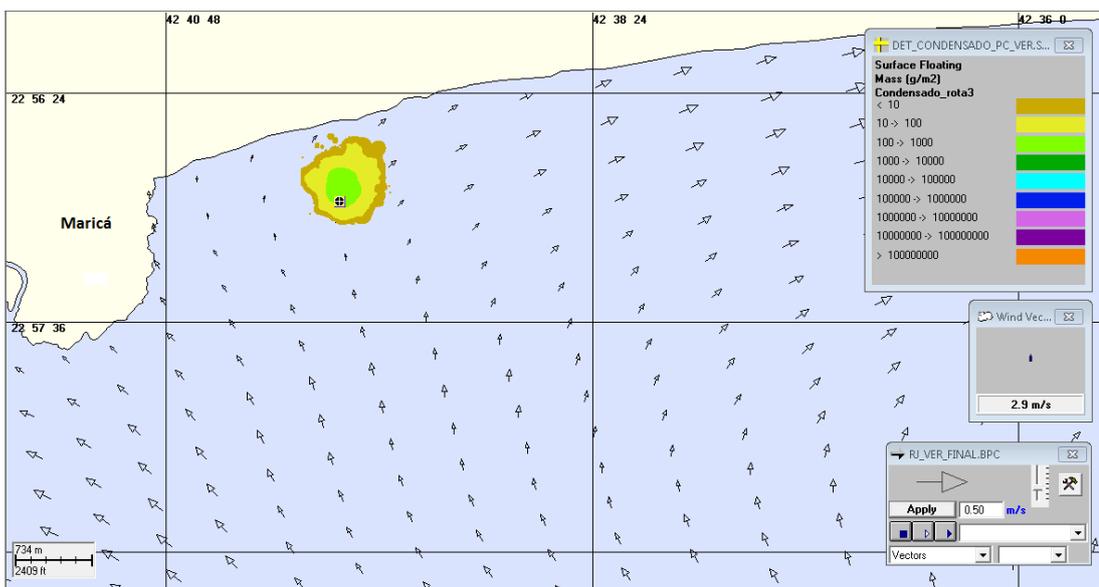


Figura III-30 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado em instante intermediário da simulação determinística crítica de pior caso, de verão. Direção Predominante: Corrente-NNE; Vento-S.

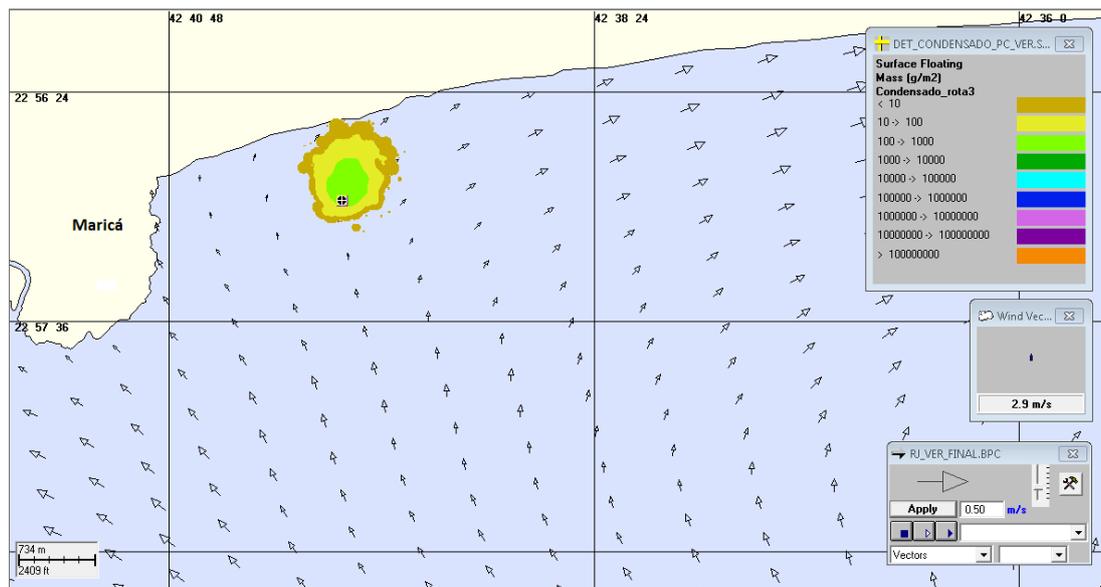


Figura III-31 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no instante de primeiro toque na costa da simulação determinística crítica de pior caso, de verão. Direção Predominante: Corrente-NNE; Vento-S.

A seguir, apresentam-se os resultados determinísticos críticos de inverno. Os gráficos de balanço de massa destas simulações demonstram que o condensado, ao atingir a superfície, evapora rapidamente e que, neste cenário, parte do derramado encontra-se entranhado na coluna d'água. Associa-se este maior entranhamento, quando comparado ao cenário de verão, à maior intensidade do vento no inverno, que apresenta magnitude superior a, aproximadamente, 4 vezes a do verão.

Novamente observa-se uma descontinuidade no perfil do condensado na coluna d'água (Figura III-33), que conforme explicado ocorre devido ao limite mínimo de concentração considerado neste estudo.

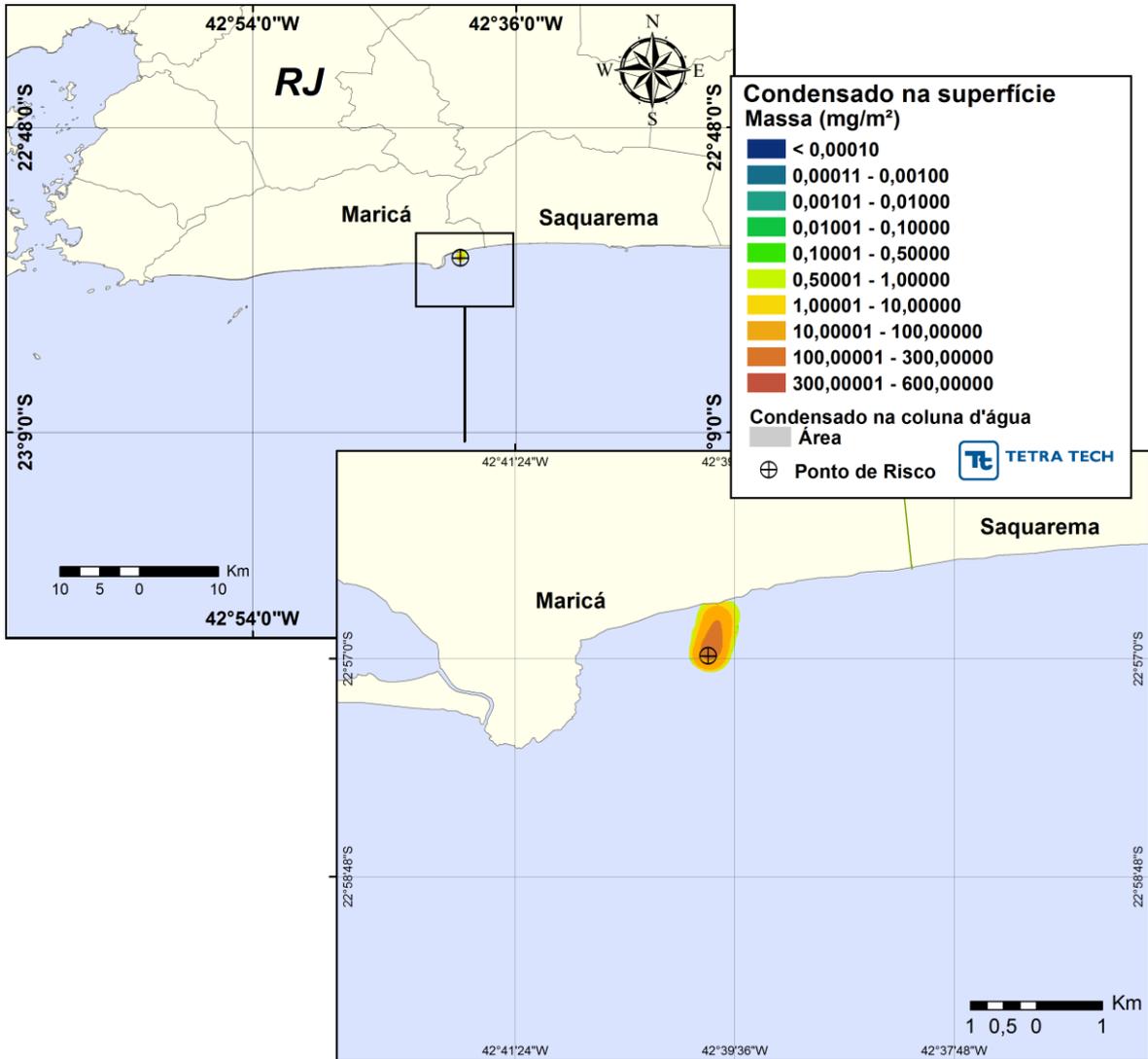


Figura III-32 - DET_CRIT_P1_INV_PC_30D. Massa do condensado na superfície da água e a pluma na coluna d'água (em cinza) para o cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o inverno, Gasoduto Rota 3.

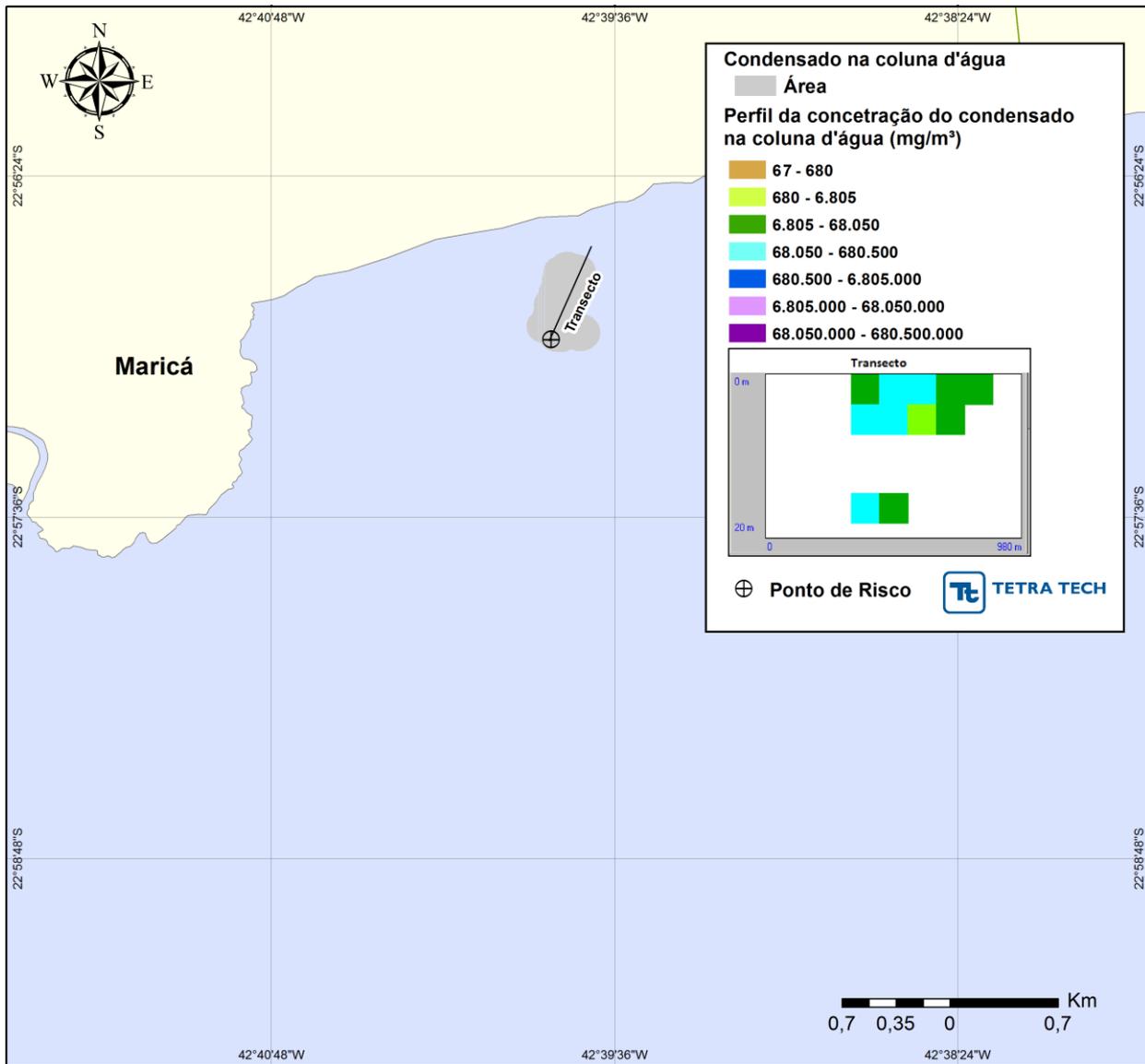


Figura III-33 - DET_CRIT_P1_INV_PC_30D. Perfil vertical da concentração do condensado na coluna d'água, do cenário determinístico crítico com um derrame de pior caso ocorrido durante o inverno, para o Gasoduto Rota 3.

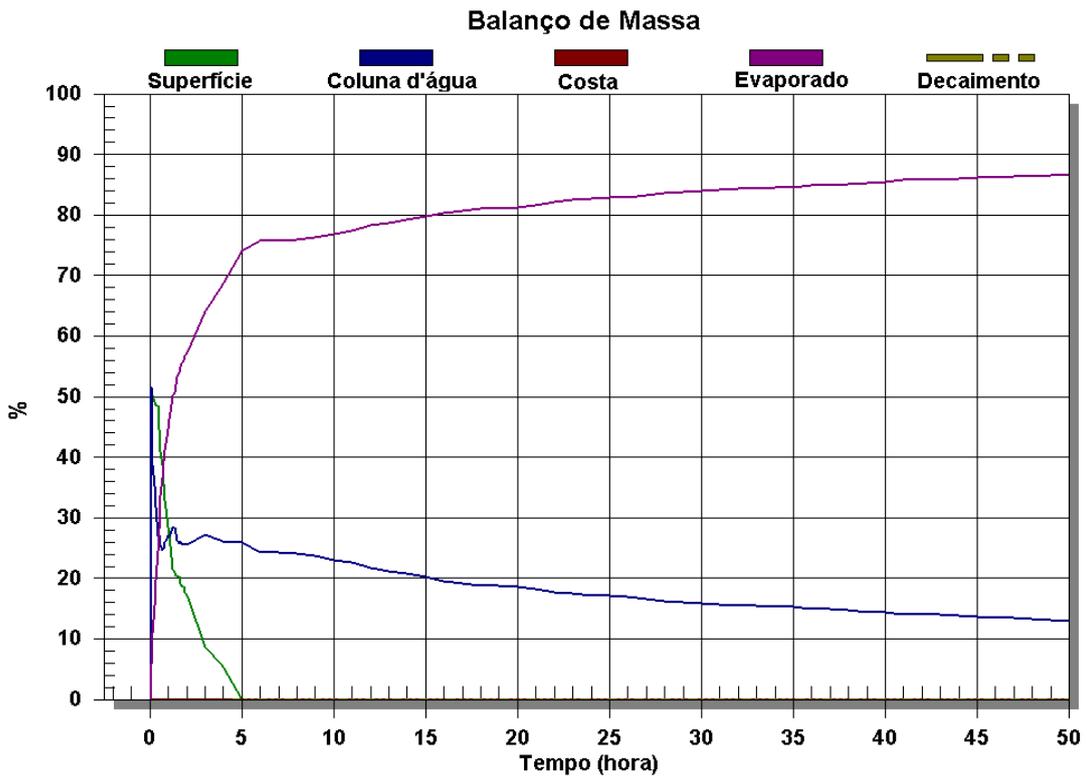


Figura III-34 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_INV_PC_30D, para as primeiras 50 horas após o início do vazamento.

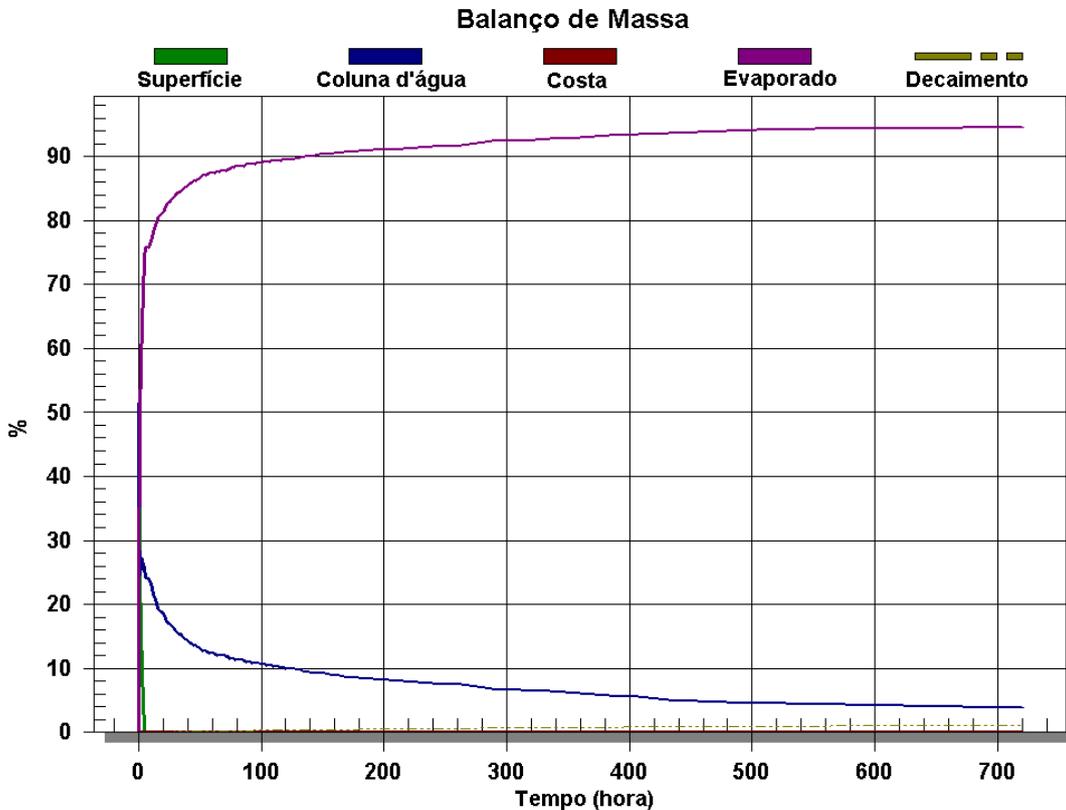


Figura III-35 - Balanço de massa do cenário DET_CRIT_P1_INV_PC_30D, para o período total da simulação.

As Figuras III-36 a III-38 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de inverno com derrame de pior caso, desde o início do derrame até o instante em que atinge o litoral de Maricá (RJ).

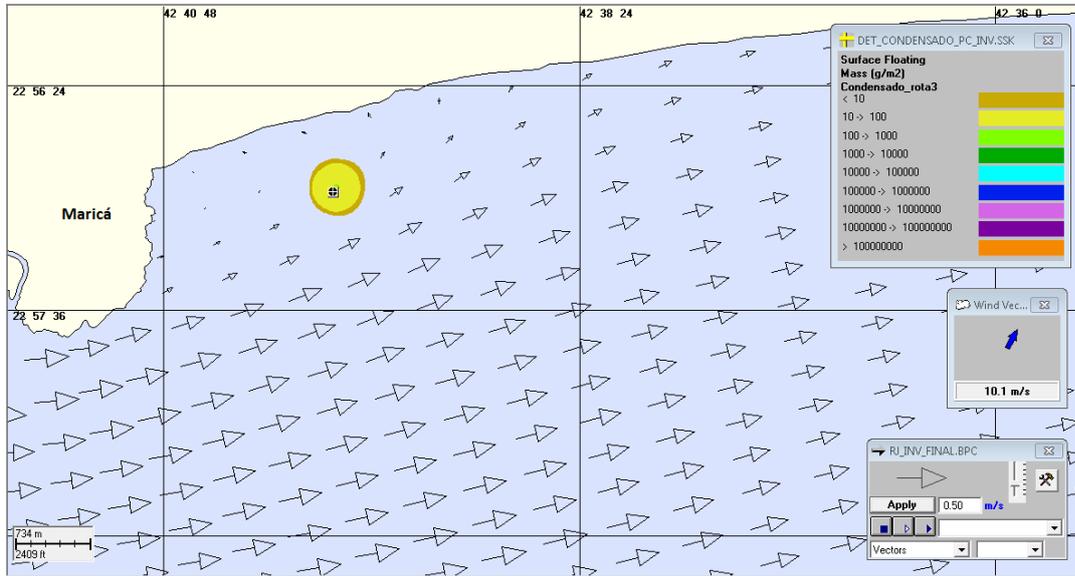


Figura III-36 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no início da simulação determinística crítica de pior caso, de inverno. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-SW.

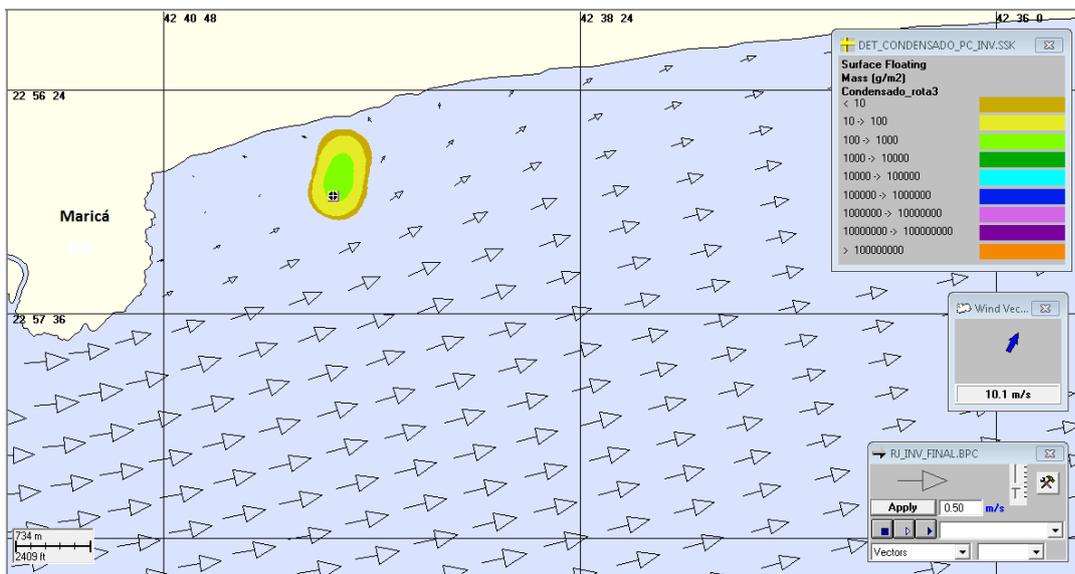


Figura III-37 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado em instante intermediário da simulação determinística crítica de pior caso, de inverno. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-SW.

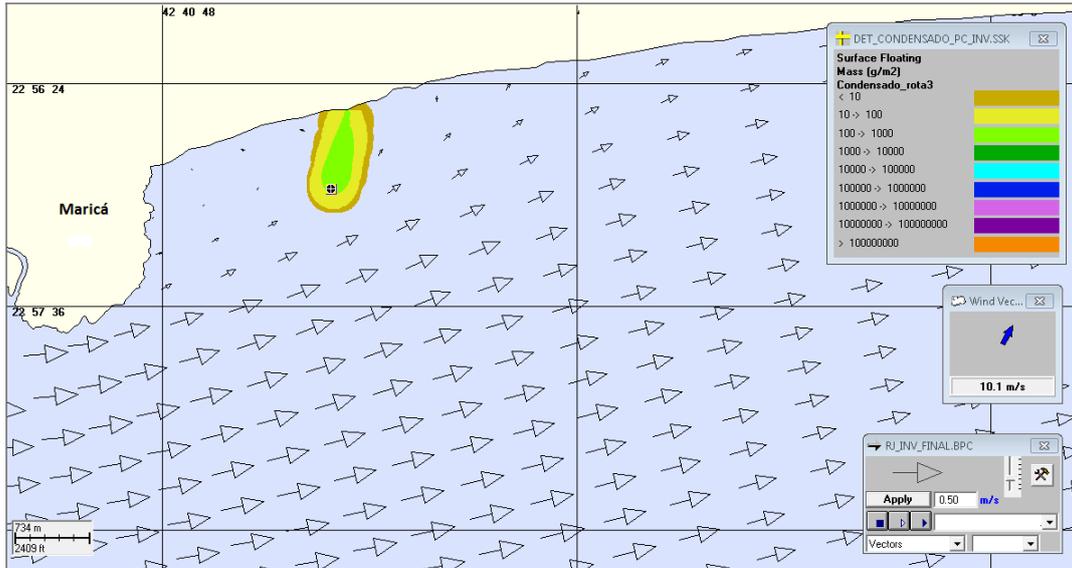


Figura III-38 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de condensado no instante de primeiro toque na costa da simulação determinística crítica de pior caso, de inverno. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-SW.

