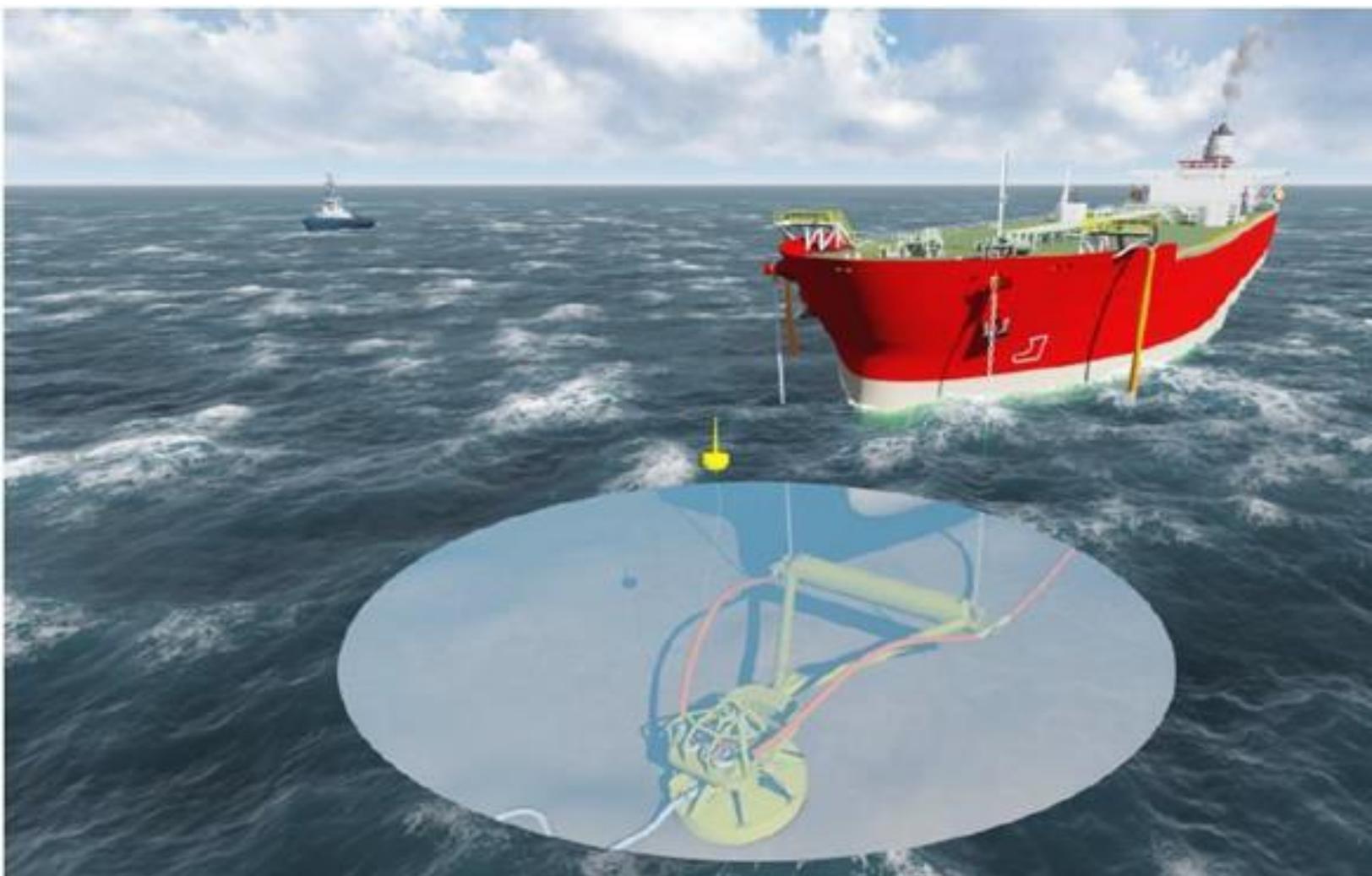


Agrupamento de Informações no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) das Instalações *Offshore* de Gás Natural, Adutora, Emissário Submarino e Estação de Bombeamento

Volume 9



Modelagem Numérica dos Efluentes do FSRU, Estado de Sergipe

Revisão 00

Agosto/2017



TETRA TECH

complex world

CLEAR SOLUTIONS™





TETRA TECH
Rua Fidalga, 711
Vila Madalena - São Paulo - SP
CEP 05432-070
<http://www.tetrattech.com>



CELSE - Centrais Elétricas de Sergipe S.A.
Av. Eng. Antônio de Góes, 60, Salas 801/805
Recife - PE
CEP 51010-000

Modelagem Numérica dos Efluentes do, Estado de Sergipe

Equipe Técnica TETRA TECH:

ANA CAROLINA LAMMARDO
BRUNO SCHERR MARTINS
EDUARDO A. YASSUDA
GABRIEL CLAUZET
MAURICIO P. LAMMARDO
TITO CONTE

Oceanógrafa
Oceanógrafo
Engenheiro Mecânico
Físico
Oceanógrafo
Oceanógrafo

Revisão 00
Agosto / 2017

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, 2017. Modelagem Numérica dos Efluentes do FSRU, Estado de Sergipe. Relatório Técnico, Revisão 00 (07 de agosto de 2017). 44pp+Anexos.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. CARACTERÍSTICAS DO LANÇAMENTO E DO EFLUENTE	13
3. MODELAGEM DO LANÇAMENTO DO EFLUENTE TÉRMICO	15
3.1. MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO	16
3.1.1. Características Ambientais	17
3.1.2. Características do Lançamento	18
3.1.3. Características do Efluente	19
3.1.4. Descrição das Simulações de Campo Próximo	19
3.1.5. Resultados da Diluição no Campo Próximo	20
3.1.6. Discussão sobre os Resultados da Modelagem no Campo Próximo	27
3.2. MODELAGEM DA DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO	28
3.2.1. Descrição das Simulações de Campo Afastado	28
3.2.2. Resultados das Simulações de Campo Afastado	31
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5. BIBLIOGRAFIA	43
ANEXO A - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CORMIX	A-1
ANEXO B - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELF3D	B-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do ponto de ancoragem do FSRU e raios de descarte das plumas térmicas, Estado do Sergipe.....	12
Figura 2 - Escalas (espacial e temporal) envolvidas nos domínios de campo próximo e afastado e nas quais as zonas de mistura são mais comumente alcançadas (adaptado de JIRKA et al., 1976 e BLENINGER & JIRKA, 2010).	16
Figura 3 - Diluição em relação à distância do ponto de lançamento do efluente da pluma fria a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.....	22
Figura 4 - Trajetória vertical (distância e profundidade) do lançamento do efluente da pluma fria a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.....	23
Figura 5 - Trajetória horizontal (vista em planta) da pluma no campo próximo do lançamento do efluente da pluma fria a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.....	24
Figura 6 - Diluição em relação à distância do ponto de lançamento do efluente da pluma quente a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.....	25
Figura 7 - Trajetória vertical (distância e profundidade) do lançamento do efluente da pluma quente a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.....	26
Figura 8 - Trajetória horizontal (vista em planta) da pluma no campo próximo do lançamento do efluente da pluma quente a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.....	27
Figura 9 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de verão.	32
Figura 10 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de inverno.	33
Figura 11 - Delta de temperatura calculado para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de verão.	34
Figura 12 - Delta de temperatura calculado calculadas para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de inverno.....	35
Figura 13 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de verão.....	37
Figura 14 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de inverno.....	38
Figura 15 - Delta de temperatura calculado para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de verão.	39
Figura 16 - Delta de temperatura calculado calculadas para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de inverno.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na modelagem das plumas de lançamento dos efluentes térmicos.....	14
Tabela 2 - Características dos efluentes térmicos.....	14
Tabela 3 - Valores de temperatura e salinidade medidos pela CH2M na região do gasoduto e emissário em 16/05/2017.....	17
Tabela 4 - Parâmetros de entrada utilizados nas simulações.....	20
Tabela 5 - Resultados das simulações de campo próximo dos efluentes.....	21

RESUMO

Para dar suporte à Centrais Elétricas de Sergipe S.A. (CELSE) na elaboração de estudos relacionados ao lançamento de efluentes provenientes do processo de regaseificação de GNL no FSRU e do processo de resfriamento dos geradores da Praça de Máquinas, a TETRA TECH apresenta este estudo de modelagem de descarte de efluentes térmicos a partir do FSRU.

Os padrões de circulação característicos da região foram estimados a partir do sistema de modelos numéricos Delft3D, desenvolvido pela Deltares (2013) e implementado pela TETRA TECH.

No estudo do comportamento das plumas, o processo foi dividido entre campo próximo (zona de diluição inicial, onde prevalecem os efeitos oriundos da velocidade inicial de ejeção e a diferença de densidade entre o efluente e o meio) e campo afastado (região onde passam a predominar os efeitos da dinâmica local no transporte e diluição da pluma). O campo próximo foi simulado utilizando-se o modelo CORMIX, desenvolvido na *Cornell University*. Para simular a diluição da pluma no campo afastado foi utilizado o modelo Delft3D da Deltares.

Os resultados das simulações mostraram que as maiores diluições são verificadas para o efluente da pluma quente (para ambos os períodos considerados), bem como as maiores distâncias a partir do FSRU. Apesar disto, a zona de mistura da legislação (diferença de 3 °C entre o efluente e o corpo receptor) é atingida em distâncias de cerca de 1 m, para a pluma quente, enquanto para a pluma fria a diferença de temperatura ocorre em distâncias inferiores a 30 m do ponto de lançamento.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentada a modelagem numérica computacional da diluição e dispersão do efluente térmico proveniente da regaseificação em ciclo aberto bem como do funcionamento dos motores do FSRU, localizado no litoral do Estado de Sergipe.

As simulações da diluição e dispersão das plumas foram realizadas através da separação do estudo em dois domínios conhecidos por campo próximo e campo afastado. O campo próximo foi simulado com o modelo CORMIX, da *Cornell University*, desenvolvido para a análise, previsão e planejamento do lançamento de efluentes em diferentes corpos d'água. Na modelagem do campo afastado, foi utilizado o sistema de modelos Delft3D, desenvolvido pela Deltares (2013) e implementado pela TETRA TECH. A Figura 1 apresenta a localização do ponto de ancoragem do FSRU e os raios de descarte a partir deste ponto para os quais foram realizadas as simulações numéricas das plumas térmicas.

Para estudos de modelagem da diluição e dispersão de efluentes em corpos d'água são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características locais; (b) padrões de circulação regional e local; (c) características físico-químicas do efluente simulado; e (d) características do lançamento. A caracterização da região em relação aos padrões de circulação foi realizada através de análise de dados e dos resultados do modelo Delft3D, implementado pela TETRA TECH na região de estudo para representar o domínio local, em conjunto com resultados do modelo global HYCOM - *HYbrid Coordinate Ocean Model* (domínio regional). O campo de ventos utilizado na modelagem foi determinado a partir de dados de reanálise do CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis* (SAHA *et al.*, 2010) composto com ventos locais observados na estação METAR¹ de Aracaju (estação SBAR).

Na sequência, o Capítulo 2 apresenta as características do lançamento e do efluente térmico descartado. O Capítulo 3 descreve a modelagem do lançamento do efluente térmico e seus respectivos resultados. Por fim, o Capítulo 4 apresenta as considerações finais deste estudo. Uma descrição mais detalhada do sistema de modelos CORMIX é apresentada no Anexo A.

¹ REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica, www.redemet.aer.mil.br).

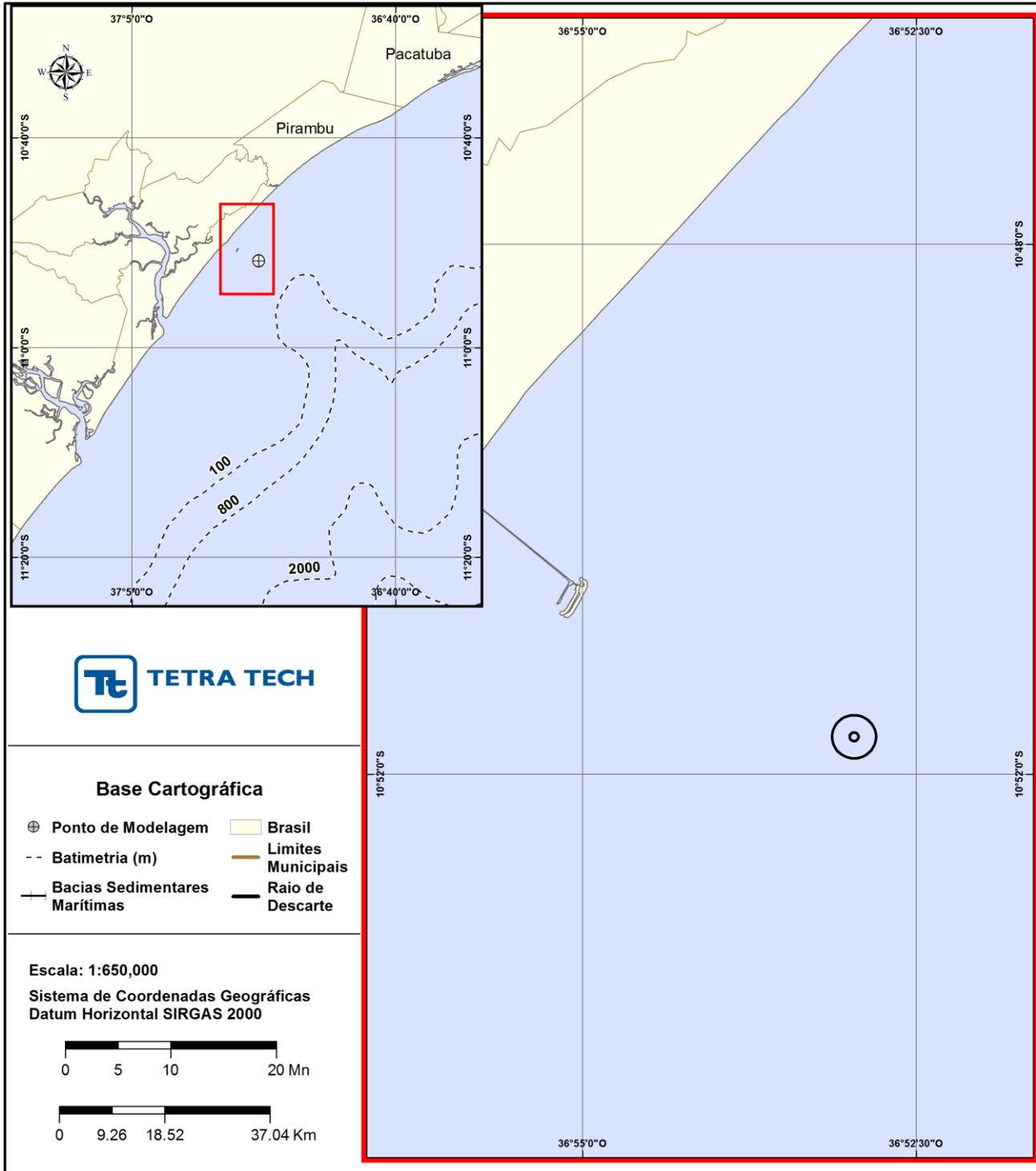


Figura 1 - Localização do ponto de ancoragem do FSRU e raios de descarte das plumas térmicas, Estado do Sergipe.

2. CARACTERÍSTICAS DO LANÇAMENTO E DO EFLUENTE

Neste relatório técnico são apresentadas simulações numéricas para o lançamento de efluentes térmicos resultantes do processo de regaseificação de GNL no FSRU (denominado de efluente de pluma fria), bem como do processo de resfriamento dos geradores da Praça de Máquinas (efluente de pluma quente).

O processo de regaseificação de GNL em ciclo aberto no FSRU consiste na pressurização do GNL com bombas de alta pressão e da utilização de um trocador de calor do tipo casco-tubo para vaporizar o GNL com água do mar. O projeto do trocador de calor é desenvolvido para retornar à água do mar com uma temperatura de até 7 °C inferior à temperatura ambiente, com uma vazão máxima de 12.000,0 m³/h. A água do mar também é utilizada para o resfriamento dos geradores da Praça de Máquina, que retorna ao ambiente com vazão máxima de 2.700,0 m³/h e temperatura elevada em até 9 °C em relação à temperatura de admissão.

Dessa forma, foram considerados dois cenários de lançamento de efluentes, um referente à pluma fria, e outro à pluma quente. Na Tabela 1 são apresentadas as características do lançamento dos efluentes térmicos. Na Tabela 2 são apresentadas as características dos efluentes adotadas no estudo.

Os lançamentos a partir do FSRU são realizados a 12 m abaixo da linha d'água, medida do calado máximo da unidade, por uma tubulação com orientação vertical para baixo perpendicular à curvatura do casco. Considerou-se uma tubulação com orifício de 1,1 m de diâmetro para o lançamento do efluente dos trens de regaseificação em operação no FSRU e de 0,65 m para o resfriamento da Praça de Máquinas.

Os pontos de descarte das plumas foram definidos com base na Planta de Localização (DE-232-01-001_C) e no documento FSRU Nanook – Mais Discharges (Emission Summary – Golar Nanook). Para o efluente quente, considerou-se o ponto de descarte posicionado a um raio de 322 m em relação à coordenada central de localização, apresentada na Tabela 1. O descarte da pluma fria foi realizado à uma distância de 60 m deste mesmo ponto central.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na modelagem das plumas de lançamento dos efluentes térmicos.

TIPO DO EFLUENTE	PLUMA FRIA	PLUMA QUENTE
PONTO DE LANÇAMENTO	10°51'43"S e 36°52'58"W	10°51'43"S e 36°52'58"W
DIÂMETRO TUBULAÇÃO	1,1 m	0,65 m
ORIENTAÇÃO TUBULAÇÃO	Vertical	Vertical
LÂMINA D'ÁGUA	~ 20 m	~ 20 m
PROFUNDIDADE / ALTURA DE DESCARTE	12 m de profundidade	12 m de profundidade
VAZÃO DO EFLUENTE	12.000,0 m ³ /h	2.700,0 m ³ /h

Tabela 2 - Características dos efluentes térmicos.

PARÂMETROS PARA MODELAGEM DO EFLUENTE		
	PLUMA FRIA	PLUMA QUENTE
Delta de Temperatura do efluente	- 7,0 °C	9 °C
Temperatura do efluente	21 °C	37 °C
Densidade do efluente	1.025,94 kg/m ³	1.020,58 kg/m ³

3. MODELAGEM DO LANÇAMENTO DO EFLUENTE TÉRMICO

A modelagem do transporte de plumas de efluentes compreende a modelagem de dois domínios conhecidos como campo próximo e campo afastado. O campo próximo corresponde à zona de diluição inicial onde prevalecem os efeitos oriundos da fonte ativa (sistema de disposição, composto por um ou vários orifícios, por exemplo), caracterizados pela velocidade inicial de ejeção (quantidade de movimento inicial do jato) e a diferença de densidade entre o efluente e o meio (empuxo inicial do jato). Esta zona possui uma escala espacial com ordens de grandeza de metros a dezenas de metros, e escala temporal da ordem de segundos a centenas de segundos.

O campo afastado compreende a região onde passam a predominar os efeitos da dinâmica passiva na diluição da pluma, *i.e.* não influenciada pela fonte ativa, mas apenas por fatores ambientais. À medida que o efluente se afasta do ponto de descarte, os efeitos associados à velocidade inicial de ejeção diminuem, passando a predominar os efeitos associados à velocidade do ambiente. A região onde ocorre a transição entre estes dois efeitos define os limites entre estes domínios. A escala espacial do campo afastado possui ordens de grandeza de centenas de metros a quilômetros, e escala temporal da ordem de horas a dias.

As escalas (espacial e temporal) envolvidas em ambos os domínios de modelagem de campo próximo e campo afastado apresentam uma variação muito grande. Em estudos de diluição e dispersão de efluentes, as zonas de mistura consideradas podem ser atingidas tanto dentro do domínio do campo próximo quanto do domínio do campo afastado (Figura 2).

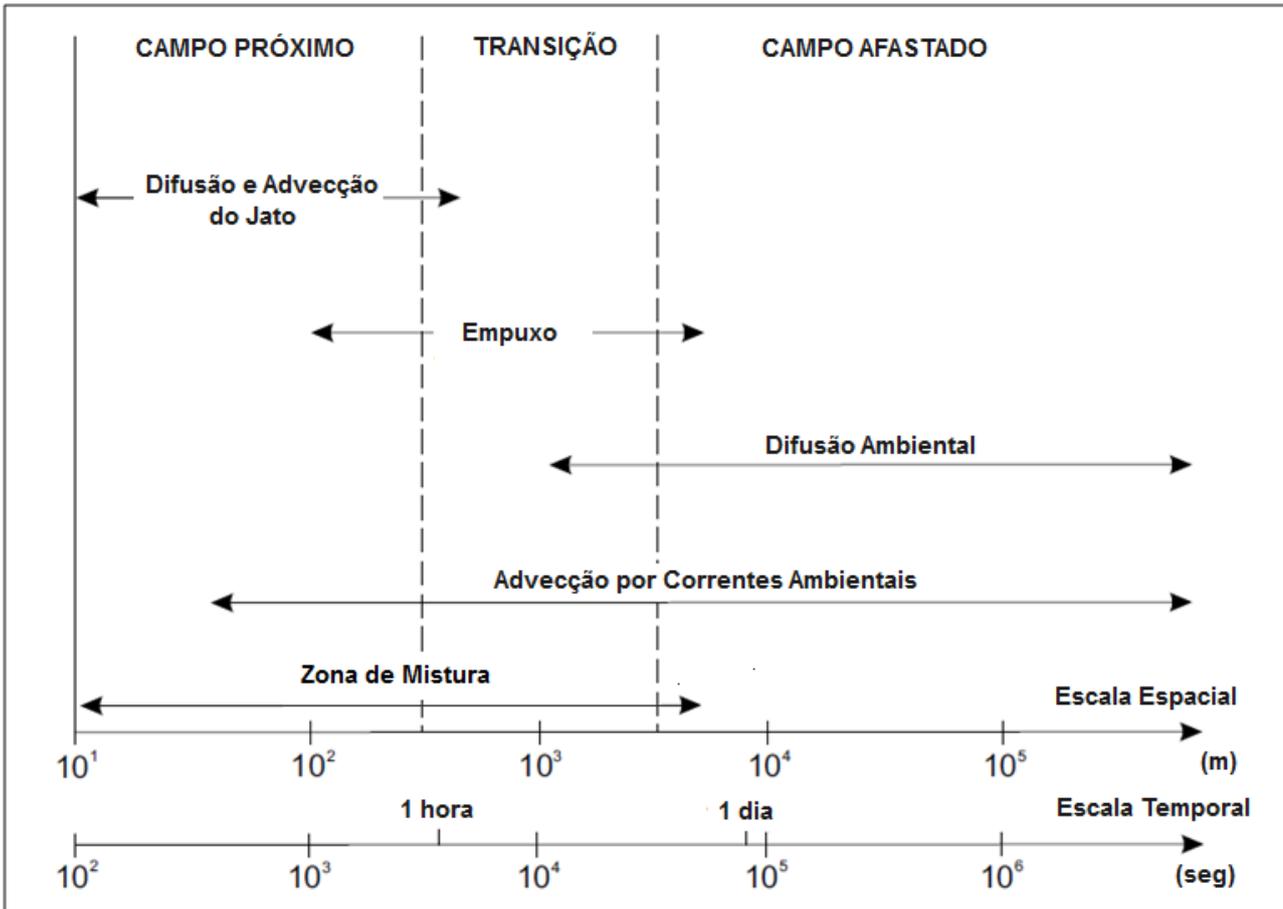


Figura 2 - Escalas (espacial e temporal) envolvidas nos domínios de campo próximo e afastado e nas quais as zonas de mistura são mais comumente alcançadas (adaptado de JIRKA et al., 1976 e BLENINGER & JIRKA, 2010).

3.1. MODELAGEM DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO

O modelo CORMIX² foi utilizado para simular o campo próximo do lançamento dos efluentes térmicos do FSRU. Este modelo (Anexo A), desenvolvido na *Cornell University* sob contrato e aprovação da EPA³ dos EUA, é pautado em diversas observações empíricas obtidas em laboratório e tem seu desempenho validado com observações de campo, através de uma grande quantidade de estudos sobre zonas de mistura realizados por terceiros⁴.

²Cornell Mixing Zone Expert System (www.cormix.info).

³Environmental Protection Agency.

⁴Independent CORMIX Validation Studies. Disponível em: <<http://www.cormix.info/validations.php>>.

Para sua correta implementação são necessárias:

- As características ambientais, as quais descrevem as condições hidrodinâmicas esperadas para o local. Estas podem ser obtidas a partir de dados históricos ou a partir de resultados de modelagem;
- As características do lançamento, descrevendo a geometria do sistema através do qual é realizado o lançamento;
- As características do efluente, os quais descrevem os parâmetros como a vazão e a densidade do efluente descartado.

3.1.1. Características Ambientais

Para modelagem no campo próximo são utilizados dados ambientais como: densidade, vento e correntes ambiente. Estes dados são analisados com o objetivo de caracterizar a região de lançamento do efluente nos diferentes períodos sazonais e fornecer os valores de entrada no modelo que caracterizam cada cenário.

As informações relativas aos dados de temperatura e salinidade ambiente são provenientes do Estudo de Impacto Ambiental – EIA das Instalações *offshore* de gás natural, adutora, emissário submarino e estação de bombeamento (CH2M, 2017). Estes dados podem ser visualizados na Tabela 3, a seguir. Adicionalmente, considerou-se águas homogêneas para os dois parâmetros, com base em Parente (2016).

Tabela 3 - Valores de temperatura e salinidade medidos pela CH2M na região do gasoduto e emissário em 16/05/2017.

PONTO	PROFUNDIDADE (m)	TEMPERATURA (°C)	SALINIDADE
Pt1	16,25	27,9	33,4
	10,83	27,9	33,2
	5,41	28,1	32,7
	0,44	28,4	32,7
Tp2	3,83	28,6	32,5
	1,91	28,7	33,4
	0,44	28,7	32,8

Fonte: CH2M (2017).

Com relação às correntes, as informações utilizadas foram obtidas através da modelagem hidrodinâmica implementada pela TETRA TECH para a realização das simulações numéricas para a dispersão do efluente térmico gerado na UTE (TETRA TECH, 2017).

Considerando a simplificação assumida pelo CORMIX (*i.e.*, intensidade e direção de correntes constante) e a complexidade e importância do regime de fluxo neste domínio, optou-se por uma abordagem mais conservativa na determinação do fator de diluição do campo próximo. Especificamente, utilizou-se um valor constante de intensidade de corrente, correspondente ao percentil de 10% dos valores observados no modelo hidrodinâmico utilizado.

Ou seja, 90% dos valores de intensidade da corrente observados no modelo hidrodinâmico são superiores (mais intensos) do que o valor utilizado nas simulações de campo próximo. Este valor foi utilizado com base nas exigências para avaliação de plumas de efluentes da EPA (TEETER & BAUMGARTNER, 1978; TETRA TECH, 1982; EPA, 1991; BRANDSMA, 2004; CHIN, 2013), de forma a fornecer a mínima diluição inicial, uma vez que a diluição do efluente tende a ser maior com o aumento da intensidade da corrente ambiente, que propicia um maior entranhamento do efluente na coluna d'água.

3.1.2. Características do Lançamento

As características do lançamento dos efluentes foram apresentadas em detalhes no Capítulo 2. Foi considerado que estes serão realizados em um local com lâmina d'água de, aproximadamente, 20 m de profundidade. Os lançamentos a partir do FSRU são realizados a 12 m abaixo da linha d'água, medida do calado máximo da unidade, por uma tubulação com orientação vertical para baixo perpendicular à curvatura do casco.

No estudo da diluição e dispersão do efluente do processo de regaseificação de GNL em ciclo aberto no FSRU considerou-se a vazão máxima de lançamento de 12.000,0 m³/h (*i.e.* 3,33 m³/s). Para o efluente do resfriamento dos geradores da Praça de Máquina considerou-se a vazão máxima de 2.700,0 m³/h (*i.e.* 0,75 m³/s).

3.1.3. Características do Efluente

As características do efluente térmico também foram descritas no Capítulo 2. Nestas simulações considerou-se um composto conservativo para a representação dos efluentes, uma vez que este sofre apenas os processos físicos da diluição, sem os efeitos dos processos bioquímicos.

Considerou-se para o efluente, as referidas diferenças de temperatura fornecidas pela CELSE (*i.e.*, de -7 °C e +9 °C em relação à temperatura ambiente), nos períodos de verão e inverno. As temperaturas dos efluentes considerados neste estudo variaram em função da diferença da temperatura ambiente, apresentadas na Tabela 3, para a determinada estação do ano simulada.

3.1.4. Descrição das Simulações de Campo Próximo

As simulações para a determinação da diluição e dispersão dos efluentes térmicos consideraram os períodos sazonais de verão e inverno. Na Tabela 4 são apresentados os dados de entrada adotados nas simulações com o modelo CORMIX.

De acordo com as informações fornecidas, a tubulação de lançamento dos efluentes térmicos, que são descartados pela tubulação, será posicionada com orientação vertical para baixo e perpendicular à curvatura do casco. Esta informação é adicionada ao CORMIX na forma do ângulo vertical de lançamento (Theta) igual a -90,0°, em conjunto com o ângulo horizontal de lançamento (Sigma), que é medido no sentido anti-horário, em relação à direção preferencial da corrente ambiente.

Tabela 4 - Parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

PARÂMETROS		DADOS DE ENTRADA	
		VERÃO	INVERNO
Ambiente	Profundidade média (m)	20	
	Profundidade no ponto de descarte (m)	20	
	Velocidade ambiente (m/s)	0,07	0,06
	Coefficiente de <i>Manning</i>	0,03	
	Velocidade do vento (m/s)	4,5	4,6
	Densidade ambiente (kg/m ³)	1.023,82	
Efluente	Vazão do efluente (m ³ /s)	Pluma fria	3,33
		Pluma quente	0,75
	Densidade do efluente " <i>non-fresh</i> " (kg/m ³)	Pluma fria	1025,94
		Pluma quente	1020,58
Tipo de poluente	conservativo		
Descarte	A margem mais próxima está a	esquerda	
	Distância até a margem mais próxima (m)	6.500,0	
	Diâmetro da porta (m)	Pluma fria	1,1
		Pluma quente	0,65
	Profundidade da porta abaixo da linha d'água (m)	12	
	Ângulo vertical THETA	-90°	
Ângulo horizontal SIGMA	0°		
Zona de Mistura	Região de interesse (m)	10.000,0	
	Número de intervalos para apresentação de resultados ⁵	20	

3.1.5. Resultados da Diluição no Campo Próximo

A Tabela 5 apresenta os resultados das simulações no campo próximo para o lançamento dos efluentes térmicos para os períodos de verão e inverno.

⁵ O parâmetro "número de intervalos para a apresentação de resultados" é uma informação necessária para determinar o número de linhas que serão escritas em cada arquivo contendo os resultados da simulação.

Tabela 5 - Resultados das simulações de campo próximo dos efluentes.

PARÂMETROS	EFLUENTE TÉRMICO			
	VERÃO		INVERNO	
	Pluma quente	Pluma fria	Pluma quente	Pluma fria
Delta de temperatura no centro do final do campo próximo (°C)	+0,49	-2,28	+0,49	-2,29
Comprimento do campo próximo (m)	74,65	46,59	87,11	67,04
Espessura final da pluma (m)	6,20	1,18	4,56	1,17
Largura final da pluma (m)	149,30	92,85	174,22	133,81
Profundidade terminal da pluma (m)	0,0 (superfície)	20,0(fundo)	0,0 (superfície)	20,0(fundo)

Com relação à temperatura dos efluentes, a Resolução CONAMA nº 430/11 (BRASIL, 2011), que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, especifica apenas que a temperatura no momento do descarte deve ser inferior a 40 °C, não fazendo indicação de limites para efluentes com temperatura inferior ao ambiente.

Esta resolução especifica ainda que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3 °C no limite da Zona de Mistura, definida como a região do corpo receptor, que se estende do ponto de lançamento do efluente, delimitada pela superfície em que é atingido o equilíbrio de mistura entre os parâmetros físicos e químicos, bem como o equilíbrio biológico do efluente e os do corpo receptor, sendo específica para cada parâmetro (BRASIL, 2011).

A Figura 3 apresenta as diluições da pluma do efluente da pluma fria em relação à distância do ponto de lançamento, baseado nos resultados do campo próximo, calculados nos períodos de verão e inverno.

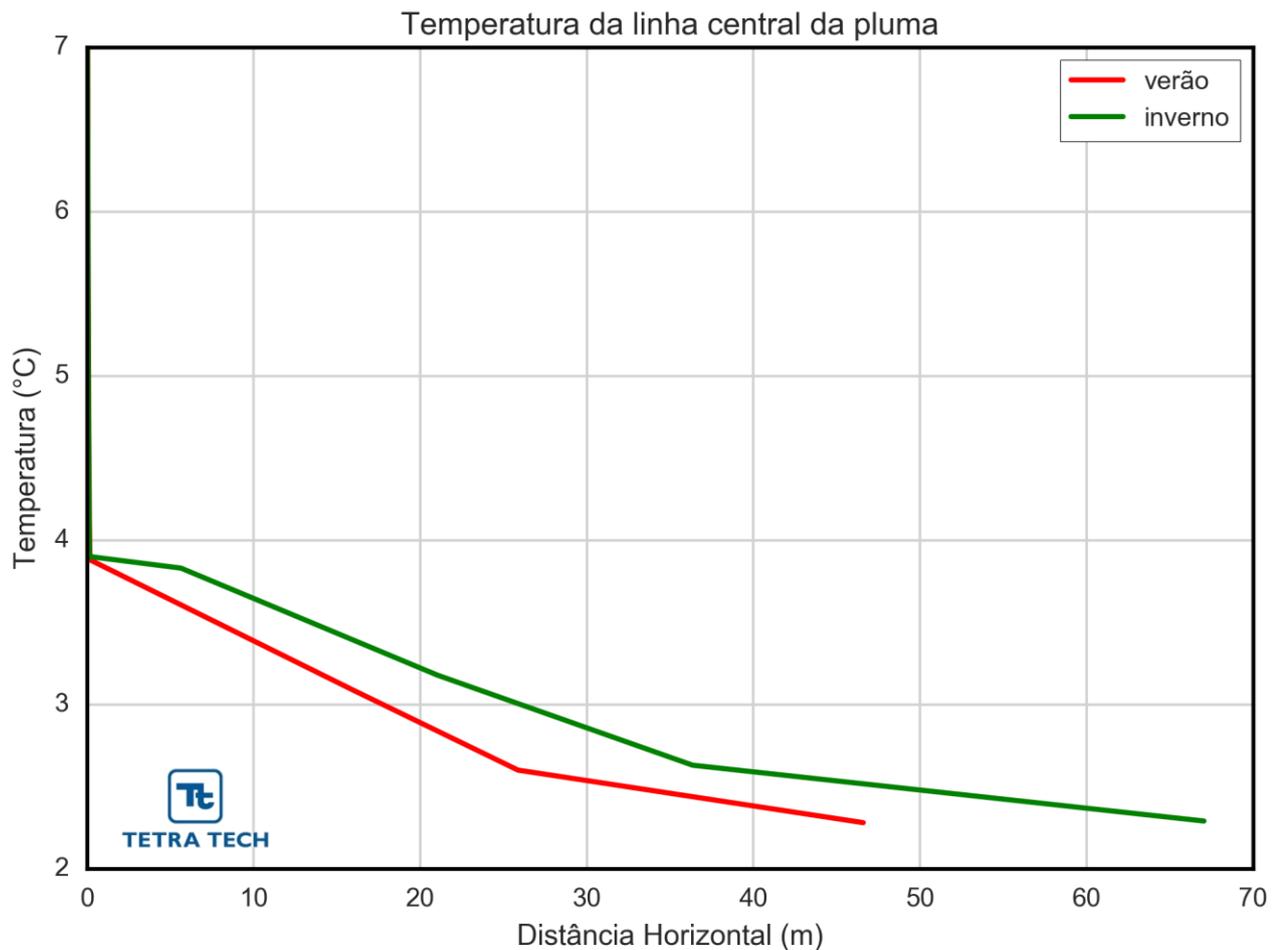


Figura 3 - Diluição em relação à distância do ponto de lançamento do efluente da pluma fria a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.

Na Figura 4 é representada a linha central do efluente da pluma fria e seus limites superior e inferior (linhas de menor espessura) nos períodos de verão e inverno. Nesta figura é indicada a profundidade na coluna d’água na qual a pluma se mantém no domínio do campo próximo. Nestes cenários a linha central da pluma atinge o fundo, com uma espessura em torno de 2 m. Já a Figura 5 ilustra uma vista em planta da trajetória da pluma no campo próximo, na qual é representada a linha central da pluma e seus limites de largura, para ambos os períodos simulados.

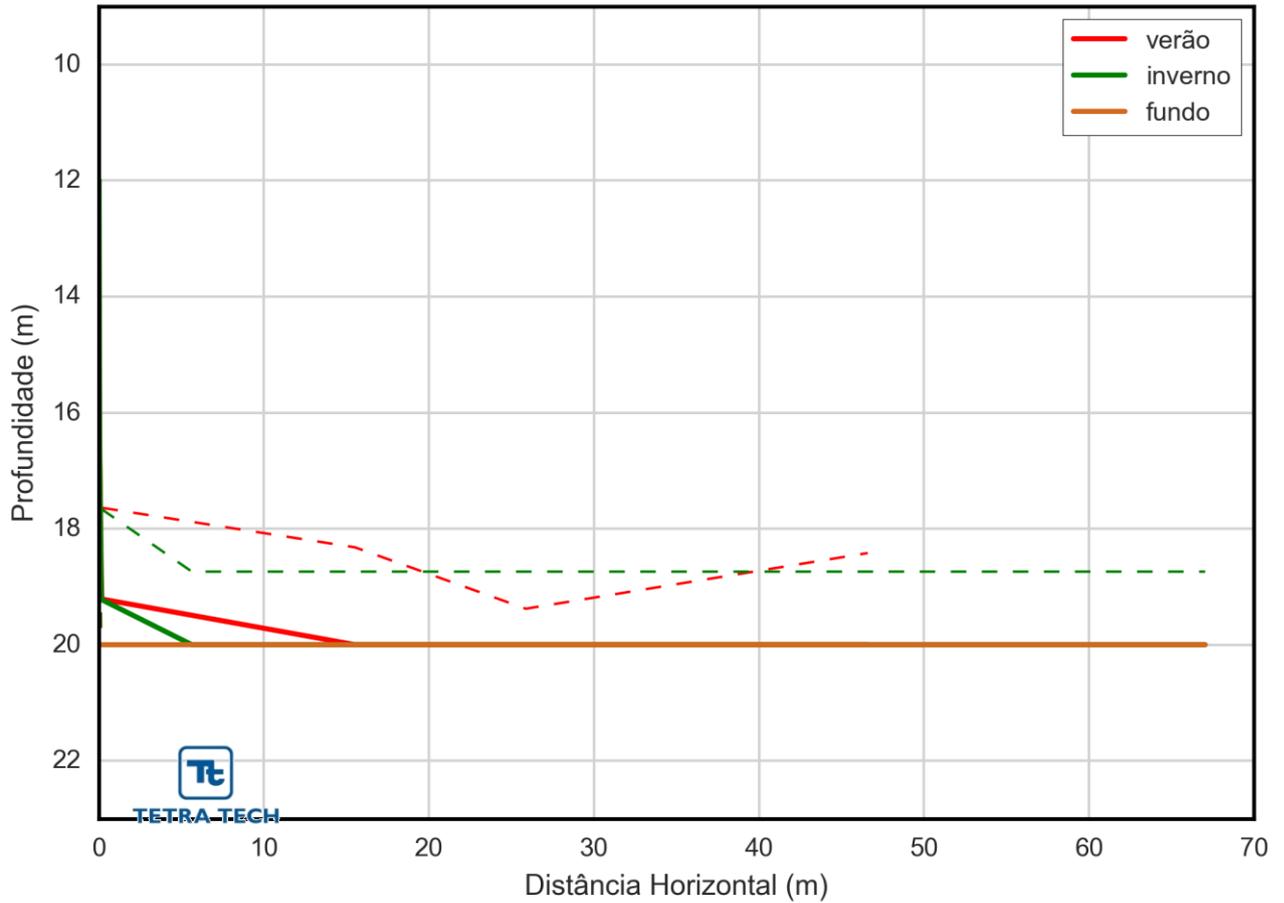


Figura 4 - Trajetória vertical (distância e profundidade) do lançamento do efluente da pluma fria a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.