IV CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este relatório apresenta os resultados da modelagem numérica do transporte e intemperismo de condensado no mar para o Gasoduto Rota 3.

Foram conduzidas simulações de derrame de condensado considerando três volumes de derrame: pequeno, médio e pior caso (rompimento da tubulação); além de duas condições sazonais (verão e inverno).

O sistema de modelos CHEMMAP da *ASA-RPS* foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de condensado.

O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região, apresentado em TETRA TECH (2013), foi obtido a partir de um modelo numérico baseado no Delft3D, adaptado e implementado pela TETRA TECH para reproduzir as correntes costeiras. Enquanto o campo de ventos foi baseado em dados de reanálise do NCEP/NCAR.

Os resultados probabilísticos demonstraram que ocorre probabilidades de toque do condensado na costa em todas as hipóteses acidentais simuladas. Porém, observou-se variação nos municípios atingidos associado ao volume de derrame, onde o Município de Maricá (RJ) apresenta probabilidade de toque em todos os cenários simulados e o Município de Saquarema (RJ), somente nos cenários com volume médio (200 m³) e pior caso (730 m³).

As extensões de costa com probabilidades de toque aumentam conforme o aumento do volume de derrame. Desta forma, o cenário de pior caso apresentou a maior extensão de toque sendo de 7,5 km no verão e 5,8 km no inverno.

Com relação ao tempo mínimo de toque na costa, foi observado tempos inferiores a 1 hora, sendo de 30 minutos no inverno e 40 minutos no verão. Isto ocorreu devido à proximidade do ponto de risco em relação à costa, localizado a aproximadamente 870 m desta.

Os resultados da modelagem determinística demonstraram que o condensado pode atingir a superfície do mar em, aproximadamente, 3 minutos e, uma vez na superfície, evapora rapidamente. Através dos resultados dos gráficos de balanço de massa, pode-se observar que, ao atingir a superfície, além de evaporar rapidamente, a pluma do condensado não necessariamente aflora na

superfície da água, podendo deslocar-se e permanecer na coluna d'água, onde sofre diluição.

Finalmente, nas simulações apresentadas neste estudo, não foram consideradas quaisquer medidas de resposta ou controle para os potenciais acidentes simulados.

V BIBLIOGRAFIA

TETRA TECH, 2013. Modelagem de Derrame de Hidrocarbonetos no Mar para o Gasoduto Rota 3: Descrição da Base Hidrodinâmica. Relatório Técnico, Revisão 00 (20 de maio de 2013). 64pp + Apêndice.

BRASIL, 2008. Resolução CONAMA nº 398, de 11 de junho de 2008. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 12 jun. 2008.

DELTARES, 2011. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 690pp.

FRENCH McCAY, D.P., 2002. Development and Application of an Oil Toxicity and Exposure Model, OilToxEx. **Environmental Toxicology and Chemistry** 21(10): 2080-2094, October 2002.

IBAMA, 2009. Nota Técnica N°02/2009/CGPEG/DILIC. Síntese dos aspectos técnicos da modelagem de transporte de óleo no mar e suas aplicações aos processos de licenciamento em E&P. Rio de Janeiro, 02 de março de 2009.

VI EQUIPE TÉCNICA**Equipe da Empresa Consultora Tetra Tech Consultoria Ltda.**

Profissional	Ana Carolina da Rocha Lammardo
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	1.689 (AOCEANO)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	325047
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	060.184.738.5
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pela(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	1031373
Responsável pela(s) Capítulo (s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Marco Antonio Corrêa
Empresa	Tetra Tech 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	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	1.065 (AOCEANO)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	272165
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Pedro Fabiano M. Sarmento
Empresa	Applied Science Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	1800416
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

APÊNDICE A DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CHEMMAP

O CHEMMAP (*Chemical Discharge Model System*), desenvolvido pela RPS-ASA, é um modelo que simula a dispersão e a distribuição de produtos químicos na superfície e coluna d'água, nos sedimentos e na costa (margens). Com os resultados das simulações é possível determinar a probabilidade de ocorrência e a concentração dos compostos químicos considerados.

O CHEMMAP é um sistema de modelos que pode ser utilizado em Análises de Riscos, Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Relatório de Controle Ambiental (RCA), e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) decorrentes de derrames acidentais de produtos químicos, do descarte de efluentes, e do descarte de água produzida associado às operações de óleo e gás (FRENCH, 2001; FRENCH *et al.*, 2002; ASA, 2008; 2010; LAMMARDO *et al.*, 2010) em qualquer região do mundo.

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

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

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

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

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

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

Essas propriedades e outras, requeridas pelo modelo para simular o transporte e destino do material descartado, estão contidas no banco de dados químicos do CHEMMAP. O banco de dados engloba uma variedade de informações na forma de texto e descritores numéricos com o qual o usuário pode identificar e caracterizar o produto químico ou a mistura. O modelo é capaz de

simular derrames de substâncias puras, produtos em soluções aquosas ou hidrofóbicas, ou substâncias em emulsões (i.e. mistura de material particulado em suspensão em base aquosa). Além disso, o banco de dados inclui características que definem as misturas e as soluções.

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

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

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

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

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

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

No modo probabilístico, várias simulações são realizadas para cada cenário de descarte. Usando séries de dados de ventos e correntes para uma locação, o

modelo seleciona aleatoriamente a data do descarte e as condições ambientais associadas. Como critério de parada das simulações, o modelo permite selecionar um limite (e.g. CENO, limite legal) acima do qual as probabilidades e concentrações esperadas sejam registradas. Cinco tipos de resultados são produzidos para cada parcela do químico ou mistura que se encontra na superfície da água, em linhas de costa, na coluna d'água e ou nos sedimentos, os quais podem ser apresentados em mapas de contorno:

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

A.1. FORMULAÇÃO DO MODELO CHEMMAP

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

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

onde

Δt = passo de tempo (s);

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

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

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

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

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

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

O modelo simula ainda a adsorção de produtos a partículas de sedimentos em suspensão, resultando na deposição de materiais. Neste caso, a Lei de Stokes é utilizada para calcular as velocidades verticais das partículas do químico puro, ou partículas de sedimento em suspensão adsorvidas aos químicos. Se a

velocidade de subida ou de afundamento supera a mistura turbulenta, as partículas irão flutuar ou se depositar no fundo. Partículas depositadas podem ser ressuspensas, caso a velocidade da corrente supere 0,2 m/s.

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

$$u_{wc} = C_w u_w \quad (2)$$

$$v_{wc} = C_w v_w \quad (3)$$

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:

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

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

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):

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

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):

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

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:

$$C_{wz} = \exp(k_{w1}w + 0,7768) \quad (8)$$

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

$$C_{az} = k_{w2} \log_{10}(w) + k_{w3} \quad (10)$$

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

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

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 espessofina, 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:

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

onde

A = área superficial da mancha (m²);

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

V = volume da superfície da mancha (m³);

t = tempo (s).

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

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

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

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:

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

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 forçantes 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 entrinhamento 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:

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

onde

- i = i -ésima componente;
- A = área superficial da pluma ou partícula (cm²);
- 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:

$$C_i^s = \frac{C_i^o}{P_i} \quad (17)$$

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:

$$K_{d_s} = \frac{ShD_{AB}}{L} \quad (18)$$

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).

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

onde

R = constante universal dos gases (8,206 × 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:

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

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

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

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

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:

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

onde

Sc = número do Schmidt;

Re_L = número de Reynolds.

O número de Schmidt é definido por:

$$Sc = \frac{\gamma}{D_{AB}} \quad (24)$$

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

onde

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

ρ_w = densidade da água (g/cm³).

O número de Reynolds é definido por:

$$\text{Re}_L = \frac{U_w L}{\gamma} \quad (26)$$

onde

U_w = velocidade do vento (m/s);

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

$$K_{d_{ss}} = \frac{Sh D_{AB}}{d} \quad (27)$$

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:

$$Sh = 2 + 0,552 \text{Re}_d^{0,5} Sc^{1/3} \quad (28)$$

onde

Sc = número do Schmidt;

Re_d = número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula.

Com o número de Reynolds, Re_d , definido por:

$$\text{Re}_d = \frac{Wd}{\gamma} \quad (29)$$

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:

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

onde

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

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

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

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

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

A evaporação é calculada de acordo com a Lei de Raoult. A taxa de evaporação por unidade de área, E (g/m²h), de um químico flutuando na superfície (MACKAY & MATSUGU, 1973), é definida por:

$$E = \frac{K_e M W P_{vp}}{RT} \quad (31)$$

onde

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

MW = peso molecular (g/mol);

P_{vp} = pressão de vapor (atm);

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

T = temperatura (K).

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

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

onde

U = velocidade do vento a 10 m de altura (m/h);

L = diâmetro da pluma ou partícula flutuante (m);

Sc_a = número do Schmidt para o químico no ar.

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

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

onde

D_{ref} = difusividade no ar de um químico de referência (cm²/s);

MW_{ref} = peso molecular de um químico de referência (g/mol).

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

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

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

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

$$H = \frac{P_{vp}}{(S / MW)} \quad (34)$$

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'):

$$H' = \frac{H}{RT} \quad (35)$$

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):

$$K_5 = 20 \sqrt{\frac{44}{MW}} \quad (36)$$

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

$$K_6 = 3.000 \sqrt{\frac{18}{MW}} \quad (37)$$

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

$$K_7 = \frac{(H' K_5 K_6)}{(H' K_6 + K_5)} \quad (38)$$

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

$$\frac{dm}{dt} = \frac{K_7 m}{d} \quad (39)$$

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 :

$$d = \sqrt{2D_z \Delta t} \quad (40)$$

onde

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

Δt = passo de tempo do modelo (s).

Um modelo de dispersão atmosférica é incorporado ao CHEMMAP com a função de estimar as concentrações das substâncias simuladas no ar, até uma camada de 2 m de altura (*i.e.* até aproximadamente a altura que uma pessoa

possa ser exposta à estas). O fluxo de massa para a atmosfera é rastreado através de uma abordagem lagrangiana, análoga ao transporte na água. A substância é transportada no ar pelo vento, e sofre degradação de acordo com as taxas especificadas.

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

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

$$Dz = L^2 \frac{du}{dz} \quad (41)$$

onde

Dz = taxa de mistura vertical;

L = comprimento de mistura;

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

Esta pode ser aproximada como:

$$Dz = zU^* \quad (42)$$

$$U^* = \sqrt{\frac{bs}{\rho_{ar}}} \quad (43)$$

onde

bs = tensão do fundo;

ρ_{ar} = densidade do ar (g/cm^3).

Em resumo:

$$Dz = zWv(Cd)^{1/2} \quad (44)$$

onde

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

Cd = atrito do fundo (~0,0013).

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

$$Dz * d(dC / dz) / dz \quad (45)$$

onde

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

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

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

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

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:

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

ou

$$k = 0,693 / t(1/2) \quad (48)$$

A.2. DADOS DE ENTRADA

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

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

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

A.3. BIBLIOGRAFIA

ASA (Applied Science Associates, Inc.). 2002. CHEMMAP Technical Manual, Narragansett, RI.

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

ASA (Applied Science Associates South America), 2010. Relatório Técnico RL-4155.56-5340-941-AFZ-004 para o Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro. Revisão D (21 de setembro de 2010). 435pp.

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

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

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

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

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

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

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

FRENCH, D.; M. REED; K. JAYKO; S. FENG; H.M. RINES; S. PAVIGNANO; T. ISAJI, S; PUCKETT; A. KELLER; F.W. FRENCH III; D. GIFFORD; J. MCCUE; G. BROWN; E. MACDONALD; J. QUIRK; S. NATZKE; R. BISHOP; M. WELSH; M. PHILLIPS & B.S. INGRAM, 1996a. The CERCLA type A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments (NRDAM/CME), Technical Documentation, Vol. I - V. Final Report, submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior, Washington, DC, April, 1996, Contract N° 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, p. 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, 542pp.

HOLTON, J.R., 1979. An Introduction to Dynamic Meteorology. **International Geophysics Series**, Vol. 23, Academic Press NY.

HOULT, D.P., 1972. Oil spreading on the sea. **Ann. Rev. Fluid Mech.**, p.341-368.

KAWAMURA, P. & D. MACKAY, 1987. The evaporation of volatile liquids. **J. Hazardous Materials**, 15:343-364.

KOLLURU, V.S., 1992. Influence of Number of Spilllets on Spill Model Predictions. Applied Science Associates Internal Report, 1992.

LAMMARDO, A.C.R.; A. GALLO, M.P. LAMMARDO, A.L.T. MENDES & M.M. AZEVEDO, 2010. Validation of Produced Water Discharge Modeling from Guamaré Outfalls I and II, Rio Grande do Norte, Brazil. In: SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production (SPE-127047-PP), 2010. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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, p. 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, 39pp.

MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980. A Mathematical Model Of Oil Spill Behavior. Department of Chemical and Applied Chemistry, University of Toronto, Canada.

MACKAY, D., W.Y. SHIU, & K.C. MA, 1992. Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, Vol. I-IV. Lewis Publ., Chelsea, Michigan.

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

THIBODEAUX, L.J., 1979. Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil. John Wiley & Sons, NY 501p.

THORPE S.A., 1984. On the determination of K_v in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. **American Meteorological Society**, p. 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.

APÊNDICE B DESCRIÇÃO DO NCEP/NCAR

Os dados atmosféricos de reanálise do NCEP/NCAR são resultados de simulações numéricas que utilizam as ferramentas mais modernas em assimilação de dados em conjunto com a mais extensa base de dados disponível. Esta base de dados tem sido aprimorada e beneficiada pela inclusão de observações (coleta de dados) realizadas em diversos países. Tais simulações são realizadas no NCEP usando um modelo espectral de cobertura global de 28 níveis verticais. Este modelo numérico inclui parametrizações dos maiores processos físicos, a saber, convecção, precipitação de grande escala, convecção superficial, arrasto devido a ondas de gravidade, radiação de ciclo diurno e interação com nuvens, física das camadas limites, interação da hidrologia superficial e processos horizontais e verticais de difusão. Detalhes da dinâmica e da física incorporada ao modelo são descritos em *NMC Development Division* (1988), Kanamitsu (1989), e Kanamitsu *et al.* (1991).

Os dados utilizados nas análises apresentadas no presente estudo foram obtidos via endereço eletrônico (<http://www.esrl.noaa.gov/psd>). É importante salientar que a Tetra Tech mantém um sistema automatizado de “download” de arquivos do NCEP/NCAR (endereço acima) e que, portanto, por ser atualizado diariamente, possibilitando apenas definir a data do último acesso (05 de janeiro de 2009).

O NCEP utiliza como sistema de referência um geóide denominado “*Spherical Earth*” (comunicação pessoal: ESRL/PSD Data Management <esrl.psd.data@noaa.gov>). Este possui valores diferentes para os parâmetros semieixo maior e achatamento, quando comparado com os do WGS 84:

- Spherical earth: semieixo maior = 6.371.200 m / achatamento = 0;
- WGS 84: semieixo maior = 6.378.137 m / achatamento = 1/298,257223563.

Esta aproximação da forma da Terra a uma esfera (i.e. com semieixos iguais) é geralmente utilizada para a simplificação das transformações de coordenadas.

A diferença entre as temperaturas do ar no litoral durante o dia e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) costeira induz pequenas células de

circulação denominadas de brisas marítimas. No caso da reanálise do NCEP/NCAR (resolução espacial de 2,5° x 2,5°), ressalta-se que essas células costeiras não são representadas, como consequência da resolução espacial do modelo.

B.1 BIBLIOGRAFIA

KANAMITSU, M., 1989. Description of the NMC global data assimilation and forecast system. **Weather and Forecasting** 4:335-342.

KANAMITSU, M.; ALPERT, J.C.; CAMPANA, K.A.; CAPLAN, P.M.; DEAVEN, D.G.; IREDELL, M.; KATZ, B.; PAN, H.-L.; SELA, J. & WHITE, G.H., 1991. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. **Weather and Forecasting** 6:425-435.

NMC Development Division, 1988. Documentation of the research version of the NMC Medium-Range Forecasting Model. NMC Development Division, Camp Springs, MD. 504pp.

ANEXO A1 *MODELAGEM HIDRODINÂMICA*

Modelagem de Derrame de Hidrocarbonetos no Mar para o Gasoduto Rota 3

Descrição da Base Hidrodinâmica

Revisão 00

Maior / 2013

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

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

TETRA TECH, 2013. Modelagem de Derrame de Hidrocarbonetos no Mar para o Gasoduto Rota 3: Descrição da Base Hidrodinâmica. Relatório Técnico, Revisão 00 (20 de maio de 2013). 64pp + Apêndice.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I. INTRODUÇÃO	I-1
I.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	I-1
I.1.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS.....	I-2
I.1.2 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS	I-3
II. ANÁLISE DOS DADOS.....	II-1
II.1 VENTOS	II-2
II.2 CORRENTES.....	II-7
II.3 ELEVAÇÃO.....	II-18
II.4 VAZÃO	II-21
III. MODELAGEM HIDRODINÂMICA	III-1
III.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E DADOS DE ENTRADA.....	III-1
III.1.1 GRADE NUMÉRICA E BATIMETRIA.....	III-1
III.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	III-4
III.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM.....	III-5
III.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	III-5
III.3.1 AVALIAÇÃO PARA A MARÉ.....	III-6
III.3.2 AVALIAÇÃO PARA AS CORRENTES	III-7
IV. RESULTADOS	IV-1
V. CONSIDERAÇÕES FINAIS	V-1
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	VI-1
APÊNDICE A DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELF3D	A-1

LISTA DE TABELAS

Tabela II-1 - Coordenadas e datas das coletas dos dados de corrente, maré e vento. ..	II-2
Tabela II-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (NCEP) para o período de inverno (junho a setembro de 2010), intervalo de amostragem dt=6h (convenção meteorológica).....	II-6
Tabela II-3 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (NCEP), para o período de verão (janeiro a março de 2011), intervalo de amostragem dt=6h (convenção meteorológica).....	II-7
Tabela II-4 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo à superfície, no período de 29 de junho a 5 de setembro de 2010, com intervalo de amostragem dt=1h.....	II-10
Tabela II-5 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo ao fundo, no período de 29 de junho a 5 de setembro de 2010, com intervalo de amostragem dt=1h.....	II-11
Tabela II-6 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo a superfície, no período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011, com intervalo de amostragem dt=1h.....	II-15
Tabela II-7 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo ao fundo, no período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011, com intervalo de amostragem dt=1h.	II-16
Tabela III-1 - Classificação do RMAE por ranges.....	III-10
Tabela III-2 - Valores máximos, médios e os desvios padrão entre os dados e os resultados do modelo.....	III-10

LISTA DE FIGURAS

Figura I-1 - Localização da área de estudo.....	I-2
Figura I-2 - Constantes harmônicas de maré para a estação maregráfica de Ponta Negra - RJ. Disponível em: www.femar.com.br/biblioteca/emb/indice.html	I-5
Figura II-1 - Localização do ADCP utilizado para coleta de dados de corrente e elevação e localização do quadrilátero da grade do NCEP utilizado para extrair os dados de vento (quadro superior).....	II-1
Figura II-2 - Diagrama <i>stick plot</i> dos valores médios diários de dados de vento (NCEP) para o período de 1º de junho de 2010 a 31 de maio de 2011, na posição 23°53'31,19"S e 43°07'30,02"W, intervalo de amostragem dt=6h. A barra de cores lateral indica a intensidade dos vetores (convenção vetorial).....	II-3
Figura II-3 - Histograma direcional dos vetores de vento (NCEP) para o período de inverno (junho a agosto) de 2010. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento, enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência. Intervalo de amostragem horária. Convenção meteorológica.	II-4
Figura II-4 - Histograma direcional dos vetores de vento (NCEP) para o período de verão (janeiro a março) de 2011. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento, enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência. Intervalo de amostragem horária. Convenção meteorológica.	II-5
Figura II-5 - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem dt=1h.....	II-8
Figura II-6 - Histograma direcional dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície (painel superior) e próximos ao fundo (painel inferior) entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem dt=1h.	II-9
Figura II-7 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície, entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem dt=1h.	II-12
Figura II-8 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo ao fundo, entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem dt=1h.	II-12
Figura II-9 - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem dt=1h.....	II-13

Figura II-10 - Histograma direcional dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície (painel superior) e próximo ao fundo (painel inferior) entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem dt=1h.	II-14
Figura II-11 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície, entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem dt=1h.	II-17
Figura II-12 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo ao fundo, entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem dt=1h.	II-17
Figura II-13 - Série temporal de elevação e nível médio (PETROBRAS) medido em Maricá entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010.	II-18
Figura II-14 - Espectro de amplitude da série temporal de elevação de nível do mar (PETROBRAS) obtida em Maricá, entre 29 de junho e 5 de setembro de 2010. ...	II-19
Figura II-15 - Série temporal de elevação e nível médio (PETROBRAS) medido em Maricá entre 1º de dezembro de 2010 e 1º de fevereiro de 2011.	II-20
Figura II-16 - Espectro de amplitude da série temporal de elevação de nível do mar (PETROBRAS) obtida em Maricá, entre 1º de dezembro de 2010 e 1º de fevereiro de 2011.	II-21
Figura II-17 - Descarga de água doce média mensal calculada para a Baía de Guanabara. (Fonte: KJERFVE <i>et al.</i> , 1997).	II-22
Figura III-1 - Grade numérica utilizada na modelagem, com localização das bordas abertas em vermelho.	III-2
Figura III-2 - Batimetria interpolada na grade numérica.	III-3
Figura III-3 - Detalhe da grade numérica e batimetria associada na região do empreendimento.	III-3
Figura III-4 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m), para um período de inverno (painel superior) e um período de verão (painel inferior), na região costeira de Maricá. A série temporal dos valores previstos é plotada em azul, enquanto que a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica é plotada em vermelho. ...	III-7
Figura III-5 - Série temporal medida da componente u e v da velocidade (azul), referente aos dados do ADCP em Maricá, e a calculada pelo modelo (vermelho) para profundidade de 1,38m referentes aos dias 29 de junho a 28 de agosto de 2010.	III-8
Figura III-6 - Série temporal medida da componente u e v da velocidade (azul), referente aos dados do ADCP em Maricá, e a calculada pelo modelo (vermelho) para profundidade de 1,38m referentes aos dias 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011.	III-9

Figura III-7 - Espectros de amplitude dos dados de Maricá, em azul, e obtidos no modelo, em vermelho, para a componente u da velocidade, em um período de inverno (à esquerda) e outro de verão (à direita).....	III-11
Figura IV-1 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de correntes típicas (para leste). A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).	IV-1
Figura IV-2 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de correntes para oeste. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s)...	IV-2
Figura IV-3 - Instantâneo do campo de correntes, na região de Ponta Negra, para um momento de correntes típicas (para leste). A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).....	IV-3
Figura IV-4 - Instantâneo do campo de correntes, na região de Ponta Negra, para um momento de correntes para oeste. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).	IV-4
Figura IV-5 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de vazante na sizígia. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s). ..	IV-5
Figura IV-6 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de enchente na sizígia. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s). ..	IV-6

RESUMO

O sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, foi selecionado como ferramenta para realizar uma modelagem hidrodinâmica na região costeira do Rio de Janeiro.

Os resultados obtidos com essa modelagem numérica serão usados para realizar simulações de derrame de hidrocarbonetos no mar na região, com o objetivo de dar suporte à PETROBRAS nos estudos ambientais para a construção do Gasoduto Rota 3.

Através das comparações realizadas entre os resultados do modelo e os dados medidos foi possível observar que a modelagem numérica em questão conseguiu reproduzir satisfatoriamente as principais características da circulação na região.

I. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a Habtec Engenharia Ambiental na elaboração do Estudo de Impacto Ambiental do Gasoduto Rota 3 foi realizada uma modelagem hidrodinâmica para fornecer o campo de correntes para a modelagem de hidrocarbonetos no mar. A construção desse gasoduto servirá para escoar a produção dos blocos BM-S-9 e BM-S-11 para o COMPERJ¹.

Com intuito de obter uma melhor compreensão da dinâmica da área e aplicação direta nessa modelagem hidrodinâmica, foi realizado um levantamento de informações pretéritas (meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas) nas imediações da região de estudo.

O sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW (DELTA RES, 2011), foi selecionado como ferramenta para atingir os objetivos propostos nesse estudo.

O Capítulo I, além de apresentar os objetivos deste estudo, fornece informações sobre a área em questão. O Capítulo II apresenta a análise dos dados ambientais disponíveis, enquanto o Capítulo III descreve a modelagem hidrodinâmica e a avaliação da mesma. Os resultados dessa modelagem são apresentados no Capítulo IV. Por fim, o Capítulo V apresenta as considerações finais. Complementando, a descrição do módulo Delft3D-FLOW encontra-se no Apêndice A deste relatório.

I.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o trecho do litoral central do Estado do Rio de Janeiro, centrada na região da Ponta Negra (Município de Maricá), incluindo a zona costeira adjacente (Figura I-1).

¹ Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro.



Figura I-1 - Localização da área de estudo.

I.1.1 Características Meteorológicas

A Região Sudeste do Brasil encontra-se numa área de transição entre os climas quentes de latitudes baixas e mesotérmicos (do tipo temperado) de latitudes médias (SILVA DIAS & MARENGO, 1999). Os principais sistemas de grande escala que interferem na circulação local são a ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), e sistemas transientes, como ciclones extratropicais, frentes frias e a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul). Periodicamente, a situação induzida pela ASAS, caracterizada por ventos vindos de nordeste, com intensidade de fraca a moderada e de céu sem nebulosidade, é perturbada pelo deslocamento de sistemas frontais.

Nessa região a sazonalidade é bem marcada, devido à localização em latitude afastada do Equador. A variação de temperatura do ar é caracterizada por mínimos no inverno e máximos no verão, tendo a pressão atmosférica padrão

inverso (mínimos no verão e máximos no inverno). A estação chuvosa ocorre durante o verão e a seca durante o inverno. A umidade relativa é mais baixa durante os meses de primavera, a insolação varia entre 5 e 8 horas de sol por dia ao longo do ano.

O vento predominante na região é proveniente de NE/NNE durante todo ano, devido principalmente à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). A componente de NNE é mais pronunciada durante o verão e durante o inverno a influência do deslocamento de sistemas frontais está associada à ocorrência de ventos de SW.

Os eventos extremos de vento identificados na região são caracterizados principalmente por uma intensificação do padrão de vento predominante, estando associados a períodos de intensificação da ASAS. Com relação à sazonalidade destes eventos, observa-se uma maior ocorrência durante o inverno, quando a ASAS encontra-se mais ao norte e quando pode haver a influência de sistemas frontais mais intensos.

1.1.2 Características Oceanográficas

O trabalho de Mano (2007) descreve que, na região oceânica próxima ao Município de Maricá, o verão é caracterizado por correntes fluindo para sudoeste, acima da pycnoclina e para nordeste abaixo da mesma. Durante o inverno a corrente é para nordeste ao longo de toda a coluna d'água. De acordo com o autor, a pycnoclina formada no verão é oriunda do avanço da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sobre a plataforma, devido à continuidade dos ventos de nordeste.

Souto (2005) cita alguns autores que afirmam que a costa do Rio de Janeiro, ao sul de Cabo Frio, apresenta um litoral retilíneo e exposto a regimes hidrodinâmicos intensos. Para o primeiro autor, as condições hidrológicas da região costeira fluminense são basicamente determinadas pela predominância da Água Tropical AT.

Carvalho da Silva *et al.* (2008) descrevem que a região de Maricá possui uma costa orientada no sentido E-W. Segundo Oliveira & Bulhões (2009), quando as frentes frias vindas do sul atingem o litoral do Rio de Janeiro (RJ), ocorrem ventos e ondas de altas intensidades do quadrante sul, ocasionando um empilhamento e aprisionamento de água na costa.

O mesmo é descrito em Muehe *et al.* (2005), que cita que o clima de ondas é condicionado pelas frequentes modificações das condições de vento, associadas à passagem das frentes frias, e a constante presença de marulho (*swell*), gerado por tempestades nas altas latitudes do Atlântico Sul e dissociadas do vento local.

De acordo com Carvalho (2003), na costa do RJ os ventos e as correntes estão correlacionados. Segundo o autor, na região de Ipanema as correntes superficiais dirigiram-se, predominantemente, para NE-ENE e WSW-W com uma média de velocidades inferior a 20 cm/s e máximas de 75 cm/s. Próximo ao fundo as correntes dirigiram-se, predominantemente, para NE-ENE e N-NNE com velocidade média menor do que 15 cm/s e máxima de 38 cm/s. O padrão da circulação nesta região é de correntes paralelas à costa.

Com relação à elevação do nível do mar para a região de Ponta Negra, a Figura I-2, a seguir, ilustra as constantes harmônicas referentes à estação maregráfica para o Farol de Ponta Negra, do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras, da FEMAR². A componente de maior amplitude é a M2, com 28,6 cm, seguida da S2 com 14,2 cm.

Segundo o banco de dados NODC, neste trecho do litoral do Rio de Janeiro a temperatura da água no verão é de 23,8 °C com salinidade de 35,5 e para o inverno os valores são de 21,3 °C e 35,8.

Bassani *et al.* (1999) afirmam que, sazonalmente na região de Maricá, a corrente do Brasil se afasta da costa entre setembro e abril, o que possibilita a entrada da ACAS acima do talude, ocupando o fundo da plataforma. Na plataforma interna do litoral do RJ, são observadas a Água Costeira (AC), com salinidade menor que 34,5, e Água de Plataforma (salinidade entre 35 e 36). A Água de Plataforma é formada pela mistura das águas continentais com a AT e

² Fundação de Estudos do Mar.

águas de profundidade. Os autores citam ainda a Baía de Guanabara entre as principais influências continentais do litoral do Rio de Janeiro.

Saavedra *et al.* (1999) observaram a presença de AT e AC, durante o inverno na região, próximas à costa. Os autores afirmam que são resultados coerentes com a situação de inverno, ou seja, com o não aparecimento da ACAS, mais atuante na primavera e verão.

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

Nome da Estação : PONTA NEGRA – RJ					
Localização : Em frente ao Farol de Ponta Negra					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 22° 58,2' S		Longitude : 42° 41,6' W			
Período Analisado : 20/11/64 a 21/12/64			Nº de Componentes : 36		
Análise Harmônica : Método do Tidal Liverpool Institute					
Classificação : Maré de Desigualdades Diurnas					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		I H 30 min	Nível Médio (Zo):		62 cm acima do NR.
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		110 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHW) :		99 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		30 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLLW) :		8 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	4,6	151
Ssa	-	-	N ₂	4,2	157
Mm	11,1	356	NU ₂	,08	157
Mf	-	-	M ₂	28,6	075
MTM	-	-	L ₂	3,8	322
Msf	8,4	008	T ₂	0,8	063
Q ₁	2,7	070	S ₂	14,2	063
O ₁	10,5	106	K ₂	3,9	063
M ₁	1,8	129	MO ₃	1,6	262
P ₁	2,1	122	M ₃	0,8	063
K ₁	6,4	122	MK ₃	1,2	315
J ₁	2,4	219	MN ₄	1,2	329
OO ₁	1,3	311	M ₄	3,7	266
MNS ₂	-	-	SN ₄	1,7	326
2N ₂	0,6	239	MS ₄	2,7	199
Referências de Nível: RN-1 situada em uma pedra a 100 m do Farol de Ponta Negra no lado esquerdo de quem olha para o mar					
Obs: Não há referência a outros períodos.					

Código BNDO: 50154

Figura I-2 - Constantes harmônicas de maré para a estação maregráfica de Ponta Negra - RJ. Disponível em: www.femar.com.br/biblioteca/emb/indice.html.

II. ANÁLISE DOS DADOS

Com o objetivo de fornecer subsídios à modelagem hidrodinâmica e de derrame de Hidrocarbonetos no Mar, foram realizadas análises de dados meteorológicos, oceanográficos e hidrológicos existentes nas imediações do empreendimento. A localização e período de coleta do conjunto de dados, cuja análise é apresentada a seguir, são indicados na Tabela II-1 e na Figura II-1.

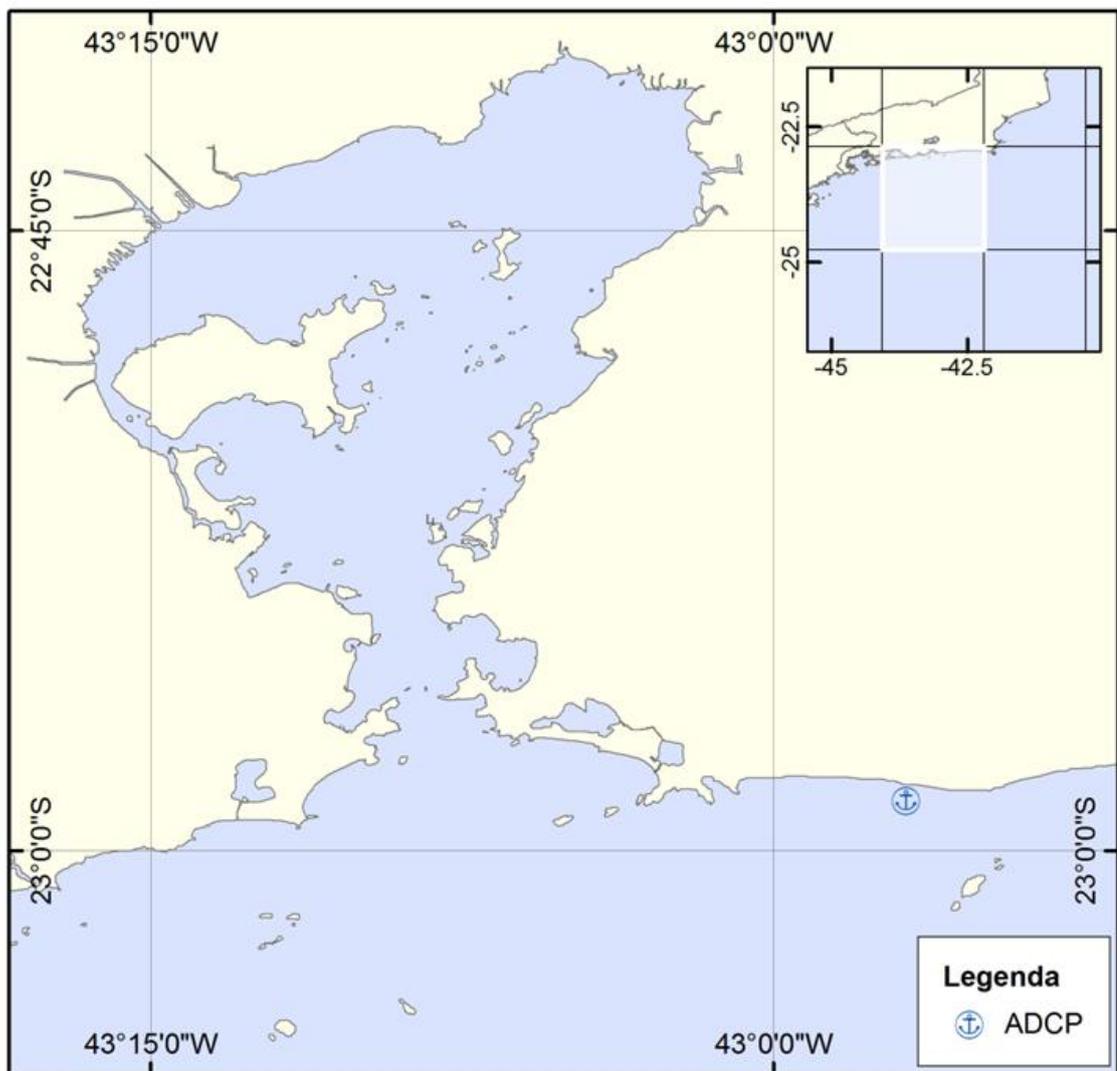


Figura II-1 - Localização do ADCP utilizado para coleta de dados de corrente e elevação e localização do quadrilátero da grade do NCEP utilizado para extrair os dados de vento (quadro superior).

Tabela II-1 - Coordenadas e datas das coletas dos dados de corrente, maré e vento.

PARÂMETROS	DADO	COORDENADAS (SIRGAS 2000)	PERÍODO
CORRENTE	PETROBRAS/ Maricá	22°58'47,97"S e 42°56'47,85"W	29 jun. a 5 set. de 2010 1º dez. de 2010 a 1º fev. de 2011
MARÉ	PETROBRAS/ Maricá	22°58'47,97"S e 42°56'47,85"W	29 jun. a 5 set. de 2010 1º dez. de 2010 a 1º fev. de 2011
VENTO	NCEP/NCAR	23°53'31,19"S e 43°07'30,02"W	1º jun. de 2010 a 1º jun. de 2011

II.1 VENTOS

Os ventos apresentados, a seguir, são provenientes de reanálise do NCEP/NCAR³, no quadrilátero de, aproximadamente, 1,8° x 1,8° em torno do ponto de coordenadas 23°53'31,19"S e 43°07'30,02"W, para o período de 1 ano (1º de junho de 2010 a 1º de junho de 2011).

A Figura II-2 apresenta o diagrama tipo *stick plot* para os dados de vento desse período, considerando valores médios diários. Observa-se predomínio de ventos provenientes do quadrante NE, com inversões provenientes de SE.

Na Figura II-3 e na Figura II-4 são apresentados os histogramas direcionais dos dados de vento para os períodos de inverno de 2010 (junho, julho e agosto) e verão de 2011 (janeiro, fevereiro e março), respectivamente. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa a porcentagem de observações. Observa-se que, tanto no período de verão quanto no período de inverno, os ventos mais frequentes foram provenientes de NE a ENE, entretanto, as inversões de SE a S no período de inverno são mais frequentes do que no verão.

³ National Centers for Environmental Prediction do National Center for Atmospheric Research.

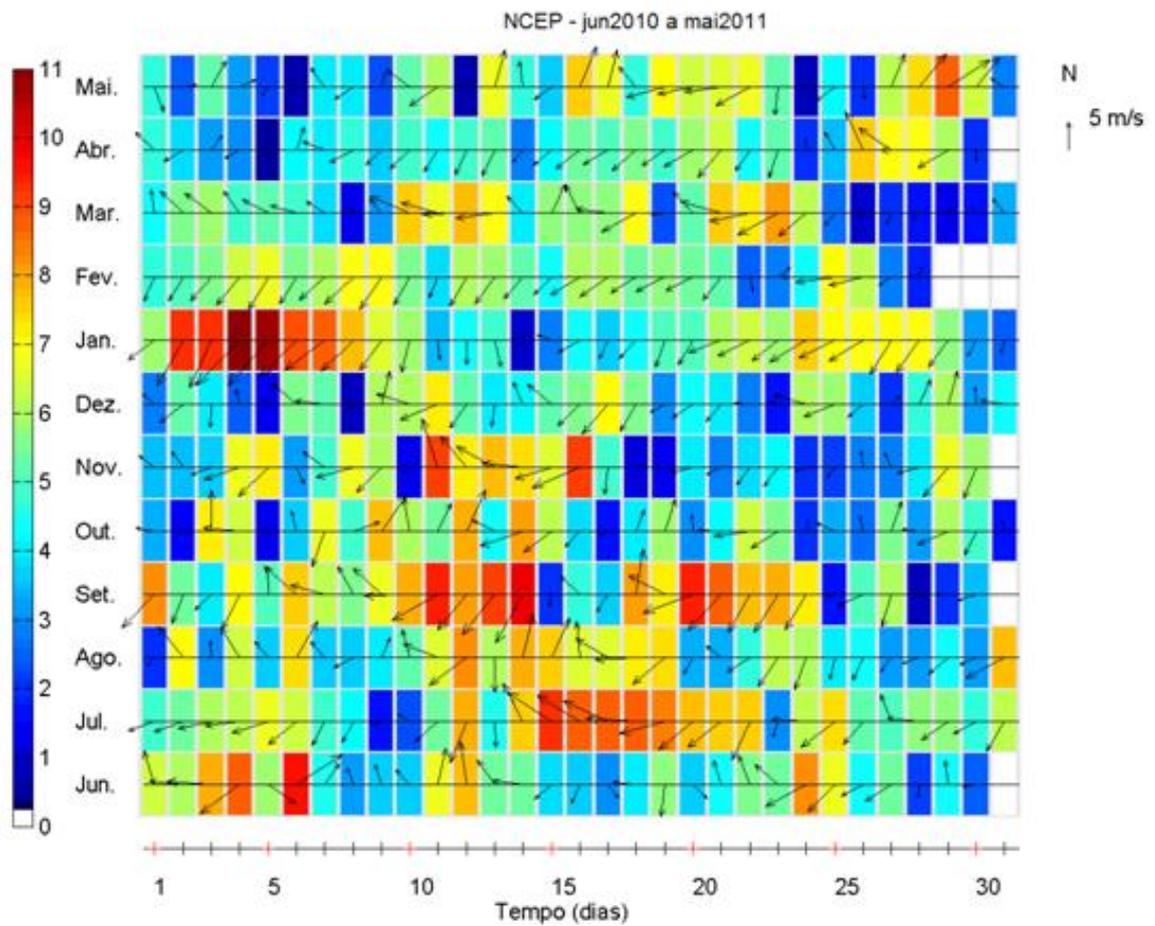
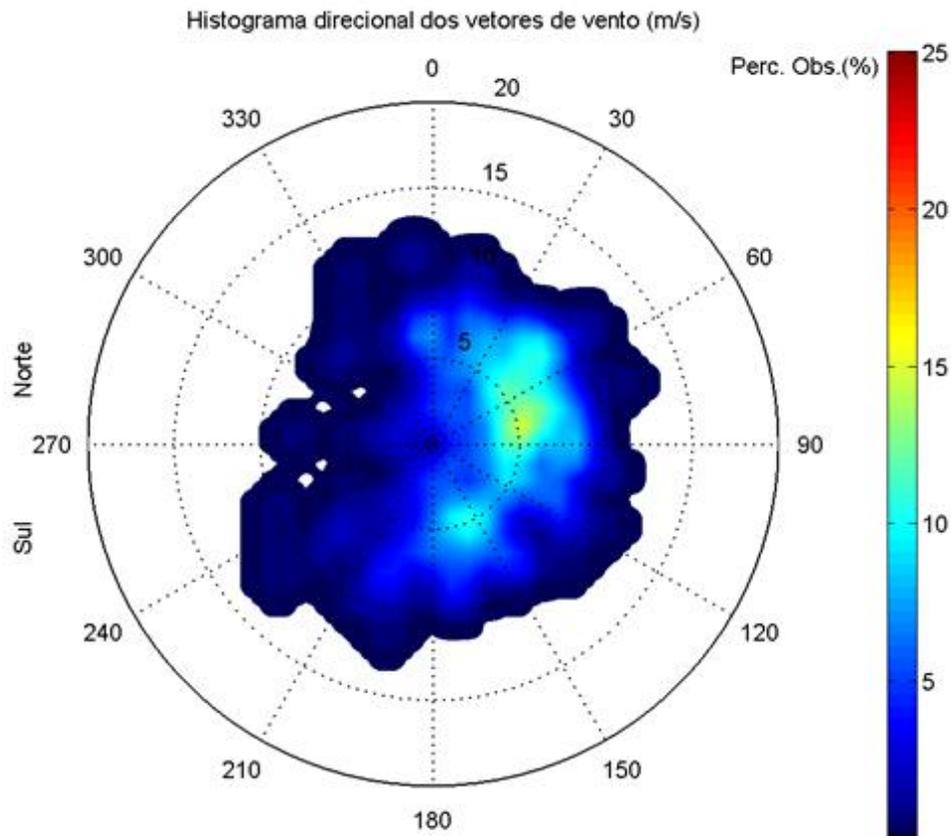
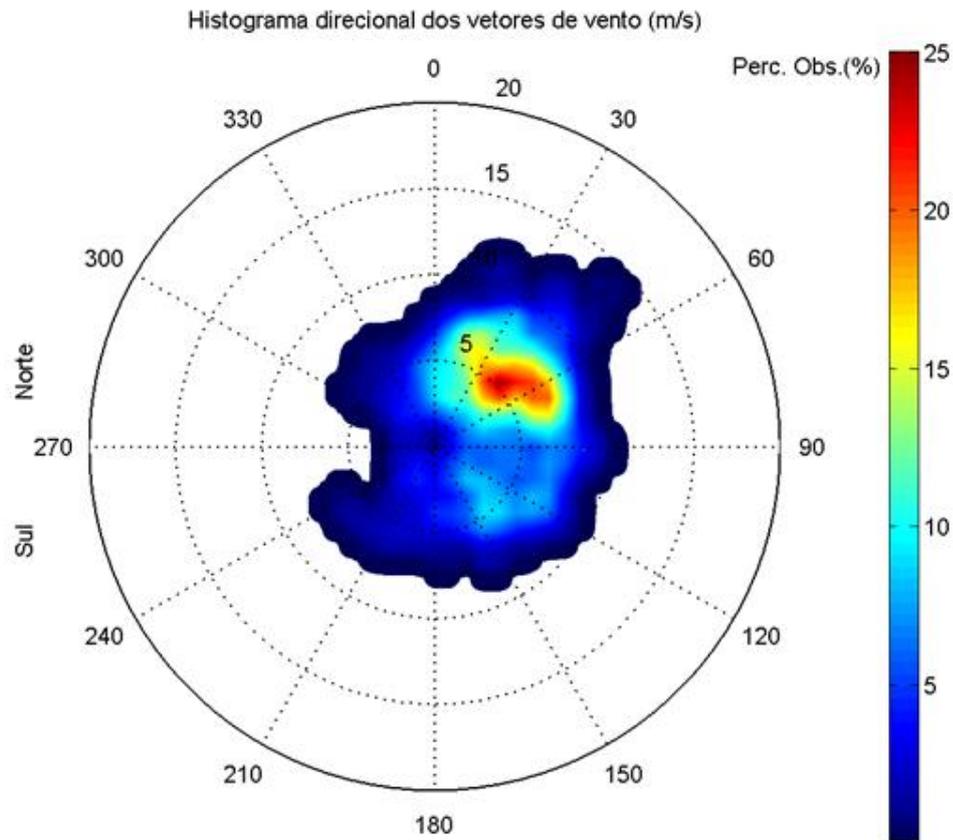


Figura II-2 - Diagrama stick plot dos valores médios diários de dados de vento (NCEP) para o período de 1^o de junho de 2010 a 31 de maio de 2011, na posição 23°53'31,19"S e 43°07'30,02"W, intervalo de amostragem $dt=6h$. A barra de cores lateral indica a intensidade dos vetores (convenção vetorial).



Direção em graus a partir do norte geográfico - convenção meteorológica

Figura II-3 - Histograma direcional dos vetores de vento (NCEP) para o período de inverno (junho a agosto) de 2010. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento, enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência. Intervalo de amostragem horária. Convenção meteorológica.



Direção em graus a partir do norte geográfico - convenção meteorológica

Figura II-4 - Histograma direcional dos vetores de vento (NCEP) para o período de verão (janeiro a março) de 2011. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vetor de vento, enquanto que a barra de cores (lateral) indica a porcentagem de incidência. Intervalo de amostragem horária. Convenção meteorológica.

A Tabela II-2 apresenta a distribuição conjunta de intensidades e direções desses ventos durante o período de inverno, utilizando a convenção meteorológica. Os ventos mais frequentes vieram de NE (14,9%) e E (12,7%) com intensidade média de 6,5 m/s e 6,2 m/s, respectivamente. Os ventos mais intensos registrados foram provenientes de ESE e WSW, com velocidade de 10,9 m/s e 10,7 m/s, respectivamente.

Tabela II-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (NCEP) para o período de inverno (junho a setembro de 2010), intervalo de amostragem dt=6h (convenção meteorológica).

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Dir. Méd.
0,0- 1,0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1,4	103
1,0- 2,0	2	2	2	1	0	2	2	1	1	0	0	0	1	0	1	0	15	4,1	67
2,0- 3,0	3	0	1	2	0	2	2	2	0	3	0	0	1	2	0	1	19	5,1	89
3,0- 4,0	1	2	1	2	5	4	2	2	4	1	0	0	0	0	0	0	24	6,5	111
4,0- 5,0	4	2	7	4	6	5	4	5	5	4	0	0	1	0	0	0	47	12,7	106
5,0- 6,0	2	4	12	10	7	5	3	8	3	0	0	1	0	0	0	0	55	14,9	86
6,0- 7,0	9	7	5	8	6	7	2	4	4	2	2	0	0	0	0	1	57	15,4	74
7,0- 8,0	3	5	11	9	9	5	2	4	6	3	2	0	1	0	2	1	63	17,1	83
8,0- 9,0	3	6	11	5	7	5	2	2	4	3	0	0	0	0	0	1	49	13,3	76
9,0-10,0	0	0	4	2	2	2	2	0	3	2	0	0	0	0	0	0	17	4,6	113
10,0-11,0	1	2	0	0	2	1	1	0	0	1	1	2	0	0	0	0	11	3,0	134
Total	28	30	54	44	46	39	22	29	30	19	5	3	4	2	3	4	362		
Porc.	7,7	8,3	14,9	12,2	12,7	10,8	6,1	8,0	8,3	5,2	1,4	0,8	1,1	0,6	0,8	1,1			
Vel. Méd.	5,6	6,5	6,5	6,0	6,2	5,9	5,6	5,3	6,1	6,2	7,7	8,8	4,2	2,4	5,5	6,3			
Vel. Máx.	10,5	10,2	9,9	9,3	10,3	10,9	10,2	8,4	9,4	10,1	10,3	10,7	8,0	2,6	7,6	8,7			
Perct.(0,9)	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0	7,0	8,5	9,0	10,0	10,0	7,0	2,0	7,0	8,0			

A Tabela II-3 apresenta a distribuição conjunta de intensidades e direções desses ventos durante o período de verão, utilizando a convenção meteorológica. Os ventos mais frequentes também foram os de NE (24,4%) seguidos dos ventos de ENE (16,4%) com intensidade média de 6,2 m/s. Os ventos mais intensos foram provenientes de NE (11,8 m/s) e de NNE (11,1 m/s).