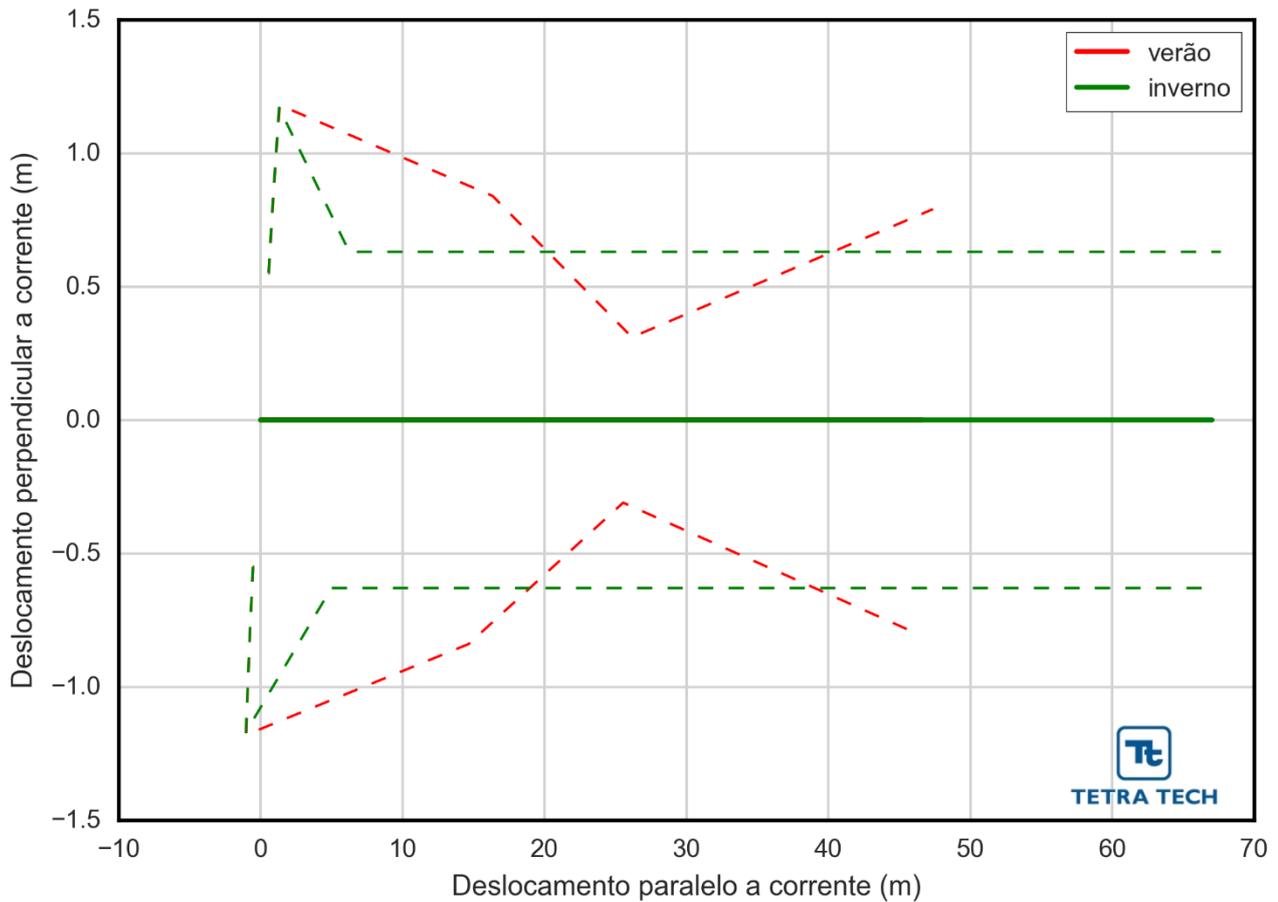


Figura 5 - Trajetória horizontal (vista em planta) da pluma no campo próximo do lançamento do efluente da pluma fria a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.

A Figura 6 apresenta as diluições da pluma do efluente da pluma quente em relação à distância do ponto de lançamento, baseado nos resultados do campo próximo, calculados nos períodos de verão e inverno.

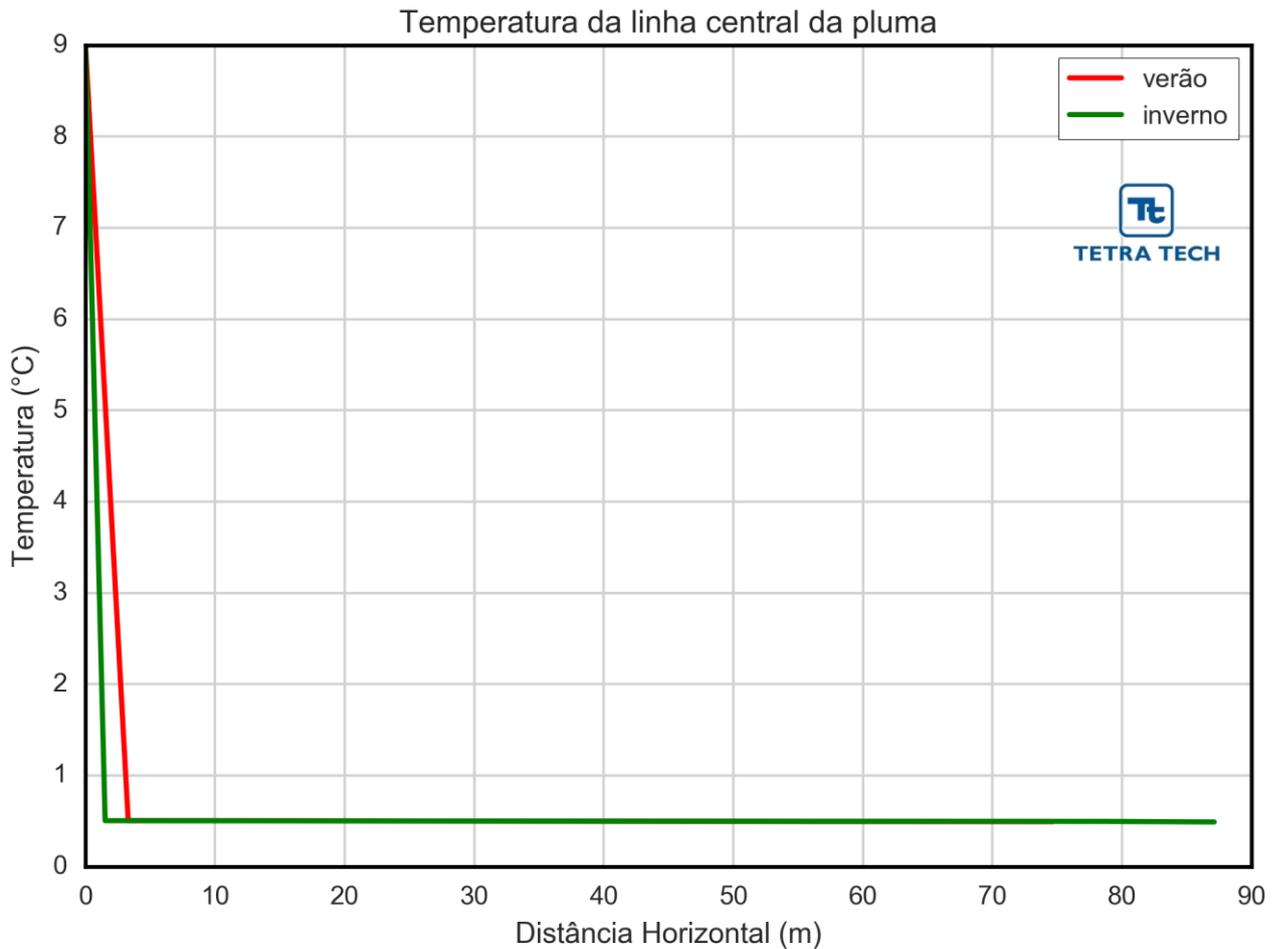


Figura 6 - Diluição em relação à distância do ponto de lançamento do efluente da pluma quente a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.

Na Figura 7 é representada a linha central do efluente da pluma quente e seus limites superior e inferior (linhas de menor espessura) nos períodos de verão e inverno. Nesta figura é indicada a profundidade na coluna d'água na qual a pluma se mantém no domínio do campo próximo. Nestes cenários a linha central da pluma atinge a superfície, com uma espessura em torno de 1 m. Já a Figura 8 ilustra uma vista em planta da trajetória da pluma no campo próximo, na qual é representada a linha central da pluma e seus limites de largura, para ambos os períodos simulados.

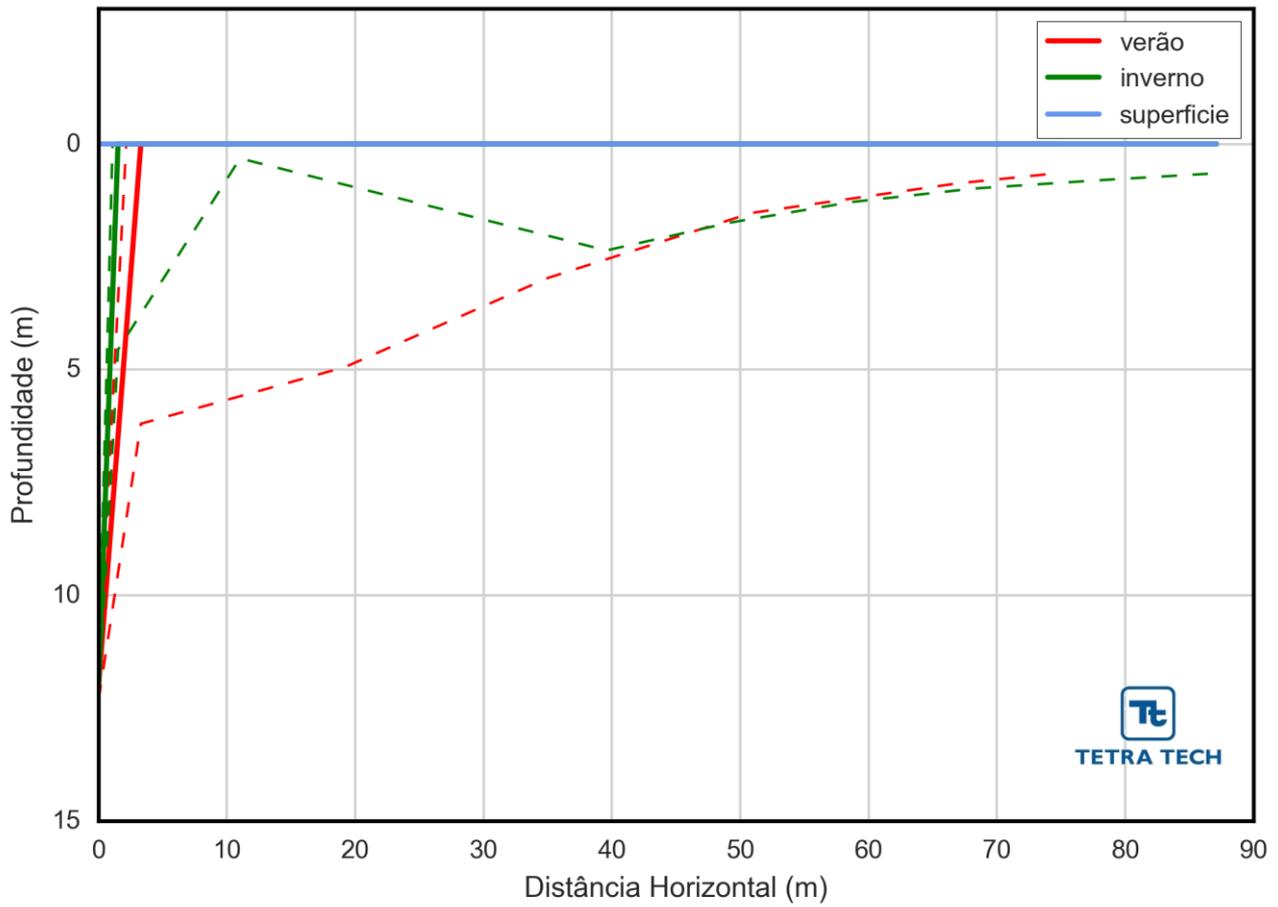


Figura 7 - Trajetória vertical (distância e profundidade) do lançamento do efluente da pluma quente a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.

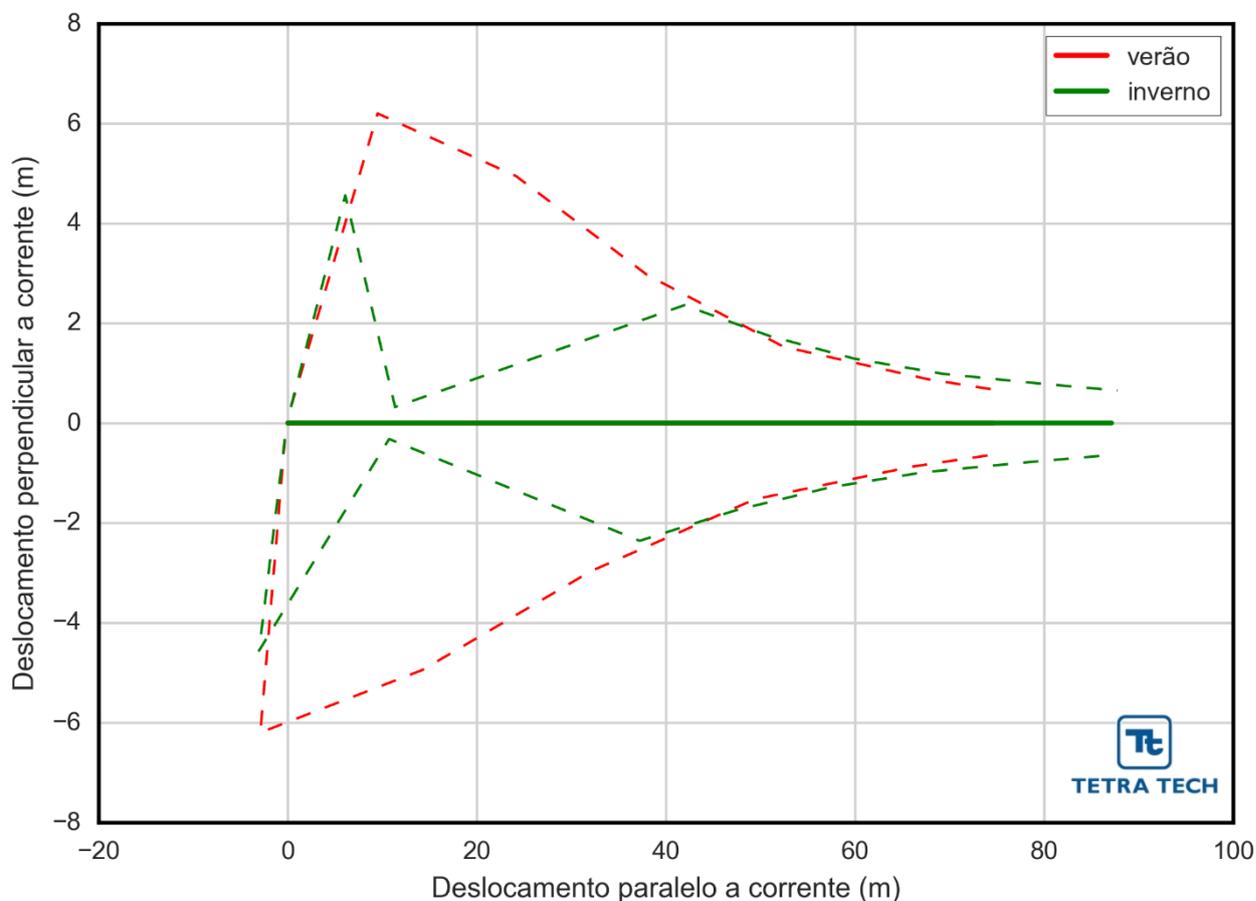


Figura 8 - Trajetória horizontal (vista em planta) da pluma no campo próximo do lançamento do efluente da pluma quente a partir do FSRU, nos períodos de verão e inverno.

3.1.6. Discussão sobre os Resultados da Modelagem no Campo Próximo

Os efluentes térmicos provenientes da regaseificação de GNL no FSRU e do processo de resfriamento dos geradores da Praça de Máquinas apresentou os seguintes resultados para a modelagem no domínio do campo próximo:

- A temperatura de descarte do efluente da pluma fria é de 21 °C enquanto para o efluente da pluma quente a temperatura é de 37 °C;
- A simulação de campo próximo da pluma quente evidencia que esta pode percorrer distâncias superiores a 80,0 m até atingir o final do campo próximo enquanto a pluma fria pode percorrer distâncias superiores a 60,0 m;

- A diferença de temperatura, entre a pluma quente e o ambiente, no final do campo próximo, é 0,5 °C superior a temperatura do meio, enquanto para a pluma fria a temperatura é de 2,27°C inferior;
- A Zona de Mistura, caracterizada como a região onde a diferença de temperatura é igual ou superior a 3 °C em relação ao corpo receptor, para a pluma quente ocorre em distâncias de cerca de 1 m, enquanto para a pluma fria a diferença de temperatura ocorre em distâncias inferiores a 30 m do ponto de lançamento. Além destas distâncias, as plumas estão enquadradas de acordo com a legislação (*i.e.*, Resolução CONAMA nº 430/11).

3.2. MODELAGEM DA DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO

Em contraste com o domínio do campo próximo, as simulações de campo afastado possuem maior abrangência espacial e temporal, demandando um detalhamento maior dos campos de velocidade, do que as generalizações adotadas nas simulações de campo próximo (BLENINGER, 2006). Na comparação entre os resultados da modelagem de campo próximo e campo afastado deve-se levar em consideração as escalas (espacial e temporal) próprias de cada sistema de modelos.

De acordo com estas considerações, na modelagem do campo afastado foi utilizado o modelo Delft3D, desenvolvido pela Deltares (2013) e implementado pela TETRA TECH, através de seu módulo de qualidade de água: *D-Water Quality* (Anexo B). O Delft3D é uma ferramenta de domínio público capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, assim como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. A TETRA TECH vêm utilizando o Delft3D em modelagens de efluentes em zona costeira há mais de 5 anos.

3.2.1. Descrição das Simulações de Campo Afastado

As simulações para a determinação da diluição e dispersão dos efluentes térmicos no campo afastado foram realizadas utilizando-se o módulo *D-Water Quality*, do modelo Delft3D, para as simulações dos processos envolvendo a qualidade de água, em seu

modo determinístico, e com pós-processamento para a obtenção dos modos probabilísticos de cada período, desenvolvido pela TETRA TECH.

Para o desenvolvimento e simulação do campo afastado no modelo Delft3D é necessária a utilização em conjunto de seus módulos hidrodinâmico (Delft3D-FLOW) e de qualidade de água (*D-Water Quality*). O processo executado assemelha-se ao descrito no manual do usuário do Delft3D (DELTARES, 2013).

Como no modo probabilístico é considerada a variabilidade das forçantes ambientais, as simulações de comportamento da pluma são realizadas através da variação das condições meteorológicas e oceanográficas. Dessa forma, foram consideradas duas condições principais correspondendo aos períodos de verão e inverno. O campo hidrodinâmico de cada período, utilizado para as simulações do comportamento da pluma foram obtidos a partir do modelo hidrodinâmico implementado pela TETRA TECH, enquanto os dados de vento utilizados foram obtidos dos dados de reanálise do CFSR.

Para incorporar as variabilidades ambientais, os cenários probabilísticos abrangem os períodos sazonais de verão e inverno. Cada cenário foi composto por uma série de 100 simulações determinísticas com o modelo Delft3D, com duração de 24 horas.

As características do efluente e do lançamento utilizadas nas simulações numéricas foram fornecidas pela CELSE. Nas simulações de campo afastado também foi considerado um composto conservativo para representar o efluente.

Inicia-se o processo através da implementação de uma grade no entorno do ponto de interesse que represente o compromisso entre os objetivos do projeto de modelagem, os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário. Alguns parâmetros ambientais (temperatura e salinidade) são inseridos ao longo da borda do modelo para que não haja limitação de fluxo.

A batimetria da região é incorporada à grade implementada e, na sequência, utiliza-se o módulo Delft3D-FLOW para a simulação de fluxos multidimensionais, para a definição do passo de tempo do modelo e bordas da grade. Durante a execução deste módulo, cria-se o arquivo de fluxo para as simulações determinísticas, priorizando as datas de início e final de cada um dos períodos simulados.

A batimetria utilizada é o ETOPO 2, extraída da biblioteca de mapas e dados do Delft DashBoard, uma das diversas ferramentas OpenEarthTools (<http://OpenEarth.nl>). É uma colaboração online para distribuição e gerenciamento de dados e ferramentas em código aberto (*open-source*), tendo suas versões lançadas em ambientes controlados (VAN KONINGSVELD *et al.*, 2010).

As características do efluente e o conjunto de parâmetros estimados no campo próximo (*i.e.*, a espessura, a largura e a profundidade terminal da pluma), são definidos no *D-Water Quality* para reproduzir a região e diluição equivalente à estimada no campo próximo para o descarte do efluente no campo afastado. Estes parâmetros são utilizados, em conjunto, para a determinação da resolução vertical e horizontal da grade necessária para reproduzi-los, a quantidade de camadas que serão utilizadas nas simulações e a camada de descarte do efluente.

Para a estruturação das simulações probabilísticas faz-se necessário dividir os 90 dias do período sazonal considerado em 100 simulações com datas equiespaçadas, e duração de 24 horas. Esse processamento foi desenvolvido pela TETRA TECH através de programas, que geram 100 simulações determinísticas para o período simulado. Cada uma destas possui como características (*setup*) de descarte o fluxo, as condições iniciais e de borda semelhantes ao original, tendo apenas suas datas de início diferenciadas entre si.

O *D-Water Quality* roda todos os 100 cenários determinísticos e, ao final desta etapa, através de pós-processamento para a determinação da área de influência da pluma dos efluentes, as múltiplas trajetórias das plumas são utilizadas para a produção de curvas de contorno para as máximas e médias concentrações esperadas do efluente em cada ponto de grade e ao longo da coluna d'água. Ao final de cada uma das simulações, registram-se os valores máximos e médios de concentração na coluna d'água para cada ponto de grade ao longo do período simulado e, ao final de todas as 100 simulações, calcula-se a média de todos os valores obtidos.

Ao final das simulações, geram-se os resultados probabilísticos, através de metodologia desenvolvida pela TETRA TECH, aplicada especificamente a esta fase, na qual são gerados os resultados.

3.2.2. Resultados das Simulações de Campo Afastado

A seguir, são apresentados os resultados das simulações probabilísticas de campo afastado dos efluentes térmicos. Ressalta-se que a resolução dos resultados gráficos apresentados, a seguir, está relacionada com a resolução da grade utilizada, levando-se em consideração as diluições e dimensões do campo próximo. Optou-se por não realizar pós-processamento (*i.e.*, interpolações para a suavização dos contornos) de forma a não haver perda de informações.

A Figura 9 e a Figura 10, a seguir, são apresentados os contornos de frequência de ocorrência das simulações probabilísticas para as plumas do efluente da pluma fria para os períodos de verão e inverno, respectivamente. Já a Figura 11 e a Figura 12 apresentam os resultados do delta de temperatura da pluma fria em relação à água ambiente, para os períodos de verão e inverno, até a temperatura limite de $-0,05$ °C.

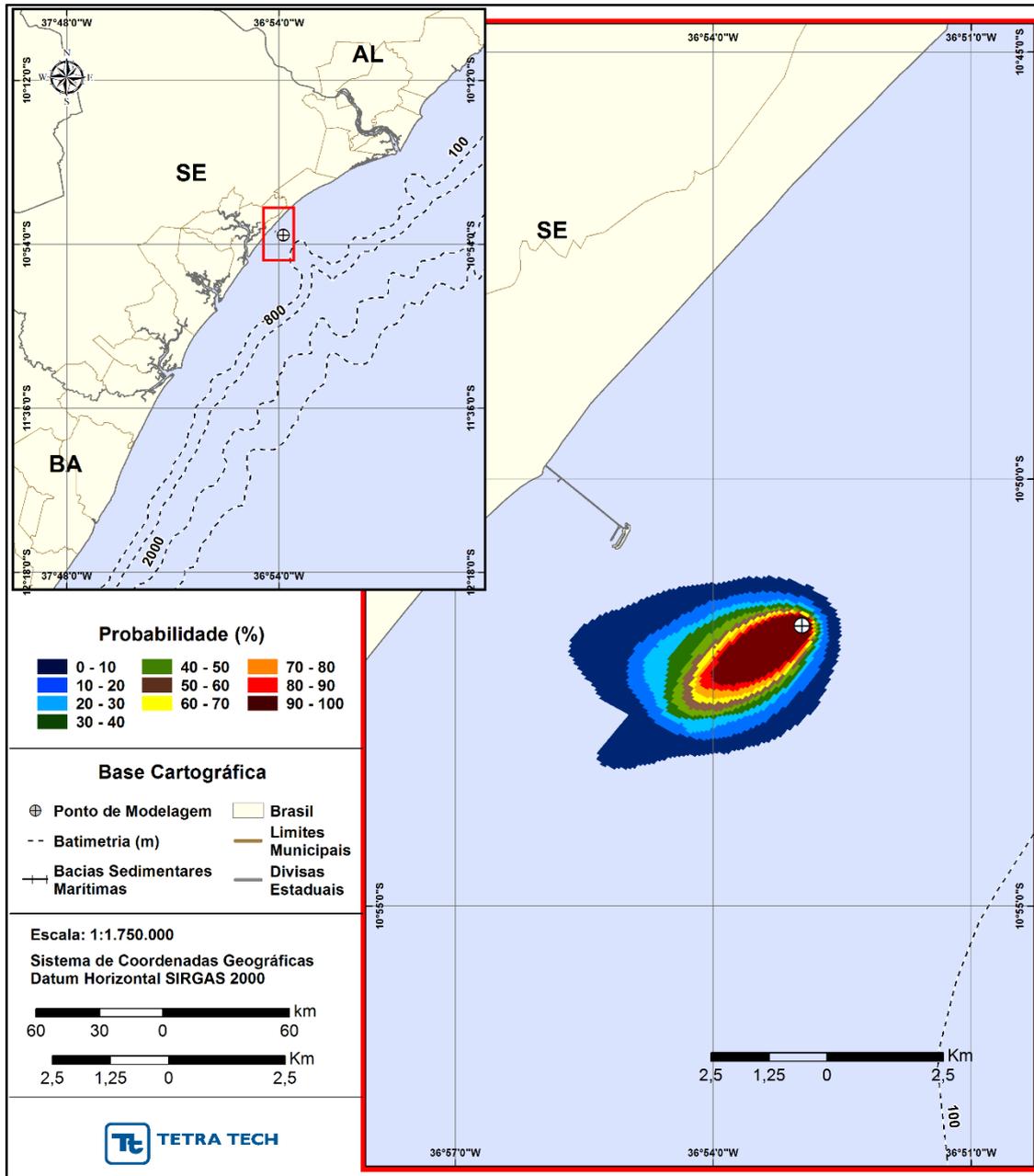


Figura 9 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de verão.

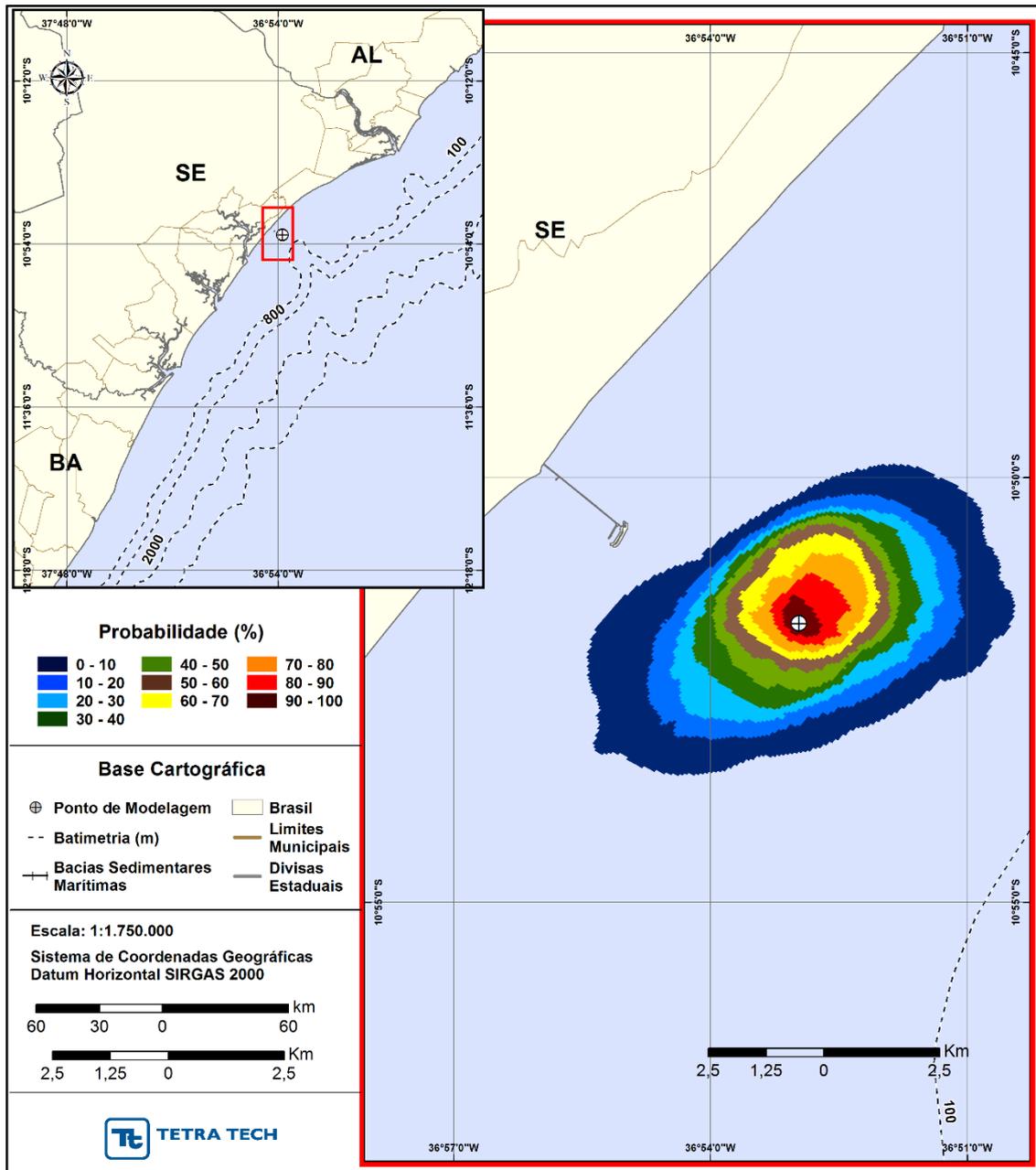


Figura 10 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de inverno.

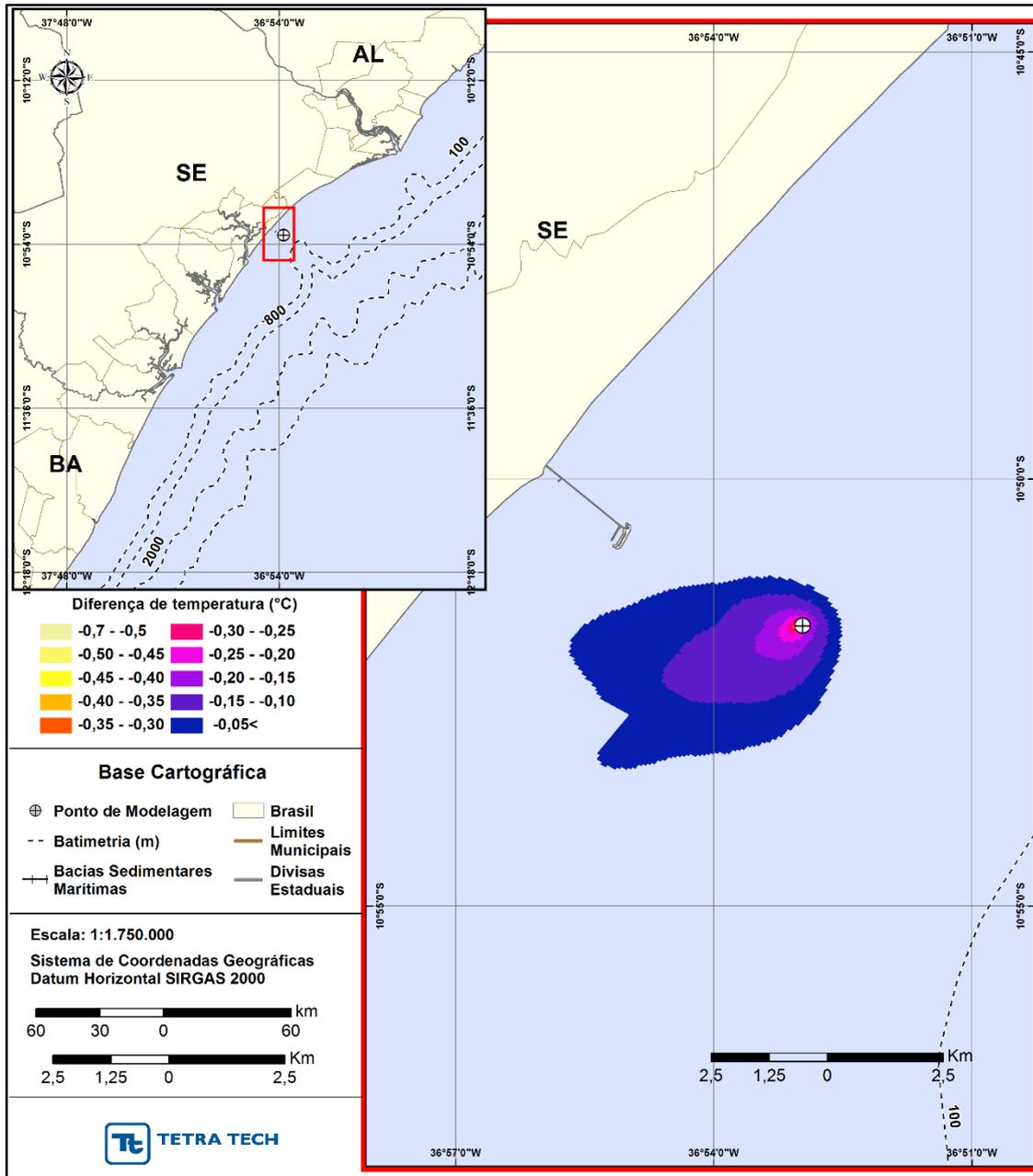


Figura 11 - Delta de temperatura calculado para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de verão.

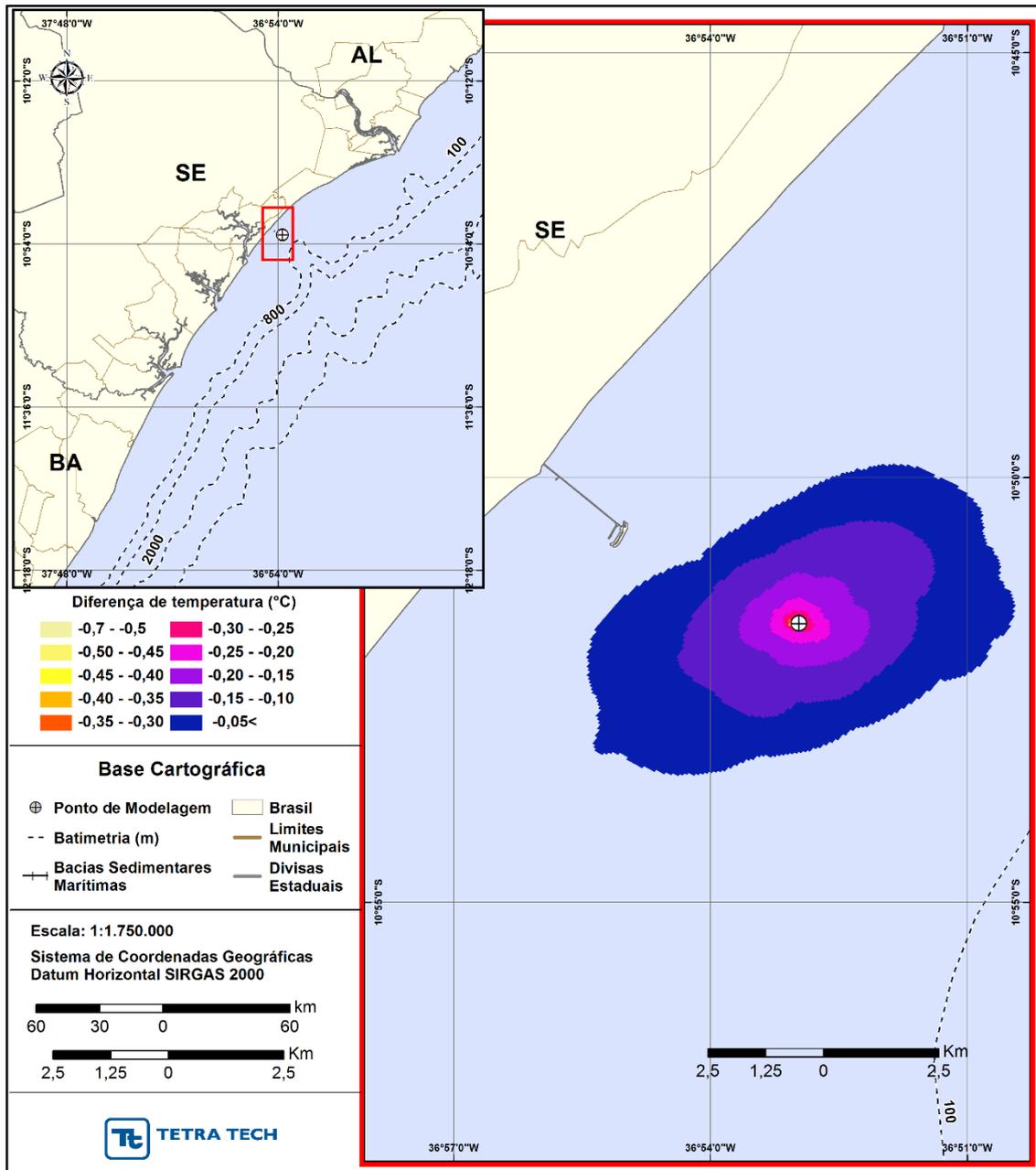


Figura 12 - Delta de temperatura calculado para o efluente da pluma fria a partir do FSRU, no período de inverno.