Tabela II-3 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (NCEP), para o período de verão (janeiro a março de 2011), intervalo de amostragem dt=6h (convenção meteorológica).

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Dir. Méd.
0,0- 1,0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	5	1,4	172
1,0- 2,0	1	0	1	2	0	0	3	1	0	2	1	0	0	1	1	0	13	3,6	124
2,0- 3,0	4	3	3	1	2	1	2	1	2	2	1	1	0	0	1	1	25	6,9	57
3,0- 4,0	4	5	4	5	3	2	6	0	2	1	0	0	0	0	2	1	35	9,7	64
4,0- 5,0	4	4	19	3	5	2	4	3	2	1	1	0	0	0	0	3	51	14,1	61
5,0- 6,0	4	11	16	9	3	4	7	4	1	2	1	0	0	0	1	1	64	17,7	65
6,0- 7,0	4	13	13	18	5	7	4	2	1	1	1	0	0	0	1	0	70	19,4	62
7,0- 8,0	3	11	14	13	9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	15,8	59
8,0- 9,0	0	4	8	7	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	6,6	59
9,0-10,0	0	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2,2	48
10,0-11,0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,8	35
11,0-12,0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1,4	39
12,0-13,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	
Total	24	57	88	59	31	24	28	12	8	9	5	2	0	1	6	6	360		
Porc.	6,7	15,8	24,4	16,4	8,6	6,7	7,8	3,3	2,2	2,5	1,4	0,6	0,0	0,3	1,7	1,7			
Vel. Méd.	4,7	6,2	6,2	6,2	6,1	6,1	4,2	4,4	4,1	3,8	3,9	1,5		1,9	3,6	4,1			
Vel. Máx.	7,9	11,1	11,8	9,1	9,1	8,7	7,1	7,0	6,4	6,6	6,3	2,1	0,0	1,9	6,2	5,0			
Perct.(0,9)	7,0	8,0	8,7	8,0	8,0	7,1	6,0	6,0	5,7	5,6	6,0	2,0	0,0	1,0	5,9	4,9			

II.2 CORRENTES

Os dados de correntes apresentados, a seguir, foram coletados pela PETROBRAS com um perfilador acústico de correntes (ADCP) na região costeira de Maricá, em uma profundidade de, aproximadamente, 23 m em dois períodos distintos: o primeiro entre 29 de junho e 5 de setembro de 2010, e o segundo entre 1º de dezembro de 2010 e 1º de fevereiro de 2011.

A Figura II-5 apresenta o diagrama *stick plot* dos dados de corrente medidos na região costeira de Maricá, no período de 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Através da figura é possível observar que as correntes são paralelas à linha de costa, orientadas ao eixo leste-oeste.

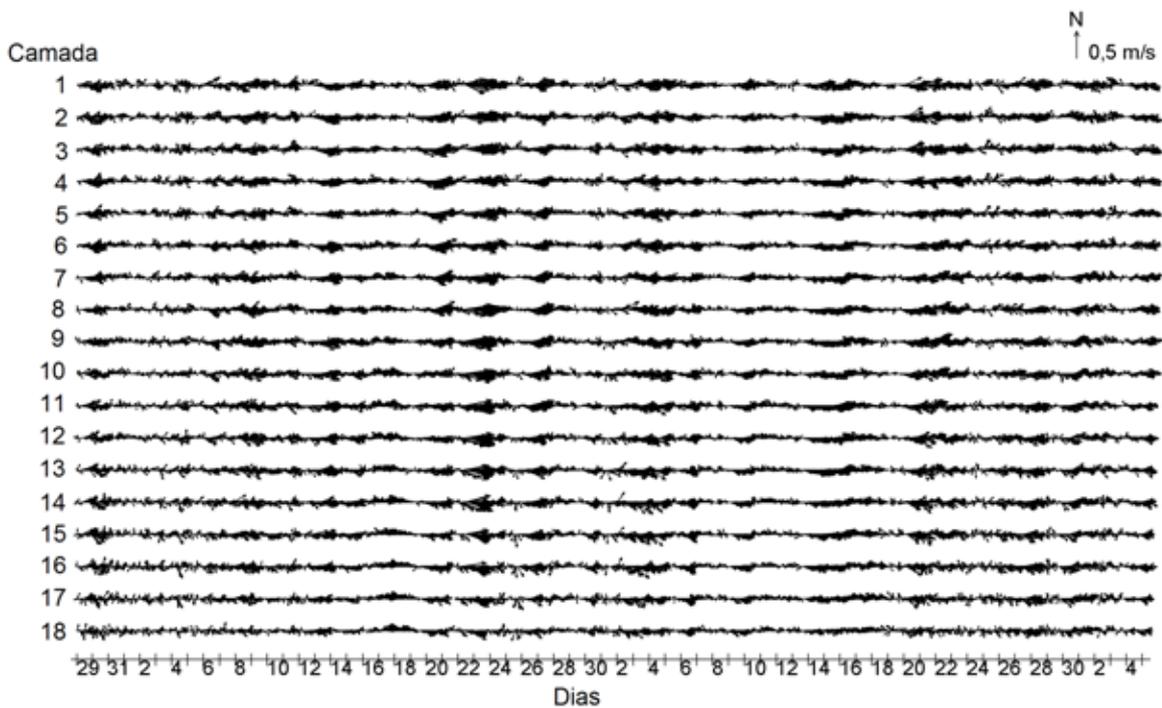


Figura II-5 - Diagrama stick plot dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

A Figura II-6 apresenta os dados de corrente, ilustrados na forma de histograma direcional para mesmo período na camada próxima a superfície e próxima ao fundo. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa a porcentagem de observações. A velocidade média na superfície foi igual a 15 cm/s, e no fundo a velocidade média foi de 12 cm/s.

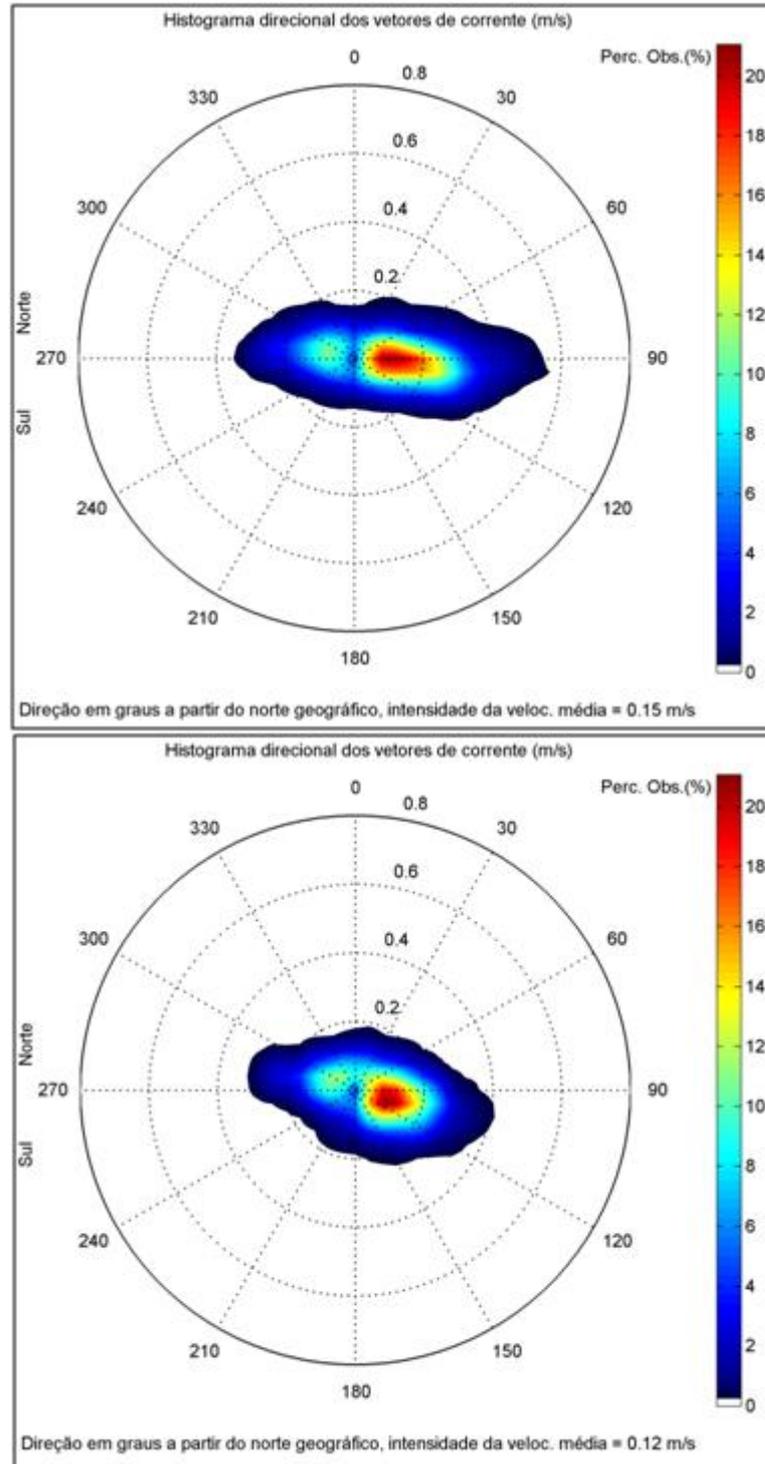


Figura II-6 - Histograma direcional dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície (painel superior) e próximos ao fundo (painel inferior) entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

A Tabela II-4 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção ($^{\circ}$) da corrente para a camada de superfície no período de inverno. Observa-se que as correntes mais frequentes registradas neste período foram nas direções E (34,0%) e ESE (16,8%), com média de 21,1 cm/s e 17 cm/s, respectivamente; e as correntes mais intensas registradas também foram em direção a E (57,7 cm/s) e ESE (39,8 cm/s). Do total de registros das correntes, 95% têm intensidades iguais ou inferiores a 33,5 cm/s.

Tabela II-4 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção ($^{\circ}$) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo à superfície, no período de 29 de junho a 5 de setembro de 2010, com intervalo de amostragem $dt=1h$.

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Dir. Méd.
0,0- 5,0	8	11	8	14	13	16	10	7	14	6	11	12	12	19	13	16	190	11,8	337
5,0-10,0	9	13	23	50	53	56	27	10	14	9	20	26	24	45	24	16	419	26,1	75
10,0-15,0	3	2	14	36	87	59	11	2	0	1	2	13	34	27	6	5	302	18,8	85
15,0-20,0	0	3	3	21	116	39	5	0	0	0	0	3	22	23	6	0	241	15,0	88
20,0-25,0	0	0	0	9	97	38	1	0	0	0	0	2	18	11	1	0	177	11,0	94
25,0-30,0	0	0	0	7	78	37	0	0	0	0	0	0	17	1	0	0	140	8,7	96
30,0-35,0	0	0	0	2	42	18	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	66	4,1	96
35,0-40,0	0	0	0	1	26	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	35	2,2	94
40,0-45,0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	1,1	91
45,0-50,0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,6	93
50,0-55,0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0,4	90
55,0-60,0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,1	87
Total	20	29	48	140	546	270	54	19	28	16	33	56	132	126	50	37	1604		
Porc.	1,2	1,8	3,0	8,7	34,0	16,8	3,4	1,2	1,7	1,0	2,1	3,5	8,2	7,9	3,1	2,3			
Vel. Méd.	5,9	6,8	8,5	12,2	21,1	17,0	8,2	5,7	4,1	5,9	5,5	8,5	15,0	10,8	8,4	5,9			
Vel. Max.	11,2	18,9	17,2	35,9	57,7	39,8	23,4	10,8	7,1	12,4	11,3	24,0	35,0	26,0	21,4	12,5			
Perct.(0,9)	10,0	13,0	10,0	20,0	35,0	25,0	15,0	8,0	5,0	5,0	5,0	10,0	25,0	15,0	15,0	10,0			

Analogamente, a Tabela II-5 apresenta o mesmo diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção ($^{\circ}$) da corrente para a camada de fundo. As correntes mais frequentes registradas nessa profundidade foram nas direções ESE (21,1%) e E (19,0%), com média de 14,9 cm/s e 15,4 cm/s, respectivamente; e as correntes mais intensas registradas também foram em direção a E (38,6 cm/s) e ESE (36,9 cm/s). Do total de registros das correntes, 95% têm intensidades iguais ou inferiores a 24,2 cm/s.

Tabela II-5 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo ao fundo, no período de 29 de junho a 5 de setembro de 2010, com intervalo de amostragem $dt=1h$.

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Dir. Méd.
0,0- 5,0	13	8	10	22	13	15	9	18	11	11	6	15	15	24	18	19	227	14,2	326
5,0-10,0	34	22	20	62	47	76	47	30	8	12	16	16	36	44	35	30	535	33,4	74
10,0-15,0	7	2	11	37	81	93	36	12	5	4	3	9	29	39	12	4	384	23,9	101
15,0-20,0	0	2	2	19	80	78	22	3	1	2	0	1	12	14	1	0	237	14,8	103
20,0-25,0	0	0	0	3	59	49	13	2	1	0	0	1	15	12	0	0	155	9,7	107
25,0-30,0	0	0	0	0	17	11	1	0	0	0	0	0	6	3	0	0	38	2,4	103
30,0-35,0	0	0	0	0	5	13	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	21	1,3	107
35,0-40,0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0,4	103
Total	54	34	43	143	305	339	129	65	26	29	25	42	114	137	66	53	1604		
Porc.	3,4	2,1	2,7	8,9	19,0	21,1	8,0	4,1	1,6	1,8	1,6	2,6	7,1	8,5	4,1	3,3			
Vel. Méd.	6,6	7,1	7,2	9,7	15,4	14,9	11,5	8,0	6,5	7,2	6,2	7,4	11,9	11,0	6,7	5,9			
Vel. Max.	14,1	17,5	17,7	23,5	38,6	36,9	34,2	22,5	20,0	17,9	12,0	20,6	30,3	30,4	15,6	13,6			
Perct.(0,9)	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	20,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	20,0	20,0	10,0	5,0			

Adicionalmente, a Figura II-7 e a Figura II-8 apresentam o espectro de amplitudes das correntes para os dados coletados próximos a superfície e ao fundo, respectivamente. Observa-se que as maiores intensidades ocorreram na baixa frequência, ou seja, inferior a 1 cpd e a componente u (leste-oeste) apresenta maior energia em relação a componente v (norte-sul), tanto para os dados de superfície quanto para os dados coletados próximo ao fundo.

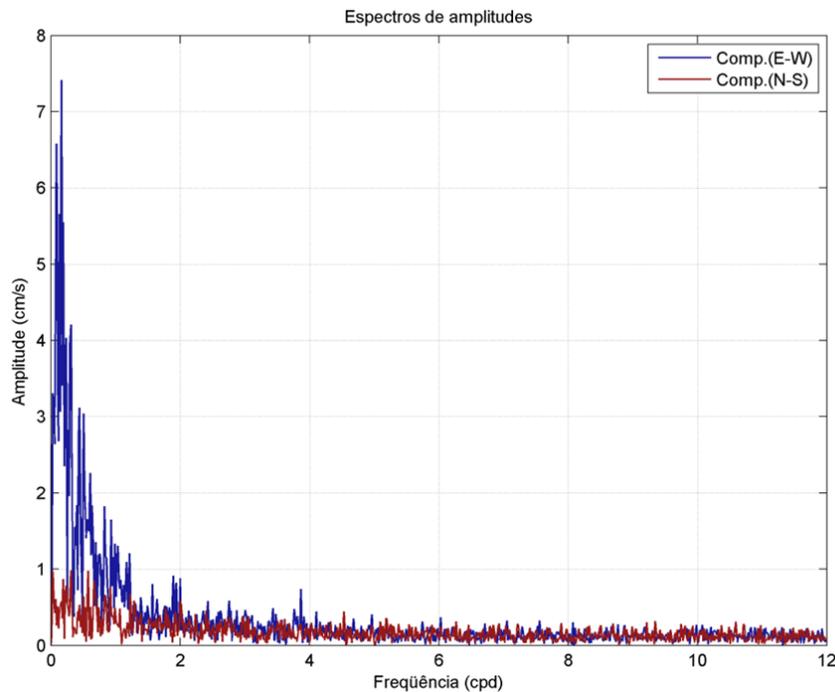


Figura II-7 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície, entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

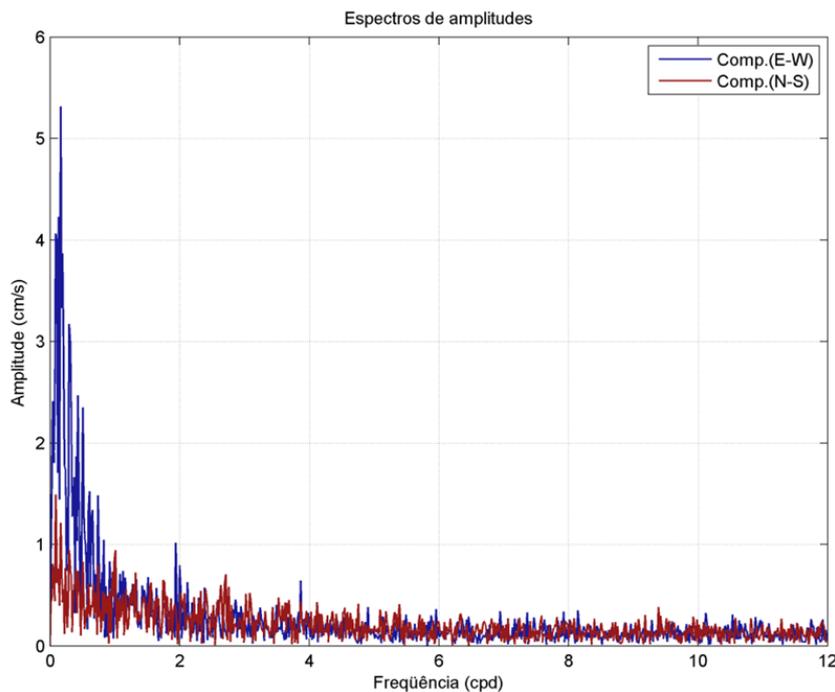


Figura II-8 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo ao fundo, entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

A seguir, é apresentada a análise para os dados coletados no período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. A Figura II-9 apresenta o diagrama *stick plot* desses dados de corrente. Assim como no período anterior, através da figura é possível observar que as correntes são paralelas à linha de costa orientadas do eixo leste-oeste.

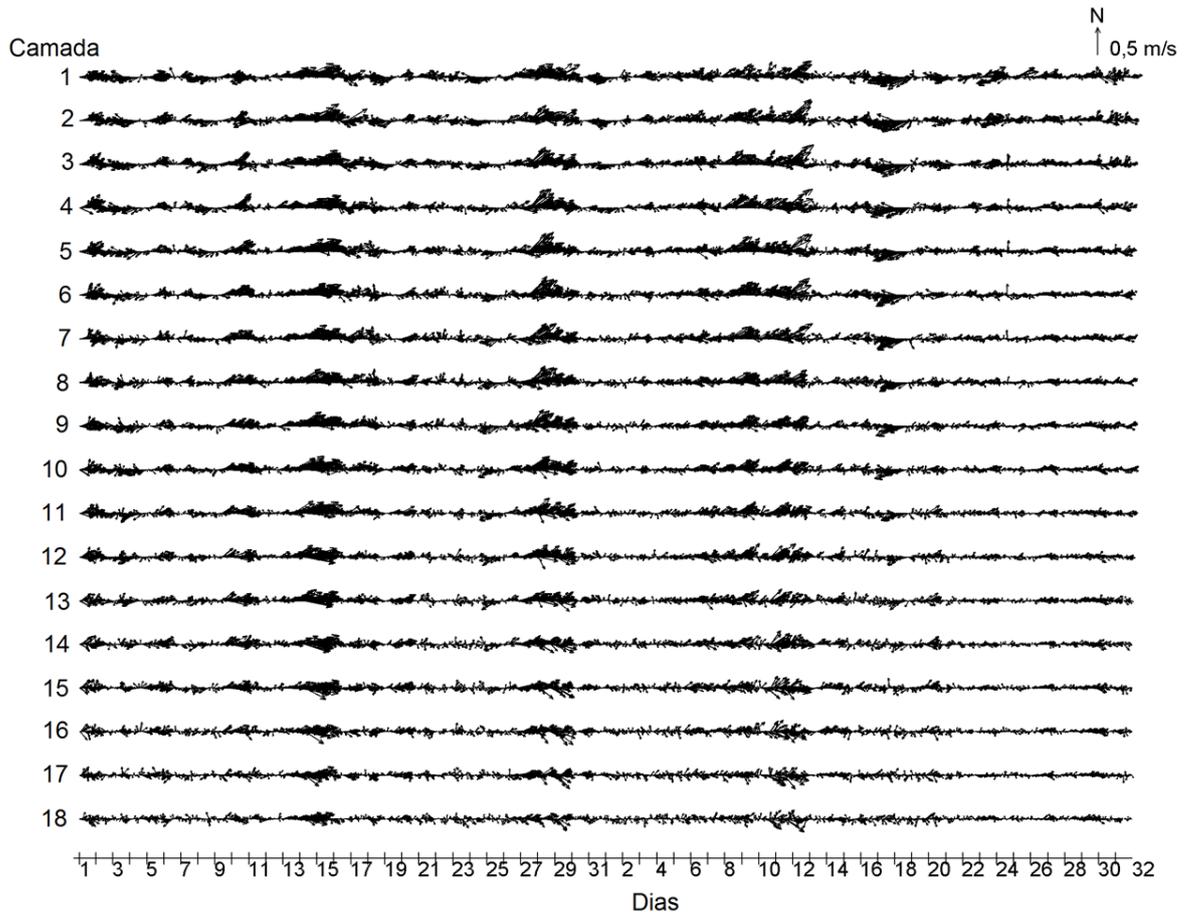


Figura II-9 - Diagrama *stick plot* dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

A Figura II-10 apresenta os dados de corrente, ilustrados na forma de histograma direcional para o período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011 na camada próxima a superfície e próxima ao fundo. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa a porcentagem de observações. A velocidade

média na superfície foi igual a 15 cm/s, enquanto no fundo a velocidade média foi de 9,6 cm/s.

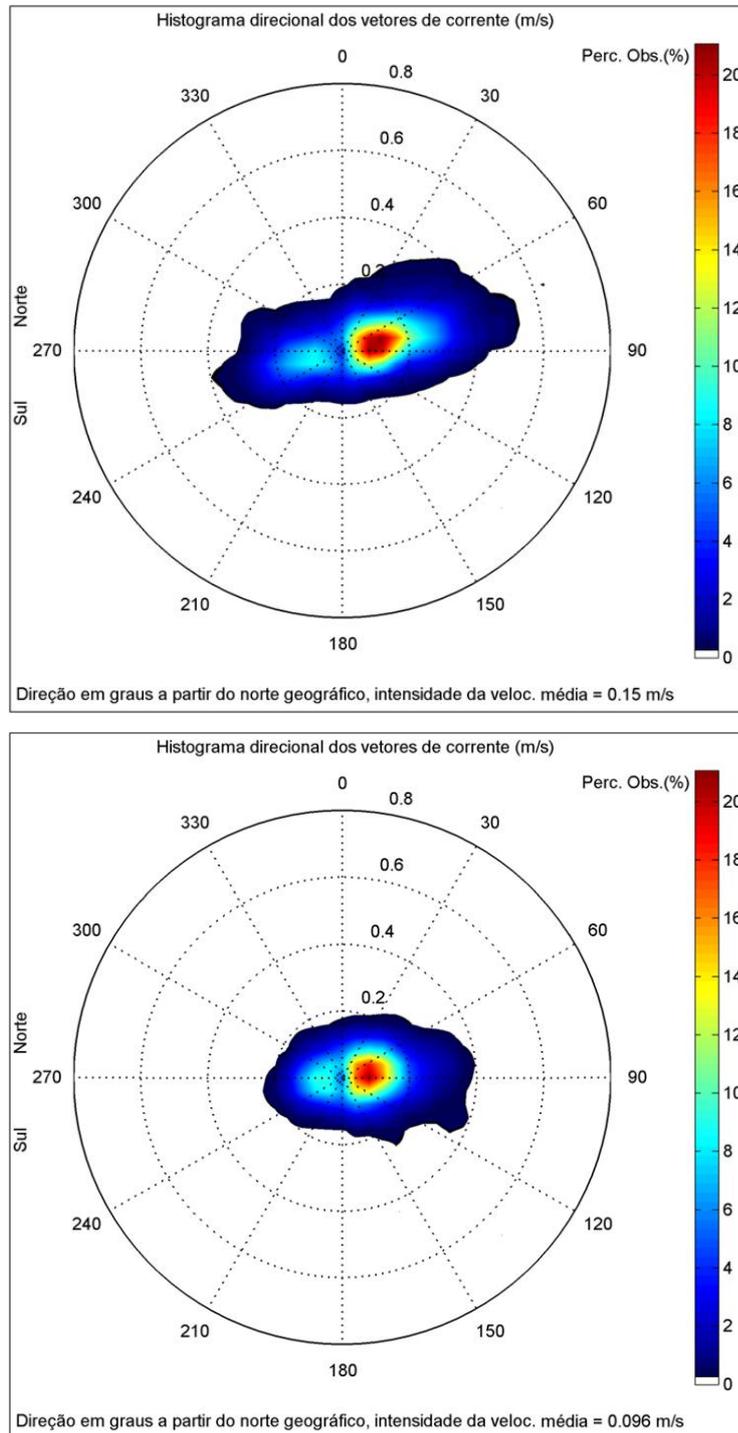


Figura II-10 - Histograma direcional dos vetores de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo a superfície (painel superior) e próximo ao fundo (painel inferior) entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

A Tabela II-6 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente para a camada de superfície no período de verão. Observa-se que as correntes mais frequentes registradas neste período foram nas direções ENE (25,0%) e E (22,6%), com média de 19,4 cm/s e 18,6 cm/s, respectivamente. As correntes mais intensas registradas também foram em direção a ENE (79,8 cm/s) e E (61,2 cm/s). Do total de registros das correntes, 95% têm intensidades iguais ou inferiores a 36,2 cm/s.

Tabela II-6 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo a superfície, no período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011, com intervalo de amostragem dt=1h.

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Dir. Méd.
0,0- 5,0	8	12	5	15	15	16	6	8	9	4	10	12	8	12	3	9	152	10,3	77
5,0-10,0	13	24	28	49	57	52	21	14	6	14	19	32	18	13	9	9	378	25,6	87
10,0-15,0	4	9	23	93	75	23	4	4	3	0	8	34	22	13	7	0	322	21,8	74
15,0-20,0	3	3	12	74	57	9	1	0	0	0	5	34	30	10	2	0	240	16,3	67
20,0-25,0	0	1	8	42	35	5	0	0	0	0	0	22	16	3	1	0	133	9,0	73
25,0-30,0	0	2	4	36	40	2	0	0	0	0	1	9	9	3	0	0	106	7,2	75
30,0-35,0	0	0	6	28	27	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	66	4,5	75
35,0-40,0	0	0	3	13	14	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	33	2,2	75
40,0-45,0	0	0	2	6	6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	16	1,1	73
45,0-50,0	0	0	1	3	6	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	14	0,9	76
50,0-55,0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	7	0,5	68
55,0-60,0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,1	67
60,0-65,0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,2	77
65,0-70,0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,1	70
70,0-75,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	
75,0-80,0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,1	76
Total	28	51	93	369	334	107	32	26	18	18	43	153	109	54	22	18	1475		
Porc.	1,9	3,5	6,3	25,0	22,6	7,3	2,2	1,8	1,2	1,2	2,9	10,4	7,4	3,7	1,5	1,2			
Vel. Méd.	7,6	8,9	15,7	19,4	18,6	9,5	7,1	6,7	5,6	6,0	8,1	15,6	16,2	11,1	9,4	5,2			
Vel. Max.	18,0	27,3	58,2	79,8	61,2	25,7	19,2	11,4	13,0	9,5	25,8	49,5	54,9	28,9	21,4	9,4			
Perct.(0,9)	13,5	15,0	30,0	30,0	30,0	15,0	10,0	10,0	10,0	5,0	15,0	25,0	25,0	20,0	15,0	5,0			

Analogamente, a Tabela II-7 apresenta o mesmo diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) da corrente para a camada de fundo. As correntes mais frequentes registradas nessa profundidade foram nas direções E (19,7%) e ENE (16,7%), com média de 13,7 cm/s e 11,8 cm/s, respectivamente. As correntes mais intensas registradas também foram em direção a E (45,1 cm/s) e ENE (39,1 cm/s). Do total de registros das correntes, 95% têm intensidades iguais ou inferiores a 23,5 cm/s.

Tabela II-7 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente (PETROBRAS) coletada próximo ao fundo, no período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011, com intervalo de amostragem $dt=1h$.

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Dir. Méd.
0,0- 5,0	14	22	12	23	33	30	16	23	25	20	16	26	23	24	15	28	350	24,0	122
5,0-10,0	16	29	42	91	70	53	38	25	10	18	21	34	31	30	19	14	541	37,1	84
10,0-15,0	5	7	25	62	70	24	12	8	0	4	3	23	27	14	4	5	293	20,1	78
15,0-20,0	2	2	9	41	53	18	6	1	0	0	2	10	8	3	0	1	156	10,7	84
20,0-25,0	0	0	3	14	28	9	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	57	3,9	87
25,0-30,0	0	0	1	8	15	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	2,1	89
30,0-35,0	0	0	0	4	13	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	1,3	89
35,0-40,0	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0,8	98
40,0-45,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	
45,0-50,0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,1	77
Total	37	60	92	244	288	14	76	57	35	42	42	94	90	71	38	48	1459		
Porc.	2,5	4,1	6,3	16,7	19,7	9,9	5,2	3,9	2,4	2,9	2,9	6,4	6,2	4,9	2,6	3,3			
Vel. Méd.	6,2	6,6	9,3	11,8	13,7	11,4	8,4	6,6	3,4	5,4	5,9	8,4	8,4	7,2	5,8	5,5			
Vel. Max.	16,1	17,5	26,2	45,1	39,1	37,7	34,8	17,0	9,1	14,9	19,8	23,1	21,2	16,6	14,2	15,5			
Perct.(0,9)	10,0	10,0	15,0	20,0	25,0	20,0	15,0	10,0	5,0	6,5	10,0	15,0	12,5	10,0	8,5	10,0			

Adicionalmente, a Figura II-11 e a Figura II-12 apresentam o espectro de amplitudes das correntes para os dados coletados próximos a superfície e ao fundo, respectivamente. Observa-se que as maiores intensidades ocorreram na baixa frequência, inferior a 1 cpd, e a componente u (leste-oeste) apresenta maior energia em relação a componente v (norte-sul), tanto para os dados de superfície quanto para os dados coletados próximo ao fundo.

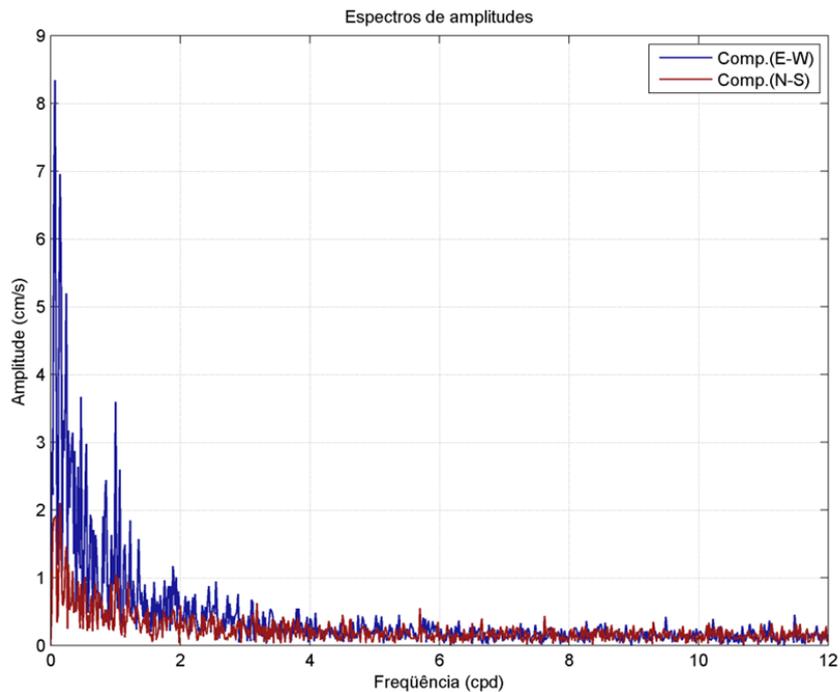


Figura II-11 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo à superfície, entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

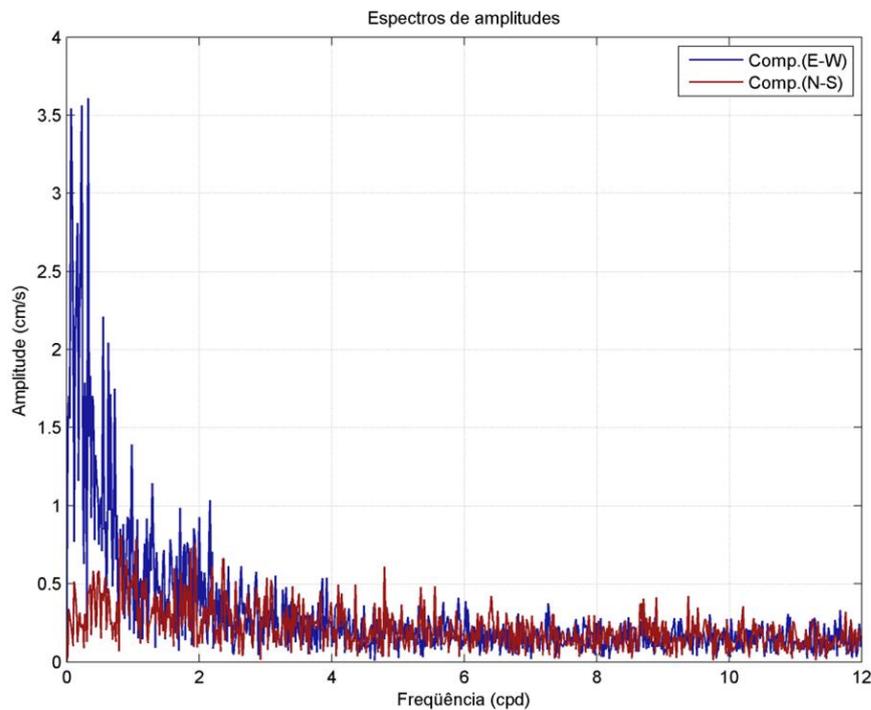


Figura II-12 - Espectro de amplitudes (cm/s) dos dados de corrente (PETROBRAS) medidos em Maricá, próximo ao fundo, entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. Intervalo de amostragem $dt=1h$.

II.3 ELEVAÇÃO

Assim como para os dados de correntes, a elevação do nível do mar foi coletada pela PETROBRAS na região costeira de Maricá em dois períodos distintos: o primeiro entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010; e o segundo entre 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011.

A seguir, é apresentada a análise da série temporal de elevação medida entre 29 de junho e 5 de setembro de 2010. A Figura II-13 apresenta as séries (em azul) e os níveis médios (em vermelho), que representam a parcela da elevação relativa aos processos meteorológicos. Observa-se que o nível médio representa uma parcela significativa da maré observada, indicando a importância dos efeitos meteorológicos na elevação do nível do mar. No local, a amplitude observada para o período de sizígia foi de 1,0 m, em média, chegando a um máximo de 1,2 m, e para o de quadratura foi de 0,4 m, em média.

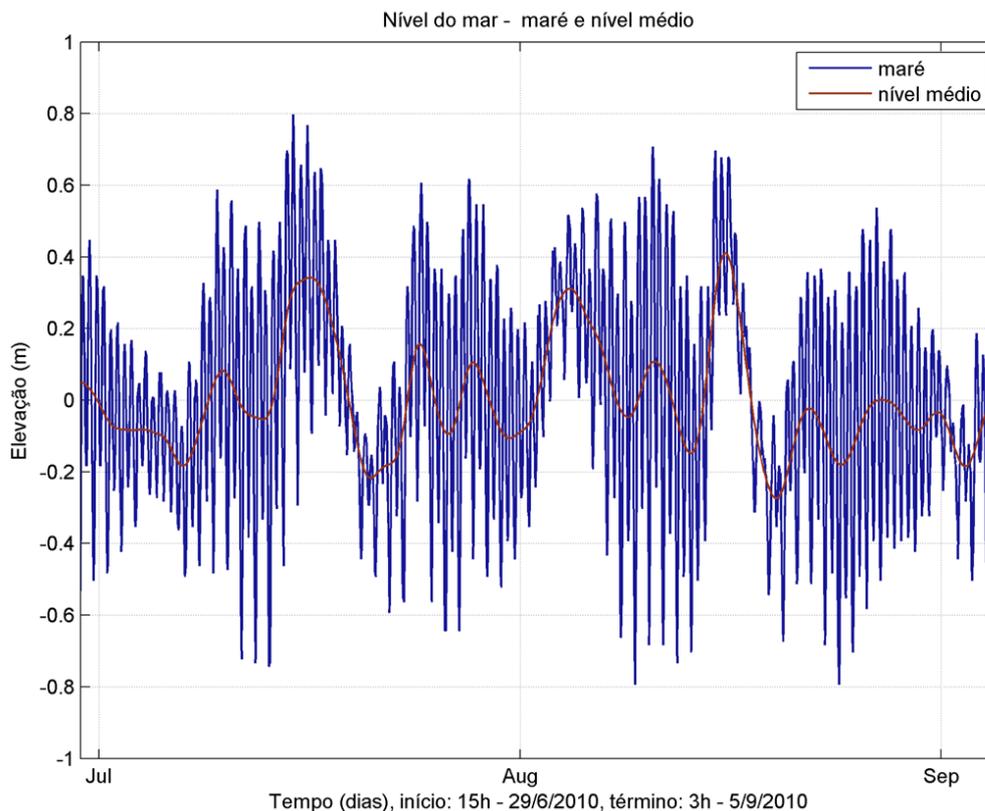


Figura II-13 - Série temporal de elevação e nível médio (PETROBRAS) medido em Maricá entre 29 de junho a 5 de setembro de 2010.

A Figura II-14 apresenta o espectro de amplitudes calculado a partir da análise harmônica desses dados. Esta análise foi realizada utilizando o método de Schuremann (SCHUREMANN, 1941). Observa-se que os picos espectrais significativos ocorrem principalmente nas frequências semidiurna, diurna e menores do que 0,5 cpd. Nesta figura também é apresentada a análise harmônica de maré, cujas principais componentes harmônicas de maré astronômica são a M2 e a S2. O espectro também indica que a variabilidade associada às baixas frequências é importante, como também pode ser observado no nível médio anteriormente apresentado.

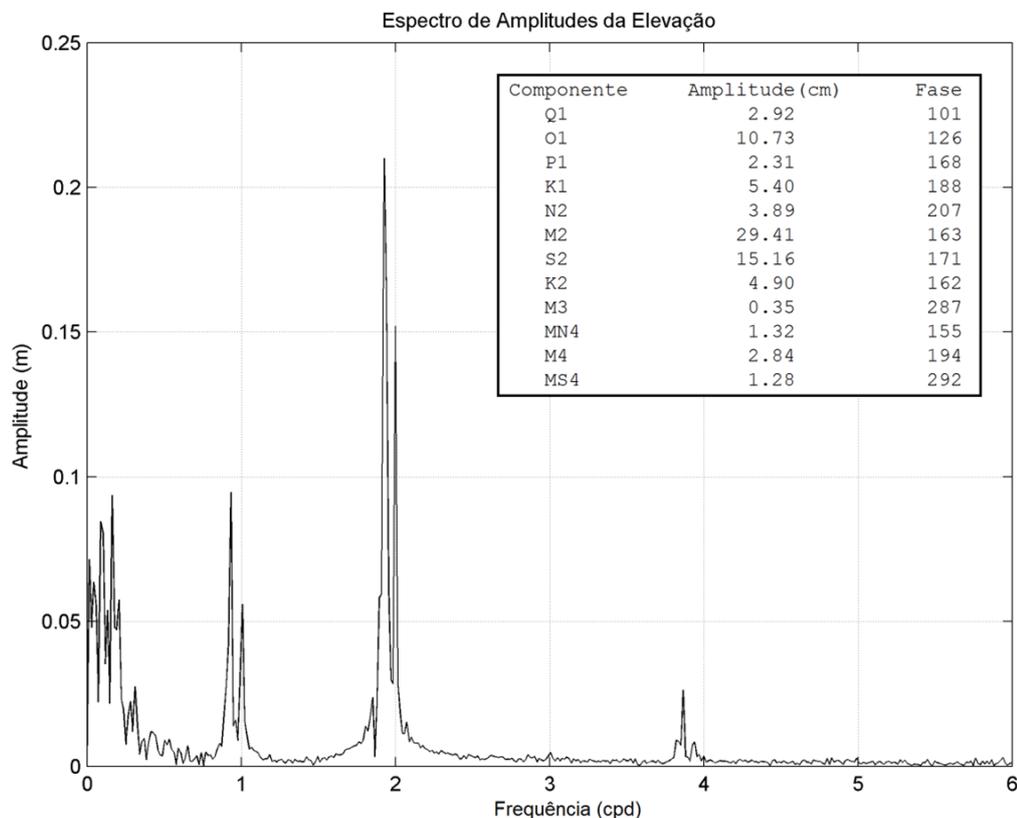


Figura II-14 - Espectro de amplitude da série temporal de elevação de nível do mar (PETROBRAS) obtida em Maricá, entre 29 de junho e 5 de setembro de 2010.

A seguir, é apresentada a análise da série temporal de elevação medida no período de verão (01/12/2010 a 01/02/2011). A Figura II-15 apresenta as séries (em azul) e os níveis médios (em vermelho), que representam a parcela da elevação relativa aos processos meteorológicos. Observa-se que o nível médio

representa uma parcela significativa da maré observada, indicando a importância dos efeitos meteorológicos elevação do nível do mar. No local, a amplitude observada para o período de sizígia foi de 1,0 m, em média, chegando a um máximo de 1,3 m, e para quadratura foi de 0,4 m, em média.

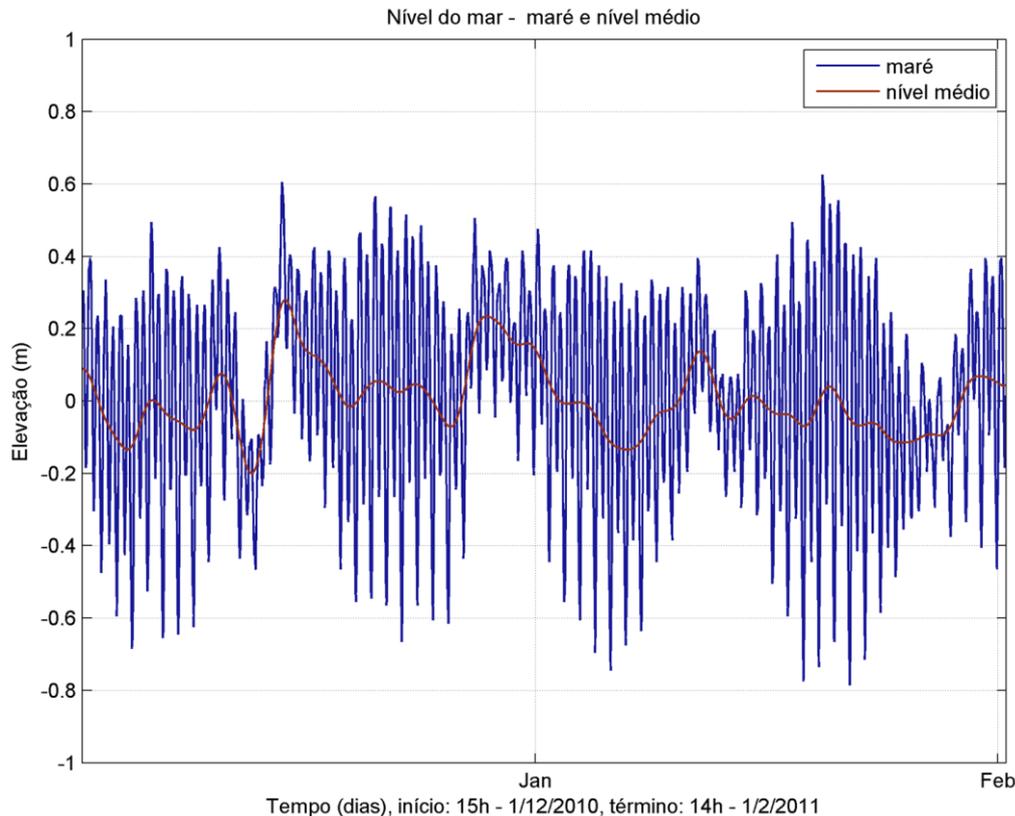


Figura II-15 - Série temporal de elevação e nível médio (PETROBRAS) medido em Maricá entre 1º de dezembro de 2010 e 1º de fevereiro de 2011.

A Figura II-16 apresenta o espectro de amplitudes calculado a partir da análise harmônica desses dados. Esta análise foi realizada utilizando o método de Schuremann (SCHUREMANN, 1941). Observa-se que os picos espectrais significativos ocorrem principalmente nas frequências semidiurna, diurna e menores do que 0,5 cpd. Nesta figura também é apresentada a análise harmônica de maré, cujas principais componentes harmônicas de maré astronômica são a M2 e a S2. O espectro também indica que a variabilidade associada às baixas frequências é importante, como também observado no nível médio anteriormente apresentado.

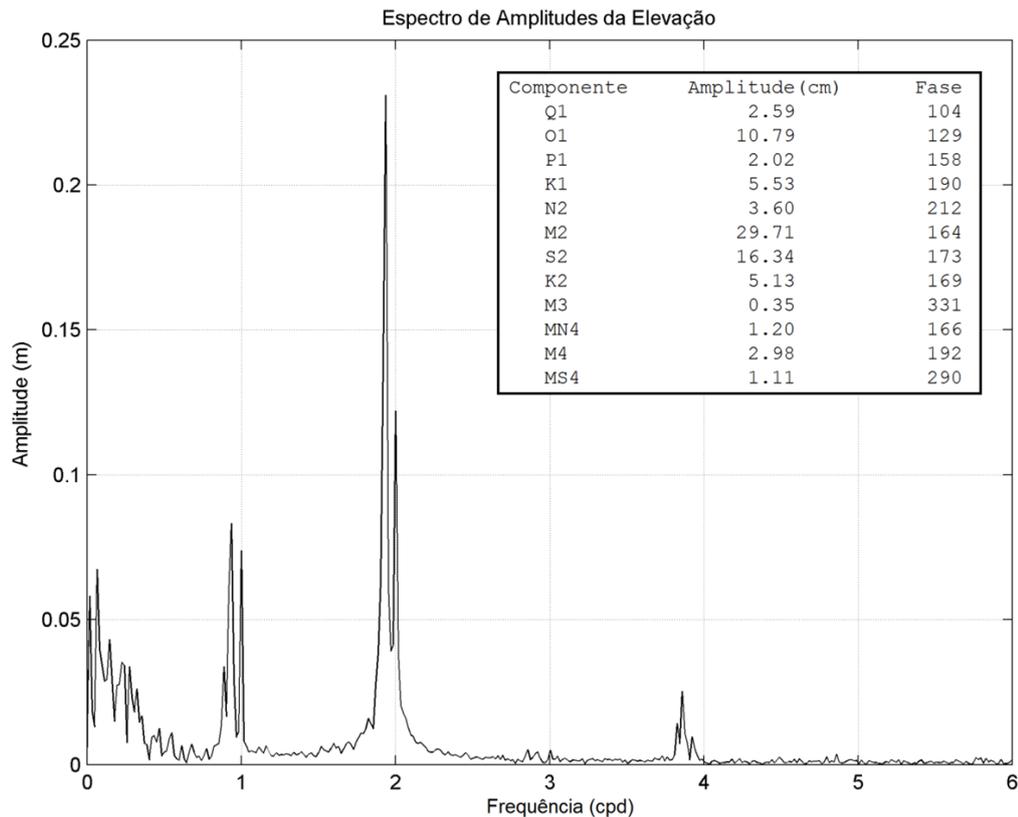


Figura II-16 - Espectro de amplitude da série temporal de elevação de nível do mar (PETROBRAS) obtida em Maricá, entre 1º de dezembro de 2010 e 1º de fevereiro de 2011.