A Figura 13 e a Figura 14, a seguir, são apresentados os contornos de frequência de ocorrência das simulações probabilísticas para as plumas do efluente da pluma quente para os períodos de verão e inverno, respectivamente. Já a Figura 15 e a Figura 16 apresentam os resultados do delta de temperatura da pluma quente em relação à água ambiente, para os períodos de verão e inverno, até a temperatura limite de 0,0125 °C. Observa-se que, como a pluma quente apresentou diluições elevadas, as dimensões da pluma, mesmo até o limite de 0,0125 °C, são muito pequenas e é possível visualizar o raio de descarte no centro.

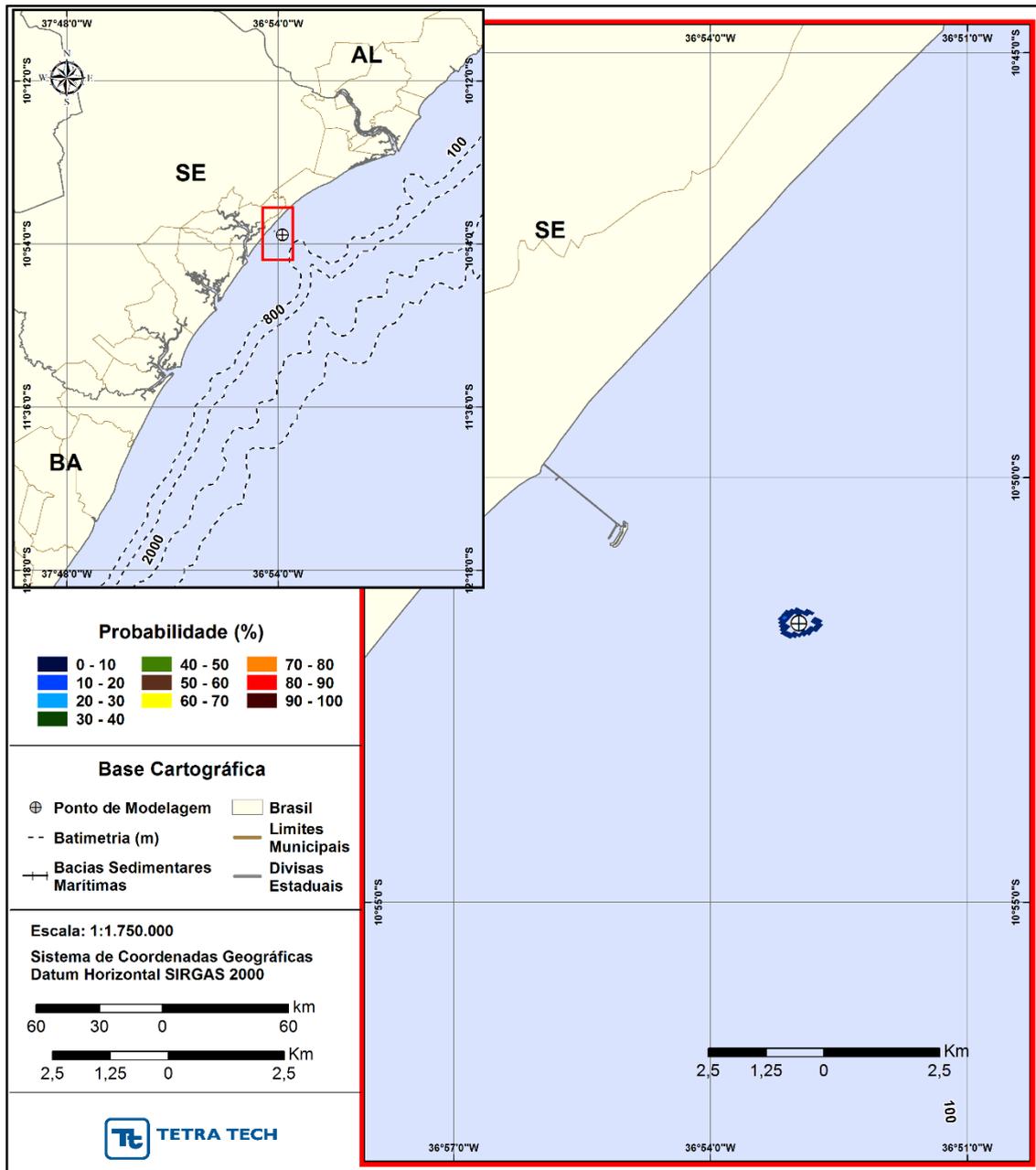


Figura 13 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de verão.

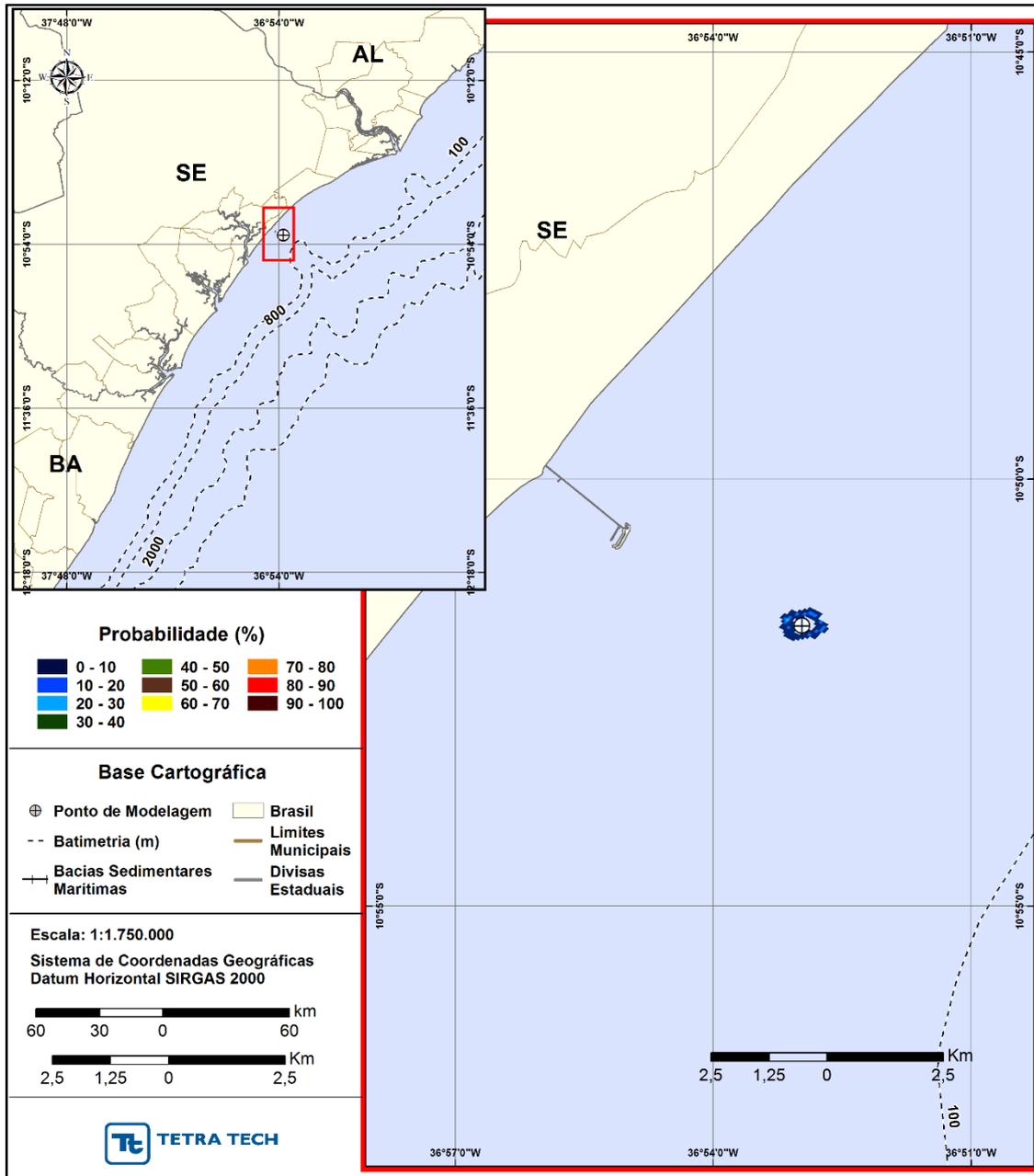


Figura 14 - Frequências de ocorrência calculadas para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de inverno.

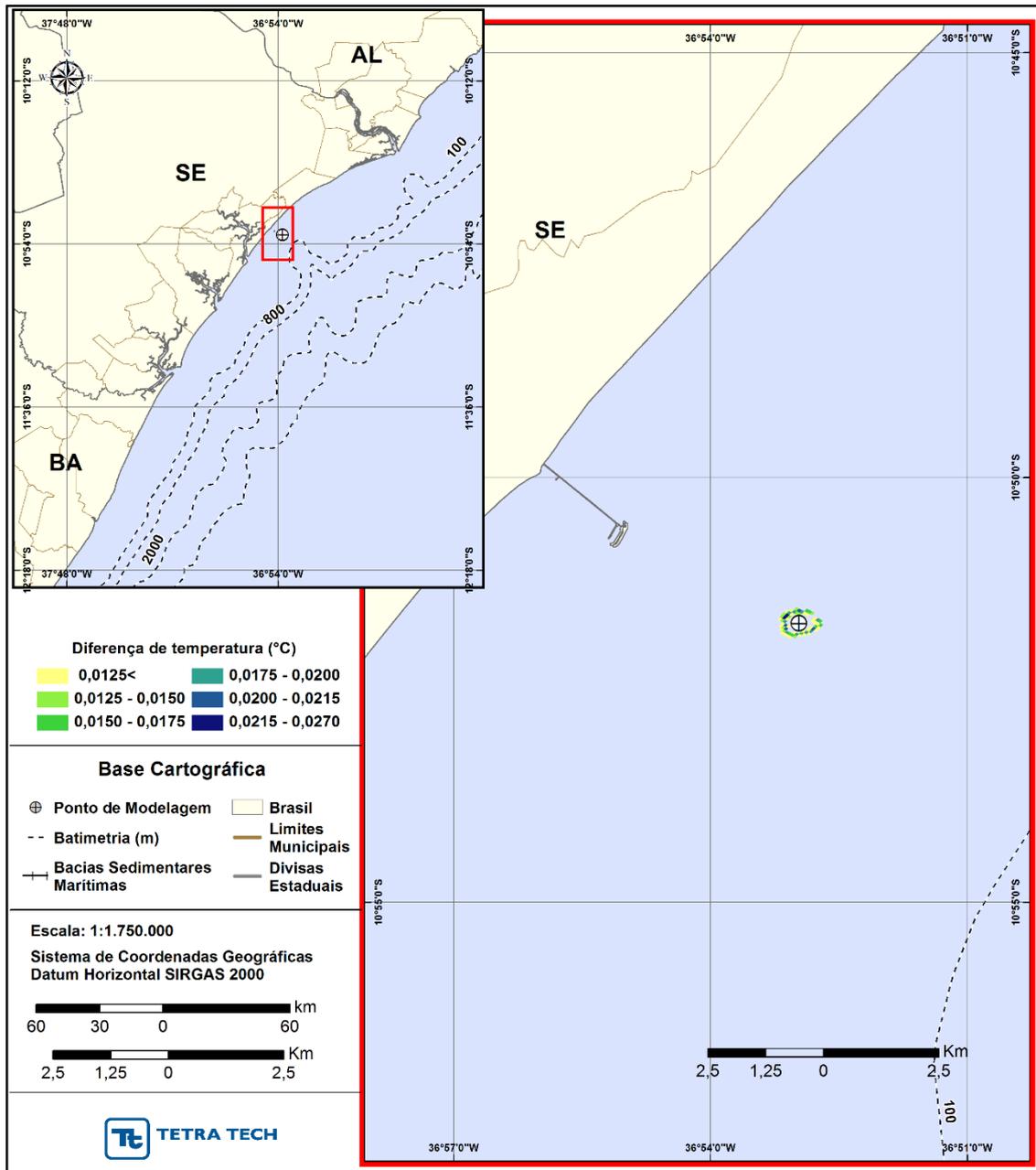


Figura 15 - Delta de temperatura calculado para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de verão.

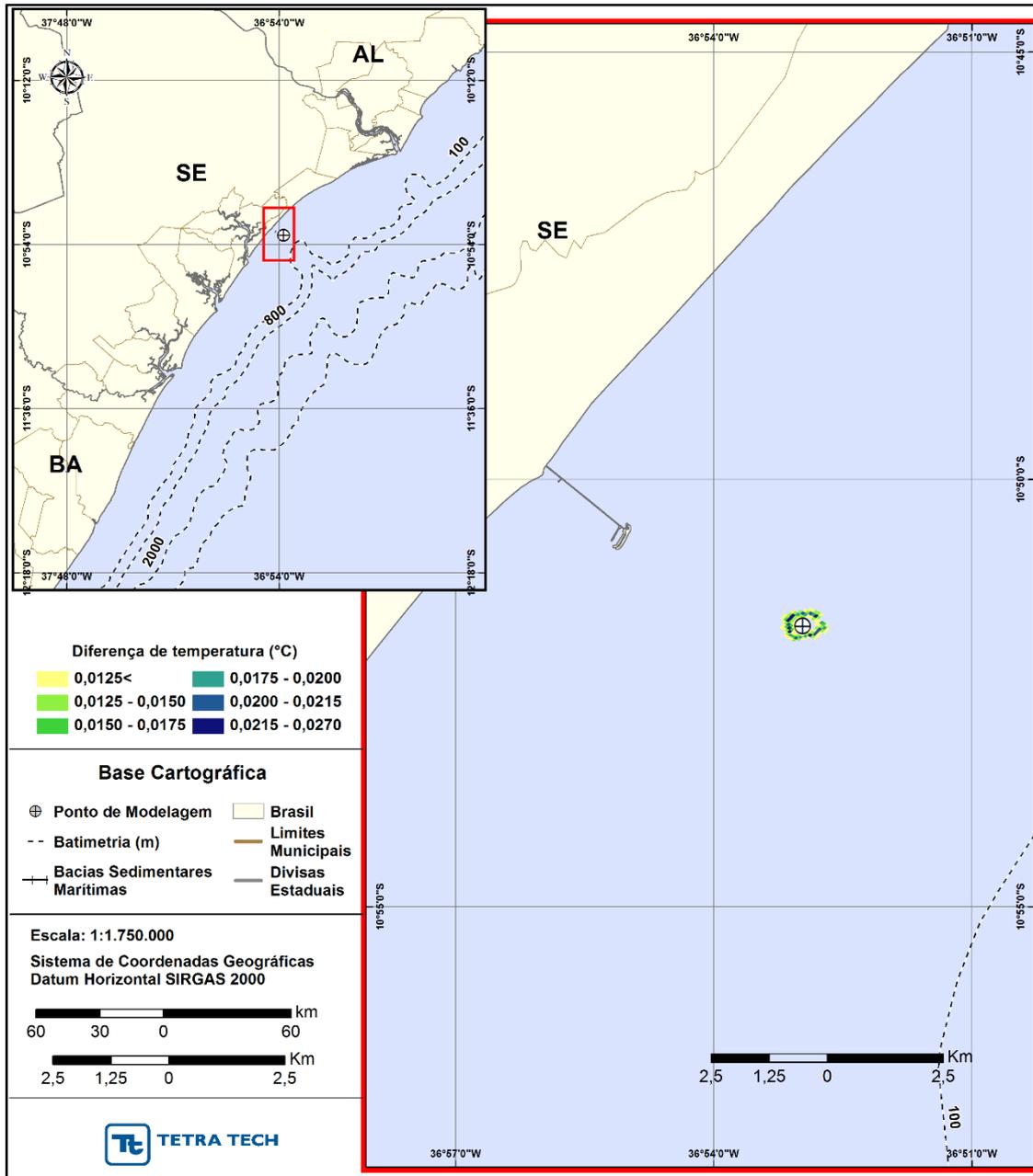


Figura 16 - Delta de temperatura calculado para o efluente da pluma quente a partir do FSRU, no período de inverno.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do processo de diluição e dispersão das plumas térmicas provenientes do processo de regaseificação de GNL no FSRU e do processo de resfriamento dos geradores da Praça de Máquinas, descartado na região costeira do Estado de Sergipe. Os padrões de circulação característicos da região foram obtidos a partir dos resultados do sistema de modelos Delft3D, desenvolvido pela Deltares (2013) e implementado pela TETRA TECH.

Com este objetivo, a modelagem foi conduzida através da separação de dois domínios conhecidos por campo próximo e campo afastado (simulações probabilísticas e determinísticas críticas). As simulações de campo próximo, realizadas com o modelo CORMIX, fornecem a diluição inicial do efluente e servem como parâmetros de entrada para o modelo de campo afastado do Delft3D.

Para a determinação da diluição e dispersão do lançamento dos efluentes foram conduzidas simulações para os períodos de verão e inverno. Para a representação do efluente foi utilizado um composto conservativo, uma vez que este sofre apenas os processos físicos da diluição, sem os efeitos dos processos bioquímicos, sendo, portanto, uma situação mais conservadora.

O processo de regaseificação de GNL em ciclo aberto no FSRU consiste na pressurização do GNL com bombas de alta pressão e da utilização de um trocador de calor do tipo casco-tubo para vaporizar o GNL com água do mar. O projeto do trocador de calor é desenvolvido para retornar à água do mar com uma temperatura de até 7 °C inferior à temperatura ambiente, com uma vazão máxima de 12.000,0 m³/h. A água do mar também é utilizada para o resfriamento dos geradores da Praça de Máquina, que retorna ao ambiente com vazão máxima de 2.700,0 m³/h e temperatura elevada em até 9 °C em relação à temperatura de admissão.

O lançamento dos efluentes será a 12 m abaixo da linha d'água, medida do calado máximo da unidade, por uma tubulação com orientação vertical para baixo perpendicular à curvatura do casco, com orifício de 1,1 m de diâmetro para o lançamento do efluente dos trens de regaseificação em operação no FSRU e de 0,65 m para o resfriamento da Praça de Máquinas.

Os resultados das simulações mostraram que as maiores diluições são verificadas para o efluente da pluma quente (para ambos os períodos considerados), bem como as maiores distâncias a partir do FSRU. Apesar disto, a zona de mistura da legislação (diferença de 3 °C entre o efluente e o corpo receptor) é atingida em distâncias de cerca de 1 m, para a pluma quente, enquanto para a pluma fria a diferença de temperatura ocorre em distâncias inferiores a 30 m do ponto de lançamento.

5. BIBLIOGRAFIA

BLENINGER, T., 2006. Coupled 3D Hydrodynamic Models for Submarine Outfalls: Environmental Hydraulic Design and Control of Multiport Diffusers. Thesis, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe.

BLENINGER, T. & JIRKA, G.H., 2010. Environmental planning, prediction and management of brine discharges from desalination plants. Middle East Desalination Research Center (MEDRC) Series of R&D Reports; MEDRC Project: 07-AS-003, Muscat, Sultanate of Oman, December, 2010.

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

BRASIL, 2011. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 16 maio 2011.

CH2M, 2017. Estudo de Impacto Ambiental – EIA das Instalações *offshore* de gás natural, adutora, emissário submarino e estação de bombeamento.

CHIN, D.A., 2013. Water-Quality Engineering In Natural Systems, Fate and Transport Processes in the Water Environment. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1991. Technical Support Document For Water Quality-based Toxics Control. Office of Water Regulations and Standards. EPA 440/4-85/032.

JIRKA, G.H.; ABRAHAM, G. & HARLEMAN, D.R.F., 1976. An Assessment of Techniques for hydrothermal prediction. Technical Report. Department of Civil Engineering, MIT for U.S. Nuclear Regulatory Commission, Cambridge.

PARENTE, 2016.

SAHA, S. et al., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 91:8, p. 1015-1057.

TEETER, A.M. & BAUMGARTNER, D.J., 1978. Prediction of Initial Mixing for Municipal Ocean Discharges. Corvallis Environmental Research Laboratory U.S. Environmental Protection Agency - EPA, Corvallis, Oregon 97330.

TETRA TECH, 1982. Revised section 301(h) technical support document. EPA 430/9-82-011. Technical Report. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Program Operations, Washington. DC. 208pp.

TETRA TECH, 2017. Modelagem de Derrame de Óleo em Atendimento ao Plano de Emergência Individual da UTE Sergipe I, Estado de Sergipe. Relatório Técnico, Revisão 01 (27 de julho de 2017). 87pp+Anexos.

VAN KONINGSVELD, M., de BOER, G.J., BAART, F., DAMSMA, T., den HEIJER, K., VAN GEER, P., de SONNEVILLE, B., 2010. OpenEarth: inter-company management of data, models, tools and knowledge. In: Proceedings WODCON XIX Conference, Beijing, China.

ANEXO A - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS CORMIX

O CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*), desenvolvido na *Cornell University*, é um sistema de modelos computacionais desenvolvido para a análise, previsão e planejamento do descarte de efluentes em diferentes corpos d'água (JIRKA *et al.*, 1996). Este modelo possui aprovação do órgão ambiental dos EUA, e é utilizado em consultorias e órgãos ambientais de vários outros países (entre eles a CETESB de São Paulo).

A ênfase do sistema se dá na previsão da geometria e das características de diluição da zona de mistura inicial, permitindo que valores aceitáveis de qualidade de água sejam calculados e discutidos.

O CORMIX é composto por três subsistemas:

- (a) CORMIX1, para a análise de lançamentos pontuais (*single port discharges*) e utilizado no presente estudo;
- (b) CORMIX2, para a análise de múltiplos lançamentos pontuais (difusores multiorifícios) abaixo da superfície (*submerged multiport diffuser discharges*);
- (c) CORMIX3, para a análise de lançamentos superficiais (*surface discharges*) não submersos e com escoamento de superfície livre (*i.e.* canais).

Como todo sistema de modelagem, o CORMIX possui premissas e limitações, entre elas:

- Os subsistemas CORMIX1, 2 e 3 exigem que a seção transversal efetiva do corpo d'água seja esquematizada como um canal retangular uniforme que pode, ou não, ser lateralmente delimitado;
- No CORMIX a velocidade ambiente é assumida como sendo uniforme e constante ao longo de toda a seção esquematizada;
- Além da possibilidade da imposição de um valor uniforme de densidade, os subsistemas CORMIX1 e CORMIX 2 permitem que três tipos diferentes de estratificação ambiente de densidade possam ser utilizados para melhor representar a distribuição vertical de densidade;
- Todos os subsistemas do CORMIX são em princípio modelos de estado estacionário, no entanto, novos desenvolvimentos permitiram a análise da mistura em ambientes de maré;

- Todos os subsistemas do CORMIX podem calcular os processos associados à diluição e mistura de efluentes conservativos, com decaimento de primeira ordem ou a transferência de calor a partir de efluentes térmicos.

Embora sua metodologia considere condições ambientais estacionárias, este sistema representa uma ferramenta adequada para previsões qualitativas (e.g. classificação de fluxos) e quantitativas (e.g. taxas de diluição, trajetórias) dos processos de misturas resultantes de diferentes configurações de descartes, e em vários tipos de corpos d'água, incluindo rios, lagos, reservatórios, estuários e águas costeiras.

Estas simplificações dinâmicas se justificam uma vez que os processos do campo próximo possuem escala temporal da ordem de segundos a centenas de segundos e escala espacial com ordens de grandeza de metros a dezenas de metros, não exigindo dessa forma, a representação da dinâmica local que ocorre em escalas maiores.

A.1 BIBLIOGRAFIA

JIRKA, G.H.; R.L. DONEKER & S.W. HINTON, 1996. User's manual for CORMIX. A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. U.S. Environmental Protection Agency. 152pp.

ANEXO B - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELF3D

O sistema de modelos Delft3D (DELTARES, 2013) 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 (Delft3D-FLOW) e de qualidade de água (*D-Water Quality*).

B.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.

B.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 usuário⁶. 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.
- 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.

⁶ Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

B.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 B-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).

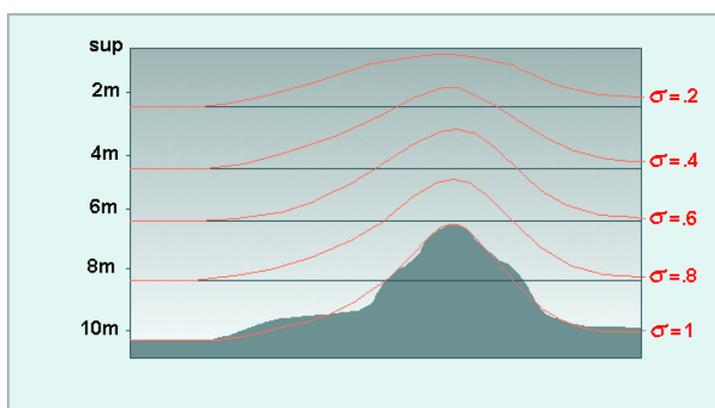


Figura B-1 - Exemplo de uma aplicação de coordenadas σ .

O sistema de coordenadas σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (\text{B1})$$

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 B-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:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (\text{B2})$$

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:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (B3)$$

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:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f v = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \quad (B4)$$

e,

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \quad (B5)$$

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 :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial[(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial[(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad (B6)$$

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 (u e v), profundidade da coluna d’água (H), elevação do nível d’água (ζ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (B7)$$

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,

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (B8)$$

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

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad (B9)$$

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:

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (B10)$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (B11)$$

Parâmetro de Coriolis

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

$$f = 2\Omega \sin\phi \quad (\text{B12})$$

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:

$$v_H = v_{SGS} + v_V + v_H^{amb} \quad (B13)$$

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:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb}) \quad (B14)$$

Onde v_{mol} é a viscosidade cinemática da água. A parte v_{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:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad (\text{B15})$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad (\text{B16})$$

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:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad (\text{B17})$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad (\text{B18})$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \quad (\text{B19})$$

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 Delft3D-FLOW, são então reduzidos para o operador de Laplace ao longo das linhas da grade:

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (\text{B20})$$

$$F_\eta = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (\text{B21})$$

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):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o} \quad (\text{B22})$$

onde:

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

$$\alpha_0 = 0,6980$$

$$P_0 = 5890 + 38 t - 0,375t^2 + 3 s$$

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

B.3 - MÓDULO DE QUALIDADE DE ÁGUA (D-WATER QUALITY)

O transporte de substâncias presentes em corpos d'água naturais é usualmente representado pela equação de transporte advectivo-difusivo. O módulo de qualidade de água do *D-Water Quality* baseia-se nesta equação e oferece diferentes métodos computacionais para sua solução numérica. A discretização espacial do domínio de modelagem é realizada por meio de uma grade arbitrária, com formato irregular, e que pode ser composta por elementos computacionais retangulares, triangulares ou curvilíneos. O *D-Water Quality* efetua, com a mesma facilidade, representações unidimensionais (1DV ou 1DH), bidimensionais (2DV ou 2DH) e tridimensionais (3D) de um corpo d'água.

De uma forma geral um sistema físico de interesse é afetado por dois tipos de processos:

Processos de transporte: envolvem o movimento de substâncias.

Processos de qualidade da água: envolvem a transformação de uma ou mais substâncias.

Os processos básicos de transporte operam da mesma maneira para todas as substâncias estudadas. Os processos de qualidade de água são incorporados na equação de transporte advectivo-difusivo, por meio da adição de um termo no balanço de massa. Tais processos são descritos por funções lineares ou não-lineares, envolvendo as variáveis de interesse e os demais parâmetros do modelo.

As formulações referentes a cada processo são organizadas sob a forma de uma biblioteca que está interligada com o módulo de qualidade da água. A biblioteca contém mais de 50 rotinas de processos de qualidade da água, num total de 140 substâncias padronizadas. A interface gráfica do usuário permite selecionar qualquer combinação de substâncias e de processos associados.

O modelo inclui os ciclos naturais completos de elementos químicos: Carbono, Nitrogênio e Fósforo, Oxigênio e Silício. Inclui também processos relacionados aos sedimentos coesivos, às bactérias, à salinidade, à temperatura, aos metais pesados e aos micropoluentes orgânicos. Seguem alguns exemplos de processos de qualidade da água:

- Troca de substâncias com a atmosfera (Oxigênio, substâncias orgânicas voláteis e temperatura);
- Adsorção e dessorção de substâncias tóxicas ou de Ortofosfato;
- Sedimentação e resuspensão de partículas ou de substâncias adsorvidas;
- Mortalidade de bactérias;
- Reações bioquímicas (decaimento de DBO e nitrificação);
- Crescimento de algas (produção primária);
- Predação (ex: zooplâncton sobre o fitoplâncton).

O *D-Water Quality* é uma ferramenta que pode ser aplicada em diferentes estudos e projetos na área de meio ambiente e recursos hídricos, como por exemplo:

- Estudo de Impacto Ambiental (EIA): avaliação de alternativas propostas;
- Estudo do balanço hídrico de um sistema: identificação da origem das águas afluentes, cálculos de tempo de residência e de capacidade de renovação das águas;
- Qualidade de água em áreas utilizadas para recreação: representação dos processos de decomposição bacteriana;
- Suporte ao projeto de emissários submarinos;
- Eutrofização de corpos d'água (ciclos de nutrientes);
- Análise de plumas de dragagem: sedimentação e resuspensão de partículas;
- Biodisponibilidade de metais pesados e de micropoluentes orgânicos.

B.4 - 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, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

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.

Anexo 7.1-9

Modelagem de Dispersão de Óleo

Modelagem de Derrame de Óleo, Estado de Sergipe

Revisão 01

Julho/2017



TETRA TECH

complex world

CLEAR SOLUTIONS™



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, 2017. Modelagem de Derrame de Óleo, Estado de Sergipe. Relatório Técnico, Revisão 01 (27 de julho de 2017). 87pp+Anexos.

ÍNDICE GERAL

CONTROLE DE REVISÕES	1
ÍNDICE GERAL	3
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	9
RESUMO.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. DADOS DE ENTRADA.....	15
2.1 CAMPOS DE CORRENTE	17
2.2 CAMPOS DE VENTO	17
2.3 PERÍODOS DE SIMULAÇÃO	18
2.4 DOMÍNIO MODELADO	18
2.5 TIPOS DE COSTA.....	19
2.6 PONTO DE MODELAGEM E VOLUMES DE DERRAME	24
2.7 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO	24
2.8 CRITÉRIO DE PARADA ADOTADO.....	25
2.9 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	25
3. RESULTADOS DA MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO	27
3.1.1 Simulações Probabilísticas – Verão	29
3.1.2 Simulações Probabilísticas - Inverno.....	47
3.2 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS	65
3.2.1 Simulações Determinísticas - Verão.....	66
3.2.2 Simulações Determinísticas - Inverno	74
4. BIBLIOGRAFIA	83
5. EQUIPE TÉCNICA	85
ANEXO A – MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	A-1
ANEXO B – DESCRIÇÃO DO MODELO OILMAP DEEP/3D.....	B-1
ANEXO C - DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS – SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS	C-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do ponto de modelagem, Estado do Sergipe.	13
Figura 2 - Ambientes costeiros utilizados no OILMAP.	23
Figura 3 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	30
Figura 4 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	31
Figura 5 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	32
Figura 6 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	33
Figura 7 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).	34
Figura 8 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	36
Figura 9 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	37
Figura 10 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	38
Figura 11 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	39
Figura 12 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no verão. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das	

caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).....40

Figura 13 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....42

Figura 14 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....43

Figura 15 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....44

Figura 16 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....45

Figura 17 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).....46

Figura 18 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....48

Figura 19 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU d, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....49

Figura 20 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....50

Figura 21 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.....51

Figura 22 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no inverno. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).....52

Figura 23 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	54
Figura 24 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	55
Figura 25 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	56
Figura 26 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	57
Figura 27 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no inverno. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).	58
Figura 28 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	60
Figura 29 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	61
Figura 30 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	62
Figura 31 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m ³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.	63
Figura 32 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume de pior caso no inverno. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).	64
Figura 33 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré alta e vento forte.	67
Figura 34 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFO: Balanço de massa.	68

Figura 35 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré alta e vento fraco.....	69
Figura 36 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFR: Balanço de massa.....	70
Figura 37 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré baixa e vento forte.....	71
Figura 38 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFO: Balanço de massa.....	72
Figura 39 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré baixa e vento fraco.....	73
Figura 40 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFR: Balanço de massa.....	74
Figura 41 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré alta e vento forte.....	75
Figura 42 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFO: Balanço de massa.....	76
Figura 43 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré alta e vento fraco.....	77
Figura 44 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFR: Balanço de massa.....	78
Figura 45 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré baixa e vento forte.....	79
Figura 46 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFO: Balanço de massa.....	80
Figura 47 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré baixa e vento fraco.....	81
Figura 48 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFR: Balanço de massa.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros numéricos utilizados como dados de entrada na modelagem de vazamento de óleo.....	16
Tabela 2 - Características dos ambientes costeiros utilizados no OILMAP.....	20
Tabela 3 - Descrição dos ambientes agrupados e seus respectivos ISL.....	21
Tabela 4 - Classificação dos tipos de costa do MAREM nos tipos de costa disponíveis no banco de dados do modelo OILMAP.....	21
Tabela 5 - Coordenadas (SIRGAS 2000) e lâmina d'água do ponto de modelagem.....	24
Tabela 6 - Características do óleo.....	25
Tabela 7 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrame de óleo na Baía de Sergipe-Alagoas.....	26
Tabela 8 - Resumo dos resultados mais críticos das simulações probabilísticas.....	27
Tabela 9 - Resultados das simulações probabilísticas (extensão da costa com probabilidade de toque).....	28
Tabela 10 - Média da distribuição de massa para os cenários probabilísticos.....	28
Tabela 11 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão.....	34
Tabela 12 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no verão.....	40
Tabela 13 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no inverno.....	47
Tabela 14 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no inverno.....	52
Tabela 15 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no inverno.....	58
Tabela 16 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume de pior caso no inverno.....	65
Tabela 17 - Resumo dos cenários determinísticos de verão e inverno.....	66

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados da modelagem de derrame de óleo diesel marítimo no mar em suporte ao Plano de Emergência Individual (PEI) das instalações *offshore*, localizada do Estado de Sergipe, da Celse – Centrais Elétricas de Sergipe S.A.

O sistema de modelos OILMAP foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de óleo. O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir do sistema de modelos Delft3D-FLOW (domínio local) em conjunto com os resultados do modelo *HYbrid Coordinate Ocean Model* - HYCOM (domínio regional). O campo de ventos foi proveniente de dados de reanálise de modelo meteorológico composto com dados locais.

As simulações foram conduzidas para dois períodos sazonais (verão e inverno), com o objetivo de determinar os intervalos de probabilidade de a mancha atingir a área de estudo. Foram consideradas três classes de derrame, como definido na Resolução do CONAMA nº 398/08: pequeno (8,0 m³), médio (200,0 m³) e pior caso (260,0 m³), correspondente a um vazamento de óleo diesel marítimo devido a colisão de dois rebocadores no local de ancoragem do FSRU).

Todos os cenários foram conduzidos por 72 horas após o final do vazamento, que correspondem a 12 horas além do tempo máximo preconizado no item 2.2 do Anexo III da Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008), para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência, com valores de CEDRO (Capacidade Efetiva Diária de Recolhimento) iguais a 8.000 m³/dia para Zona Costeira.

Dentro do período das simulações probabilísticas, foram selecionadas datas representativas de diferentes condições para as simulações determinísticas, sendo condições de vento forte e vento fraco, nas marés alta e baixa.

A análise dos resultados das simulações probabilísticas de cada período simulado demonstrou que, em ambos os períodos sazonais, ocorre o toque do óleo na costa. O menor tempo de toque calculado foi de 14 horas em Barra dos Coqueiros (SE) para o período de inverno, enquanto no verão foi registrada a maior probabilidade de toque de óleo na costa (53,5% em Aracaju, SE).

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados da modelagem de derrame de óleo diesel marítimo no mar a partir da colisão de dois rebocadores no local de ancoragem do FSRU, em suporte ao seu Plano de Emergência Individual (PEI), no litoral do Estado de Sergipe.

A Figura 1 apresenta a localização do ponto de modelagem para o qual foram realizadas as simulações numéricas de potenciais acidentes com vazamento de óleo diesel marítimo.

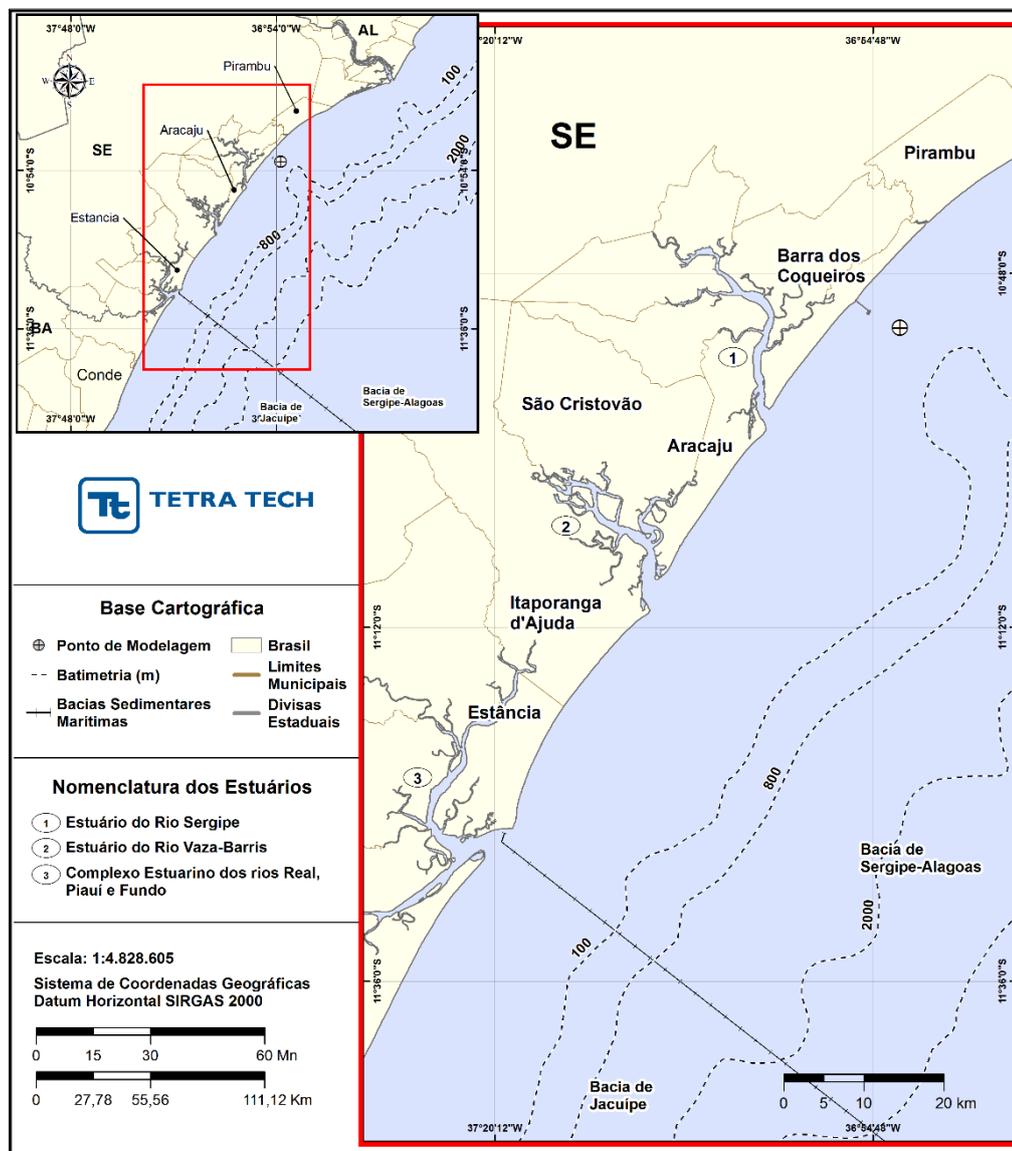


Figura 1 - Localização do ponto de modelagem, Estado do Sergipe.

A modelagem de derrame de óleo foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OILMAPDeep/3D¹, desenvolvido pela RPS². 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 grande escala, (c) campos de vento variáveis no tempo e no espaço e (d) caracterização físico-química do produto.

A caracterização dos padrões de circulação foi obtida a partir dos resultados do sistema de modelos numéricos Delft3D, implementado pela TETRA TECH na região de estudo para representar o domínio local, em conjunto com resultados do modelo global HYCOM - *HYbrid Coordinate Ocean Model* (domínio regional). O campo de ventos utilizado na modelagem de deriva de óleo foi determinado a partir de dados de reanálise do CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis* (SAHA *et al.*, 2010) composto com ventos locais observados na estação METAR³ de Aracaju (estação SBAR).

As simulações probabilísticas de derrame de óleo consideraram um ponto de modelagem, três volumes de derrame (pequeno, médio e pior caso) e duas condições sazonais (verão e inverno). As simulações foram conduzidas por 72 horas após o final do vazamento. Dentro do período das simulações probabilísticas, foram selecionadas datas representativas de diferentes condições para as simulações determinísticas, sendo condições de vento forte e vento fraco, nas marés alta e baixa.

A seguir, o Capítulo 2 descreve os cenários acidentais de óleo, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas são apresentados no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta as referências bibliográficas citadas do estudo. Em complementação, o Anexo A apresenta o modelo hidrodinâmico a partir do qual foram gerados os campos de corrente para o presente estudo. O Anexo B apresenta a descrição do modelo OILMAP.

¹ *Oil Spill Model and Response System*.

² *RPS Group* (www.rpsgroup.com| www.asascience.com)

³ REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica, www.redemet.aer.mil.br).

2. DADOS DE ENTRADA

Na modelagem de derrame de óleo diesel marítimo foi utilizado o modelo OILMAP, desenvolvido pela RPS. O OILMAP é um sistema de modelo desenvolvido para prever a trajetória e os processos de intemperismo atuantes sobre o óleo em ambientes aquáticos. A descrição mais detalhada deste modelo encontra-se no Anexo B.

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

- ✓ Localização geográfica do ponto de vazamento;
- ✓ Volume/Vazão do vazamento;
- ✓ Profundidade de vazamento;
- ✓ Duração da simulação;
- ✓ Tipo de óleo;
- ✓ Linha de costa;
- ✓ Batimetria;
- ✓ Tipo de ambiente (e.g., manguezais, rochas, praias);
- ✓ Campo de corrente;
- ✓ Campo de vento;
- ✓ Temperatura e salinidade da água do mar;
- ✓ Temperatura do ar;
- ✓ Parâmetros de simulação (e.g. número de partículas, número de camadas verticais, número de simulações determinísticas que compõe cada cenário probabilístico, passo de tempo, intervalo de saída, fator de vento, coeficiente de dispersão horizontal e vertical, entre outros).

Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo. Na modelagem foram considerados os processos de intemperismo descritos no Anexo B.

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados como dado de entrada na modelagem de derrame de óleo. Ressalta-se que o diâmetro das gotículas de óleo é calculado internamente pelo modelo OILMAP (Equação 3; Anexo B), assim como as informações de ondas (Equações 23 e 24; Anexo B).

Tabela 1 - Parâmetros numéricos utilizados como dados de entrada na modelagem de vazamento de óleo.

PARÂMETROS	VALOR UTILIZADO NO MODELO (OILMAP)
Localização do ponto de modelagem (SIRGAS 2000)	10°51'43" S / 36° 52' 58" W
Volume de Derrame	8,0 m ³ (pequeno)
	200,0 m ³ (médio)
	260,0 m ³ (pior caso)
Profundidade do Derrame	Superfície (0 m)
Tipo de Óleo	Óleo diesel marítimo (ver Item 2.7)
Tipo de Costa	Ver Item (ver Item 2.5)
Duração do Vazamento	Instantâneo
Duração da Simulação	72 horas
Passo de Tempo	30 minutos
Intervalo de Saída (Output)	30 minutos
Número de Partículas (Superfície)	1.000,0 (pequeno)
	2.000,0 (médio)
	3.600,0 (pior caso)
Volume de Cada Partícula (Superfície)	0,008 m ³ (pequeno)
	0,1 m ³ (médio)
	0,072 m ³ (pior caso)
Resolução da Grade <i>Habitat</i> (células)	250.000 (500 no eixo X e 500 no eixo Y)
Período da Simulação	Verão (Novembro a Janeiro)
	Inverno (Junho a Agosto)
Fator de deriva do vento (%)	3,50

Os subitens seguintes apresentam detalhes sobre os dados de entrada como campos de corrente e vento, perfil de salinidade e temperatura da água, períodos de simulação, domínio modelado e batimetria, localização do ponto de modelagem, volumes de derrame, características do óleo, critérios de parada adotados nas simulações e um resumo dos cenários simulados.

2.1 CAMPOS DE CORRENTE

Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte de óleo foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica implementada com o Delft3D-FLOW na região da Bacia de Sergipe-Alagoas, em conjunto com resultados do modelo HYCOM, para representar o domínio regional.

A implementação da modelagem hidrodinâmica, incluindo análise de dados de corrente, é apresentada no Anexo A deste relatório.

2.2 CAMPOS 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 CFSR (SAHA *et al.*, 2010), com resolução espacial de $0,3^\circ$ e resolução temporal horária.

A CFSR contempla em seu processamento o acoplamento entre o oceano e a atmosfera, possui um modelo interativo de gelo marinho e também incorpora uma técnica de assimilação de dados de satélite, através de interpolação estatística, disponibilizando assim, produtos globais de reanálise com resolução espacial de $0,3^\circ$ e resolução temporal horária. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo também seus efeitos sobre o sistema climático terrestre. Esta série de fatores difere a CFSR de outros produtos de reanálise, permitindo a qualidade da representação dos campos atmosféricos em alta resolução espacial e temporal

De forma a incorporar o sinal de ventos costeiros na região do entorno dos pontos de modelagem, foram incluídos os dados dos ventos observados na estação METAR de Aracaju (estação SBAR). Este processo foi realizado com a utilização de um filtro de interpolação aplicado sobre um raio de influência em torno da estação, com decaimento senoidal da influência dos dados medidos com a distância. A aplicação deste filtro permitiu a incorporação dos dados METAR ao campo da CFSRS a cada hora de maneira coerente. A análise mais detalhada destes dados é apresentada no Anexo A.

2.3 PERÍODOS DE SIMULAÇÃO

Para avaliar a sazonalidade das forçantes ambientais nos padrões de circulação e transporte, foram definidos dois períodos compreendendo os meses de verão (novembro de 2008 a janeiro de 2009) e inverno (junho a agosto de 2009).

A seleção destes períodos teve como base as análises climatológicas do regime de ventos na Bacia de Sergipe-Alagoas, apresentadas junto ao relatório da modelagem hidrodinâmica (Anexo A).

2.4 DOMÍNIO MODELADO

Na modelagem de óleo não foi utilizada uma grade *land-water* fixa, uma vez que o modelo OILMAP tem a opção de se utilizar o *shapefile* da linha de costa para definir os ambientes de água e costa. No presente estudo, a linha de costa utilizada é a do Projeto MAREM (IBP, 2016), discutido em mais detalhe no item 2.5.

Assim, o OILMAP permite ao usuário definir o número de células sem definir o domínio de uma grade e, somente após a computação de todas as trajetórias determinísticas que compõe um cenário probabilístico, o modelo calcula a resolução da grade utilizada no cálculo dos resultados probabilísticos.

Para representar melhor o domínio da modelagem foi utilizado 250.000.0 de células (500 no eixo X e 500 no eixo Y). Este valor foi aplicado para cada cenário simulado, de acordo com a área total de deslocamento do óleo.

A vantagem deste método computacional é a obtenção da máxima resolução dos resultados, uma vez que a resolução é definida somente após ter sido calculado o domínio efetivo de todas as trajetórias que compõem o cenário probabilístico.

Ressalta-se que o modelo permite a adoção de uma resolução fixa, através da predefinição da grade *land-water*, porém, o método escolhido apresenta algumas vantagens como a obtenção da melhor resolução possível e eliminação de possíveis perdas de resultados devido à trajetória do óleo alcançar o final de uma grade previamente definida.

Outra vantagem é a maior precisão do toque do óleo na costa. Neste caso, o modelo computa o toque do óleo na costa quando a partícula de óleo alcança a linha que define

a costa (arquivo *shapefile*). Enquanto que, na abordagem da grade fixa, o toque é considerado quando a partícula alcança a célula de costa, a qual, a depender domínio da modelagem, pode apresentar resolução superior a 2 km. Portanto, neste caso, o toque pode ser computado considerando a chegada da partícula em uma região localizada à cerca de 2 km da costa.

Os dados batimétricos são os mesmos utilizados na modelagem hidrodinâmica, conforme apresentado no Anexo A.

2.5 TIPOS DE COSTA

Para a definição dos tipos de costa utilizados na modelagem, correlacionou-se os ambientes costeiros disponíveis no OILMAP com os ambientes agrupados no Índice de Sensibilidade Ambiental à Derrames de Óleo em Ambientes Costeiros e Estuarinos (ISL) no Mapeamento Ambiental para Resposta à Emergência no Mar – MAREM (IBP, 2016).

O projeto MAREM foi executado no âmbito do Acordo de Cooperação Técnica (ACT) assinado entre o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP). Dentre os produtos resultantes do projeto, estabeleceu-se o ISL para o litoral brasileiro, que é usado como ferramenta para o planejamento e gestão de uma operação responsiva à acidentes envolvendo derramamento de óleo no mar.

Conforme apresentado na Tabela 2, o OILMAP apresenta 5 tipos básicos de ambientes costeiros: costão rochoso, praia de cascalho, praia arenosa, planície de maré e manguezal, subdivididos em até 3 classes, variando a largura que define a faixa de deposição do óleo ou o subtipo de ambiente. Os diferentes tipos e subtipos de costa, junto à viscosidade do óleo, definem a capacidade máxima de retenção de óleo do ambiente. A deposição do óleo cessa quando é alcançada a capacidade de retenção do ambiente.

Tabela 2 - Características dos ambientes costeiros utilizados no OILMAP.

Tipo de Costa (Português)	Tipo de Costa (Inglês)	Extensão (m)	Espessura Máxima do Óleo Retida (mm)		
			Óleo Leve (<30cSt)	Óleo Médio (30-2000cSt)	Óleo pesado (>2000cSt)
Encosta	<i>Rock Clift/Ledge</i>	1	1	2	2
Costão Rochoso (abrigado)	<i>Rock (sheltered)</i>	3	1	5	10
Costão Rochoso (exposto)	<i>Rock (exposed)</i>	3	1	2	10
Cascalho / Matacão (estreito)	<i>Gravel/Cobble (narrow)</i>	3	2	9	15
Cascalho / Matacão (largo)	<i>Gravel/Cobble (wide)</i>	10	2	9	15
Praia arenosa (estreita)	<i>Sand (narrow shore)</i>	5	4	17	25
Praia arenosa (larga)	<i>Sand (wide shore)</i>	20	4	17	25
Planície de Maré (estreita)	<i>Tidal Flat (narrow)</i>	15	3	6	10
Planície de Maré (larga)	<i>Tidal Flat (wide)</i>	200	3	6	10
Manguezal (estreito)	<i>Marsh (narrow)</i>	50	6	30	40
Manguezal (largo)	<i>Marsh (wide)</i>	200	6	30	40

Observa-se, na Tabela 2 que, quanto maior a viscosidade do óleo, maior será a espessura que pode ser depositada, assim como quanto maior a largura do ambiente, maior a quantidade de óleo que pode ser depositado. Para correlacionar as informações de ISL com os tipos de costa do OILMAP, considerou-se as semelhanças geomorfológicas entre os dois conjuntos de informações.

Na Tabela 3 são apresentados os ambientes e seu respectivos ISL conforme o MAREM (IBP, 2016). A Tabela 4, por sua vez, mostra a seleção dos tipos de costa do modelo OILMAP com base na descrição dos ambientes do MAREM.

Tabela 3 - Descrição dos ambientes agrupados e seus respectivos ISL.

ISL	DESCRIÇÃO
1	Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos; Falésias em rochas sedimentares, expostas; Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas
2	Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos; Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)
3	Praia dissipativa de areia média a fina, exposta; Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach"); Escarpas e taludes íngremes
4	Praia de areia grossa; Praia intermediária de areia fina a média, exposta; Praia de areia fina a média, abrigada
5	Praia mista de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais; Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação; Recifes areníticos em franja
6	Praia de cascalho (seixos e calhaus); Costa de detritos calcários; Depósito de tálus; Enrocamentos (rip-rap, guia corrente, quebra-mar) expostos; Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)
7	Planície de maré arenosa exposta; Terraço de baixa-mar
8	Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada; Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada; Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados; Enrocamentos (rip-rap e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados
9	Planície de maré arenosa/ lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas; Terraço de baixa-mar lamoso abrigado; Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
10	Deltas e barras de rio vegetadas; Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas; Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado, apicum; Marismas; Manguezal (mangues frontais e mangues de estuário)

Tabela 4 - Classificação dos tipos de costa do MAREM nos tipos de costa disponíveis no banco de dados do modelo OILMAP.

ISL	AMBIENTE GRADE HABITAT OILMAP
1	Rock Cliff/Ledge
2	Rock (exposed)
3	Sand (wide shore)
4	Sand (wide shore)
5	Gravel/Cobble (wide)
6	Gravel/Cobble (wide)
7	Tidal Flat (wide)
8	Rock (sheltered)
9	Tidal Flat (wide)
10	Marsh (wide)

Os ambientes do ISL 1 foram classificados como o ambiente de encosta. Esta associação foi realizada devido a presença do ambiente de costão rochoso liso de alta declividade na classificação do ISL. Os ambientes do ISL 2 foram agrupados dentro do OILMAP como costão rochoso exposto, ambiente este existente dentro da classificação do ISL 2.

Os ambientes do ISL 3 e 4 foram classificados no OILMAP como praia arenosa (larga). Esta classificação se deu já que ambientes praia são caracterizados como regiões deposicionais de areia.

Para o ISL 5 e 6 utilizou-se a classificação do OILMAP de cascalho/ matacão (largo). Dentre as duas opções deste ambiente no OILMAP, optou-se por utilizar a classificação da praia de cascalho larga.

Os ambientes dos ISL 7 e 9 foram representados no OILMAP pela planície de maré (larga), o ISL 8 foi classificado como costão rochoso abrigado e o ISL 10 classificado como manguezal. A classificação destes ambientes justifica-se pela presença nos dois conjuntos de dados.

Para todos os casos optou-se pela utilização de ambientes de subtipo “largo”. Esta classificação foi norteada pela visualização via imagens de satélite da costa brasileira, onde verificou-se que a largura dos ambientes que podem estar em contato com o óleo supera, na maior parte dos casos, a largura definida como estreito para todos os ambientes que apresentam esta subdivisão.

A Figura 3 apresenta o mapa com a classificação dos ambientes costeiros utilizados no OILMAP.

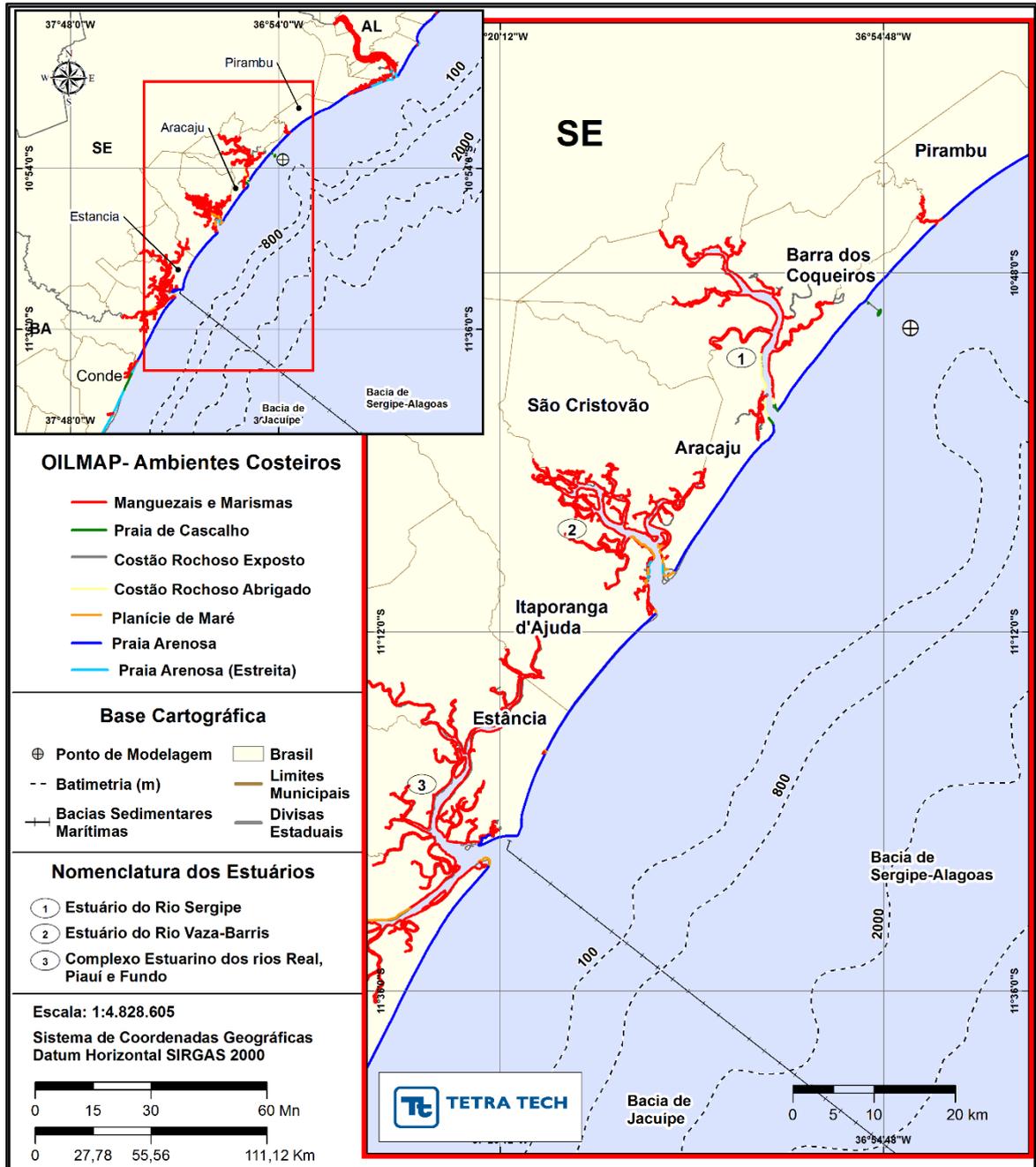


Figura 2 - Ambientes costeiros utilizados no OILMAP.

2.6 PONTO DE MODELAGEM E VOLUMES DE DERRAME

A Tabela 5 lista o ponto considerado na modelagem e suas coordenadas geográficas (SIRGAS 2000).

Tabela 5 - Coordenadas (SIRGAS 2000) e lâmina d'água do ponto de modelagem.

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE
FSRU	10° 51' 43"S	36° 52' 58"W

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

- a- Pequeno: 8,0 m³;
- b- Médio: 200,0 m³;
- c- Pior caso: 260 m³.

O volume de pior caso foi definido como o volume correspondente a um vazamento de óleo diesel marítimo a partir da colisão de duas embarcações de apoio ao FSRU. Todas as hipóteses acidentais foram conduzidas considerando-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação e com a liberação do produto ocorrendo a partir da superfície.

2.7 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Com relação às propriedades do óleo diesel marítimo, foram adotadas informações fornecidas pelo Golar (Tabela 6). Com base nas características deste óleo, foi selecionado um óleo no banco de dados do OILMAP, a partir do qual foram alterados os valores dos parâmetros conhecidos do óleo, gerando um novo tipo no banco de dados.

Tabela 6 - Características do óleo.

PARÂMETRO	GOLAR
Nome do óleo	Óleo Diesel Marítimo
Densidade (kg/m ³) a 15°C	0,90
Viscosidade dinâmica (cP)	11 (a 40°C)

2.8 CRITÉRIO DE PARADA ADOTADO

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 72 horas após o final do vazamento, ou seja, a duração das simulações foi de 72 horas.

Este tempo corresponde a 12 horas além do tempo máximo preconizado no item 2.2 do Anexo III da Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008), de 60 horas, para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência, com valores de CEDRO (Capacidade Efetiva Diária de Recolhimento) iguais a 8.000 m³/dia para Zona Costeira.

Ressalta-se que todos os cenários foram simulados considerando derrames de óleo a partir da superfície. A espessura mínima de existência de óleo em superfície adotada no presente estudo foi de 0 mm, ou seja, não se adotou nenhum critério de corte de espessuras.

2.9 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações probabilísticas foram realizadas considerando dois períodos; verão (novembro a janeiro) e inverno (junho a agosto).

Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteorológicas e oceanográficas, foi realizada uma série de 600 simulações determinísticas em cada cenário probabilístico. Os instantes iniciais de todo o conjunto de simulações determinísticas que compõem os cenários probabilísticos são definidos automaticamente pelo modelo, através da seleção das datas de início espaçadas regularmente no tempo ao longo do período sazonal definido. Desta forma, todas as simulações probabilísticas

apresentam um mesmo conjunto de datas de início dos derrames e as datas de início não se repetem.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos cenários simulados neste estudo.

Tabela 7 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrame de óleo na Baía de Sergipe-Alagoas.

CENÁRIOS	ÓLEO	VOLUME (m ³)	DURAÇÃO DO DERRAME	TEMPO DE SIMULAÇÃO	PERÍODO DE SIMULAÇÃO
FSRU_8_VER_72H	Óleo Diesel Marítimo	8,0	Instantâneo	72 horas	Novembro a janeiro
FSRU_200_VER_72H		200,0			Novembro a janeiro
FSRU_PC_VER_72H		260,0			Novembro a janeiro
FSRU_8_INV_72H		8,0			Junho a agosto
FSRU_200_INV_72H		200,0			Junho a agosto
FSRU_PC_INV_72H		260,0			Junho a agosto

3. RESULTADOS DA MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas de vazamento de óleo diesel marítimo. Em nenhuma das simulações realizadas, levaram-se em consideração ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Emergência.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados probabilísticos mais críticos por cenário simulado, considerando a maior probabilidade de toque na costa e tempo mínimo e médio de chegada do óleo à costa. As extensões de costa com probabilidade de chegada do óleo e área total coberta pela mancha de óleo são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8 - Resumo dos resultados mais críticos das simulações probabilísticas.

PONTO	VOLUME	PERÍODO	PARÂMETRO	VALORES	MUNICÍPIOS	UF
FSRU	8 m ³	VER	Prob. (%)	12,7	Aracaju	SE
			Tempo Min. (horas)	20	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Méd. (horas)	44	Aracaju	SE
		INV	Prob. (%)	15,8	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Min. (horas)	15	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Méd. (horas)	29	Aracaju	SE
FSRU	200 m ³	VER	Prob. (%)	31,7	Aracaju	SE
			Tempo Min. (horas)	19	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Méd. (horas)	33	Aracaju	SE
		INV	Prob. (%)	26,8	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Min. (horas)	14	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Méd. (horas)	27	Aracaju	SE
FSRU	Pior Caso	VER	Prob. (%)	53,5	Aracaju	SE
			Tempo Min. (horas)	16	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Méd. (horas)	30	Aracaju	SE
		INV	Prob. (%)	29,5	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Min. (horas)	14,0	Barra dos Coqueiros	SE
			Tempo Méd. (horas)	28,0	Barra dos Coqueiros	SE

Tabela 9 - Resultados das simulações probabilísticas (extensão da costa com probabilidade de toque).

CENÁRIO	EXTENSÃO DE TOQUE NA COSTA (km)
FSRU_8_VER_72H	62,82
FSRU_8_INV_72H	76,21
FSRU_200_VER_72H	84,96
FSRU_200_INV_72H	97,32
FSRU_PC_VER_72H	110,06
FSRU_PC_INV_72H	118,70

O resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram os cenários probabilísticos, na forma de uma tabela com os valores médios, é apresentado a seguir (Tabela 10). A partir da análise deste resultado, observa-se que a evaporação ocorre de forma mais intensa no período de verão, devido as maiores temperaturas do respectivo período. A porcentual do volume degradado é similar entre os cenários simulados (<0,5%).

No geral, os processos mais importantes para a retirada do óleo da superfície da água foram a evaporação. Para os volumes médio e de pior caso, a interação com a linha foi responsável por retirar entre 8 e 17% da massa de óleo da água. No geral, após 72 horas de simulação restam, em média, menos que 5% do volume de óleo na superfície da água inicialmente derramado.

Tabela 10 - Média da distribuição de massa para os cenários probabilísticos.

CENÁRIOS	SUPERFÍCIE (% média)	COLUNA D'ÁGUA (% média)	COSTA (% média)	EVAPORADO (% média)	DEGRADADO (% média)
FSRU_8_VER_72H	3,50	6,55	1,29	88,24	0,42
FSRU_8_INV_72H	4,36	4,14	7,68	83,43	0,39
FSRU_200_VER_72H	3,23	8,91	8,68	78,68	0,49
FSRU_200_INV_72H	4,10	5,35	15,72	74,42	0,42
FSRU_PC_VER_72H	3,07	9,13	10,41	76,90	0,49
FSRU_PC_INV_72H	4,02	5,32	17,14	73,11	0,42

Os resultados das simulações são apresentados de forma gráfica, a seguir, com os intervalos de probabilidade da presença de óleo na superfície da água e na costa e tempos de deslocamento do óleo na superfície da água; menor tempo de toque na costa são apresentados a seguir para cada um dos volumes simulados.

Em todas as ilustrações de intervalos de probabilidade de óleo na água e na costa, 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 óleo 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 (BRASIL, 2008). Para tempos superiores a estes, foram selecionados intervalos que melhor se adequaram à visualização da evolução dos derrames na área de estudo.

Para melhorar a visualização dos resultados de costa, as figuras de costa, apresentadas neste relatório (probabilidade), são geradas a partir da intersecção dos resultados do OILMAP com a linha de costa, transformando o resultado de polígono para linha. As escalas de cores adotadas foram selecionadas de forma a permitir uma melhor diferenciação dos intervalos de probabilidade.

3.1.1 Simulações Probabilísticas – Verão

A seguir, são apresentados os resultados probabilísticos com derrame de volume pequeno (8 m^3) para o período de verão. A trajetória do óleo ocorre predominantemente para sul -sudoeste do ponto de modelagem, com os contornos de probabilidade restritos ao litoral do Estado de Sergipe.

A probabilidade de toque ocorreu na faixa de litoral sergipano que se estende do Município de Barra dos Coqueiros até Itaporanga d'Ajuda, sendo as maiores probabilidades de toque (12,7%) identificadas no Município de Aracaju (SE).

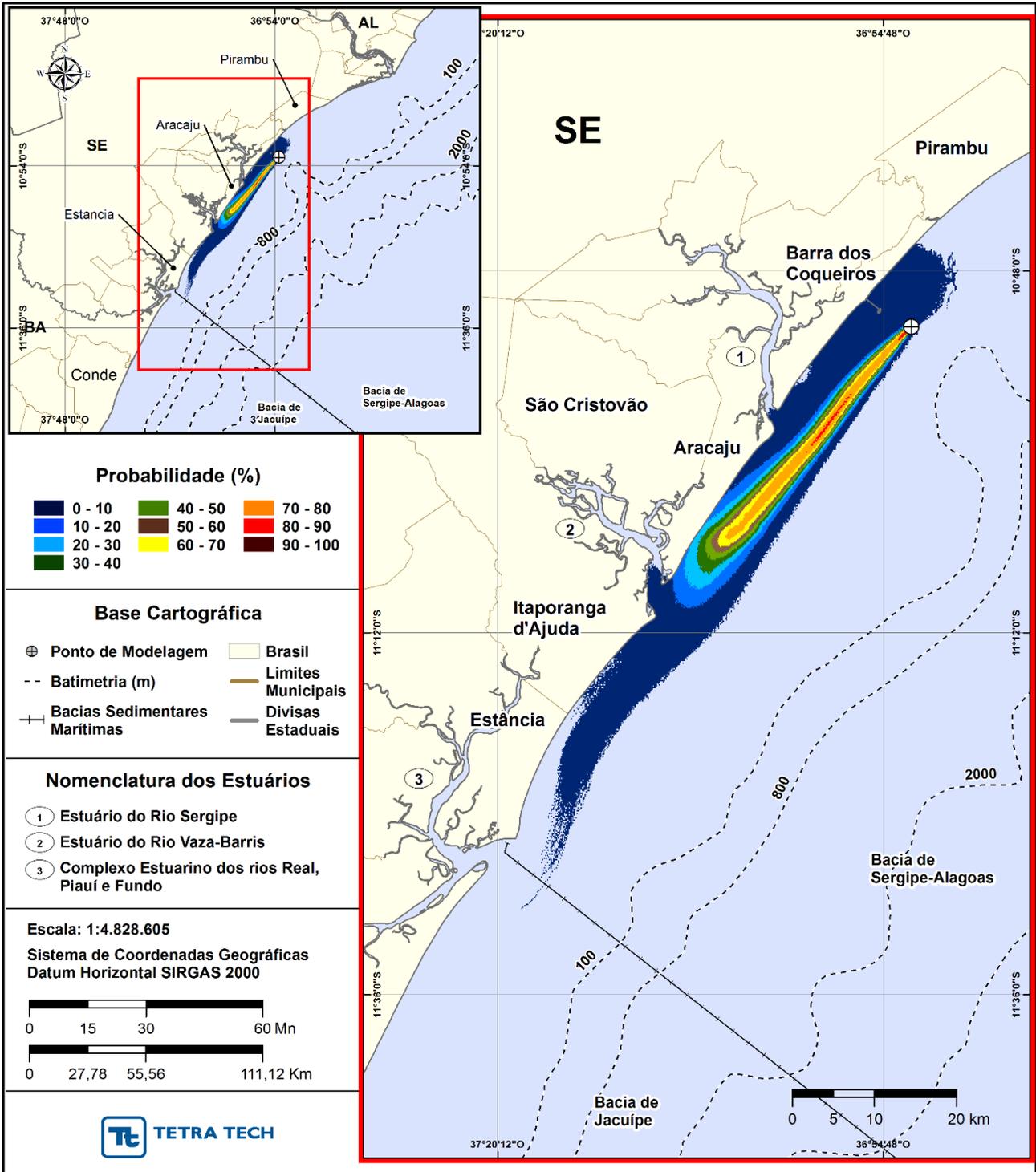


Figura 3 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

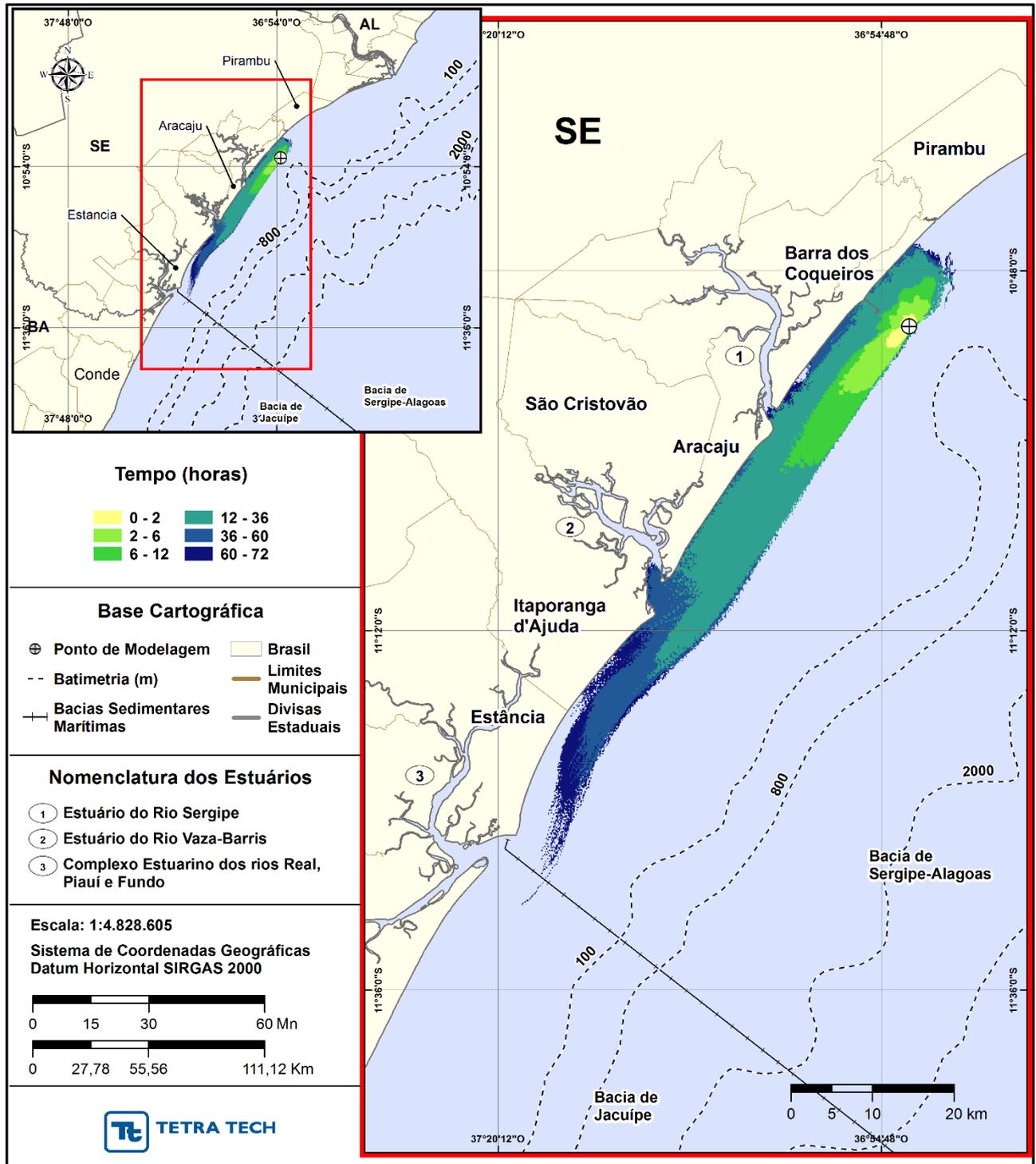


Figura 4 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

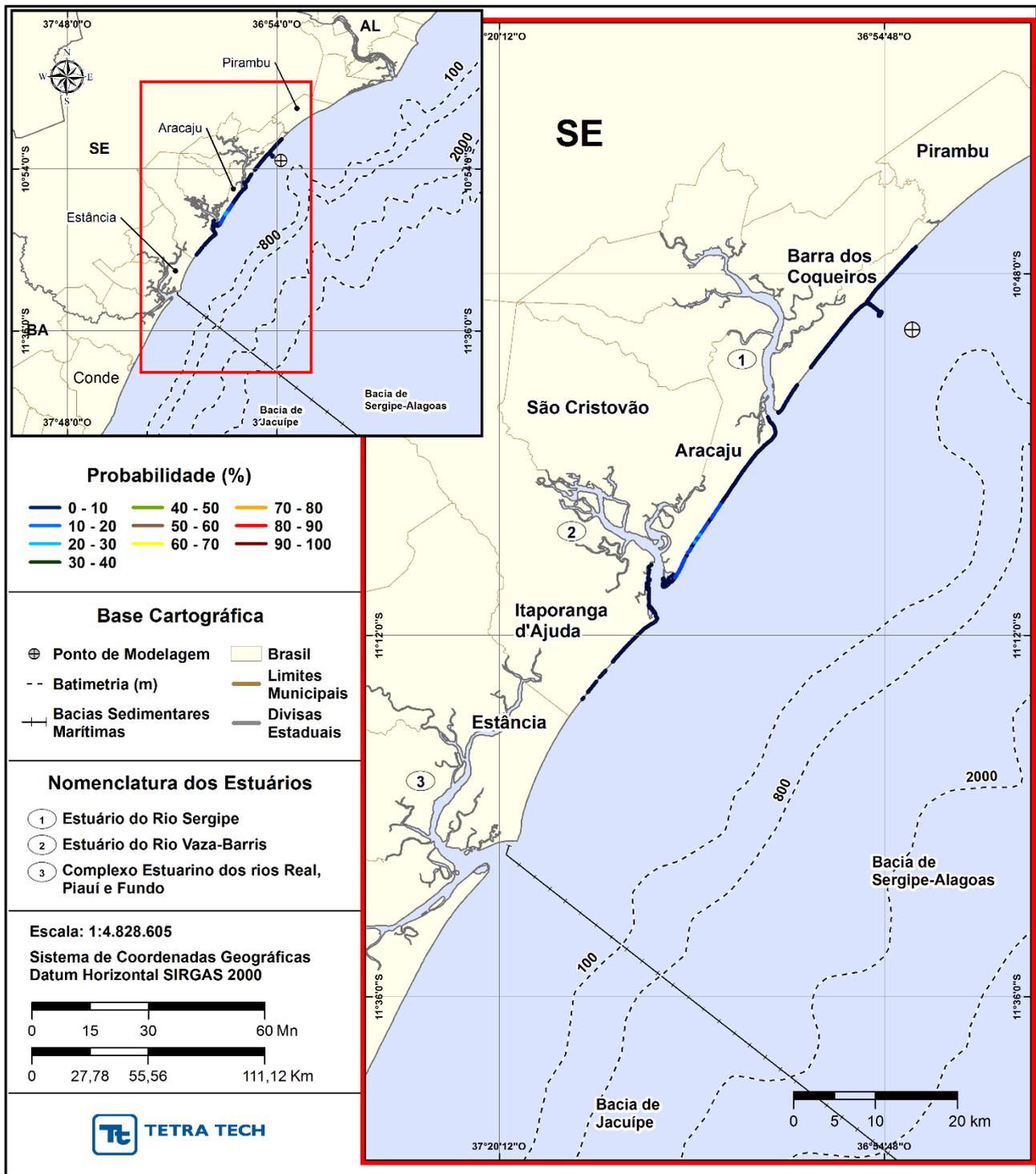


Figura 5 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

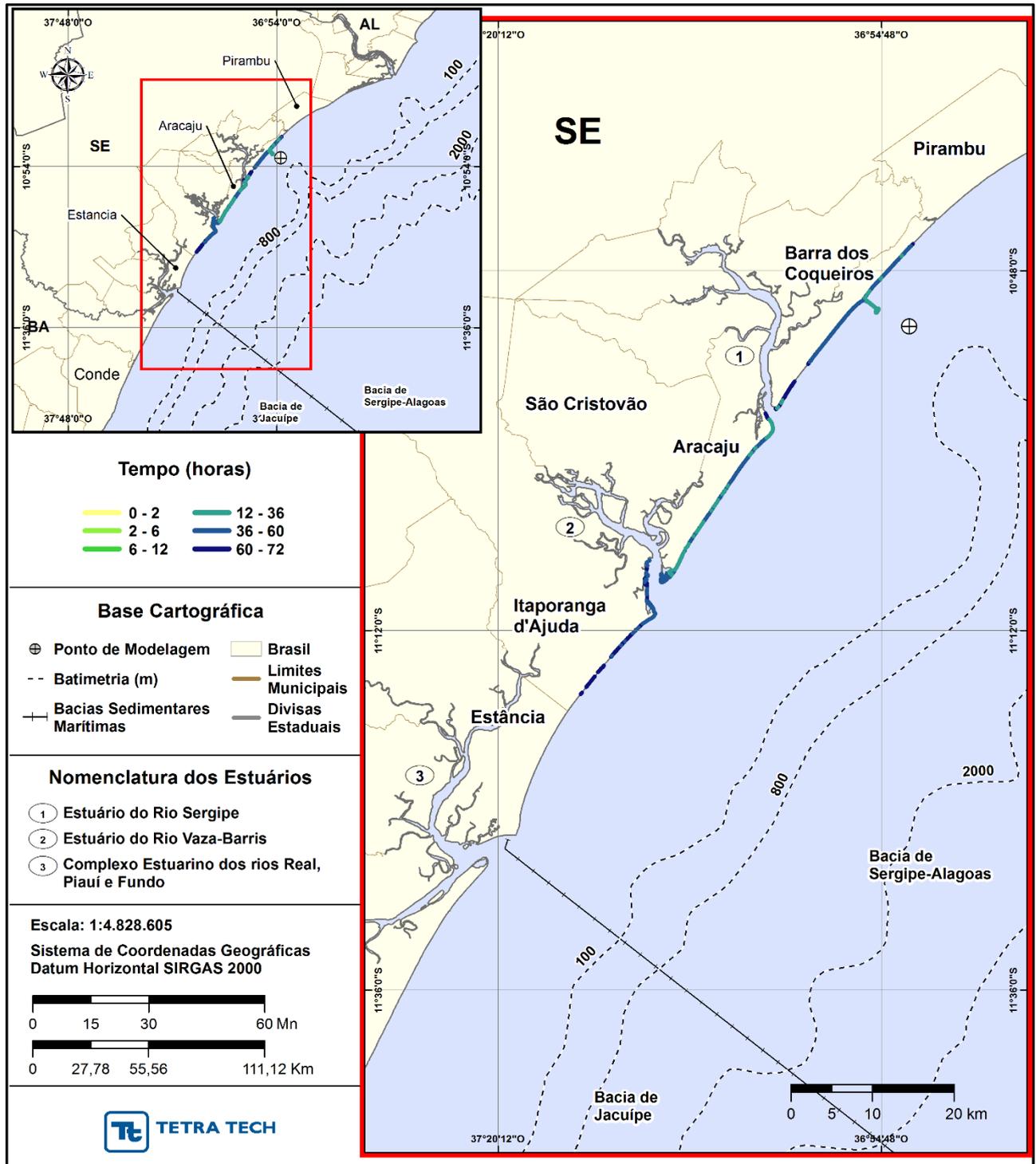


Figura 6 - Cenário FSRU_8_VER_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