II.4 VAZÃO

Segundo Kjerfve *et al.* (1997) a descarga de água doce média total na Baía de Guanabara é de 100 m³/s, variando de, aproximadamente, 33 m³/s em julho à 186 m³/s em janeiro. Esses valores foram calculados com base em um modelo empírico utilizando dados de precipitação. A vazão média mensal calculada é apresentada na Figura II-17.

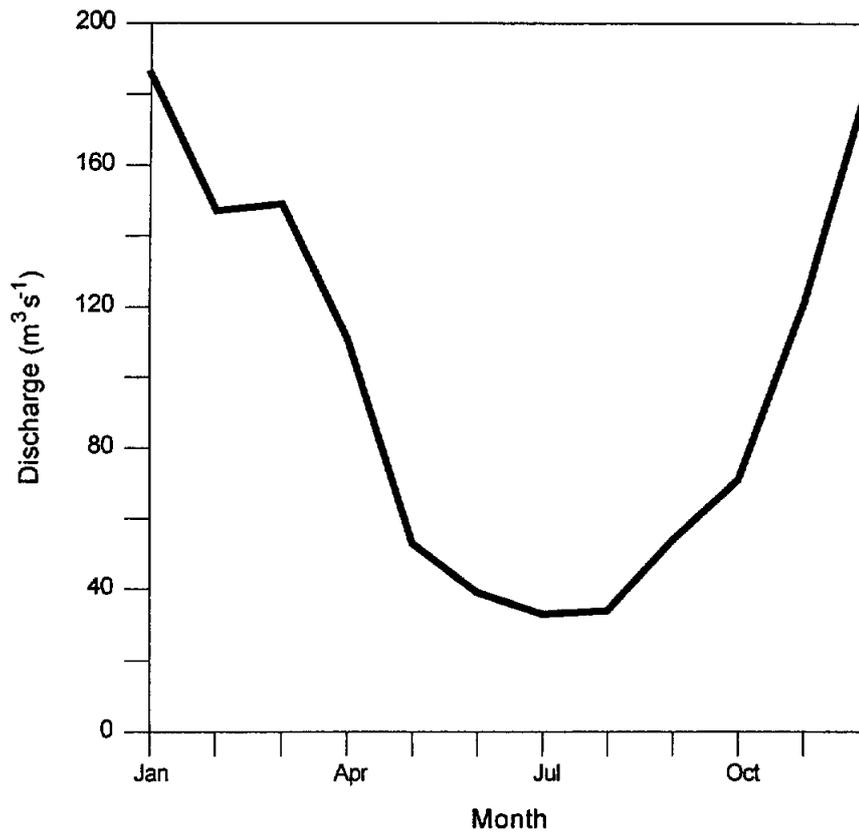


Figura II-17 - Descarga de água doce média mensal calculada para a Baía de Guanabara. (Fonte: KJERFVE et al., 1997).

III. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O sistema de modelos numéricos Delft3D (DELTARES, 2011), através do módulo Delft3D-FLOW, foi selecionado como ferramenta para se atingir os objetivos propostos neste estudo. Esse sistema de modelos é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, assim como a transferência de *momentum* ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. As principais características desse modelo são descritas no Apêndice A deste relatório.

III.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E DADOS DE ENTRADA

No presente estudo, deseja-se analisar o comportamento de determinadas variáveis no espaço e no tempo. A metodologia empregada (simulações numéricas) depende da geometria bi e/ou tridimensional que se pretende analisar. A seguir, estão descritos os procedimentos adotados na consideração desses fatores críticos, garantindo, assim, a qualidade do estudo realizado.

III.1.1 Grade Numérica e Batimetria

A grade numérica implementada representa um compromisso entre os objetivos finais do projeto de modelagem e a descrição dos processos na região. A especificação desta é feita pela fixação dos pontos de grade ao longo da linha de costa (no plano) e pela batimetria (eixo vertical). Uma vez que estes pontos ao longo da linha de costa são determinados, as demais características batimétricas são associadas ao domínio.

Foi implementada uma grade numérica curvilínea com dimensão horizontal de 187x169 pontos, oito camadas sigma na vertical e espaçamento horizontal variando de 12.000 m (na região de menor resolução) a 20 m (na região do empreendimento).

As informações de profundidade foram obtidas através da digitalização de cotas batimétricas da carta náutica da DHN⁴, n^{os} 1.501, 1.511, 1.512, 1.517, 23.000 e 23.100 e com levantamentos pertencentes ao banco de dados da TETRA TECH.

Visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa, foram utilizadas também informações provenientes de imagens de satélite. As cotas batimétricas foram associadas a cada ponto da grade numérica do modelo através de interpolação triangular. Com isso, estes dados foram incorporados ao modelo, adequando-os à resolução adotada.

Os resultados finais da discretização da grade numérica estão ilustrados, a seguir. Na Figura III-1 é apresentada a grade numérica, enquanto a Figura III-2 mostra a batimetria interpolada na mesma; a Figura III-3 apresenta um detalhe dessa grade e da batimetria nas proximidades do ponto de risco.

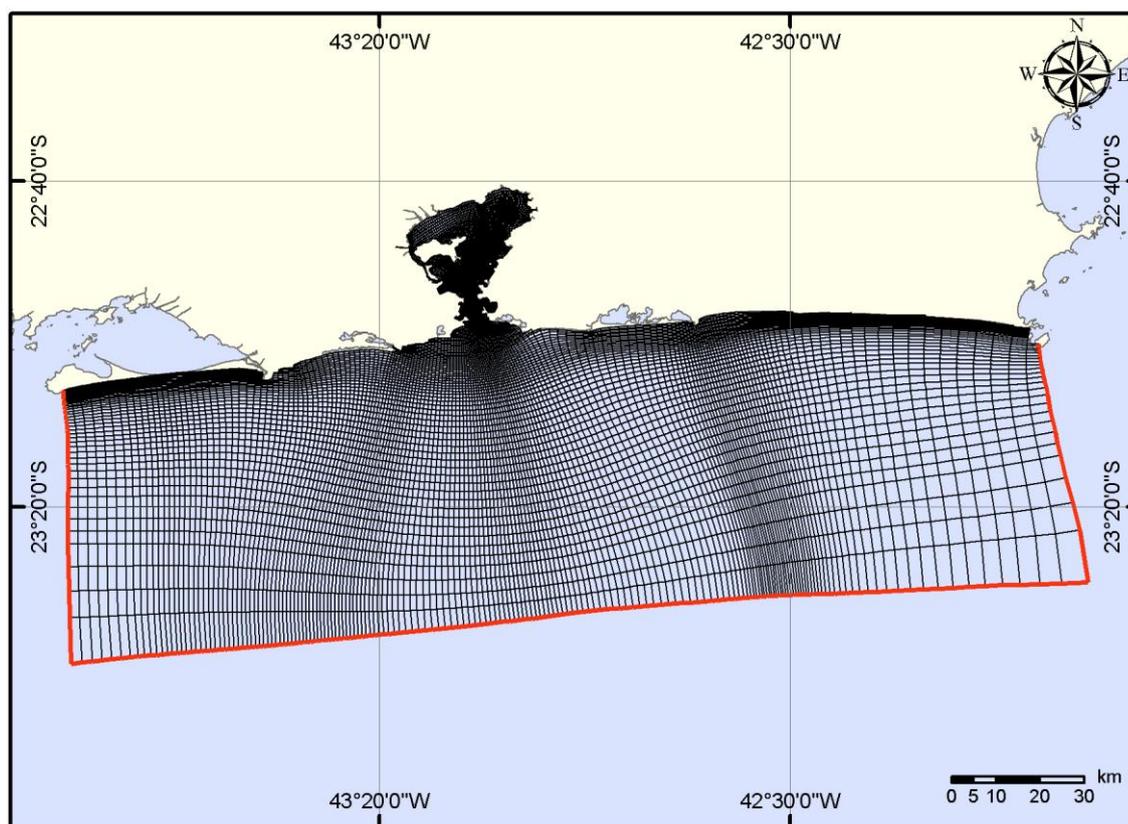


Figura III-1 - Grade numérica utilizada na modelagem, com localização das bordas abertas em vermelho.

⁴ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

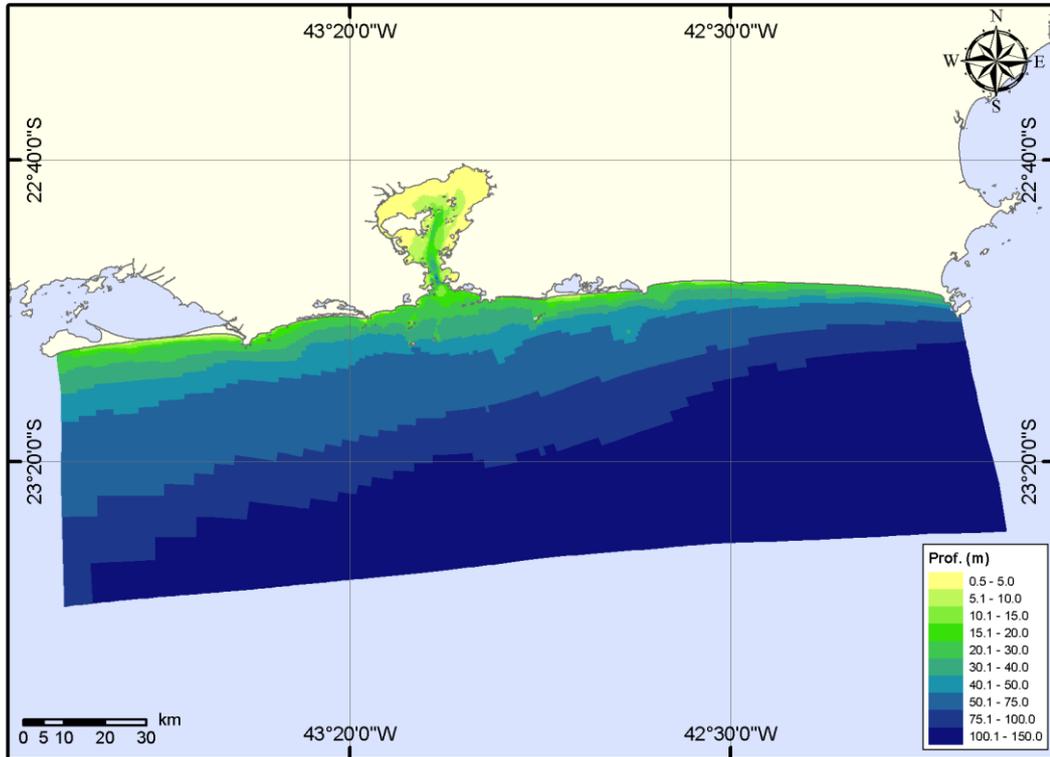


Figura III-2 - Batimetria interpolada na grade numérica.

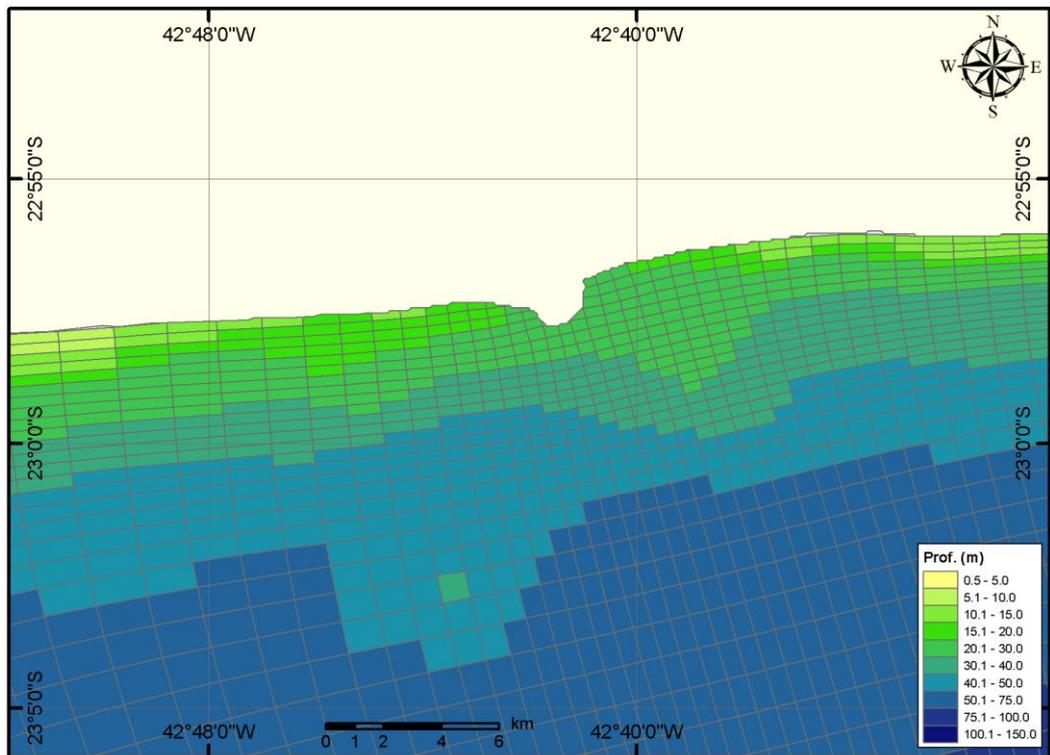


Figura III-3 - Detalhe da grade numérica e batimetria associada na região do ponto de risco.

III.1.2 Condições de Contorno

No modelo hidrodinâmico foi considerado um conjunto de 14 bordas abertas na fronteira oceânica, sendo três na borda Leste, três na Oeste e oito na borda Sul (Figura III-1). As condições hidrodinâmicas impostas a estas bordas foram a previsão harmônica da elevação de superfície, obtida a partir das constantes harmônicas do modelo global de maré TPXO⁵, e dados de correntes 3D, temperatura e salinidade, provenientes da base de dados do consórcio HYCOM⁶. Essa base de dados é composta por resultados do modelo numérico HYCOM, com resolução espacial de 1/12^o (aproximadamente 9,25 km).

As forçantes hidrodinâmicas de elevação e velocidade foram impostas na borda do modelo numérico Delft3D através de uma condição de fronteira denominada Riemann. Esse tipo de condição de fronteira é usado para simular uma borda levemente reflexiva. A principal característica de uma fronteira levemente reflexiva é que esta, até um determinado nível, é transparente para onda transmitida, tais como distúrbios de ondas curtas. Assim ondas transmitidas podem cruzar a fronteira aberta, sem serem refletidas de volta para o domínio computacional como acontece com outros tipos de condição de fronteira (DELTARES, 2011).

A condição Riemann imposta na borda do modelo é obtida da seguinte equação:

$$f(t) = U + \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (\text{III.1.2-1})$$

onde,

$f(t)$ é a condição Riemann no tempo;

U é a velocidade da corrente (oriunda do modelo HYCOM);

ζ é a elevação do nível da água (oriunda dos modelos TPXO e HYCOM);

⁵ Disponível em <<http://opendap.deltares.nl/thredds/catalog/opendap/deltares/delftdashboard/>>. Último acesso em 22 de abril de 2013.

⁶ HYbrid Coordinate Ocean Model Disponível em <<http://www.hycom.org>>. Último acesso em 22 de abril de 2013.

- g é a aceleração da gravidade;
 d é a profundidade.

Como condição de contorno na superfície livre, para a reprodução do campo atmosférico, foram utilizados dados de vento e pressão atmosférica variáveis no espaço e no tempo do NCEP/NCAR. A análise desses dados para um ponto de grade foi apresentada no Item II.1.

III.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM

Para contemplar a variabilidade sazonal foram simulados dois períodos: (a) três meses de inverno, de 1º de junho a 05 de setembro de 2010; e (b) três meses de verão, de 1º de dezembro de 2010 a 05 de março de 2011. Estes períodos foram selecionados devido a disponibilidade dos dados para a avaliação do modelo; para ambos os períodos foi considerado um aquecimento de dez dias para estabilização do modelo.

III.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de validação utilizada fundamenta-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica na região em estudo. Com este intuito são apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e os dados coletados disponíveis na região de interesse (apresentados no Item II).

A comparação entre os resultados da modelagem e os dados foi quantificada através do parâmetro, denominado, Índice de concordância (*Index of Agreement*) proposto por Willmott & Wicks (1980 *apud* WILLMOTT, 1982), definido por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\text{modelo}_i - \overline{\text{dado}}| + |\text{dado}_i - \overline{\text{dado}}|)^2} \right] \quad (\text{III.3-1})$$

onde: $\overline{\text{dado}}$ = média do dado.

Segundo os autores para valores de $d \gg 0,5$ a modelagem apresenta uma significativa redução de erros. O valor ideal de d é 1 (um).

A avaliação dos resultados da modelagem hidrodinâmica para elevação do nível do mar e correntes foi realizada através da comparação entre os valores previstos pelo modelo e os dados de elevação e correntes coletados através de um ADCP na região costeira de Maricá em dois períodos distintos, nas coordenadas 22°58'47,97"S e 42°56'47,85"W (SIRGAS 2000).

III.3.1 Avaliação para a Maré

Para a avaliação da modelagem hidrodinâmica, com relação à elevação da superfície do mar, utilizou-se os dados de elevação coletados na região costeira de Maricá em um período de inverno e de verão.

As séries temporais de elevação de superfície, tanto dos dados quanto dos resultados do modelo, são apresentadas na Figura III-4. O parâmetro estimado para quantificar a comparação (dado x modelo) no período de inverno foi de 0,97, enquanto o no período de verão esse índice foi de 0,98.

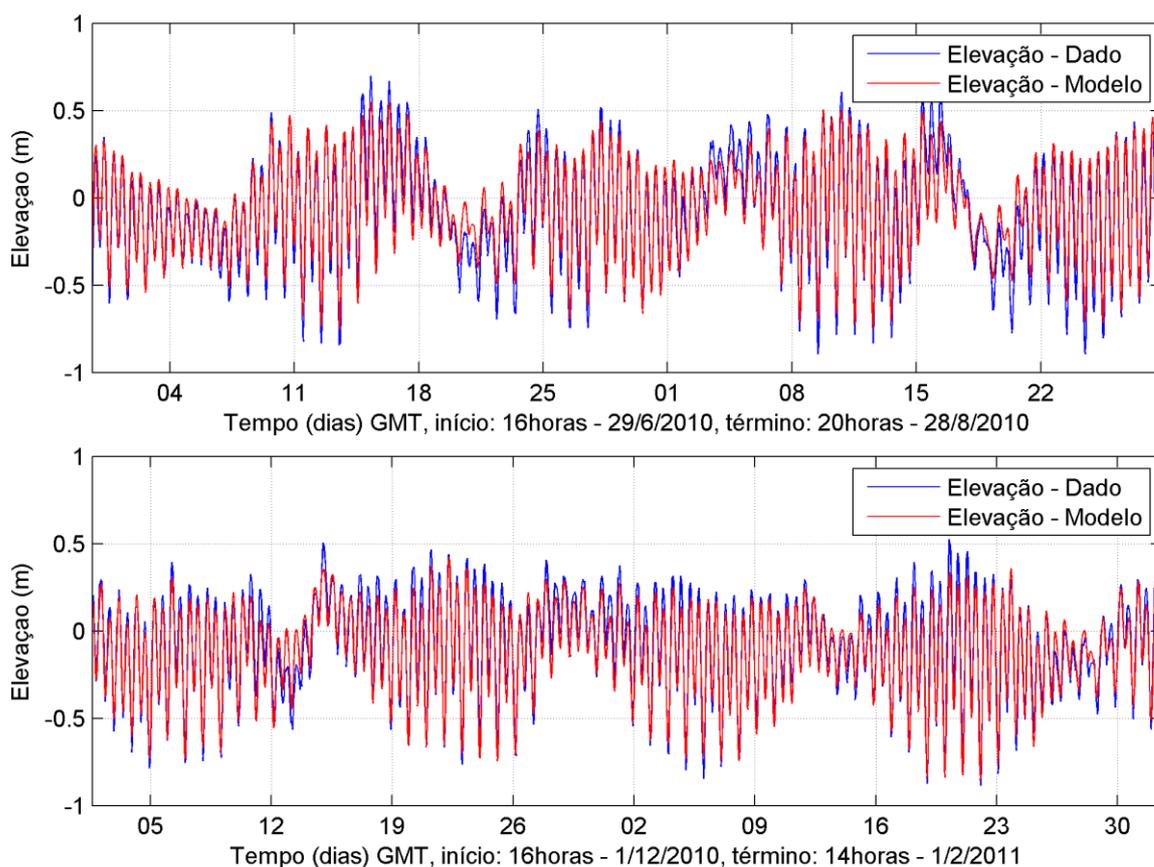


Figura III-4 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m), para um período de inverno (painel superior) e um período de verão (painel inferior), na região costeira de Maricá. A série temporal dos valores previstos é plotada em azul, enquanto que a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica é plotada em vermelho.

III.3.2 Avaliação para as Correntes

No processo de avaliação das correntes calculadas pelo modelo, foram comparadas as velocidades das correntes modeladas com as correntes observadas na profundidade de 1,38 m.

A Figura III-5 apresenta a comparação entre os resultados da modelagem e as séries observadas para as componentes u e v , para a profundidade de 1,38 m. A comparação é para o período compreendido entre os dias 29 de junho e 28 de agosto de 2010. O parâmetro estimado para quantificar a comparação (dado x modelo) nesse período foi de 0,79 para a componente u (principal componente local de velocidade).

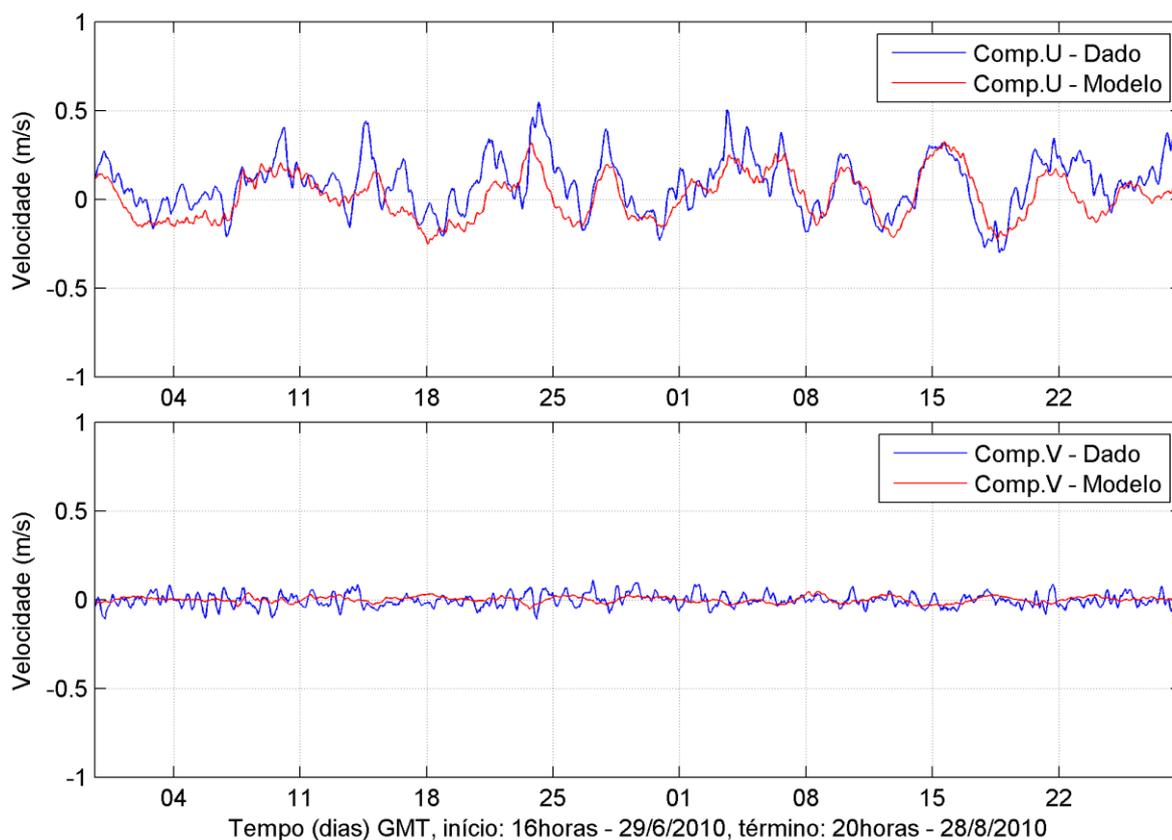


Figura III-5 - Série temporal medida da componente u e v da velocidade (azul), referente aos dados do ADCP em Maricá, e a calculada pelo modelo (vermelho) para profundidade de 1,38m referentes aos dias 29 de junho a 28 de agosto de 2010.