A seguir, apresenta-se um resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno para verão, na forma de um diagrama *boxplot* (Figura 7) e tabela com valores mínimo, médio e máximo (Tabela 11). A análise demonstra que, no geral, no período de verão, a evaporação é principal processo de retirada do óleo da superfície da água, seguida da coluna d'água (na forma de entranhamento).

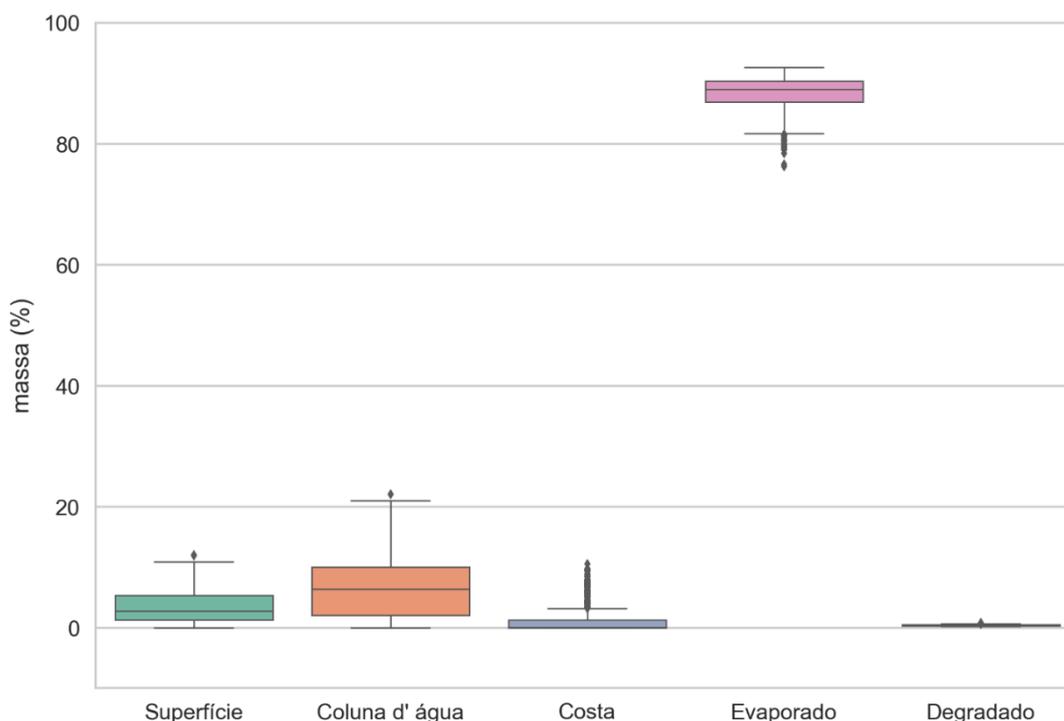


Figura 7 - Diagrama *boxplot* com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).

Tabela 11 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão.

	Superfície (%)	Coluna d'água (%)	Costa (%)	Evaporado (%)	Degradado (%)
Mínimo	0,02	0,00	0,00	76,25	0,22
Médio	3,50	6,55	1,29	88,24	0,42
Máximo	12,02	22,10	10,57	92,60	0,79

A seguir, são apresentados os resultados probabilísticos com derrame de volume médio (200 m³) para o período de verão. Os resultados demonstraram uma área pouco maior em relação ao derrame de volume pequeno e, a trajetória do óleo ocorre predominantemente para sul-sudoeste do ponto de modelagem, com os contornos de probabilidade principalmente restritos ao litoral do Estado de Sergipe, e uma pequena porção no norte do Estado da Bahia.

A probabilidade de toque ocorreu na faixa de litoral que se estende do Município de Barra dos Coqueiros (SE) até Jandaíra (BA), sendo as maiores probabilidades de toque identificadas nos municípios de Aracaju e Itaporanga d'Ajuda.

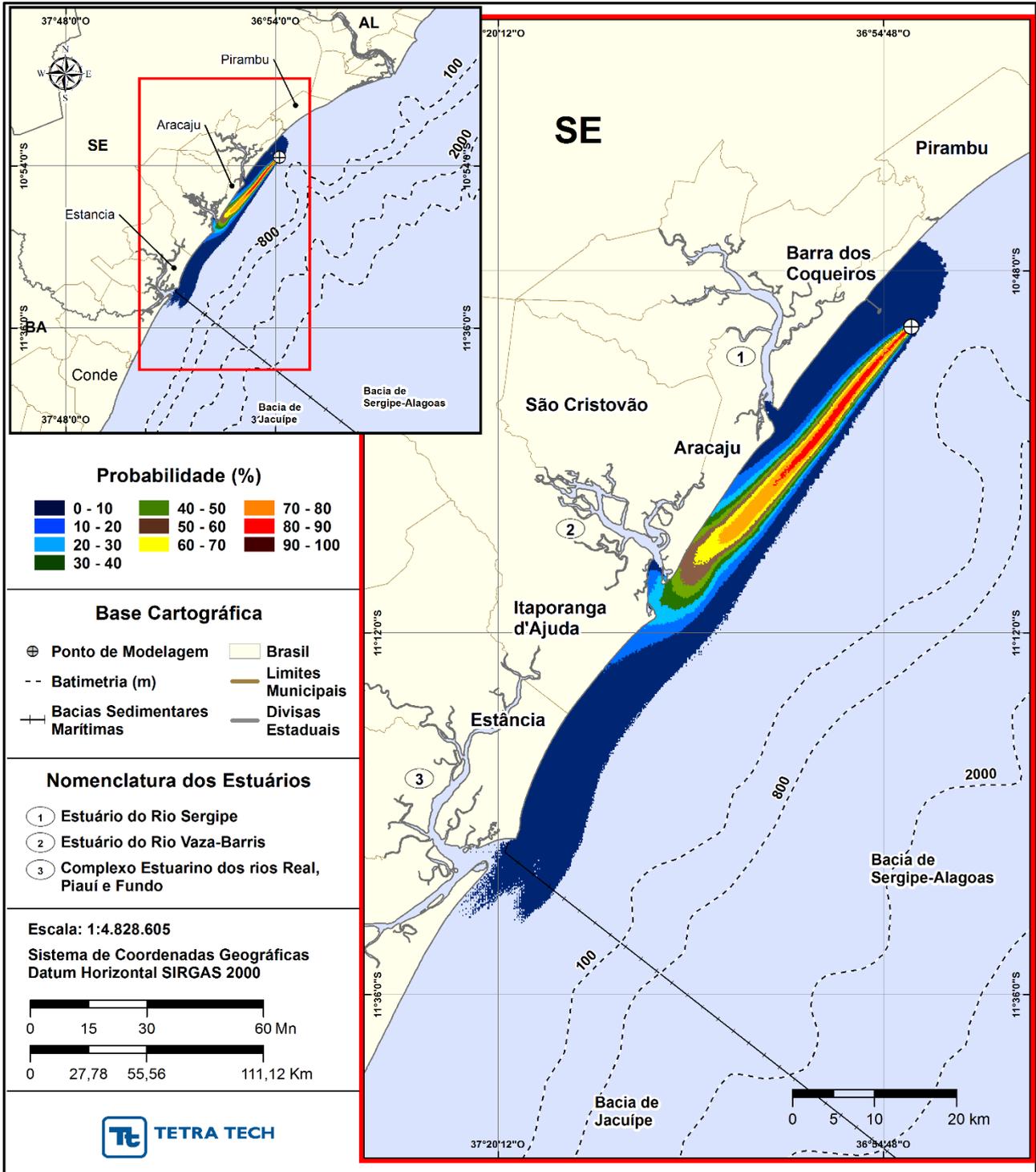


Figura 8 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

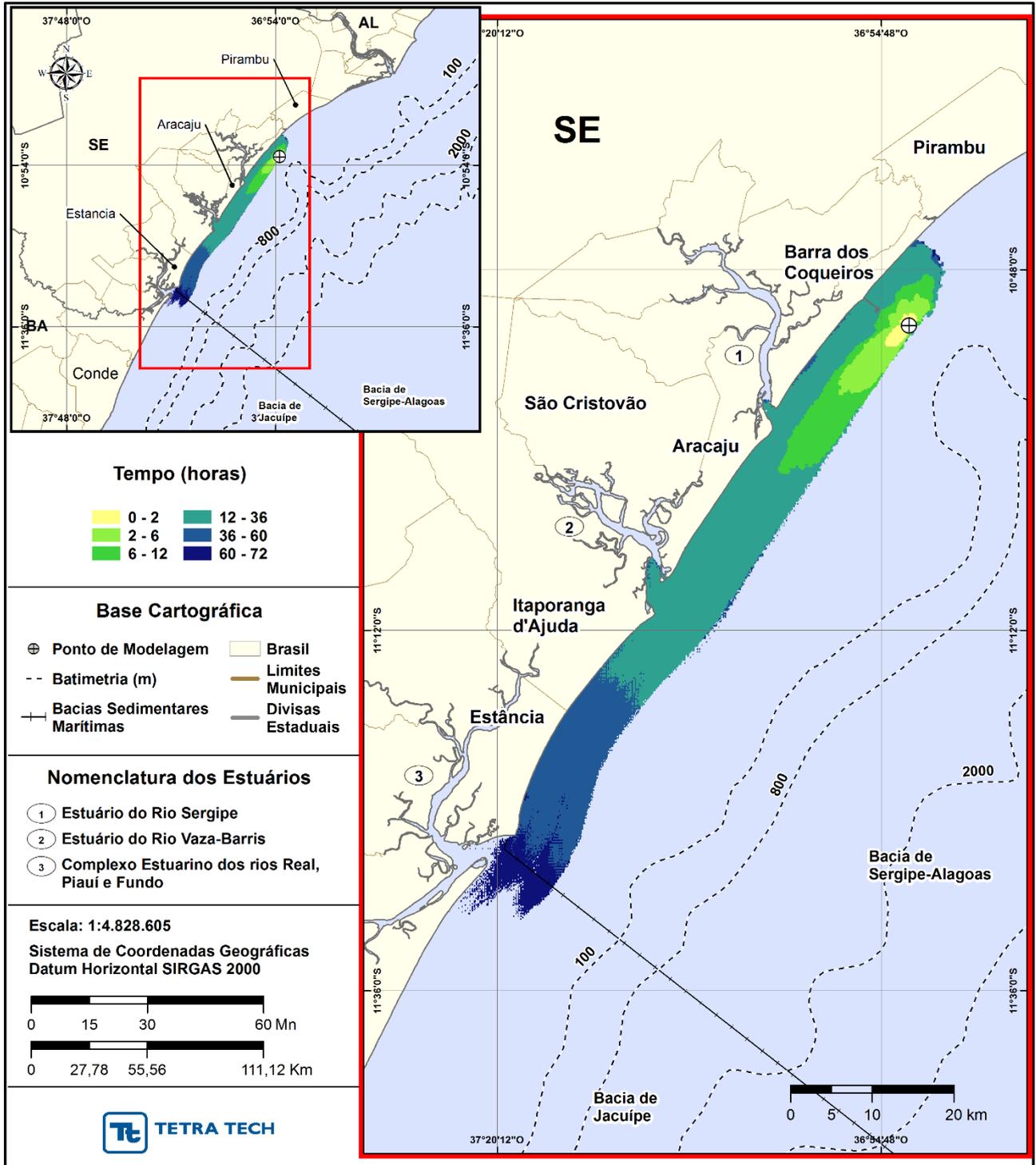


Figura 9 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

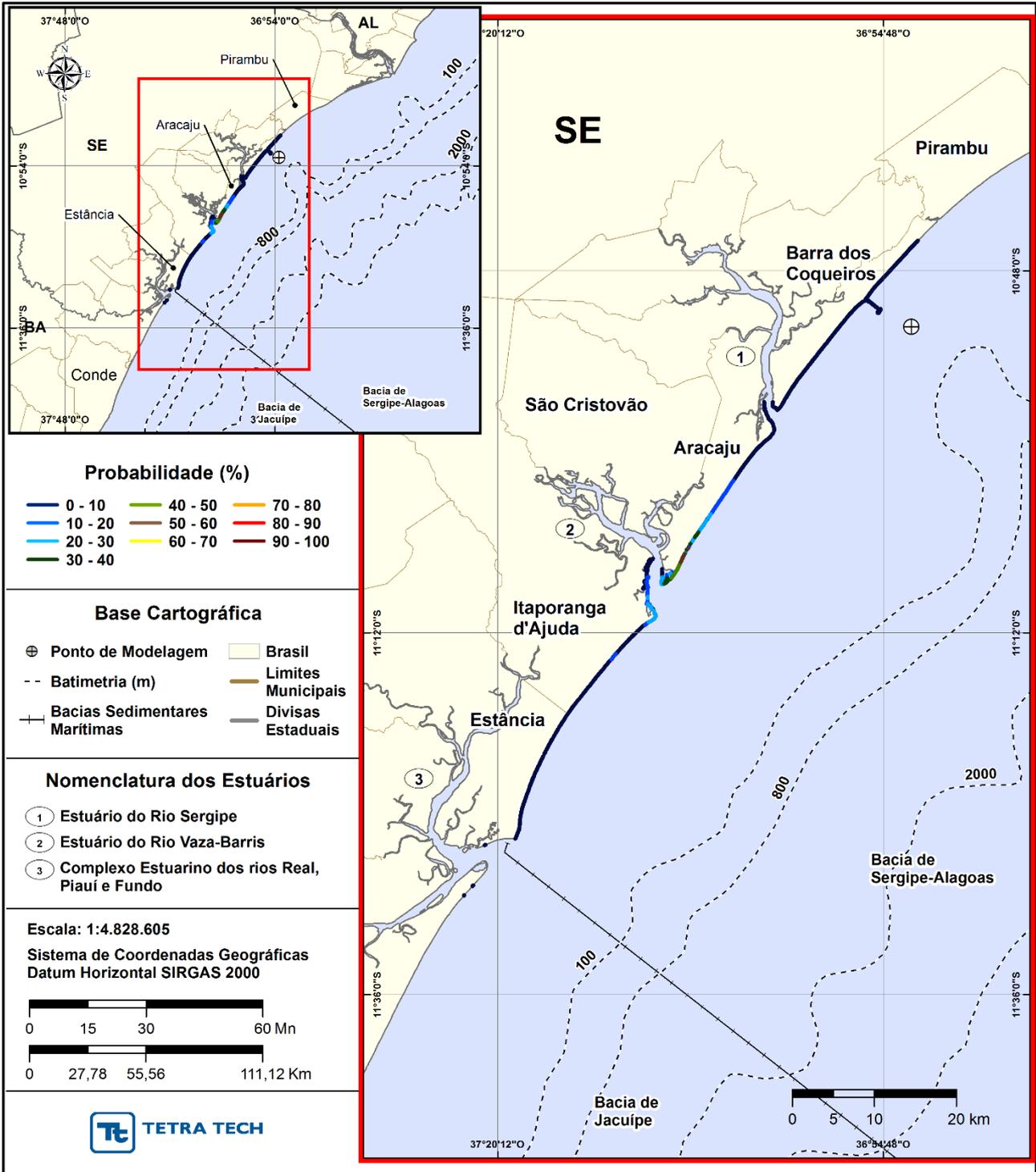


Figura 10 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

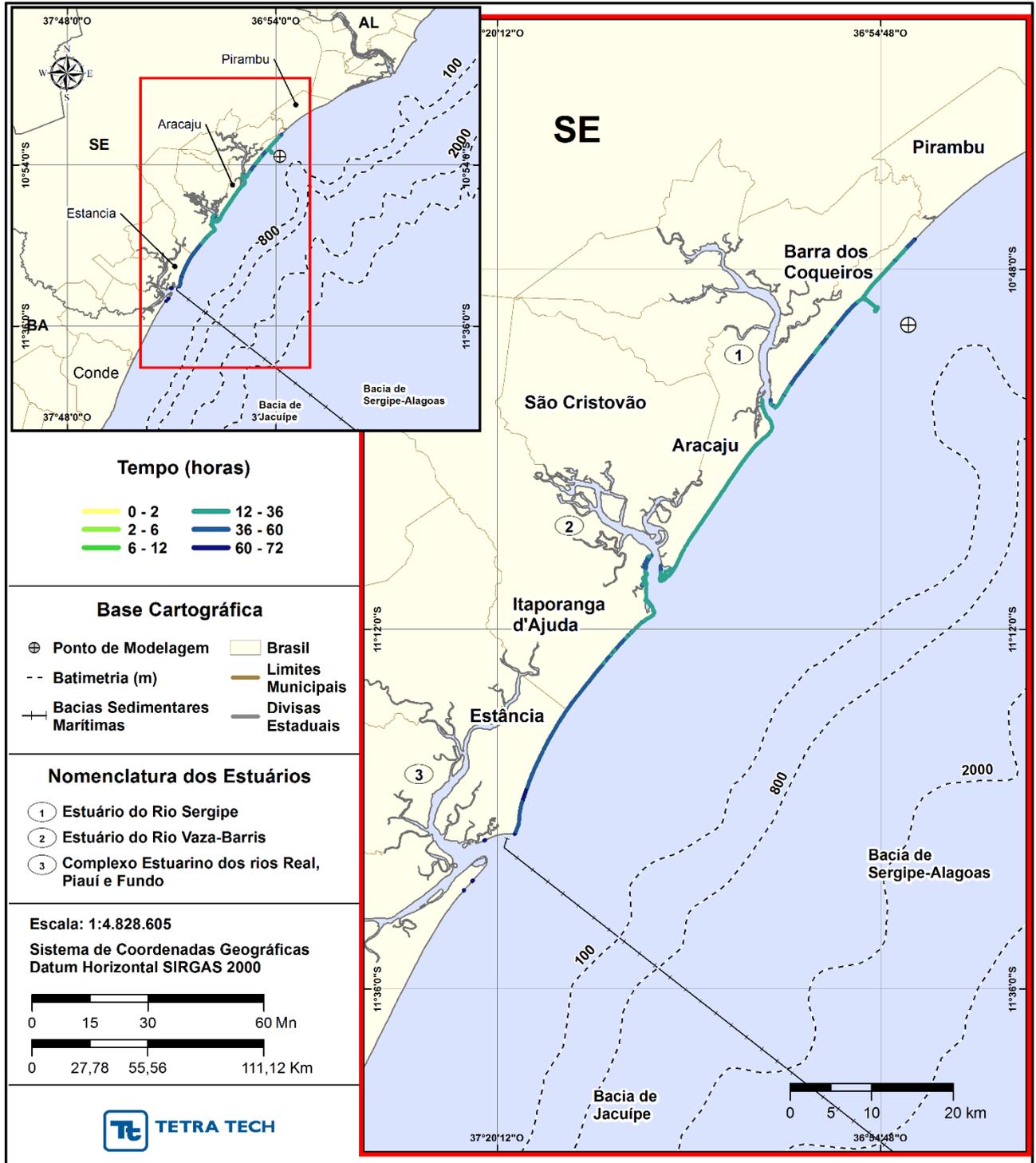


Figura 11 - Cenário FSRU_200_VER_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

A seguir, apresenta-se um resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram o cenário probabilístico com derrame de volume médio para verão, na forma de um diagrama *boxplot* (Figura 12) e tabela com valores mínimo, médio e máximo (Tabela 12). As análises dos balanços de massa demonstram que, no geral, no período de verão, a evaporação é o principal processo de retirada do óleo da superfície da água, seguida da interação com a costa e com a coluna d'água (na forma de entranhamento).

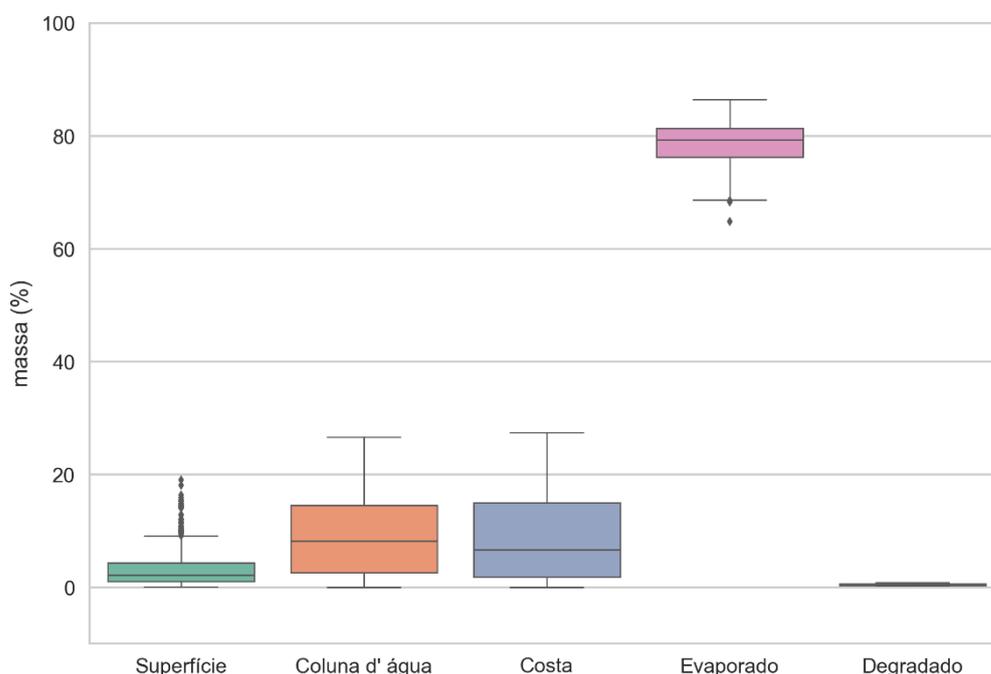


Figura 12 - Diagrama *boxplot* com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no verão. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).

Tabela 12 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no verão.

	Superfície (%)	Coluna d'água (%)	Costa (%)	Evaporado (%)	Degradado (%)
Mínimo	0,06	0,00	0,00	64,87	0,25
Médio	3,23	8,91	8,68	78,68	0,49
Máximo	19,01	26,69	27,45	86,51	0,83

A seguir, são apresentados os resultados probabilísticos do período de verão referentes ao volume de pior caso. Os resultados demonstraram uma área maior com probabilidades similares às de volume médio (200,00 m³) e, a trajetória do óleo ocorre predominantemente para sul-sudoeste do ponto de modelagem, com os contornos de probabilidade principalmente restritos ao litoral do Estado de Sergipe, além de uma pequena porção no norte da Bahia.

A probabilidade de toque ocorreu na faixa de litoral que se estende do Município de Barra dos Coqueiros (SE) até Jandaíra (BA), sendo as maiores probabilidades de toque identificadas nos municípios de Aracaju e Itaporanga d'Ajuda (SE).

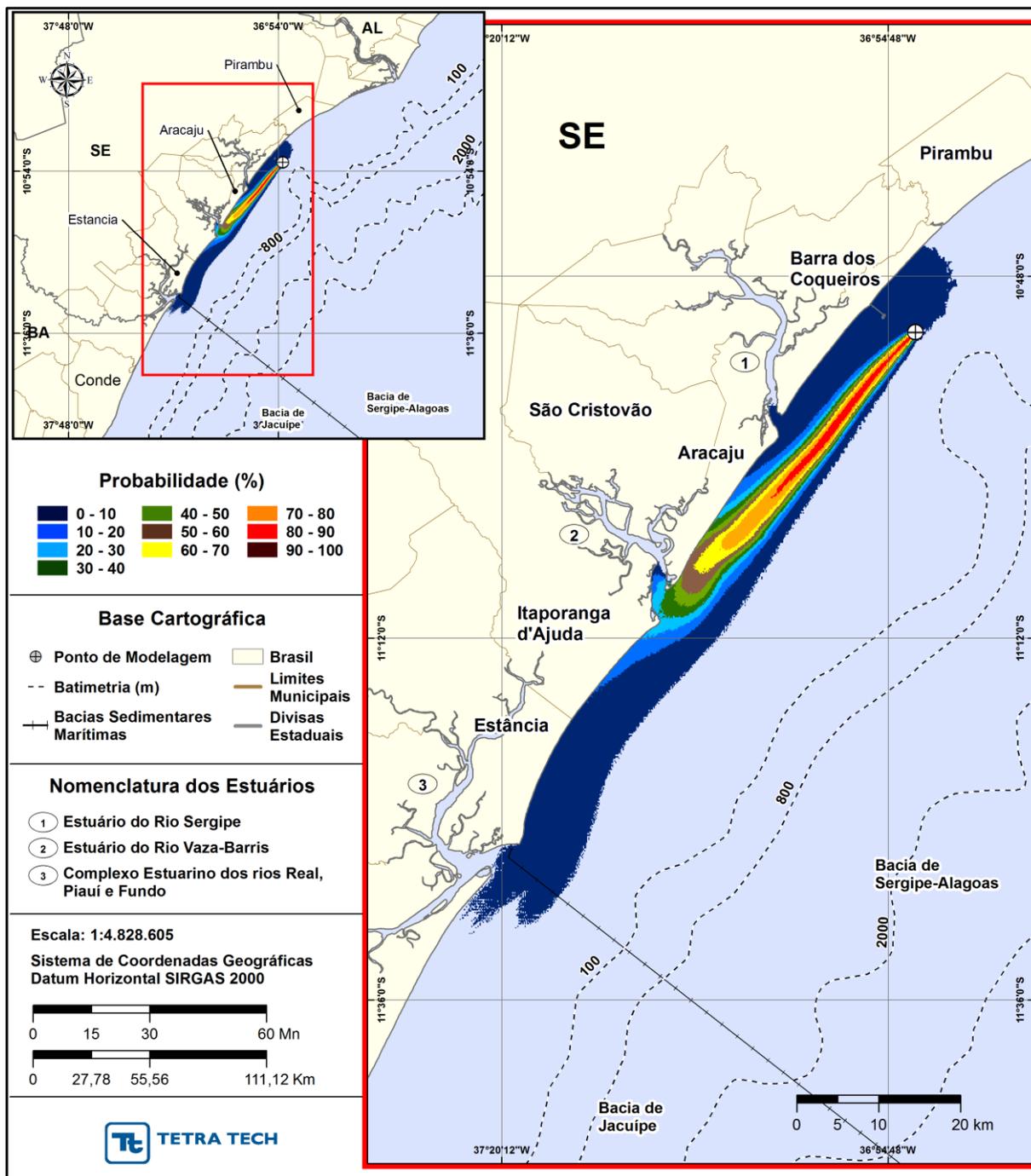


Figura 13 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

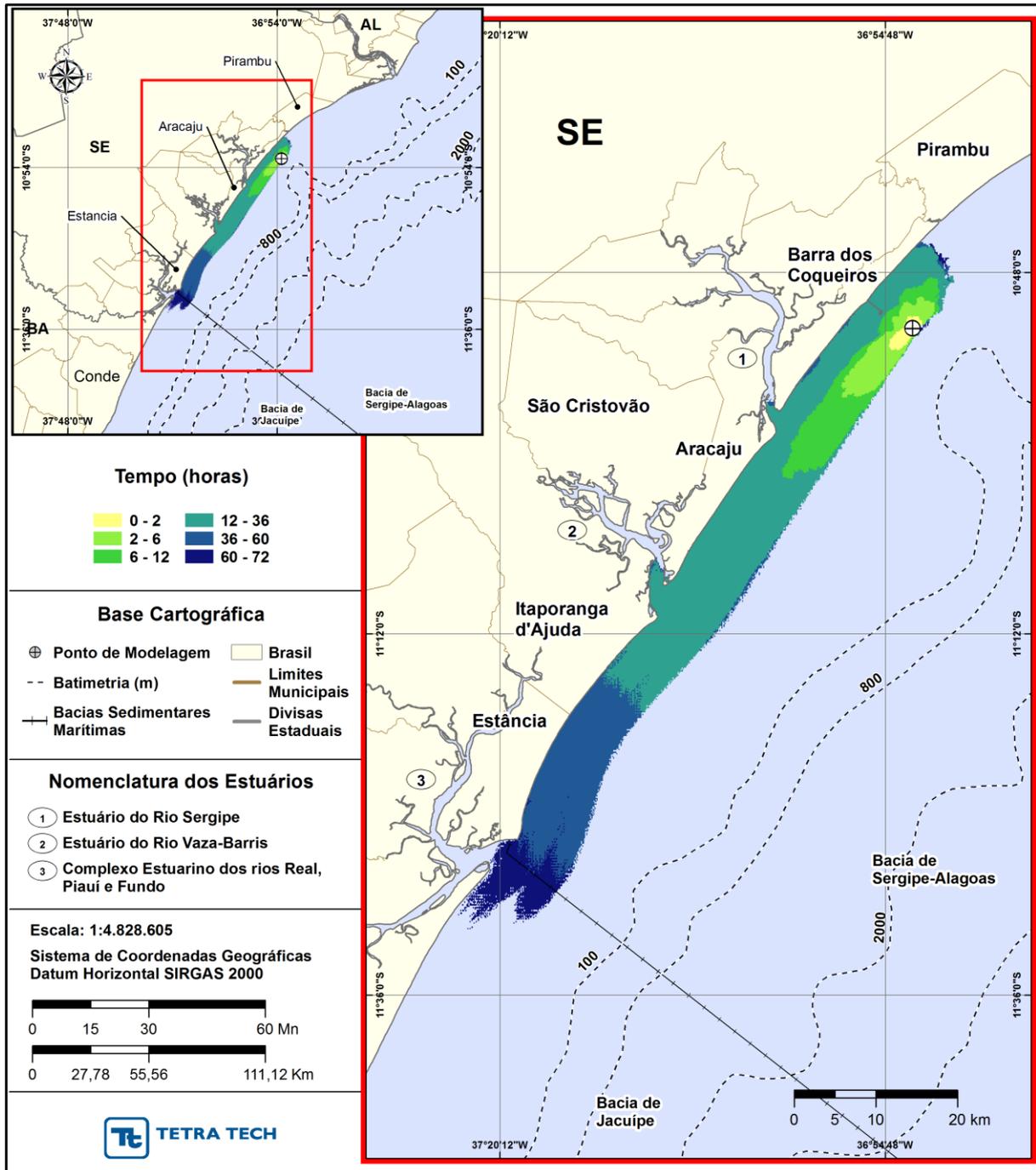


Figura 14 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

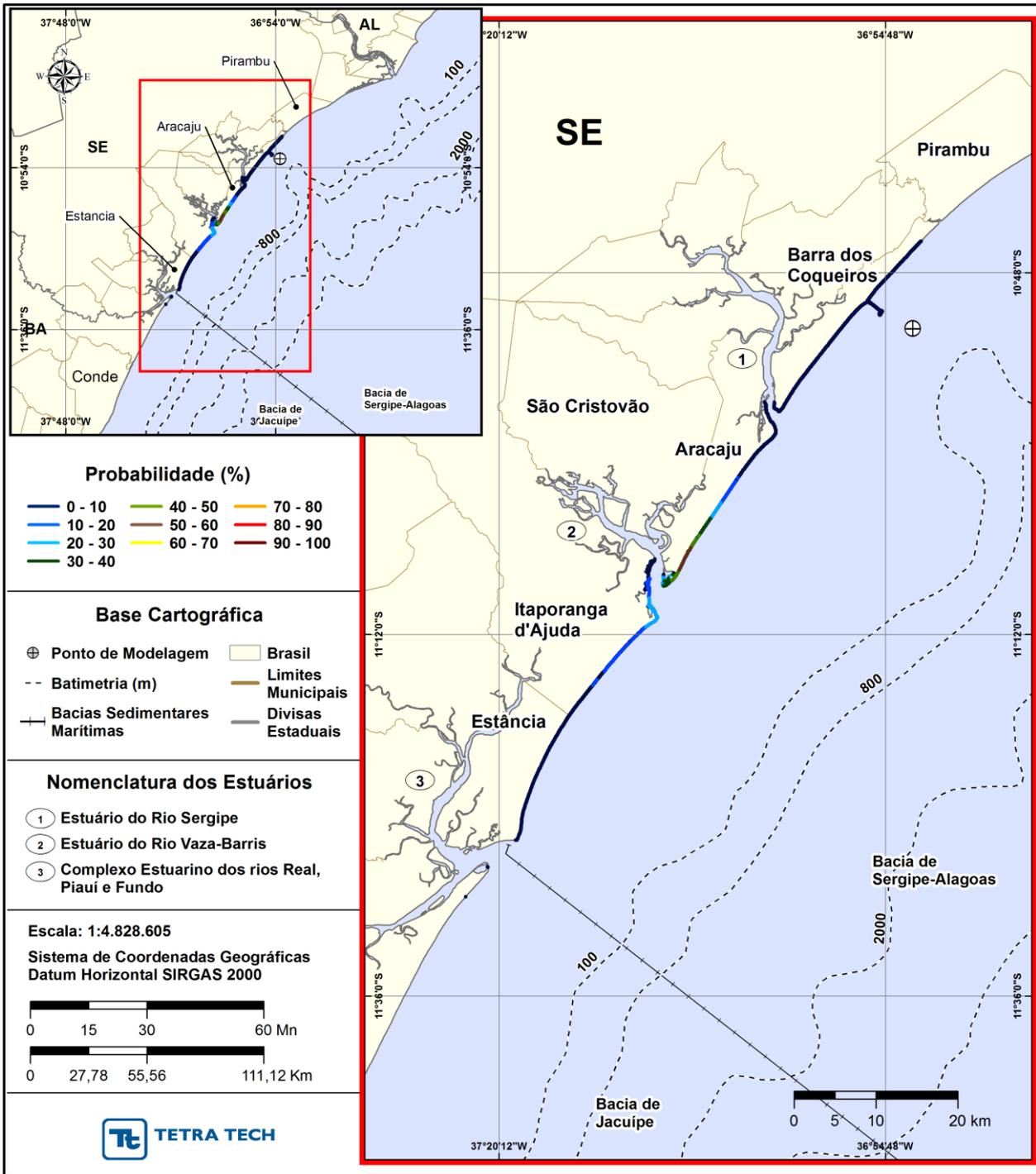


Figura 15 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

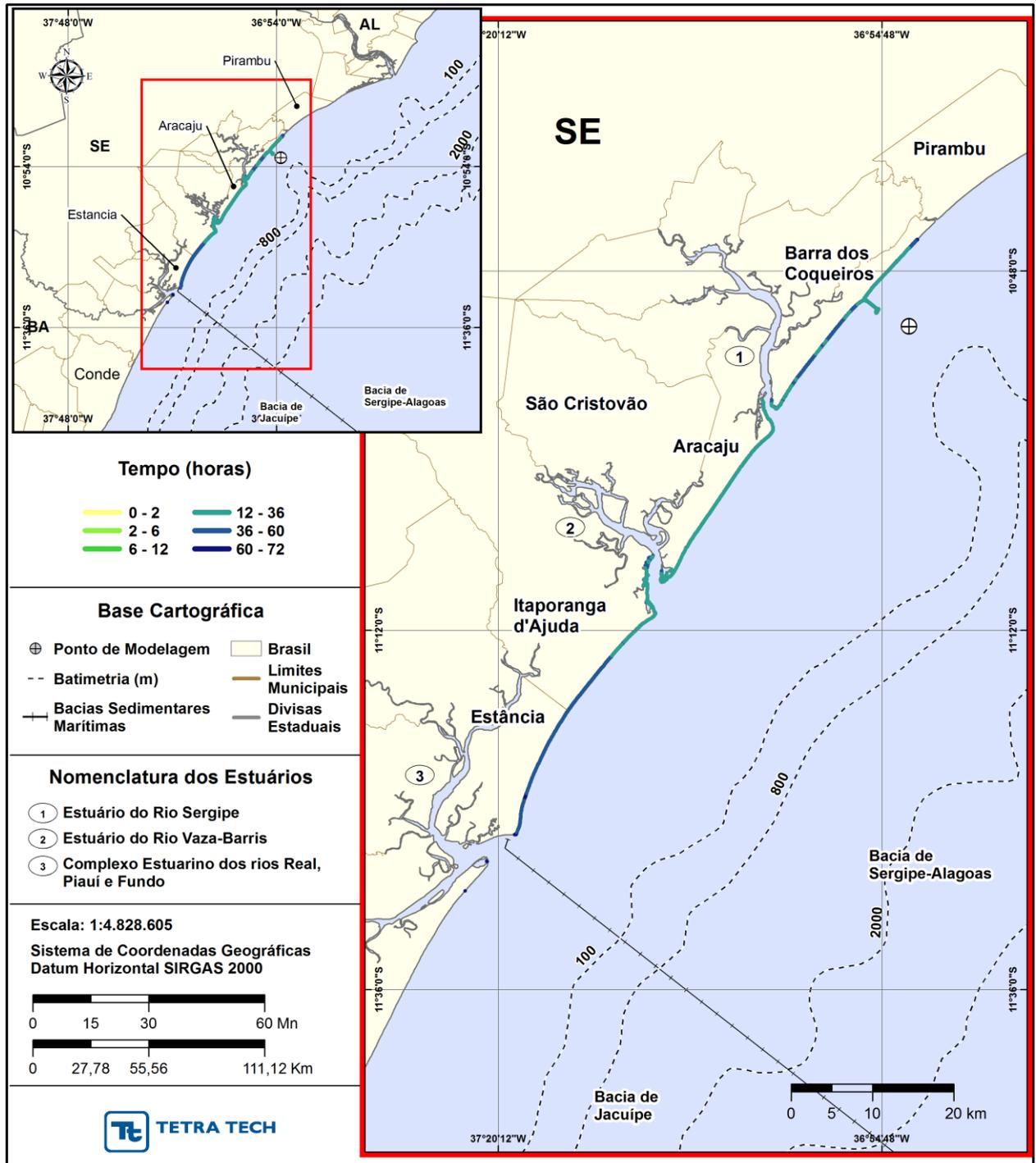


Figura 16 - Cenário FSRU_PC_VER_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o verão (novembro a janeiro), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

A seguir, apresenta-se um resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno para verão, na forma de um diagrama *boxplot* (Figura 17) e tabela com valores mínimo, médio e máximo (Tabela 13). As análises demonstram que, no geral, em média, no período de verão, somente 3,07% de todo volume de óleo derramado resta na superfície da água ao final da simulação. O principal processo de intemperismo atuante é a evaporação (76,90%), seguida de retenção na costa (10,41%), entranhamento na coluna d'água (9,13%) e degradação (0,49%).

Os valores mínimos e máximos demonstram que, ao final da simulação, podem ocorrer simulações específicas sem toque de óleo na costa e sem a presença do óleo na coluna d'água. E, em alguns casos, quase todo o volume de óleo derramado é retirado da superfície da água através dos processos intempéricos atuantes. A evaporação pode atingir um máximo de 85,52% de volume de vazamento inicial e a interação com a costa até 30,68%.

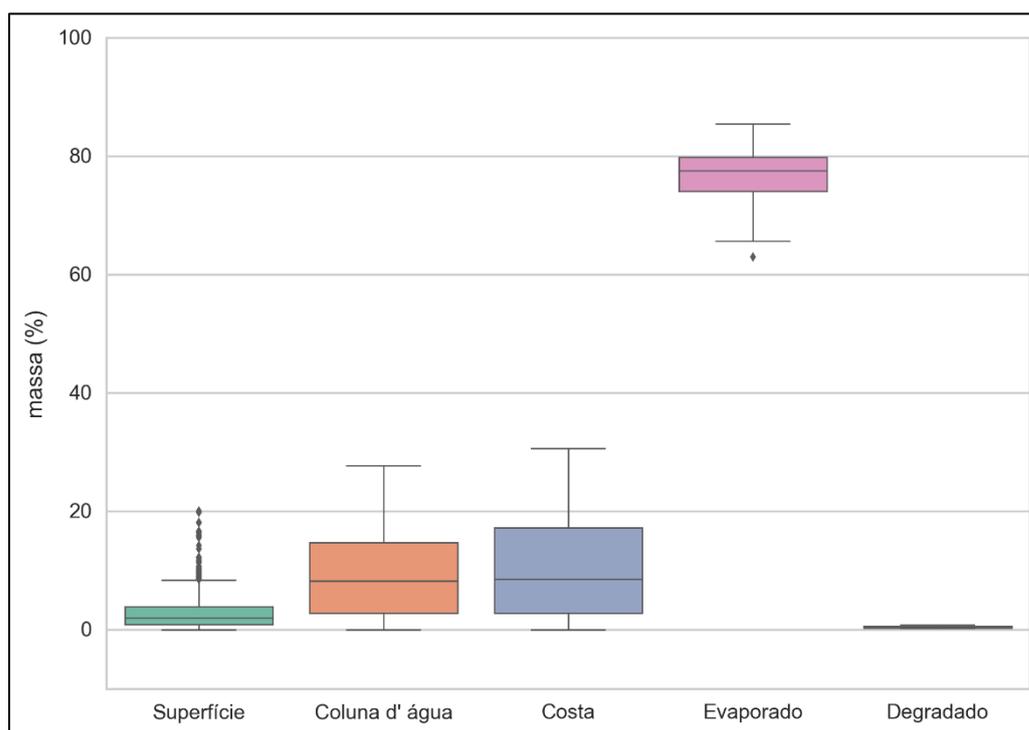


Figura 17 - Diagrama *boxplot* com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).

Tabela 13 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no verão.

	Superfície (%)	Coluna d'água (%)	Costa (%)	Evaporado (%)	Degradado (%)
Mínimo	0,06	0,00	0,00	63,06	0,25
Médio	3,07	9,13	10,41	76,90	0,49
Máximo	20,09	27,78	30,68	85,52	0,83

3.1.2 Simulações Probabilísticas - Inverno

Na continuação são apresentados os resultados probabilísticos do período de inverno. Diferente do que foi observado no cenário de verão, a área coberta pela mancha de óleo apresenta baixas probabilidades de ocorrência de óleo na água. Observa-se, também, que os maiores contornos de probabilidade ocorrem predominantemente em direção ao quadrante norte, em relação ao ponto de modelagem, atingindo regiões mais a norte que no período de verão, assim como, atingiram regiões menos distantes ao sul do ponto de modelagem. Associa-se isto as diferenças no padrão de circulação hidrodinâmica das respectivas sazonalidades conforme demonstrado no Anexo A.

A seguir, são apresentados os resultados probabilísticos com derrame de volume pequeno (8 m^3) para o período de inverno. A trajetória do óleo ocorre predominantemente para sul-sudoeste e norte-nordeste do ponto de modelagem, com os contornos de probabilidade restritos ao litoral do Estado de Sergipe. A probabilidade de toque ocorreu na faixa de litoral que se estende do Município de Pirambu até Aracaju (SE), sendo as maiores probabilidades de toque (15,8%) identificadas em Barra dos Coqueiros (SE).

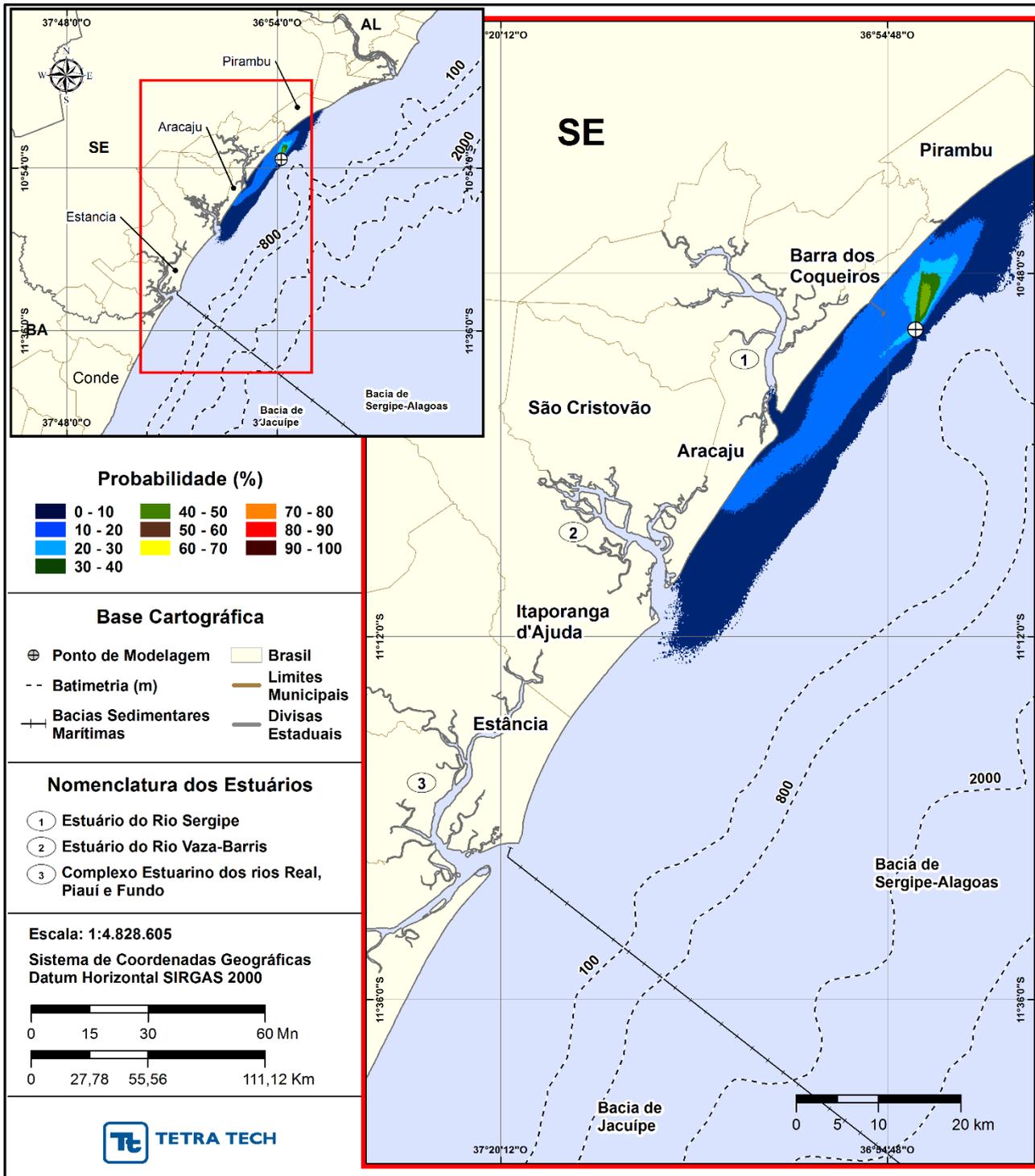


Figura 18 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

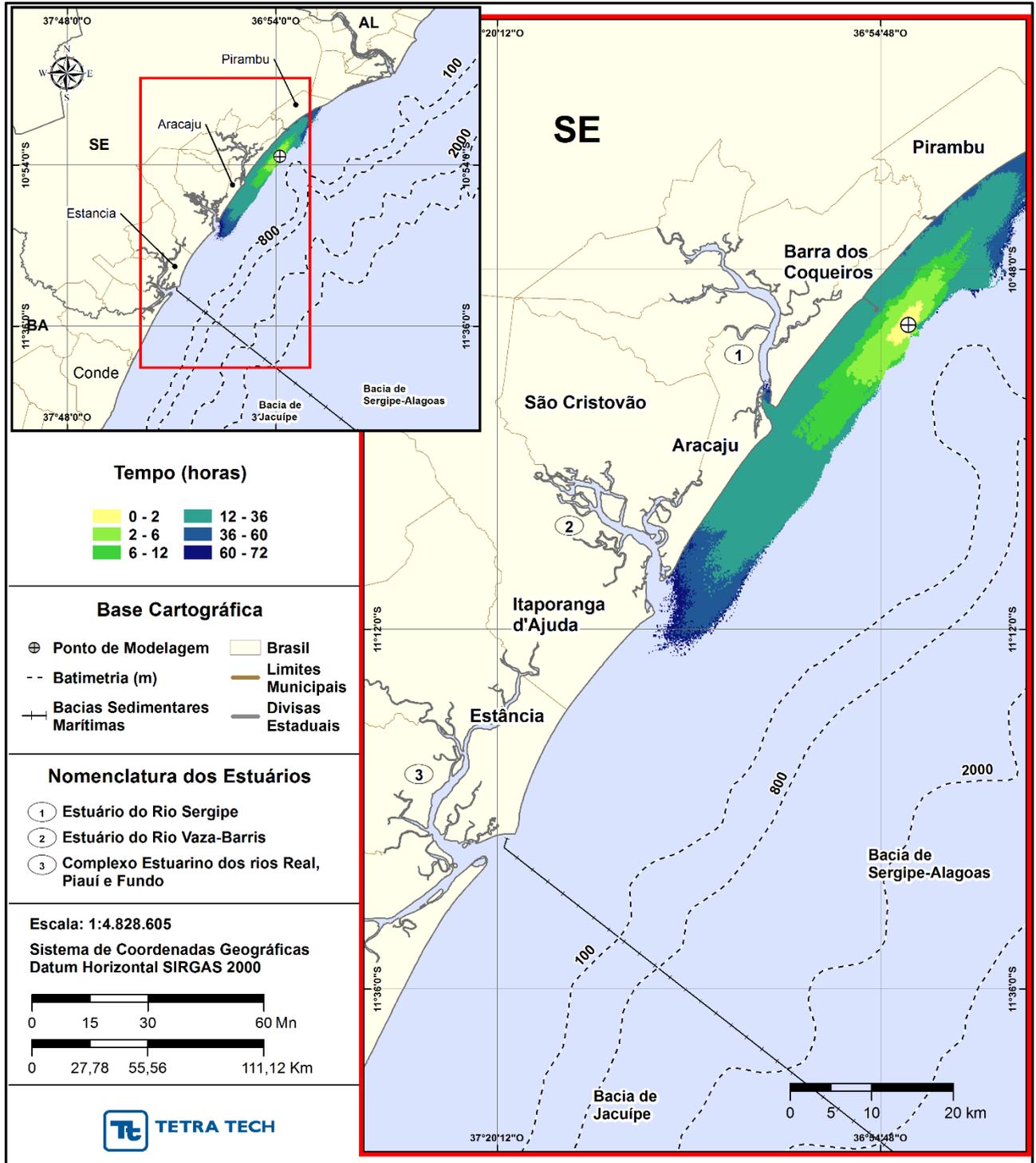


Figura 19 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

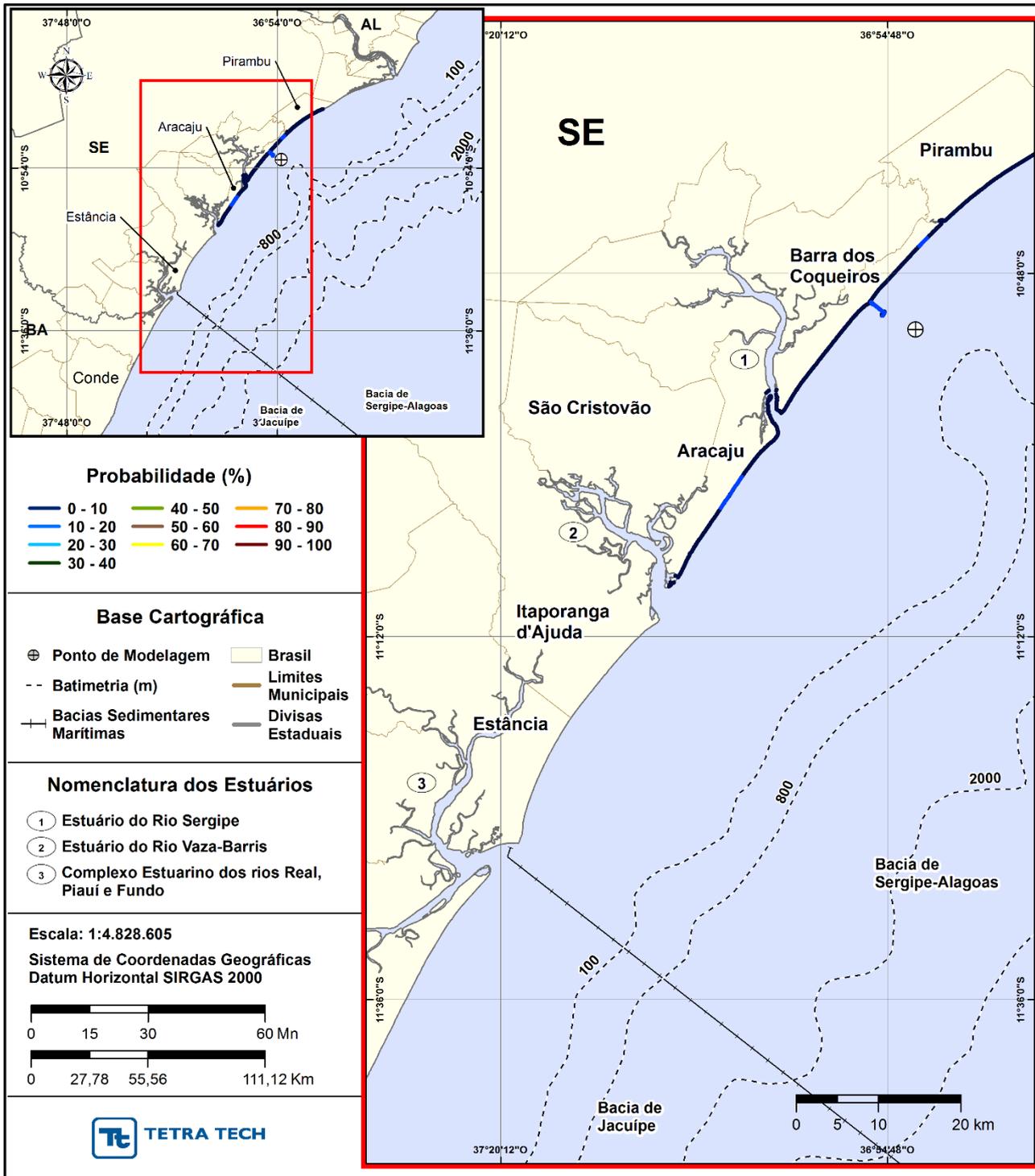


Figura 20 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

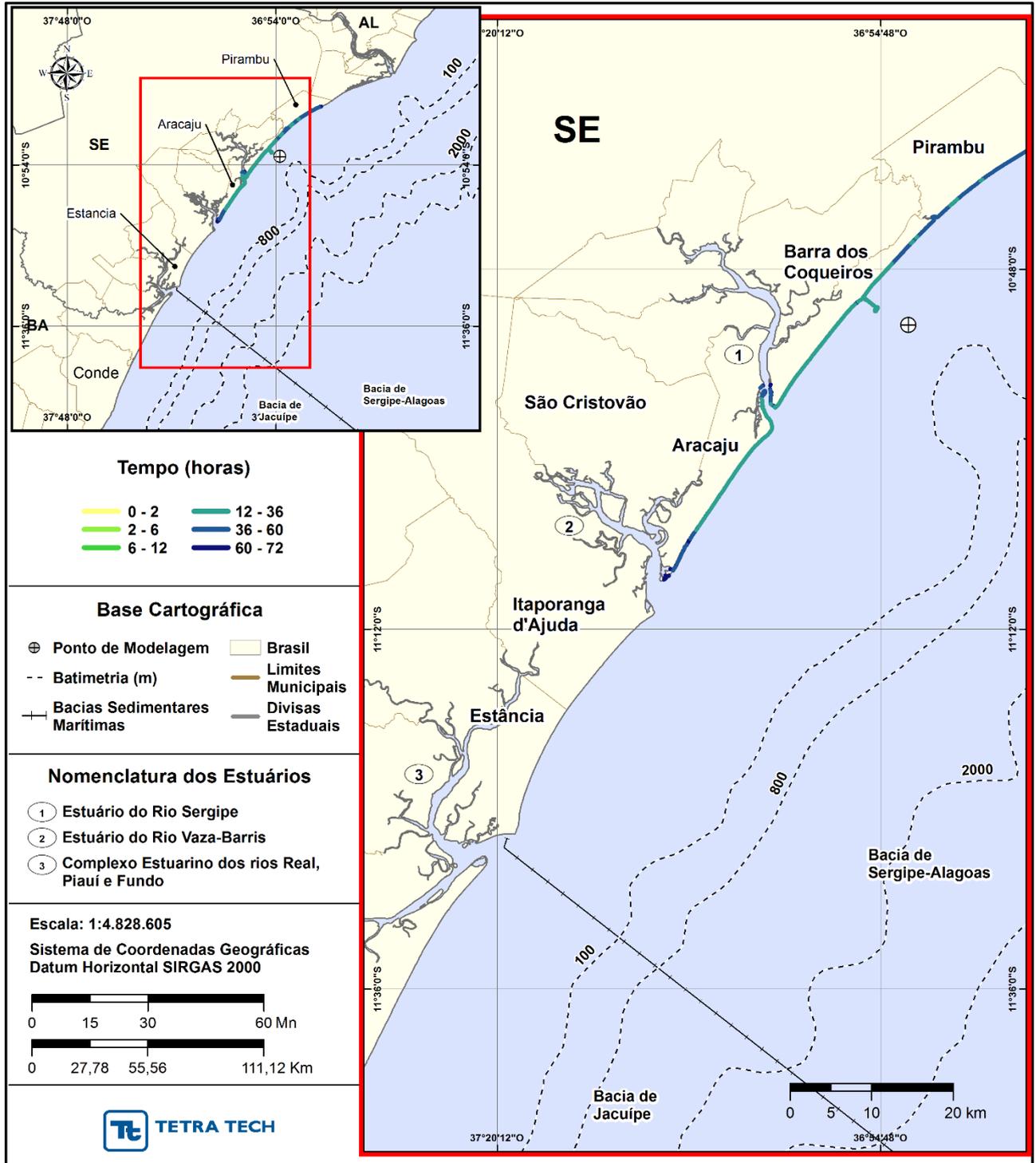


Figura 21 - Cenário FSRU_8_INV_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 8,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

A seguir, apresenta-se um resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno para inverno, na forma de um diagrama *boxplot* (Figura 22) e tabela com valores mínimo, médio e máximo (Tabela 14). O principal processo de intemperismo atuante foi a evaporação (em média, 83,43% do volume inicial evapora em 72 horas).

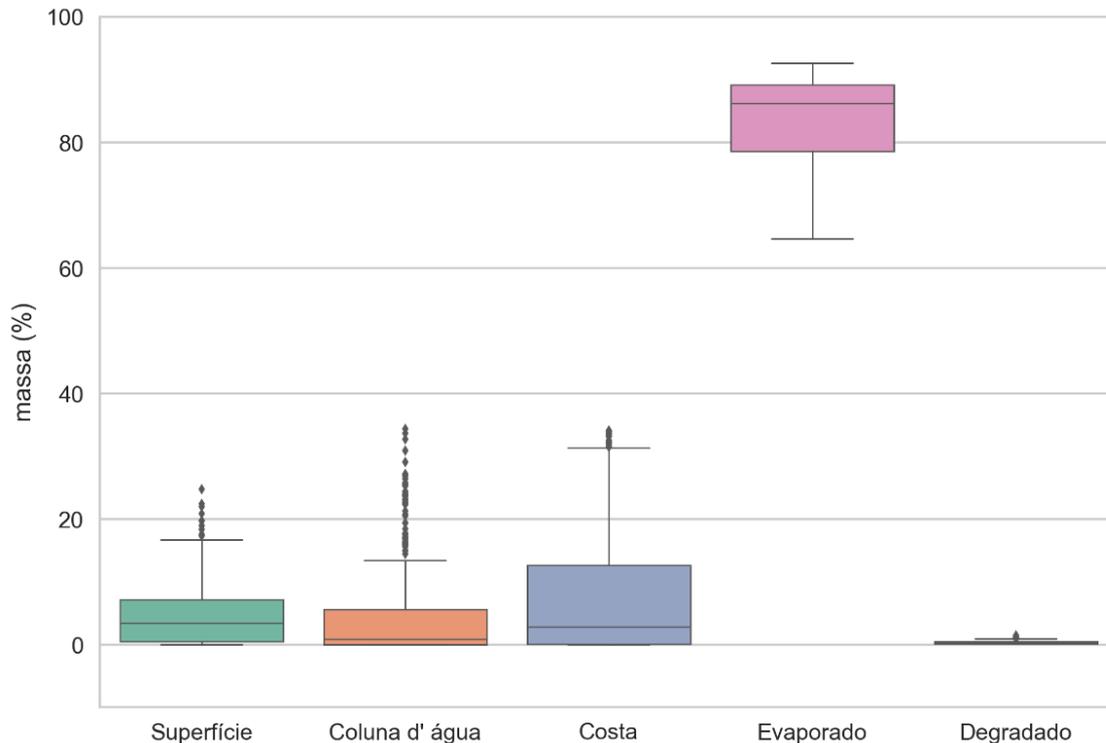


Figura 22 - Diagrama *boxplot* com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no inverno. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (*outliers*).

Tabela 14 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno no inverno.

	Superfície (%)	Coluna d'água (%)	Costa (%)	Evaporado (%)	Degradado (%)
Mínimo	0,00	0,00	0,00	64,68	0,15
Médio	4,36	4,14	7,68	83,43	0,39
Máximo	24,73	34,34	34,11	92,59	1,49

A seguir são apresentados os resultados probabilísticos de volume médio (200,0 m³) do período de inverno. A área coberta pela mancha de óleo apresenta baixas probabilidades de ocorrência de óleo na água se comparada com as probabilidades observadas durante o verão. Observa-se, também, maiores probabilidades em direção ao quadrante norte do ponto de modelagem. Assim como no volume pequeno, a faixa de litoral atingida encontra-se no Estado de Sergipe, sendo que a probabilidade de toque ocorreu do Município de Pirambu até Itaporanga D'Ajuda (SE). As maiores probabilidades de toque (até 26,8%) foram identificadas em Barra dos Coqueiros (SE).

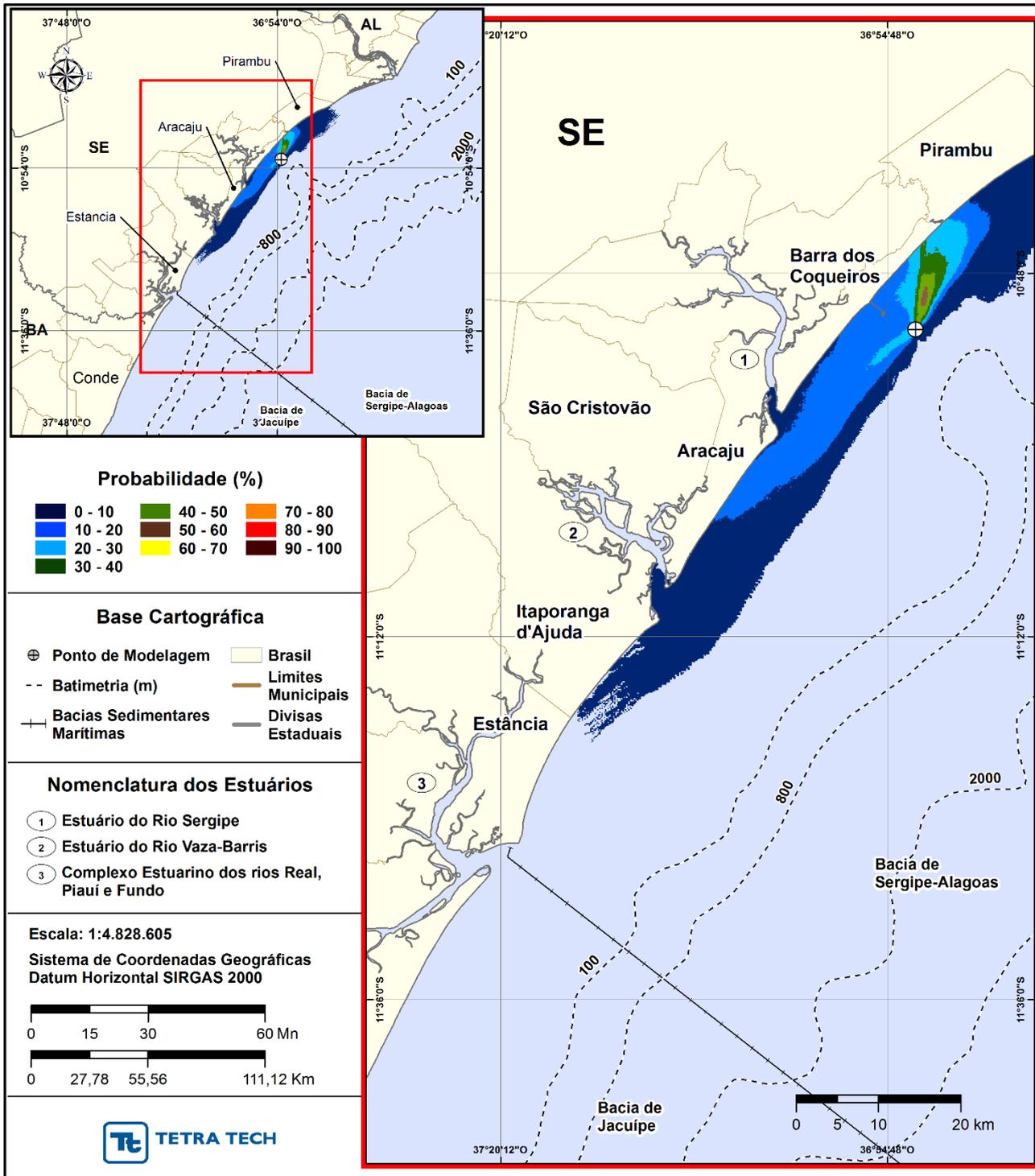


Figura 23 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

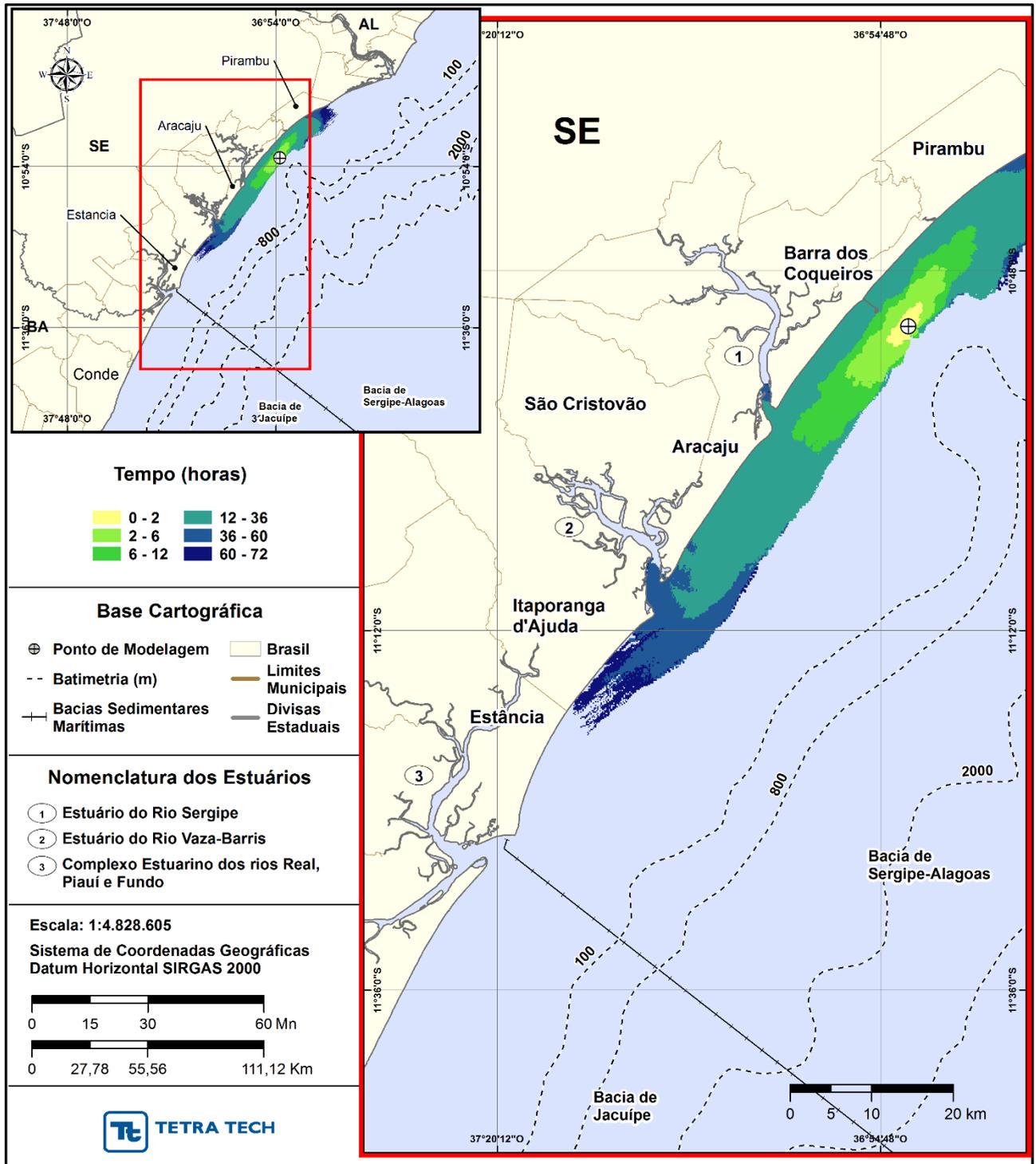


Figura 24 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

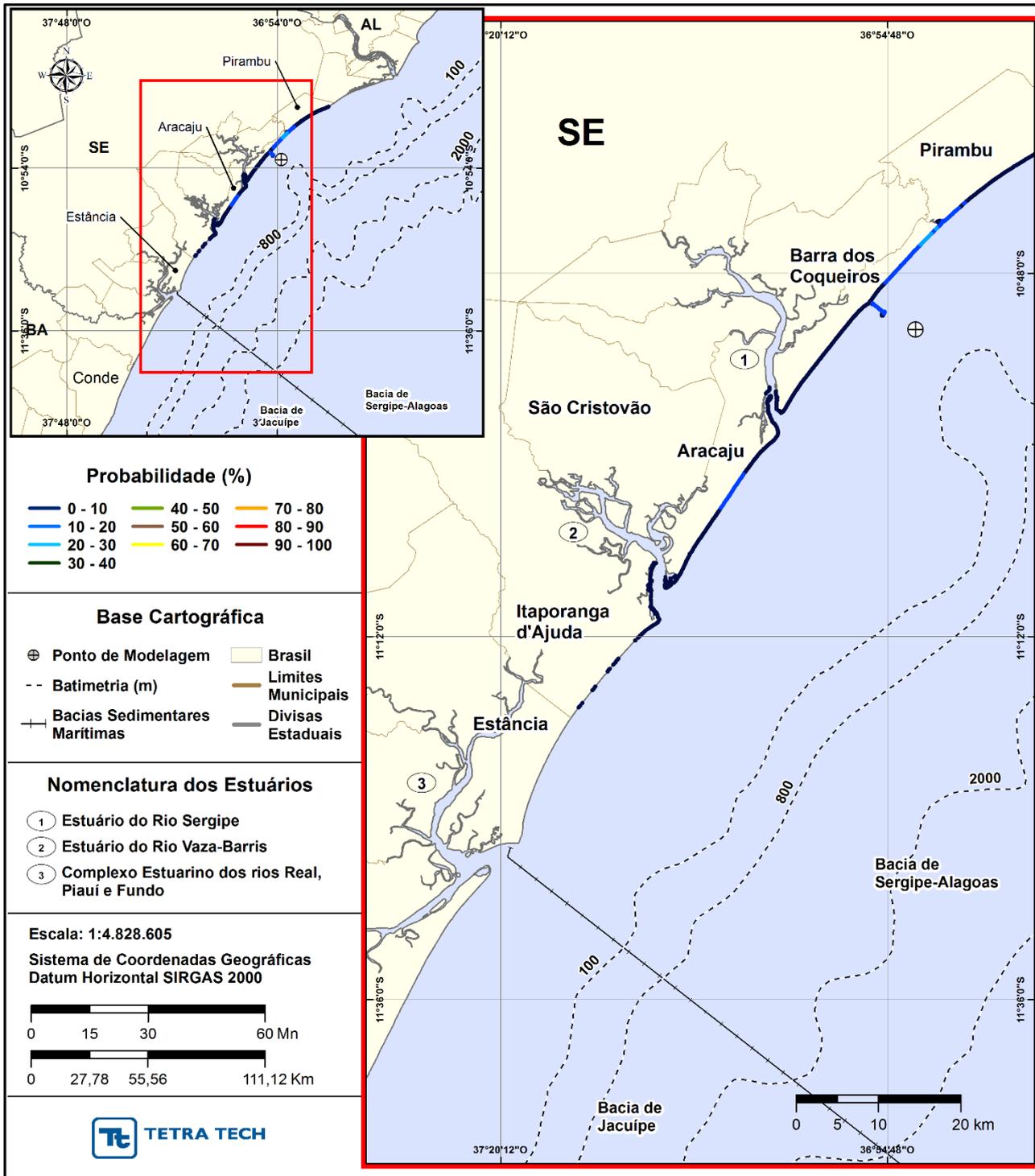


Figura 25 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Bacia de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

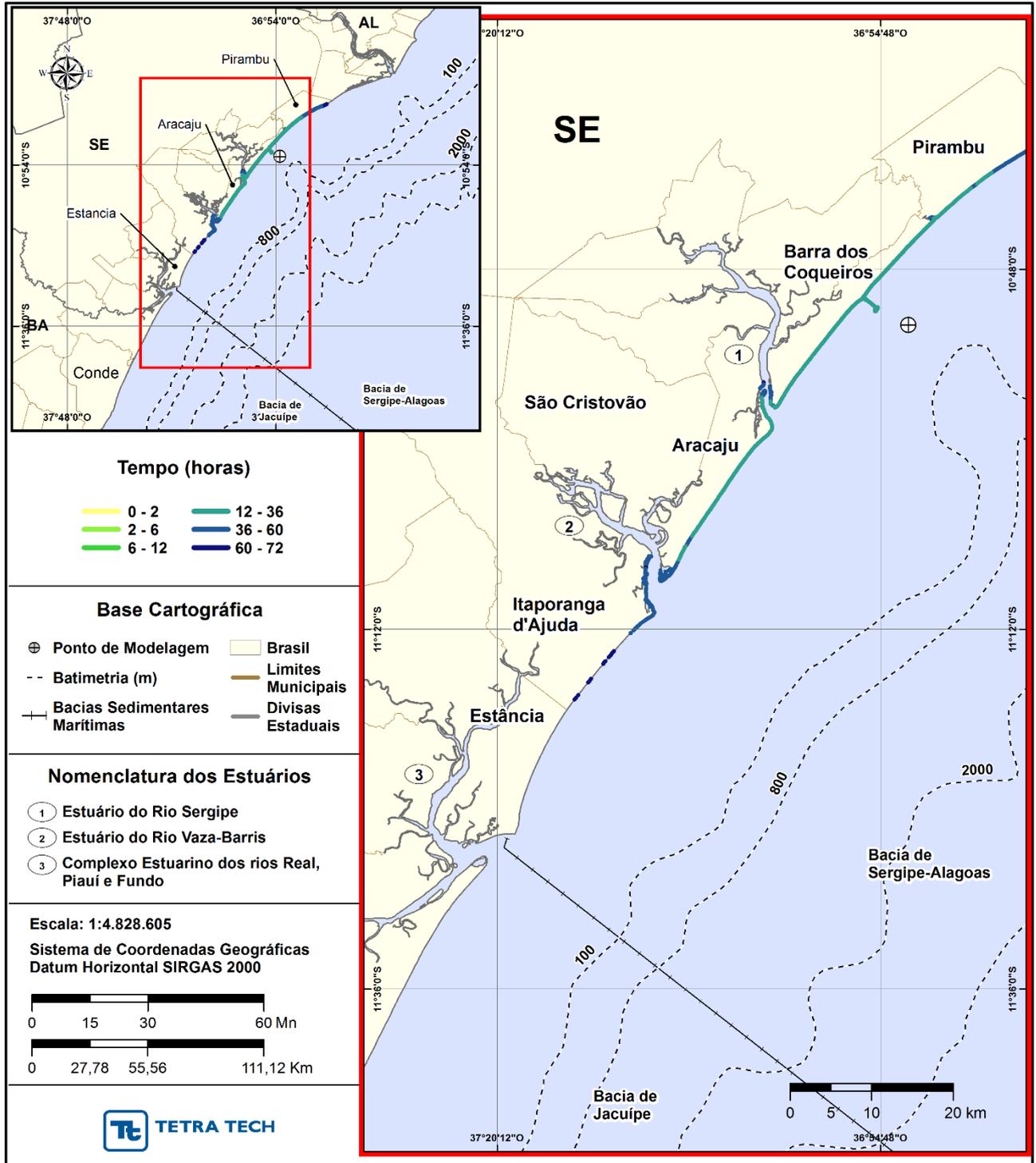


Figura 26 - Cenário FSRU_200_INV_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 200,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

A seguir, apresenta-se um resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram o cenário probabilístico com derrame de volume pequeno para inverno, na forma de um diagrama *boxplot* (Figura 27) e tabela com valores mínimo, médio e máximo (Tabela 15). As análises demonstram que, no período de inverno e considerando o volume médio, a evaporação (74,42% após 72 horas de simulação) também é o principal processo de retirada do óleo da superfície da água, seguida da interação com a linha de costa (15,72%).