Analogamente aos dados apresentados para um período de inverno, a seguir é apresentada a avaliação do modelo para um período de verão. A Figura III-6 apresenta a comparação entre os resultados da modelagem e as séries observadas para as componentes u e v , para a profundidade de 1,38 m. A comparação é para o período compreendido entre os dias 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011. O parâmetro estimado para quantificar a comparação (dado x modelo) nesse período foi de 0,78 para a componente u (principal componente local de velocidade).

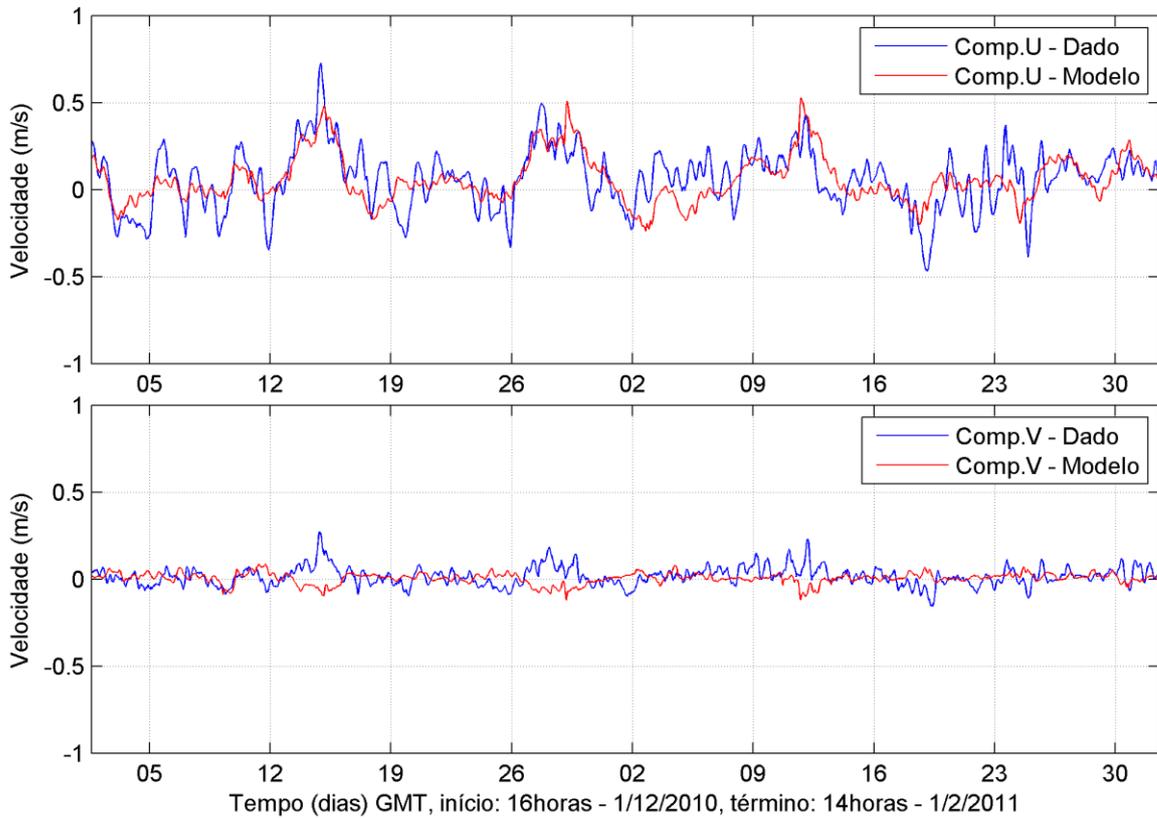


Figura III-6 - Série temporal medida da componente *u* e *v* da velocidade (azul), referente aos dados do ADCP em Maricá, e a calculada pelo modelo (vermelho) para profundidade de 1,38m referentes aos dias 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011.

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se também como se comportam os padrões médios e extremos obtidos com a modelagem, e se o modelo tem capacidade de reproduzir os efeitos mais frequentes e mais energéticos observados nos dados. Realizou-se então, uma nova avaliação, desta vez utilizando-se o parâmetro estatístico *Relative Mean Absolute Error* - RMAE (WALSTRA *et al.*, 2001), definido como:

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

O RMAE ideal é nulo. Estes autores apresentaram também, uma tabela na qual classificam (qualificam) os valores dos erros (Tabela III-1).

Tabela III-1 - Classificação do RMAE por ranges.

ERRO PERCENTUAL DO RMAE (%)	QUALIFICAÇÃO
RMAE < 20	Excelente
20 < RMAE < 40	Bom
40 < RMAE < 70	Razoável
70 < RMAE < 100	Ruim
RMAE > 100	Péssimo

Desta forma, é apresentada a seguir (

Tabela III-2), uma comparação entre os valores máximos, médios e os desvios padrão entre os dados e os resultados do modelo e os respectivos erros percentuais do RMAE obtidos. Observa-se que a maior parte dos erros obtidos podem ser qualificados como “Bons” por esta classificação.

Tabela III-2 - Valores máximos, médios e os desvios padrão entre os dados e os resultados do modelo.

		Dado	Modelo	Erro Percentual	Classificação
Inverno	Média da Velocidade (m/s)	0,146	0,115	21,2%	Bom
	Velocidade Máxima (m/s)	0,550	0,325	40,9%	Razoável
	Média Comp. u (m/s)	0,140	0,113	19,2%	Excelente
	Desvio Padrão Comp. u (m/s)	0,104	0,067	35,5%	Bom
Verão	Média da Velocidade (m/s)	0,154	0,11	28,5%	Bom
	Velocidade Máxima (m/s)	0,772	0,536	30,5%	Bom
	Média Comp. u (m/s)	0,145	0,105	27,5%	Bom
	Desvio Padrão Comp. u (m/s)	0,107	0,102	4,6%	Excelente

Complementando a análise apresentada acima, seguem comparações entre os espectros de amplitudes para a componente u (principal componente local de velocidade) do campo de correntes medidos e resultantes da modelagem, para o período de 29 de junho a 28 de agosto de 2010 e para a período de 1º de dezembro de 2010 a 1º de fevereiro de 2011.

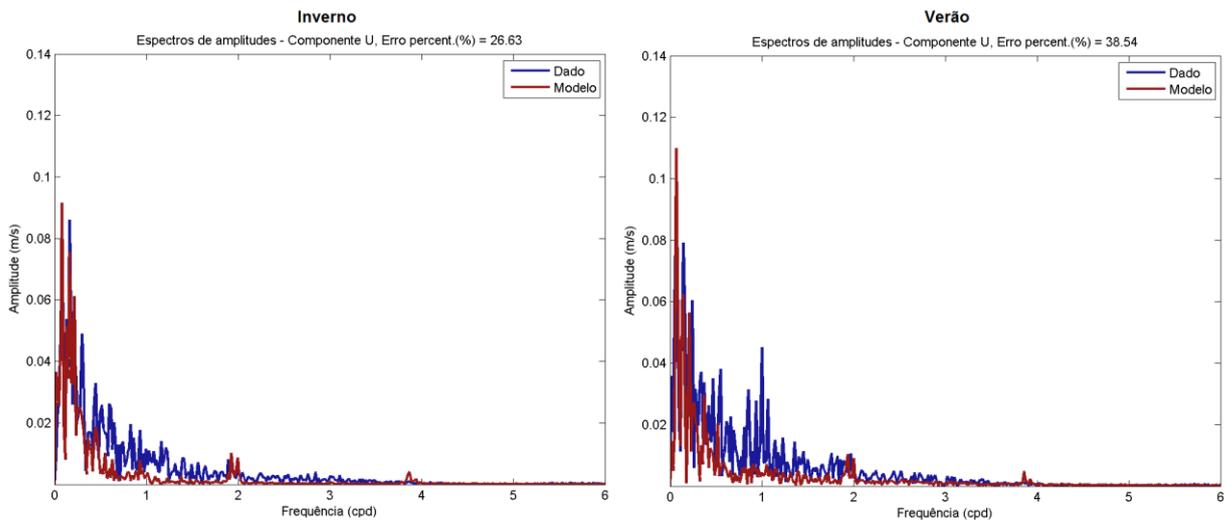


Figura III-7 - Espectros de amplitude dos dados de Maricá, em azul, e obtidos no modelo, em vermelho, para a componente u da velocidade, em um período de inverno (à esquerda) e outro de verão (à direita).

Por fim, para verificar de forma objetiva e quantitativa o quanto a modelagem conseguiu reproduzir as principais características da dinâmica oceânica da região de estudo, em escalas espacial e temporal, e em termos de variabilidade e intensidade, calculou-se o erro percentual entre os espectros obtidos no modelo e no dado.

Dessa forma, pode-se observar que todas as características da componente u (principal componente local de velocidade) simulada pelo modelo apresentou qualificação “Boa” (abaixo de 40%). Assim, demonstra-se quantitativamente a capacidade do modelo em reproduzir satisfatoriamente a variabilidade e a energia contida nos dados. Enfim, através dos métodos apresentados para a avaliação do modelo numérico implementado para a região, constata-se que a modelagem numérica foi aplicada com sucesso.

IV. RESULTADOS

As figuras abaixo (Figura IV-1 e Figura IV-2) mostram os campos de corrente modelados para instantes de correntes costeiras típicas, ou seja, para leste, e em instantes de inversão (correntes para oeste), respectivamente. Posteriormente, apresentam-se detalhes para a região de interesse (Figura IV-3 e Figura IV-4).

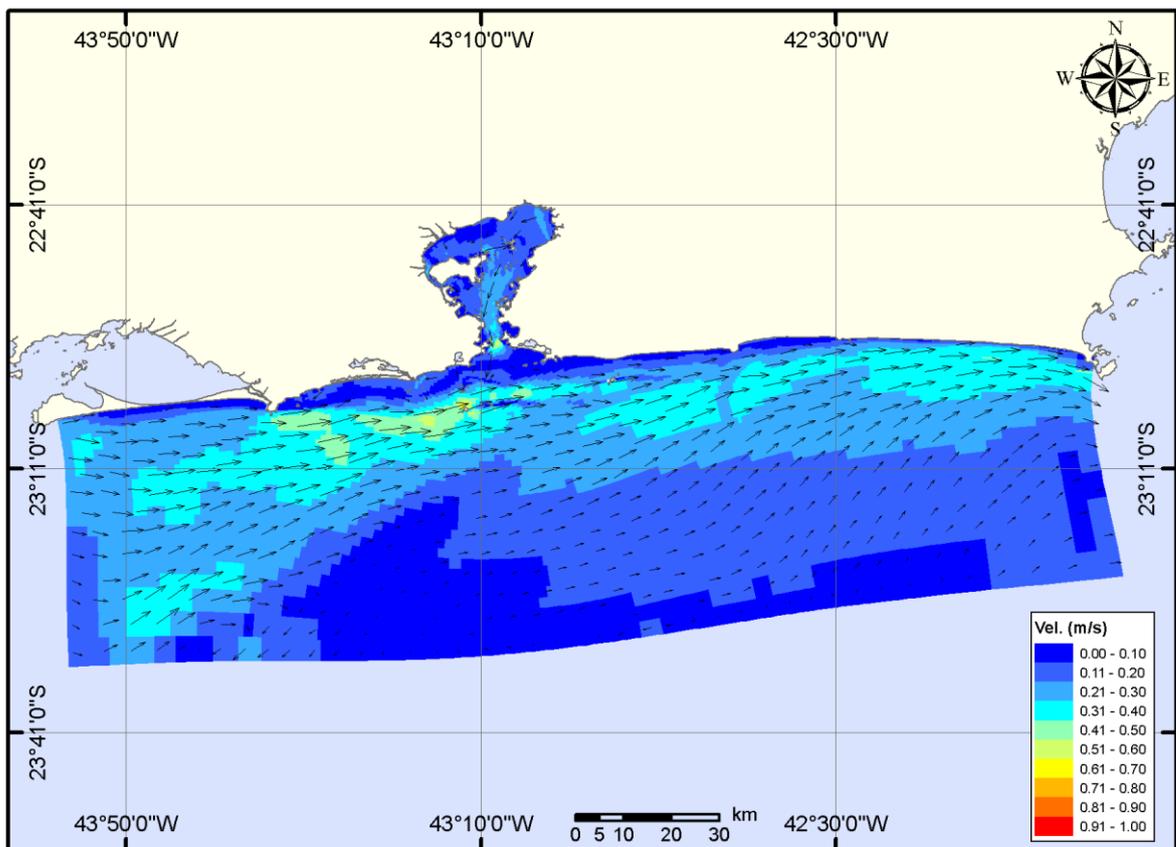


Figura IV-1 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de correntes típicas (para leste). A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).

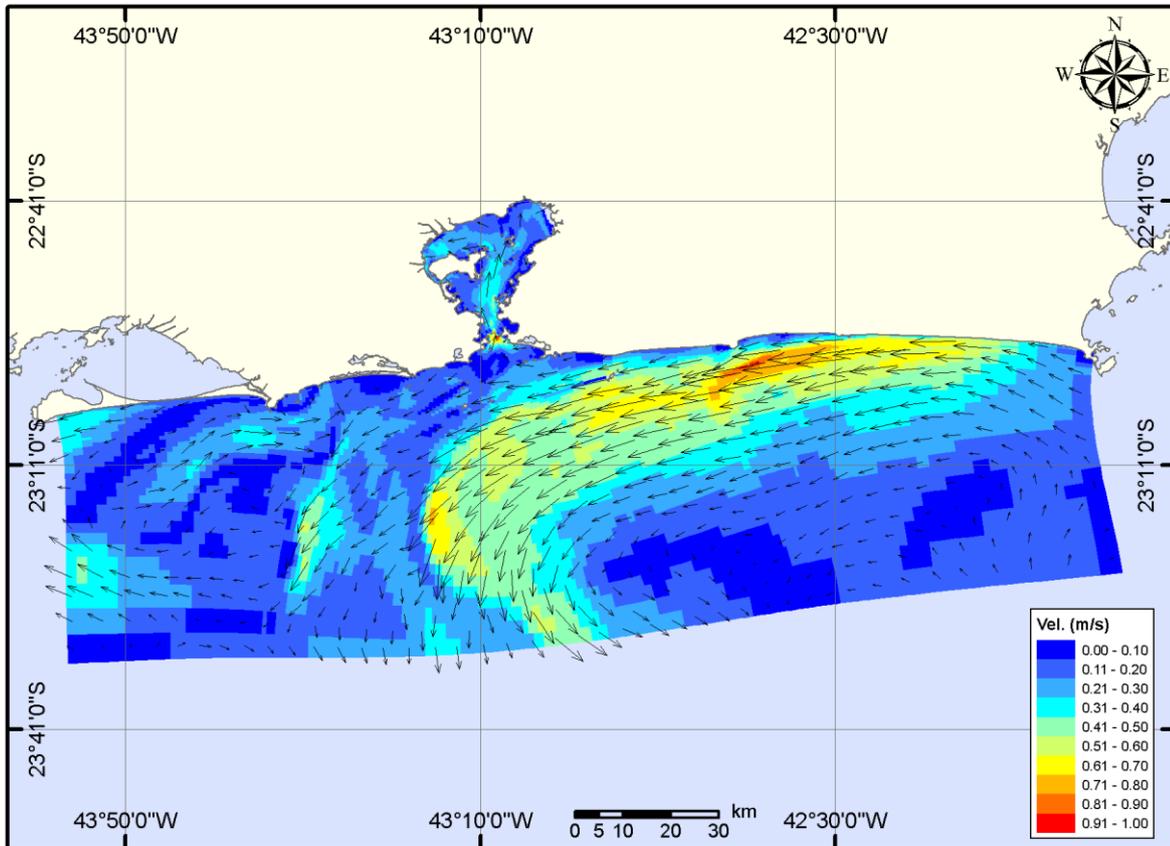


Figura IV-2 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de correntes para oeste. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).

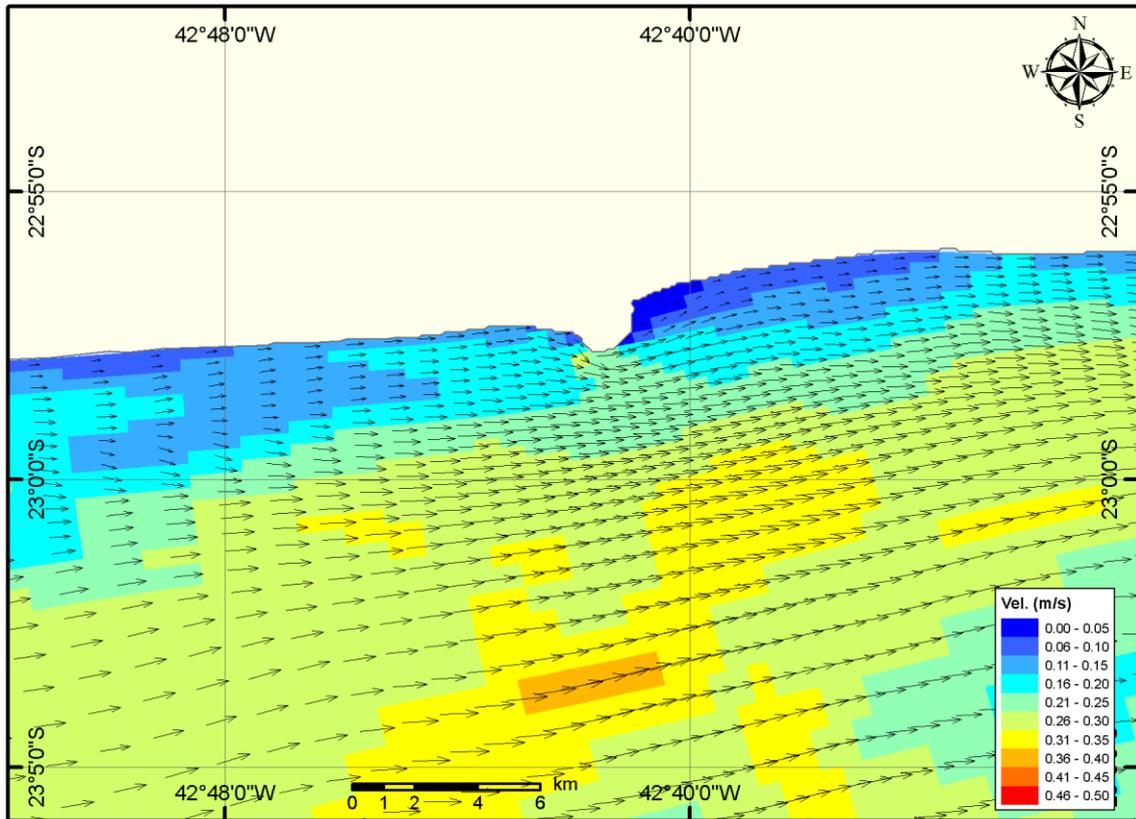


Figura IV-3 - Instantâneo do campo de correntes, na região de interesse, para um momento de correntes típicas (para leste). A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).

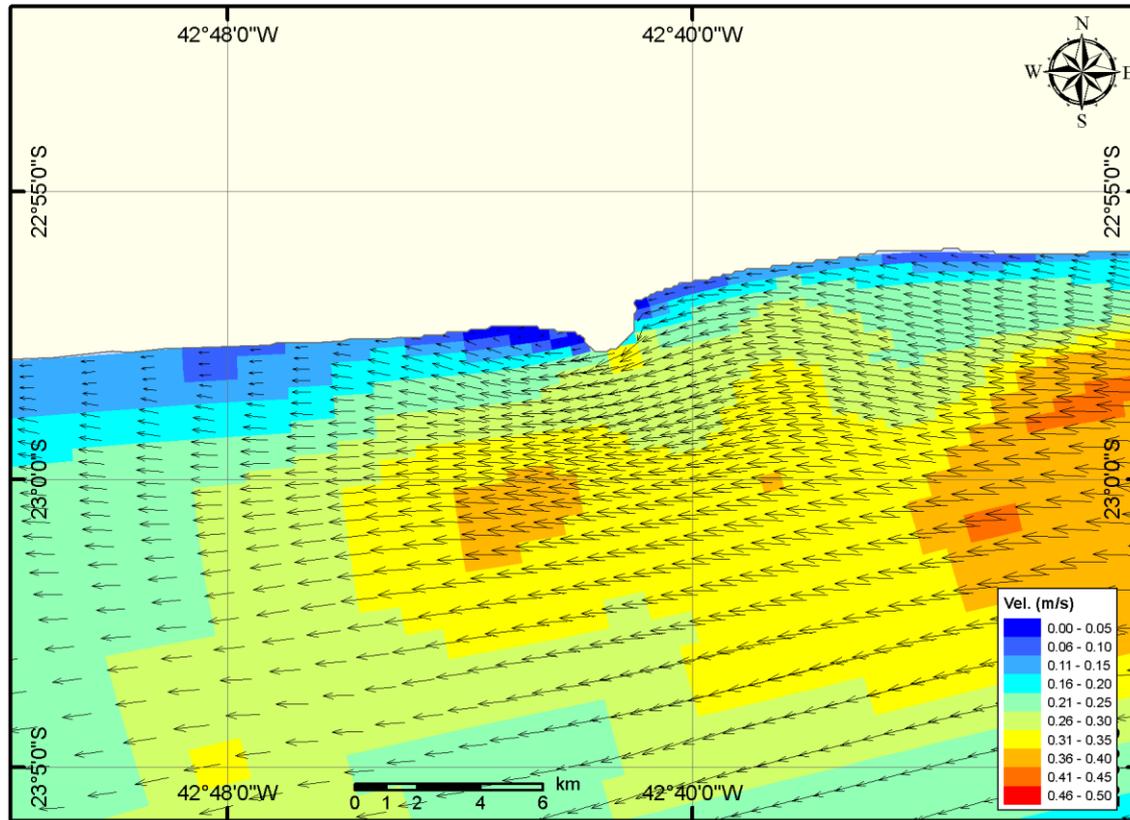


Figura IV-4 - Instantâneo do campo de correntes, na região de interesse, para um momento de correntes para oeste. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).

Adicionalmente, são apresentados instantâneos com os resultados das correntes na região da entrada da Baía de Guanabara durante a sizígia na vazante (Figura IV-5) e na enchente (Figura IV-6).

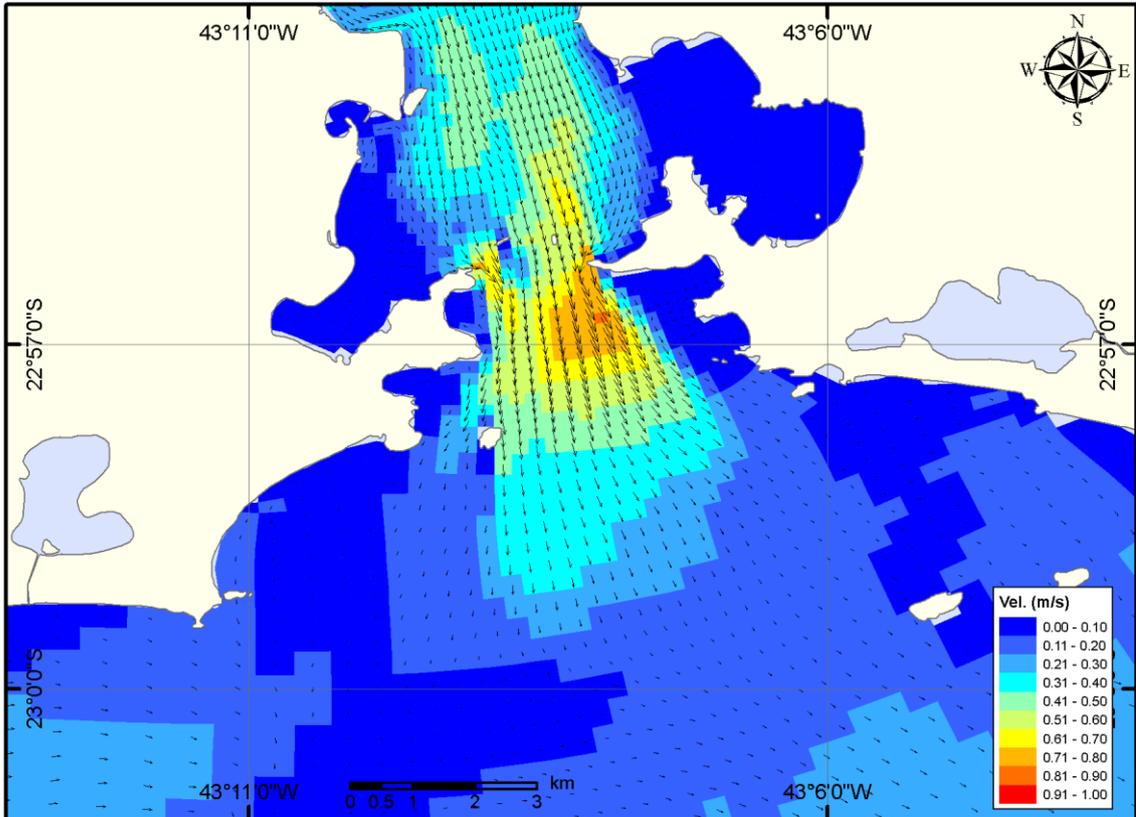


Figura IV-5 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de vazante na sizígia. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).

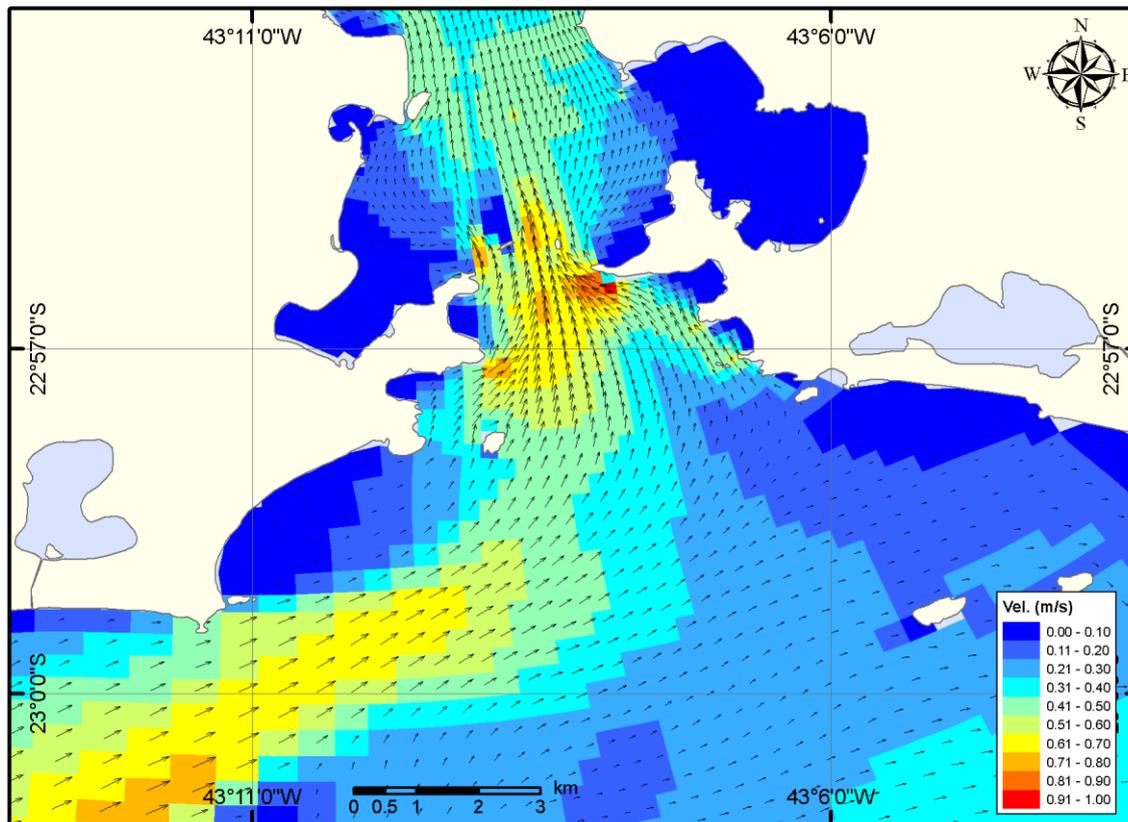


Figura IV-6 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de enchente na sizígia. A barra de cores lateral apresenta a intensidade das correntes (em m/s).

Por fim, deve-se considerar que os parâmetros utilizados e apresentados para quantificar a comparação entre as observações e os resultados da modelagem são de natureza estatística e, portanto, somente expressam o quanto duas séries temporais (ou números) se assemelham. Por outro lado, é importante também, considerar os principais aspectos físicos envolvidos. Na modelagem em questão, tanto a análise estatística dos resultados quanto a observação do campo de corrente e elevação modelados mostram que, a modelagem conseguiu reproduzir de forma satisfatória as principais características hidrodinâmicas da região de estudo em escalas espacial e temporal.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para dar suporte à Habtec Engenharia Ambiental nos estudos ambientais para construção do Gasoduto Rota 3, foi realizada a modelagem hidrodinâmica na região do litoral central do Estado do Rio de Janeiro.

O principal objetivo do presente trabalho foi realizar a modelagem com intuito de reproduzir a circulação na região, fornecendo, assim, um campo de correntes adequado para as simulações de derramamento de hidrocarbonetos.

Foi realizado um levantamento de informações pretéritas (meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas) nas imediações da região de estudo com intuito de obter de uma melhor compreensão da dinâmica da área e aplicação direta na modelagem hidrodinâmica.

Fazendo-se o uso do modelo hidrodinâmico Delft3D-FLOW foi possível reproduzir satisfatoriamente as principais características da circulação hidrodinâmica tanto nas regiões da Baía de Guanabara (influenciada pela oscilação de maré, predominantemente semidiurna, e fluxo bimodal orientado pelo canal), quanto na região costeira adjacente (predomínio de fluxo para o quadrante E, com algumas inversões para quadrante W).

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASSANI, C.; A.C.T. BONECKER, S.L.C. BONECKER, C.R. NOGUEIRA, J.M.L. DOS REIS & L.R. NASCIMENTO, 1999. Plâncton do Litoral Norte do Estado do Rio de Janeiro (21°00' a 23°30') – análise e síntese do conhecimento pp 99-120. In Silva, S.H.G., & Lavrado, H.P. (eds). Ecologia dos Ambientes Costeiros do Estado do Rio de Janeiro. Série Oecologia Brasiliensis, vol. VII. PPGE-UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

CARVALHO, J.L.B., 2003. Modelagem e Análise do Lançamento de Efluentes através de Emissários Submarinos. Tese de Doutorado, UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

CARVALHO DA SILVA, A.L.; M.A.M. SILVA & C.L. SANTOS, 2008. Comportamento morfológico e sedimentar da praia de Itaipuaçu (Maricá, RJ) nas últimas três décadas. **Revista Brasileira de Geociências** 38 (1): 87-97.

DELTARES, 2011. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 690pp.

KJERFVE, B; C. RIBEIRO, G. DIAS, A. FILIPPO & V. QUARESMA, 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía da Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. **Cont. Shelf. Res.**, 17(13): 1609-1643.

MANO, M. F., 2007. Assimilação de Dados em Modelo Oceanográfico da Bacia Sudoeste do Atlântico para Reproduzir e Prever Circulação Superficial e Feições de Meso-Escala. Tese de Doutorado em Eng.Civil, COPPE/UFRJ.

MUEHE D., C.F. LIMA & F.M. LINS-DE-BARROS, 2005. “Rio de Janeiro”. In: MUEHE D. (organizador) Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro. pp. 265-267. **Programa de Geologia e Geofísica Marinha**. UERJ.

OLIVEIRA, J. F. & E. BULHÕES, 2009. A Poluição por Efluentes Domésticos nas Praias Oceânicas da Cidade do Rio de Janeiro: a Participação das Ondas e dos Ventos no Comprometimento da Balneabilidade. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal de Viçosa.

SAAVEDRA, L., L.M.A. DORNELLES, S.B. SANTOS, R. ABSALÃO, S.M.C ANJOS, G.V. MELO, N.S.G. STANTON, E.M. FONSECA, L.M. LIMA, E.T. KÜSEL, E.O. RIBEIRO, A.A.A. LAZILLOTTA & F.A. ESTEVES, 1999. Caracterização oceanográfica da plataforma continental interna adjacente ao Cabo Frio-RJ, no inverno de 1995. pp. 245-271. In Silva, S.H.G. & Lavrado, H.P.(eds). Ecologia dos Ambientes Costeiros do Estado do Rio de Janeiro. **Série Oecologia Brasiliensis**, vol. VII. PPGE-UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

SCHUREMANN, P. 1941. Manual of harmonic analysis and prediction of tides. Washington, D.C., U.S. **Coast & Geodetic Surv.**, S.P. n. 98, 317p.

SILVA DIAS, P.L. & J.A. MARENGO, 1999. Águas atmosféricas. In: REBOUÇAS, A.C.R.; BRAGA, B.; TUNDIZI, J.G. Águas doces no Brasil. São Paulo. Ed. Escrituras, 1999. Cap.3, p.75-115.

SOUTO, R.D., 2005. Avaliação do Impacto Antropogênico na Zona Costeira do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://www.ivides.org/atlas/>, acessado em 12/01/2010.

WALSTRA. L.C., L.C. VAN RIJN, H. BLOGG & M. VAN ORMONDT, 2001. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. Report TR121 - EC MAST Project nº. MAS3- 0197-0086. HR Wallingford, UK.

WILLMOTT C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. **American Meteorological Society Bulletin**, 1309-1313.

VII. EQUIPE TÉCNICA

Equipe da Empresa Consultora Tetra Tech Consultoria Ltda.

Profissional	Ana Carolina R. Lammardo
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	1.689 (AOCEANO)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	325047
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	060.184.738.5 9 (CREA)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	1031373
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Marco Antonio Corrêa
Empresa	Tetra Tech 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	Mariana Lino Gouvêa
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5489811
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Capítulos I e II
Assinatura	_____

Profissional	Maurício Person Lammardo
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Registro no Conselho de Classe	1.065 (AOCEANO)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	272165
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Renan Braga Ribeiro
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Biólogo
Registro no Conselho de Classe	64.100/01-D (CRBio)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	4443147
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

APÊNDICE A DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D

O sistema de modelos Delft3D (DELTARES, 2011) é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, bem como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. Além disso, este sistema atualiza a cada passo de tempo as cotas batimétricas decorrentes de alterações geomorfológicas de fundo (erosão e deposição de sedimentos), além do transporte de sedimentos (de fundo e em suspensão na coluna d'água).

A seguir, são descritas as principais características do modelo, através de seu módulo hidrodinâmico.

A.1 - DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-FLOW

Para resolver o problema de hidrodinâmica em escala espacial e temporal adequada para as aplicações finais (determinação do campo de correntes e elevação de nível da superfície d'água) e, simultaneamente, manter os custos computacionais em níveis razoáveis, optou-se pela utilização do modelo Delft3D.

A possibilidade de se trabalhar com grades altamente ajustáveis aos contornos foi a característica determinante para a escolha deste modelo. A acomodação da grade numérica à linha de costa permite uma apurada representação do corpo d'água em estudo. Para a solução do problema dinâmico são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, além da utilização das aproximações hidrostáticas e de Boussinesq.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. A estrutura vertical, quando ativada na formulação, é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão horizontal.

A grade a ser implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos dinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

A.1.1 - Processos Físicos

A implementação do modelo hidrodinâmico foi baseada em um sistema de equações de águas rasas tridimensionais. O sistema de equações consiste nas equações horizontais da quantidade de movimento, na equação de continuidade e nas equações de transporte para constituintes conservativos. Tal conjunto de equações é derivado das equações tridimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A seguir, são descritas as considerações e aproximações do modelo:

- É adotado o sistema de coordenadas sigma (σ) no eixo vertical. A profundidade é assumida como sendo muito menor do que a escala horizontal. Então, devido à reduzida razão de aspecto, as aproximações para o sistema de águas rasas tornam-se válidas e, por conseguinte, a equação vertical do movimento reduz-se à equação hidrostática;
- O efeito da densidade é considerado somente através de seu efeito na pressão (aproximação de Boussinesq);
- Utiliza-se o sistema de coordenadas cartesianas, não considerando o efeito da curvatura da Terra. Além disso, o parâmetro de Coriolis é assumido como uniforme;
- Assume-se uma condição de deslizamento no fundo (*slip boundary condition*) e é aplicada uma formulação de segunda ordem (quadrática) ao cisalhamento no fundo;
- A formulação para a tensão de cisalhamento no fundo devido à ação conjunta das ondas e correntes é baseada num campo de fluxo 2D, gerado a partir da velocidade próxima ao fundo, utilizando uma aproximação logarítmica;

- As equações do Delft3D-FLOW são capazes de resolver as escalas turbulentas (*large eddy simulation*). No entanto, as grades são geralmente muito grosseiras para resolver estas flutuações. Desta forma, as equações utilizadas são baseadas nas tensões de Reynolds;
- No Delft3D-FLOW os vórtices turbulentos são definidos pela profundidade da água. Sua contribuição à troca vertical da quantidade de movimento horizontal e da massa é modelada através de um coeficiente de viscosidade vertical turbulenta e difusividade turbulenta. Assume-se que os coeficientes são proporcionais à escala de velocidade e comprimento. Os coeficientes devem ser especificados (valor constante) ou computados por modelos algébricos, de turbulência k-L ou k- ϵ , onde k representa a energia cinética turbulenta, L é o máximo comprimento e ϵ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;
- Em concordância com a razão de aspecto para consideração da formulação de águas rasas, a geração de turbulência é baseada no gradiente vertical do fluxo horizontal;
- A velocidade em um ponto de grade assume magnitude zero quando a altura da coluna d'água atinge cotas inferiores à metade daquela definida pelo usuário⁷. A velocidade pode retornar a magnitudes diferentes de zero quando a altura da coluna d'água atingir valores acima da metade do valor de corte;
- Uma célula é considerada "seca" quando os quatro pontos de velocidade nas extremidades da célula secarem, ou quando a profundidade da água no centro da célula for menor que zero (volume negativo);
- O fluxo de massa através dos contornos laterais e de fundo é nulo;
- Quando não é especificado o campo de temperaturas, a troca de calor com a atmosfera é anulada. A troca de calor através do fundo é nula.

⁷ Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

- Se a troca de calor com a superfície da água é computada, utilizando um modelo de temperatura, o coeficiente de troca é função da temperatura e da velocidade do vento e, é determinado de acordo com Sweers (1976). Assume-se que a temperatura do ambiente é constante no espaço e pode variar no tempo. Em outras formulações de troca de calor, os fluxos devido à radiação solar, atmosférica e radiação de fundo, convecção e perdas de calor devido à evaporação são modelados separadamente;
- O efeito da precipitação na temperatura da água é representado.

No próximo subitem, são apresentadas as equações básicas que governam o modelo implementado.

A.1.2 - Equações Básicas

O modelo adotado resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e de Boussinesq. A aceleração vertical é desprezada na equação da quantidade de movimento vertical, resultando na aproximação hidrostática. Desse modo, a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

O Sistema de Coordenadas Sigma (σ)

O sistema de coordenadas sigma (σ) foi introduzido em modelos atmosféricos (PHILLIPS, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos σ , não exatamente horizontais, que acompanham as variações da batimetria e do nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma feição suavizada para a batimetria (Figura A-1).

O número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada σ é usualmente não uniforme. Esta propriedade permite maior resolução nas áreas de interesse, como em regiões superficiais (importante para fluxos devido ao vento e trocas de calor com a atmosfera) e áreas próximas ao fundo (para cálculos de transporte de sedimentos).

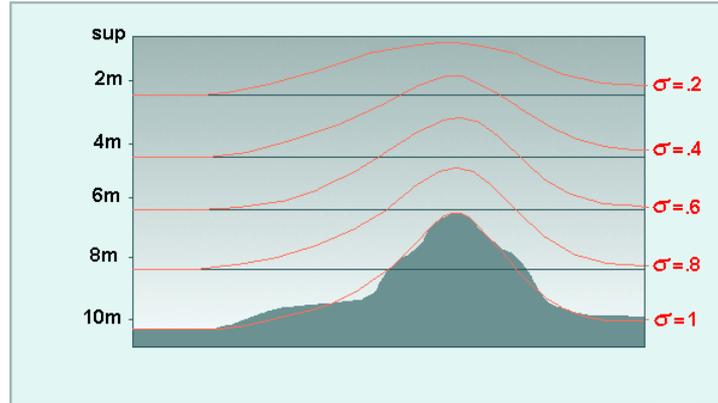


Figura A-1 - Exemplo de uma aplicação de coordenadas σ .

O sistema de coordenadas σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad \text{A.1.2-1}$$

onde:

- z a coordenada vertical no espaço físico;
- ζ a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ($z = 0$);
- d profundidade abaixo do plano de referência;
- H profundidade local total ($H = d + \zeta$).

No sistema de coordenadas σ , a coordenada vertical no fundo é definida como $\sigma = -1$, e na superfície como $\sigma = 0$ (Figura A-1). As derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas são expressas em coordenadas σ após modificações (“regra da cadeia”) e termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994).

O domínio de modelagem tridimensional para o fluxo consiste em um plano horizontal de uma área restrita (limitada) composta de contornos abertos e fechados (terra) e vertical (número de camadas). No sistema de coordenadas σ o número de camadas é constante em todos os locais do plano horizontal. Para cada camada vertical, um sistema de equações conservativas é resolvido.

Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad \text{A.1.2-2}$$

onde:

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$ coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

ξ, η coordenadas no sistema cartesiano;

U, V velocidades médias (na vertical) nas direções ξ, η

Q representa as contribuições por unidade de área devido à fonte ou sumidouro de água, precipitação e evaporação:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad \text{A.1.2-3}$$

onde:

q_{in} fonte de água por unidade de volume;

q_{out} sumidouro de água por unidade de volume;

P precipitação;

E evaporação.

A tomada d'água de uma usina, por exemplo, deve ser modelada como um sumidouro. Na superfície pode haver uma fonte devido à precipitação ou um sumidouro devido à evaporação.

Equações da Quantidade de Movimento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de movimento, nas direções ξ e η , são dadas por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \quad \text{A.1.2-4}$$

e,

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \quad \text{A.1.2-5}$$

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas (P_{ξ} e P_{η}). As forças F_{ξ} e F_{η} , nas equações acima, representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds, enquanto M_{ξ} e M_{η} representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros).

Velocidades Verticais

A velocidade vertical (ω) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas σ :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad \text{A.1.2-6}$$

Na superfície o efeito da precipitação e evaporação é levado em conta. A velocidade vertical ω é definida nas superfícies σ . A velocidade vertical (ω) é referente ao movimento em σ , e pode ser interpretada como a velocidade associada aos movimentos de subida e descida. As velocidades verticais w (em sua “concepção física”), no sistema de coordenadas cartesianas, não são

consideradas nas equações do modelo e são computadas apenas para fins de pós-processamento. Estas velocidades podem ser expressas em função das velocidades horizontais (\mathbf{u} e \mathbf{v}), profundidade da coluna d'água (H), elevação do nível d'água (ζ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad \text{A.1.2-7}$$

Pressão hidrostática

Ao se adotar a aproximação das equações de águas rasas para o sistema em estudo, a equação vertical para a quantidade de movimento é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de flutuabilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad \text{A.1.2-8}$$

Após a integração da equação acima, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad \text{A.1.2-9}$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad \text{A.1.2-10}$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad \text{A.1.2-11}$$

Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis (f) depende da latitude geográfica (ϕ) e da velocidade angular de rotação da Terra (Ω). Portanto,

$$f = 2\Omega \sin\phi \quad \text{A.1.2-12}$$

Tensões de Reynolds

As forças F_ξ e F_η nas equações da quantidade de movimento representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta, e pode ser observada em maiores detalhes em Rodi (1984). Dento deste conceito, as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação.

Considerando águas rasas, o tensor de Reynolds é anisotrópico. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta (ν_H) é muito maior de que sua contra parte vertical (ν_V). O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes:

1. uma parte devido a “turbulência de escala subgrade”;
2. uma parte devido a “turbulência tridimensional (3D)”;
3. uma parte devido a dispersão, para simulações representando médias na coluna d’água.

Em simulações onde as equações de quantidade de movimento e transporte são médias na coluna d’água, a distribuição da quantidade de movimento e material devido à variação vertical da velocidade horizontal, é denominada dispersão. Como o perfil vertical da velocidade horizontal não é resolvido nas simulações 2D, a dispersão não é simulada. O efeito dispersivo pode ser modelado como o produto do coeficiente de viscosidade e o gradiente de velocidade. O termo dispersivo pode ser estimado pela formulação de Elder.

Se o perfil vertical da velocidade horizontal não se aproximar de um perfil logarítmico (devido à estratificação ou a forçante do vento), recomenda-se utilizar um modelo 3D para o transporte de materiais.

A viscosidade turbulenta na horizontal é principalmente associada à contribuição dos movimentos turbulentos na horizontal e forçantes não resolvíveis na malha horizontal (“turbulência de escala subgrade”) ou por equações de águas rasas com médias de Reynolds. É introduzida a viscosidade turbulenta na horizontal na escala de subgrade (v_{SGS}) e a viscosidade turbulenta na horizontal (v_H^{amb}). O Delft3D-FLOW simula os movimentos turbulentos na horizontal (em larga escala) através da metodologia denominada Horizontal Large Eddy Simulation (HLES). O v_{SGS} será computado por um modelo de turbulência.

A viscosidade horizontal do meio, definida pelo usuário é representada pela v_H^{amb} . Consequentemente, no Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade turbulento na horizontal é definido por:

$$v_H = v_{SGS} + v_V + v_H^{amb} \quad \text{A.1.2-13}$$

A parte v_V se refere à turbulência tridimensional e, nas simulações 3D, é computada a partir de um modelo de fechamento turbulento 3D.

Para modelos de fechamento turbulento que respondem apenas ao cisalhamento gerado, é conveniente especificar um coeficiente de mistura vertical de forma a contabilizar outras formas de mistura não resolvíveis, (v_V^{amb}). Por isso, além de todos os modelos de fechamento turbulento, no Delft3D-FLOW deve-se especificar uma constante (no espaço e no tempo) que represente o coeficiente de mistura do ambiente (valor referente à viscosidade turbulenta na vertical das equações de quantidade de movimento). Consequentemente, o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical é definido por:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb}) \quad \text{A.1.2-14}$$

Onde:

ν_{mol} é a viscosidade cinemática da água.

A parte ν_{3D} é computada através de um modelo de fechamento turbulento.

A fim de modelar o fluxo secundário em simulações 2D em curvas de rios, o Delft3D-FLOW contém uma formulação para levar em conta o efeito do movimento espiral. Assim, a tensão de cisalhamento na horizontal é estendida considerando um termo adicional.

O sistema de coordenadas σ rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica na adição de termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (BLUMBERG & MELLOR, 1985). Então, as forças F_ξ e F_η são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad \text{A.1.2-15}$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad \text{A.1.2-16}$$

Para fluxos em pequena escala, quando o cisalhamento nos contornos fechados precisar ser levado em conta, os tensores de cisalhamento $\tau_{\xi\xi}$, $\tau_{\xi\eta}$, $\tau_{\eta\xi}$, $\tau_{\eta\eta}$ são determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad \text{A.1.2-17}$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{G_{\eta\eta}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad \text{A.1.2-18}$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \quad \text{A.1.2-19}$$

Para simular fluxos em larga escala, com grades horizontais grosseiras, quando o cisalhamento nos contornos fechados puder ser negligenciado, as forças F_ξ e F_η são simplificadas. Os termos de viscosidade horizontal, no Delft-FLOW, são então reduzidos para o operador de Laplace ao longo das linhas da grade:

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad \text{A.1.2-20}$$

$$F_\eta = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad \text{A.1.2-21}$$

Onde se assume que a viscosidade turbulenta é constante.

Equação de Estado

A densidade da água (ρ) é uma função da salinidade (s) e da temperatura (t). O modelo Delft3D utiliza uma relação empírica (ECKART, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o} \quad \text{A.1.2-22}$$

onde:

$$\lambda = 1779,5 + 11,25t - 0,0745t^2 - (3,80 + 0,01 t) s$$

$$\alpha_o = 0,6980$$

$$P_o = 5890 + 38 t - 0,375t^2 + 3 s$$

com a salinidade (s) em ‰ e a temperatura da água (t) em °C.

A.2 BIBLIOGRAFIA

BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L., 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. **Monthly Weather Review**, Vol. 113(8).

DELTARES, 2011. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 690pp.

ECKART, C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. **American Journal of Science**, Vol. 256, 225-240.

PHILLIPS, N.A., 1957. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting, **J. of Meteorology**, Vol. 14.

RODI, 1984. Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'état de connaissance. IAHR Paper presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics, The Netherlands.

STELLING, G.S. & VAN KESTER, J.A.TH.M., 1994. On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, **Int. J. Num. Meth. Fluids**, Vol. 18, 915-955.

SWEERS, 1976. A nomogram to estimate the heat exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. **Journal of Hydrology**, Vol. 30.