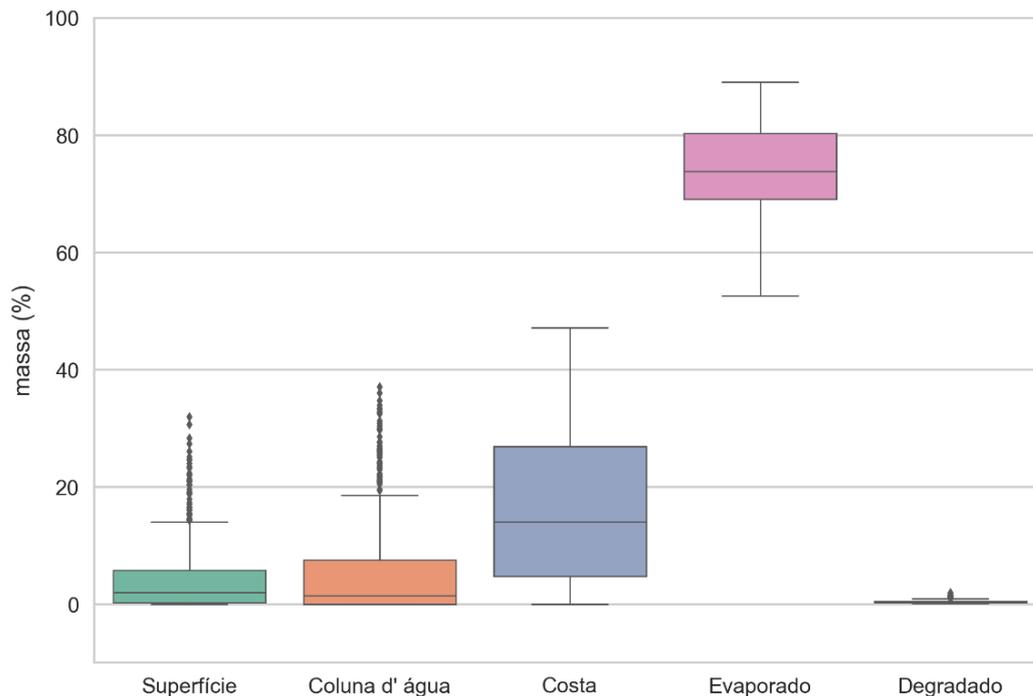


Figura 27 - Diagrama *boxplot* com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no inverno. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (*outliers*).

Tabela 15 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume médio no inverno.

	Superfície (%)	Coluna d'água (%)	Costa (%)	Evaporado (%)	Degradado (%)
Mínimo	0,00	0,00	0,00	52,60	0,19
Médio	4,10	5,35	15,72	74,42	0,42
Máximo	31,93	37,03	47,16	89,10	1,93

Na continuação, são apresentados os resultados probabilísticos do período de inverno referentes ao cenário de pior caso. Diferente do que foi observado no cenário de verão, no inverno as maiores probabilidades de ocorrência na água são inferiores.

Observa-se também que a trajetória do óleo ocorre, considerando as maiores probabilidades, predominantemente em direção ao quadrante norte do ponto de modelagem, atingindo regiões mais a norte que o resultado de verão, assim como, atingiu regiões menos distantes ao sul. Associa-se isto as diferenças no padrão de circulação hidrodinâmica das respectivas sazonalidades conforme demonstrado no Anexo A.

A probabilidade de toque ocorreu na faixa de litoral sergipano que se estende do Município de Pirambu até Itaporanga D'Ajuda, sendo as maiores probabilidades de toque identificadas em Barra dos Coqueiros (29,5%).

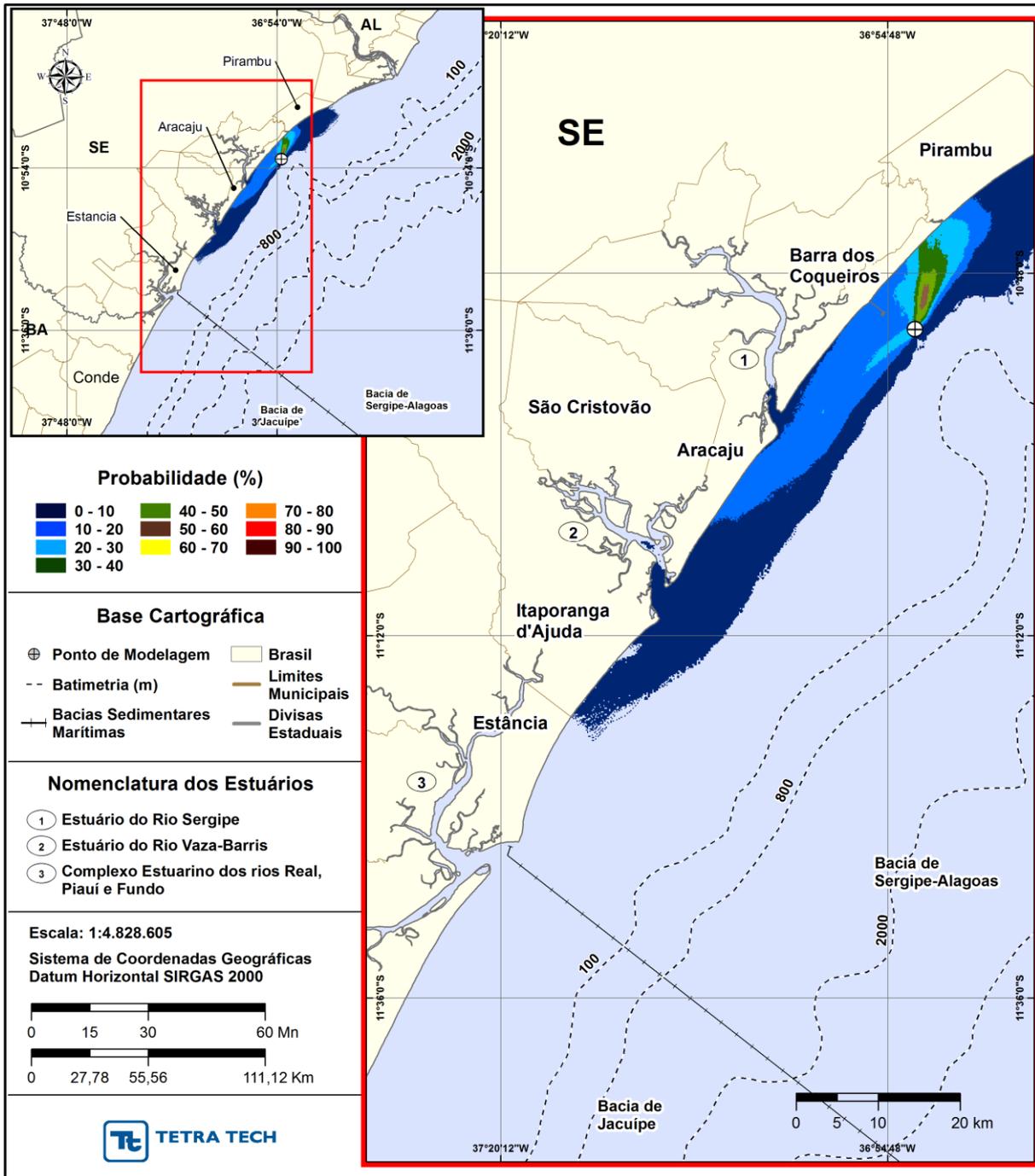


Figura 28 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

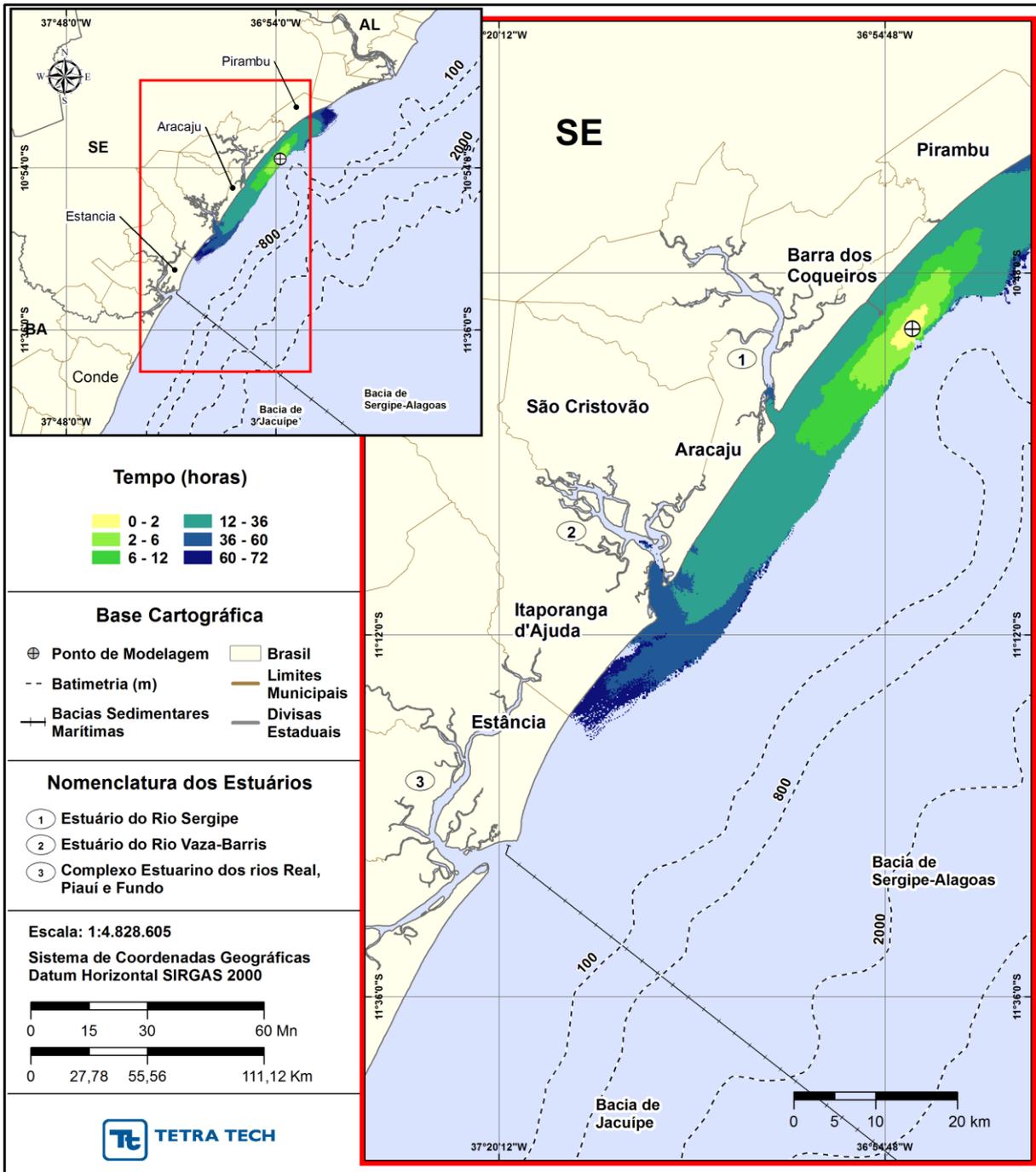


Figura 29 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

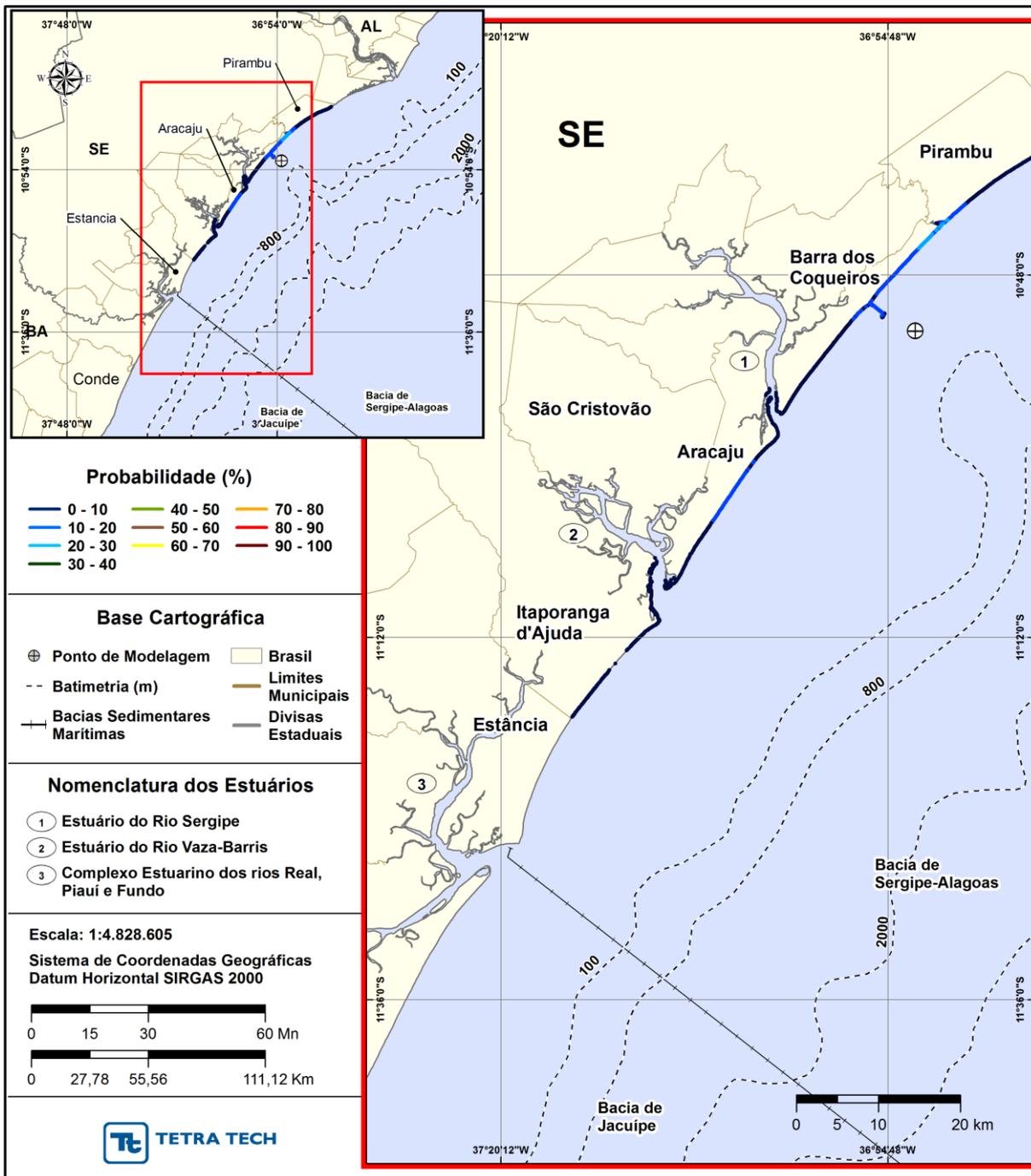


Figura 30 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

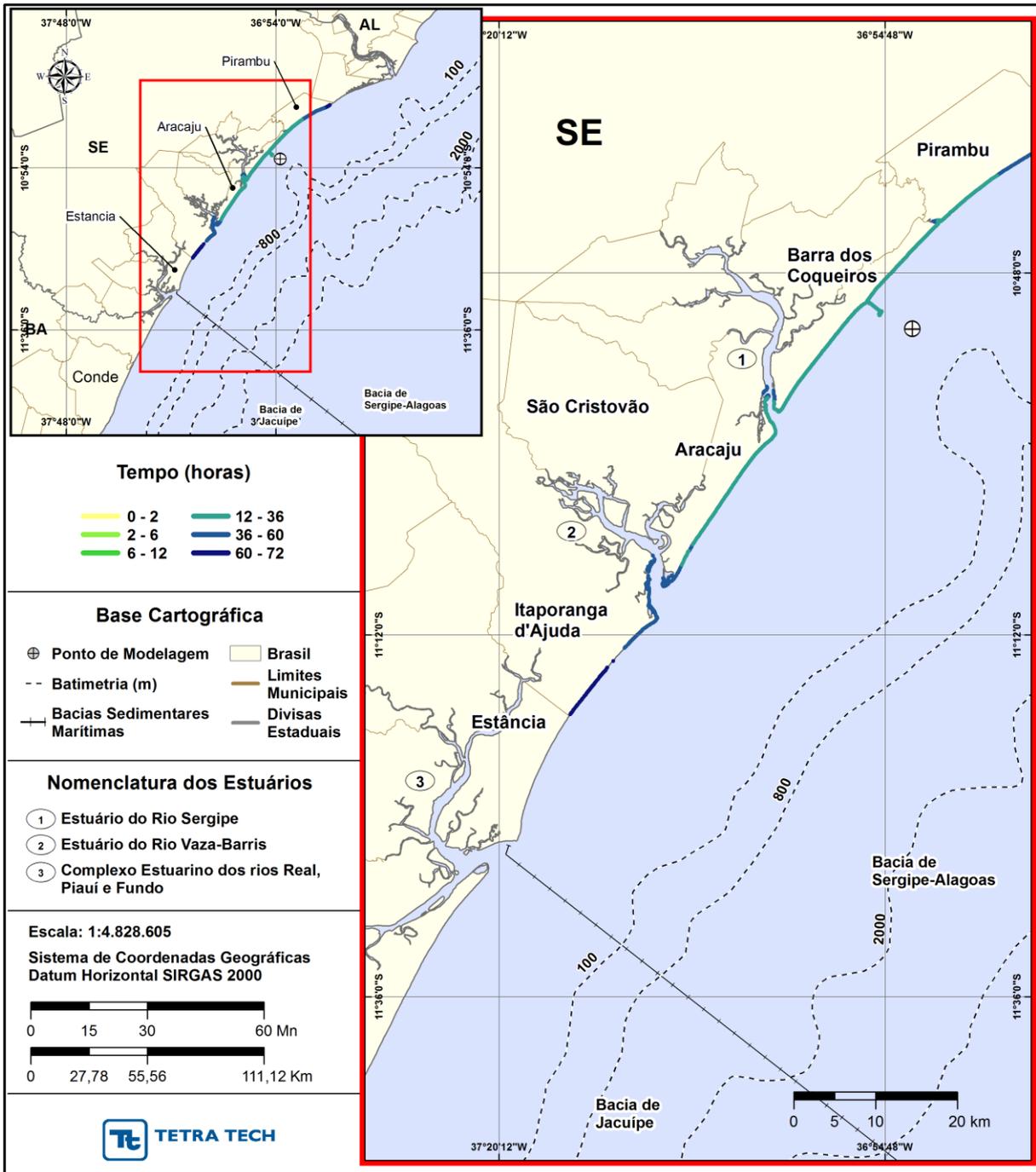


Figura 31 - Cenário FSRU_PC_INV_72H. Tempo mínimo para a chegada de óleo na costa para um acidente ocorrendo a partir do FSRU, Baía de Sergipe-Alagoas, durante o inverno (junho a agosto), com derrame de 260,0 m³ (instantâneo), após 72 horas de simulação.

A seguir, apresenta-se um resumo dos balanços de massa para os 600 cenários determinísticos que compuseram o cenário probabilístico com derrame de volume pior caso para inverno, na forma de um diagrama boxplot (Figura 32) e tabela com valores mínimo, médio e máximo (Tabela 16). As análises demonstram que, no geral, no período de inverno, em média, somente 4,02% de todo o volume derramado permanece na superfície da água ao final das 72 horas de simulação. O volume restante do óleo é principalmente evaporado (73,11%), retido na costa (17,14%), entranhado na coluna d'água (5,32%) ou degradado (0,42%).

Os valores mínimos e máximos demonstram que podem ocorrer simulações específicas sem toque de óleo na costa, assim como não restar nenhum volume de óleo na água ao final da simulação. E, em alguns casos podem ocorrer simulações com toque e retenção de óleo na costa acima de 50% do volume total derramado.

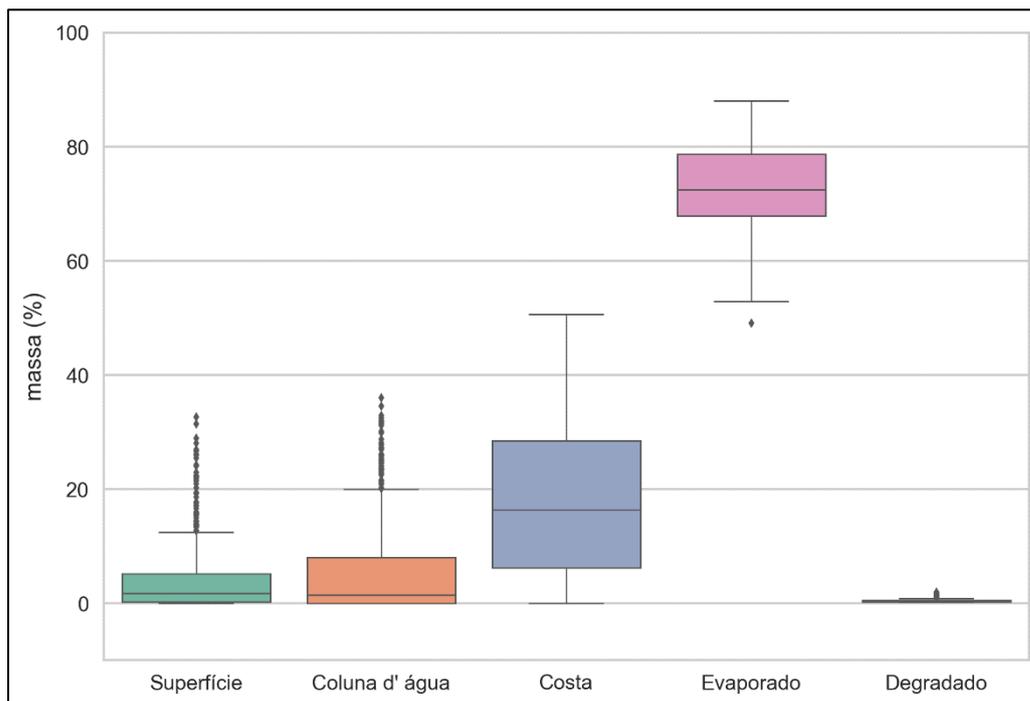


Figura 32 - Diagrama boxplot com o resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume de pior caso no inverno. Nesta representação, as linhas centrais da caixa correspondem à mediana da porcentagem de massa entre as simulações, os limites das caixas correspondem ao primeiro e terceiro quartis, as linhas aos limites dos valores englobados na média mais dois desvios-padrão, e os pontos os valores acima deste limiar (outliers).

Tabela 16 - Resumo dos balanços de massa para o cenário probabilístico com derrame de volume de pior caso no inverno.

	Superfície (%)	Coluna d'água (%)	Costa (%)	Evaporado (%)	Degradado (%)
Mínimo	0,00	0,00	0,00	49,07	0,19
Médio	4,02	5,32	17,14	73,11	0,42
Máximo	32,60	35,98	50,67	88,04	1,88

3.2 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS

As simulações determinísticas foram conduzidas para as condições meteorológicas e oceanográficas de ocorrência de vento forte e fraco associados a maré enchente e vazante, para os períodos de verão e inverno, considerando o volume de derrame mais crítico (pior caso). No Anexo C apresenta-se a metodologia utilizada para a identificação destas condições meteo-oceanográficas, cuja nomenclatura adotada nos cenários determinísticos segue abaixo:

- MA - maré alta (vazante),
- MB - maré baixa (enchente),
- VFO - vento forte,
- VFR - vento fraco.

A seguir, são apresentados os resultados das simulações determinísticas de verão e inverno (Tabela 17). Observa-se que a condição de maré alta associada a condição de vento forte foi que proporcionou os menores tempos de toque do petróleo na costa. Para esta condição, o menor tempo de toque foi de calculado em 28,5 horas no Município de Aracaju (SE).

Tabela 17 - Resumo dos cenários determinísticos de verão e inverno.

CENÁRIO	DATA DE INÍCIO DA SIMULAÇÃO	TEMPO DE CHEGADA DO ÓLEO NA COSTA (horas)	MUNICÍPIO DE PRIMEIRO TOQUE	VOLUME DE ÓLEO NA COSTA (m ³)
DET_PC_VER_MA_VFO	13/11/2008 10:00h	28,5	Aracaju (SE)	23,14
DET_PC_VER_MA_VFR	13/01/2009 11:00h	34,5	Barra dos Coqueiros (SE)	58,24
DET_PC_VER_MB_VFO	13/11/2008 16:00h	37,5	Itaporanga d'Ajuda (SE)	2,86
DET_PC_VER_MB_VFR	14/01/2009 07:00h	36,5	Barra dos Coqueiros (SE)	39,78
DET_PC_INV_MA_VFO	27/07/2009 01:00h	52,5	Barra dos Coqueiros (SE)	17,94
DET_PC_INV_MA_VFR	23/06/2009 23:00h	55,5	Barra dos Coqueiros (SE)	30,42
DET_PC_INV_MB_VFO	27/07/2009 07:00h	49,0	Barra dos Coqueiros (SE)	8,06
DET_PC_INV_MB_VFR	24/06/2009 05:00h	59,5	Barra dos Coqueiros (SE)	14,56

OBS: o volume de petróleo final à costa é calculado com base na porcentagem do balanço de massa e volume inicial de derrame.

Os resultados das simulações determinísticas são apresentados na forma de duas ilustrações. A primeira apresenta os contornos de tempo do deslocamento do petróleo ao longo de toda a simulação. A segunda apresenta um gráfico com o balanço de massa (petróleo na superfície, na costa, evaporado, na coluna d'água) para as simulações determinísticas.

Para a melhor visualização dos resultados, a apresentação dos mesmos é dividida conforme a sazonalidade.

3.2.1 Simulações Determinísticas - Verão

Da Figura 33 a Figura 40 são apresentados os resultados determinísticos de verão. Analisando os gráficos de balanço de massa destas simulações, observa-se que a evaporação foi o principal processo responsável por retirar o petróleo da superfície da água. Em cenários de vento forte, observa-se que ocorre uma maior porcentagem do volume de óleo na coluna d'água do que nos cenários de vento fraco. Verifica-se que a distribuição de massa destes cenários corresponde ao padrão típico dos cenários probabilísticos, uma vez que os digramas *boxplot* apresentam distribuição de massa similar.

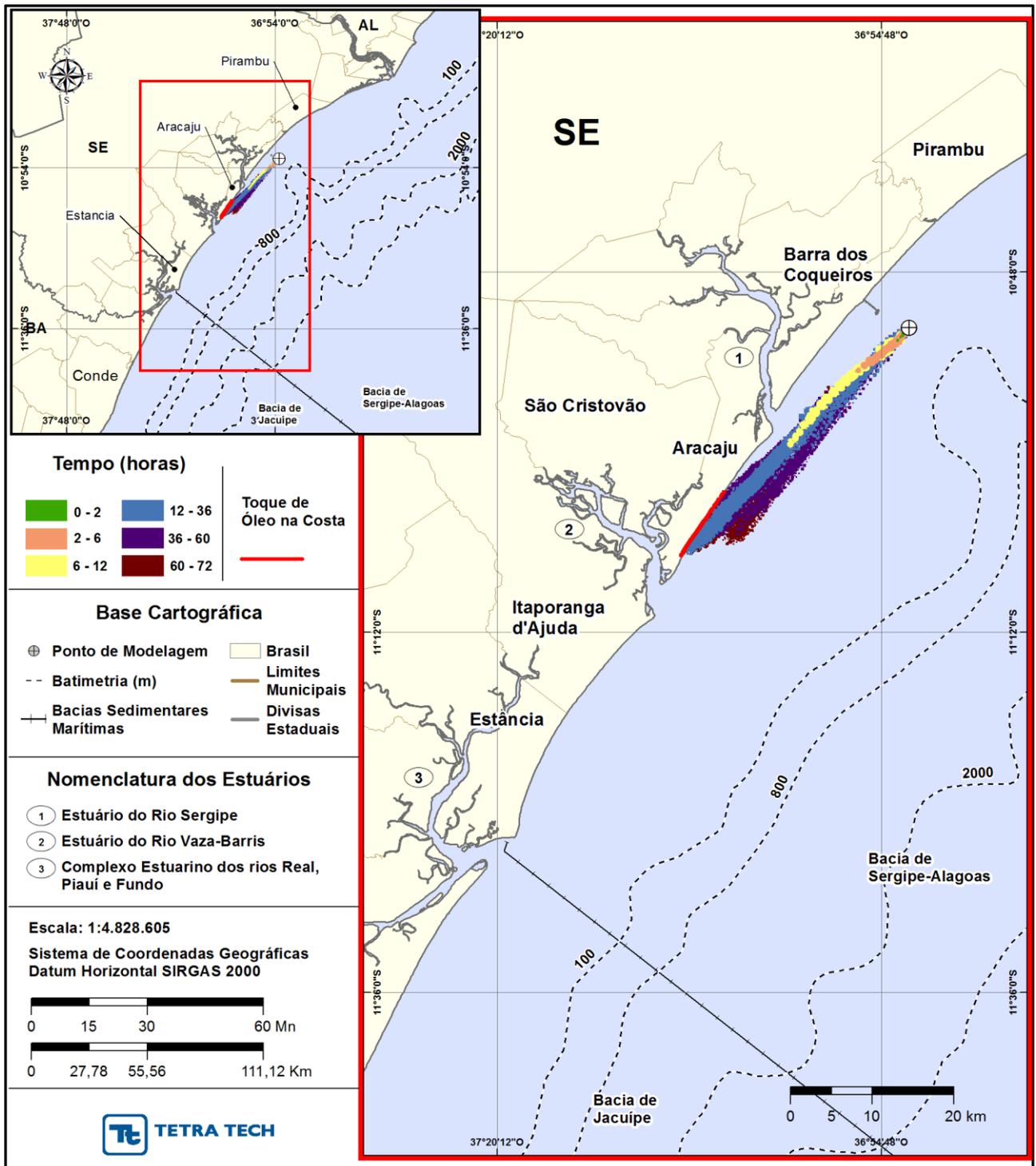


Figura 33 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré alta e vento forte.

Balanço de massa

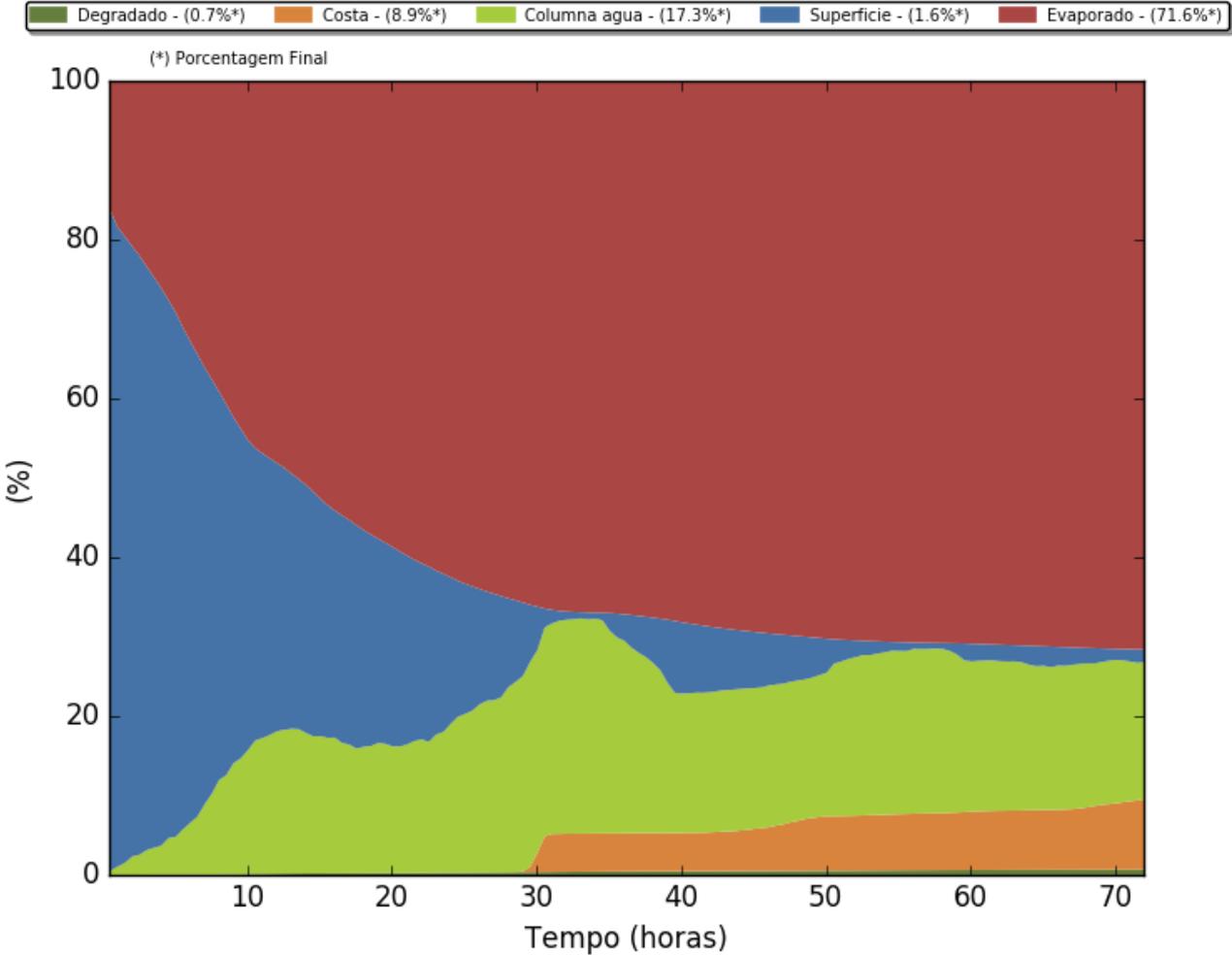


Figura 34 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFO: Balanço de massa.

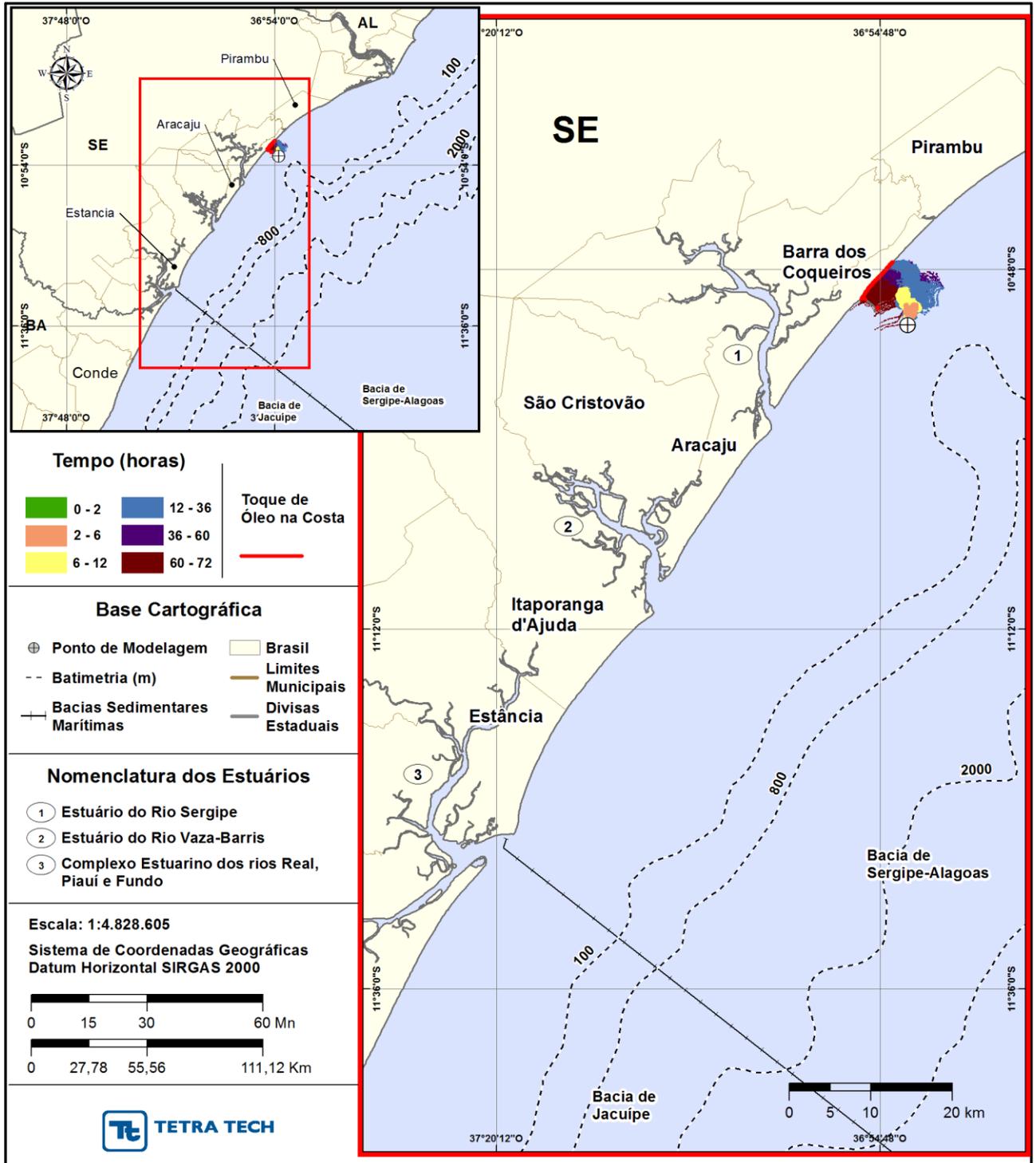


Figura 35 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré alta e vento fraco.

Balanço de massa

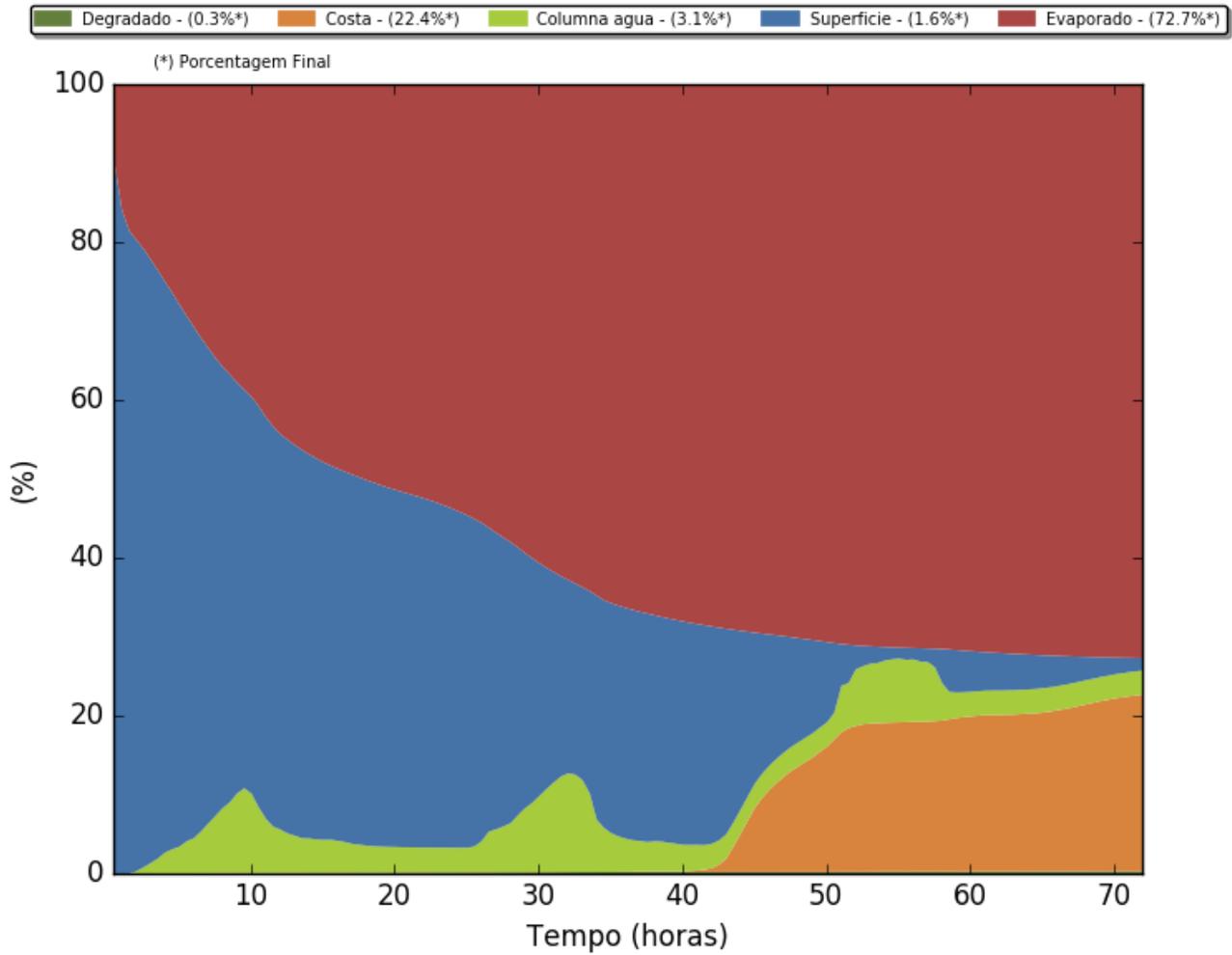


Figura 36 - DET_FSRU_PC_VER_MA_VFR: Balanço de massa.

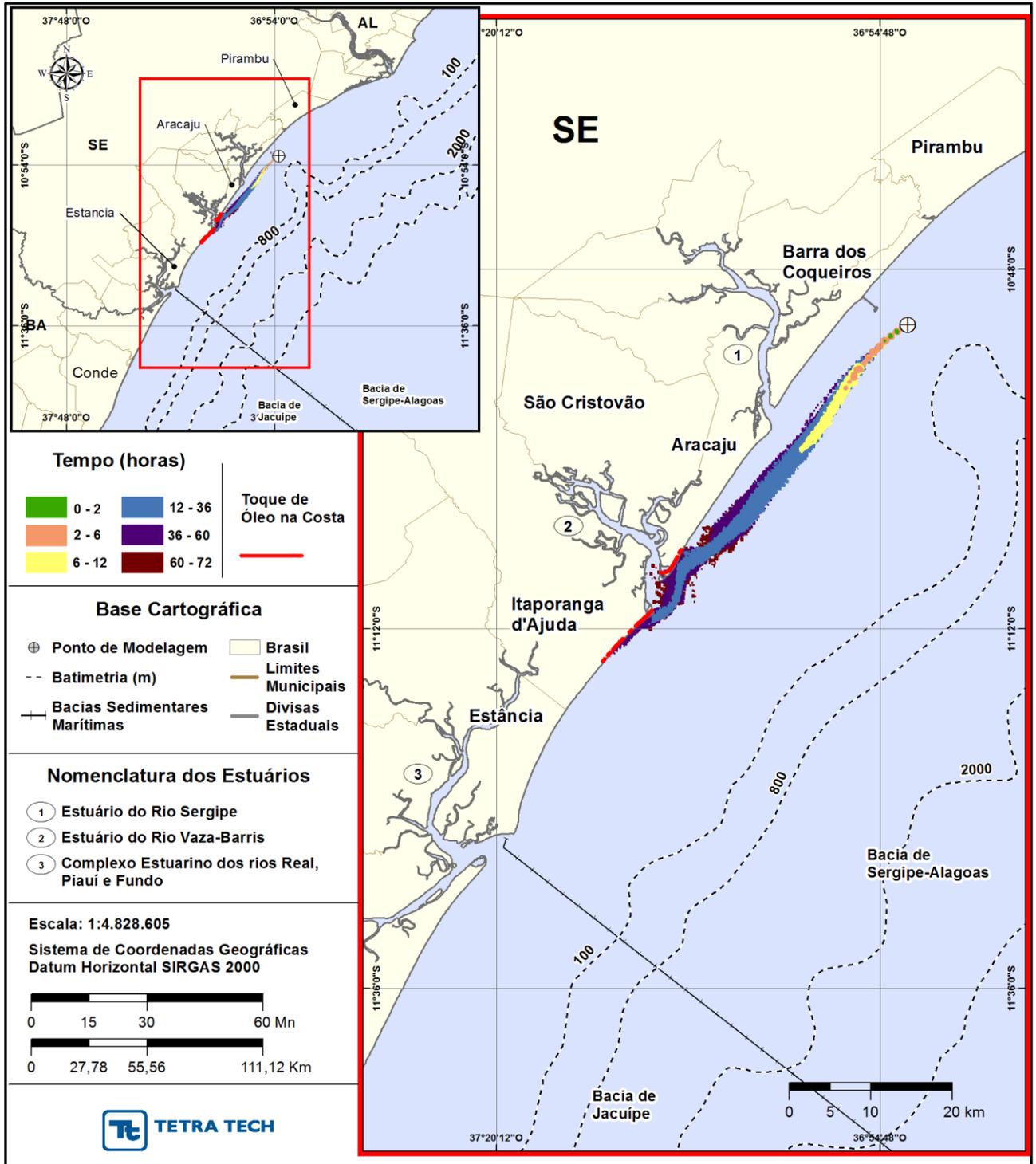


Figura 37 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré baixa e vento forte.

Balanço de massa

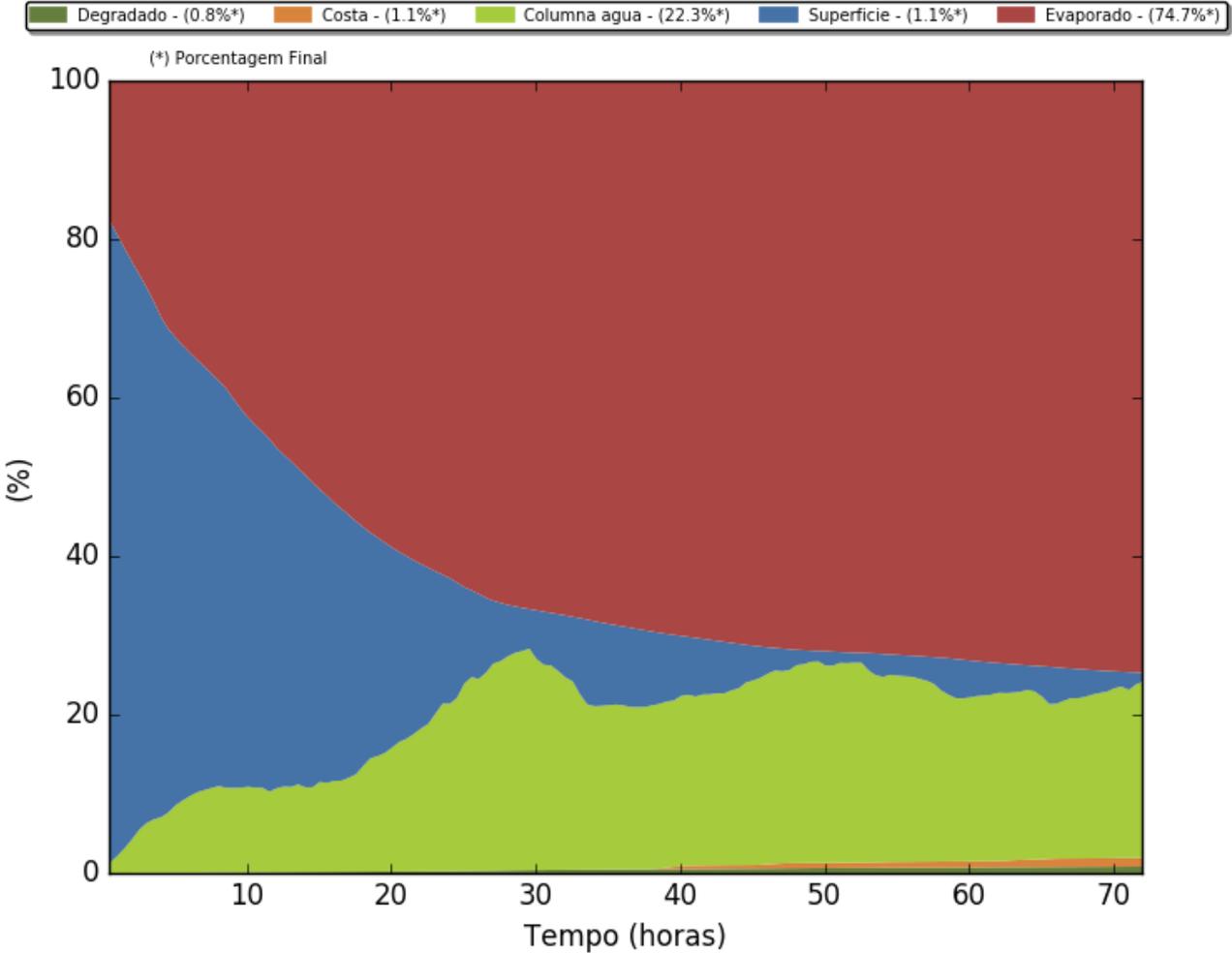


Figura 38 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFO: Balanço de massa.

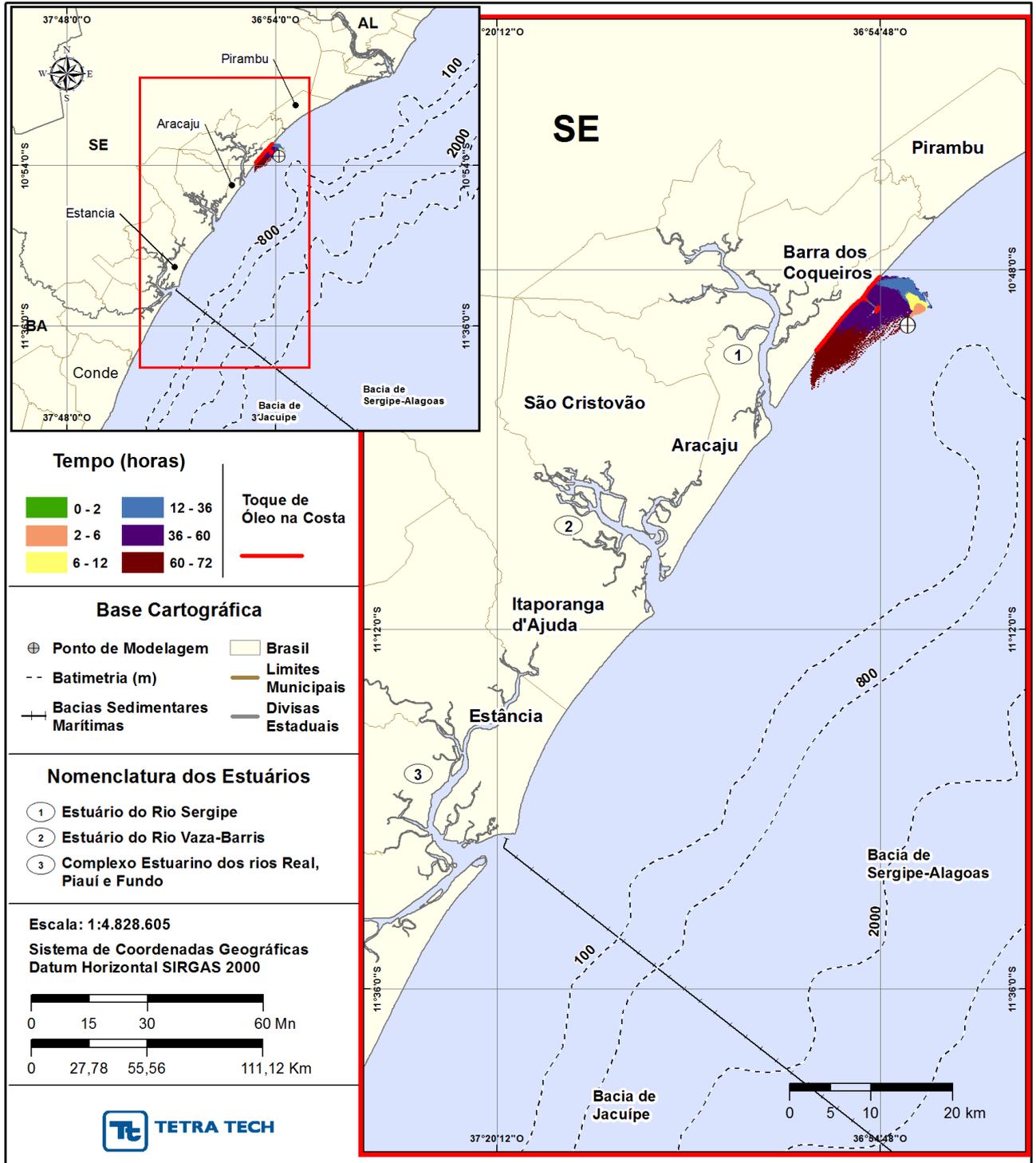


Figura 39 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de verão, maré baixa e vento fraco.

Balanco de massa

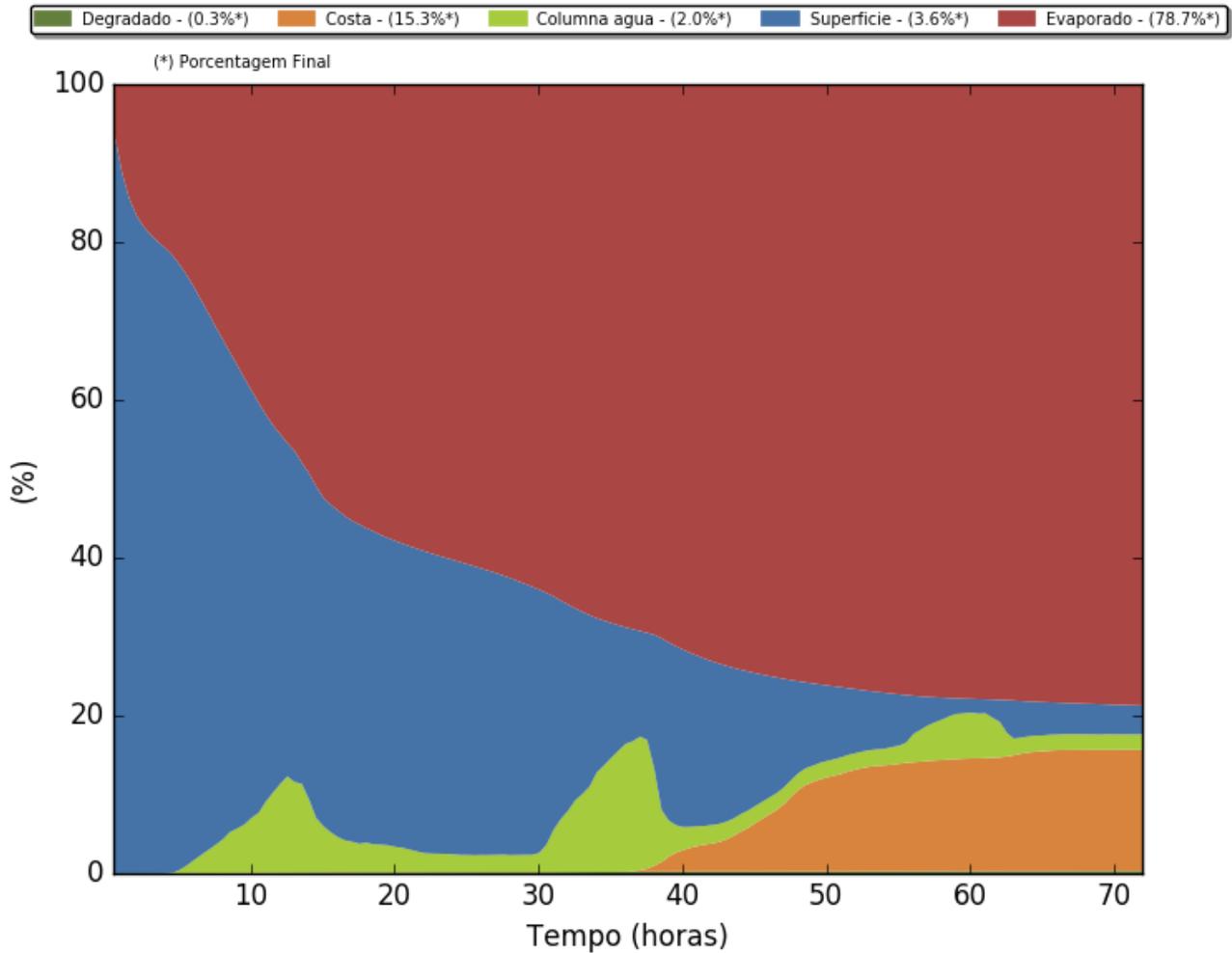


Figura 40 - DET_FSRU_PC_VER_MB_VFR: Balanço de massa.

3.2.2 Simulações Determinísticas - Inverno

Da Figura 41 a Figura 48 são apresentados os resultados determinísticos de inverno. Analisando os gráficos de balanço de massa destas simulações, observa-se novamente que a evaporação foram os principais processos responsáveis por retirar o petróleo da superfície da água. E assim como nos resultados determinísticos de verão, através da análise dos gráficos de balanço de massa verifica-se que a distribuição de massa destes cenários corresponde ao padrão típico dos cenários probabilísticos, uma vez que os digramas *boxplot* apresentam distribuição de massa similar.

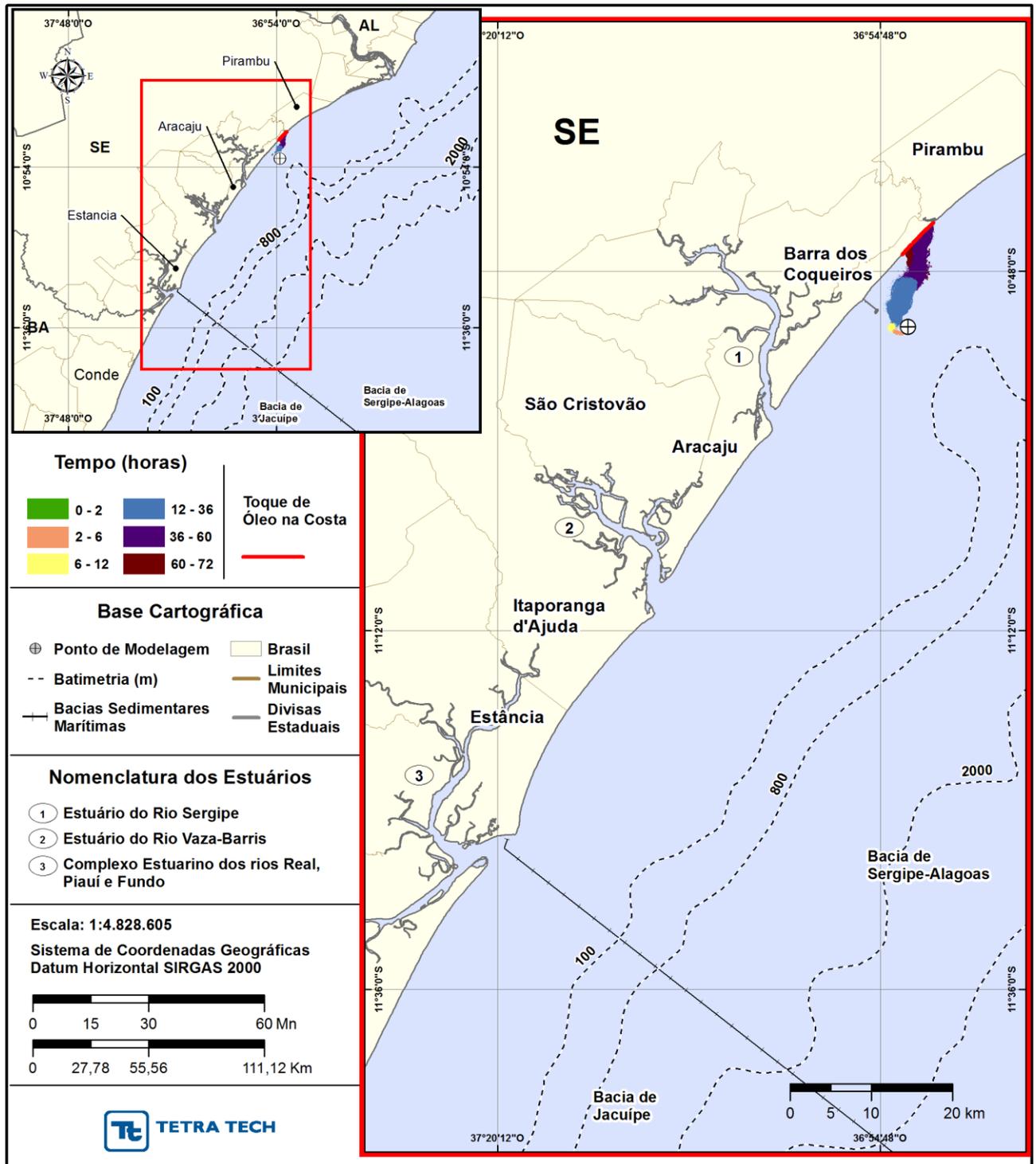


Figura 41 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré alta e vento forte.

Balanço de massa

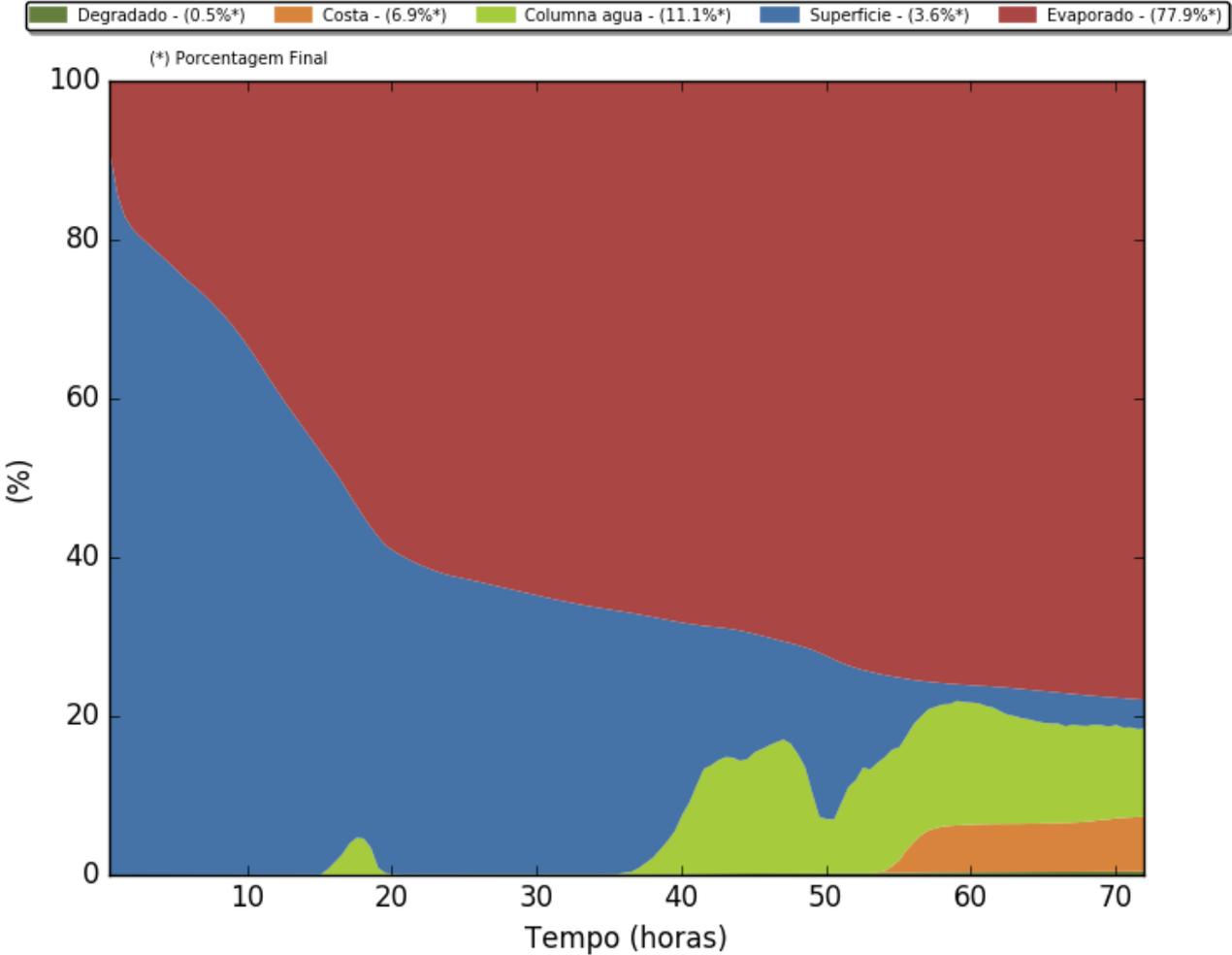


Figura 42 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFO: Balanço de massa.

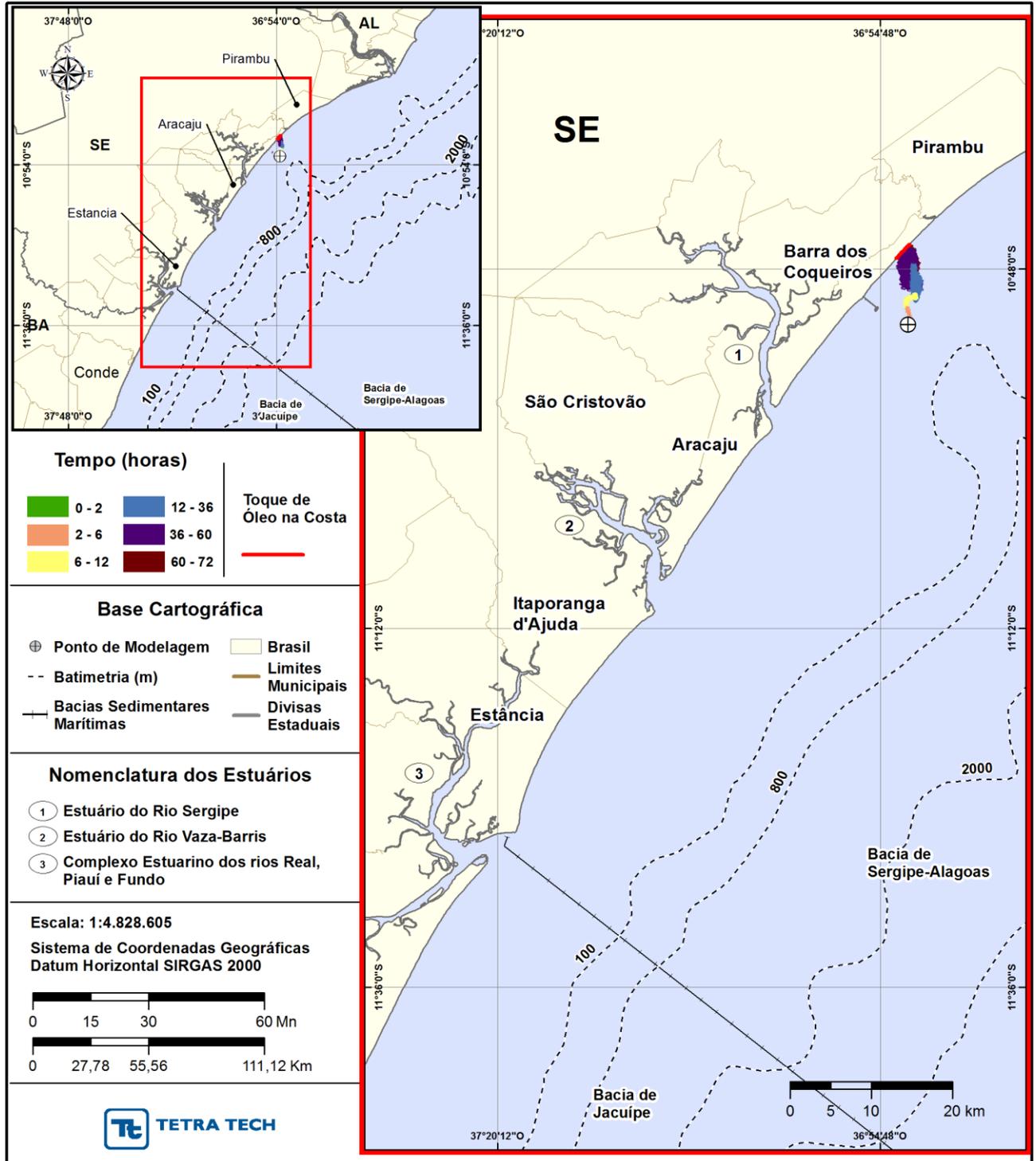


Figura 43 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré alta e vento fraco.

Balanço de massa

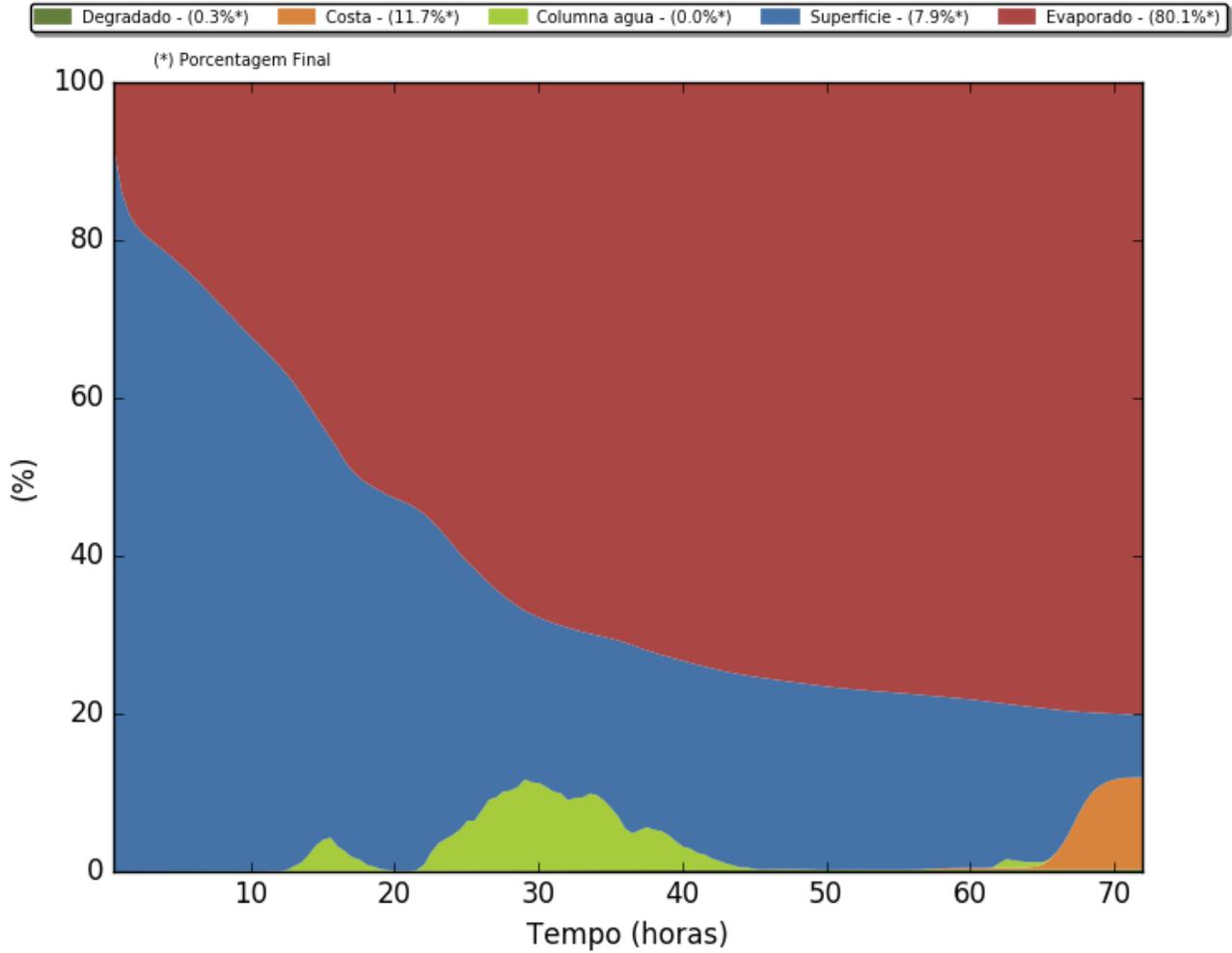


Figura 44 - DET_FSRU_PC_INV_MA_VFR: Balanço de massa.

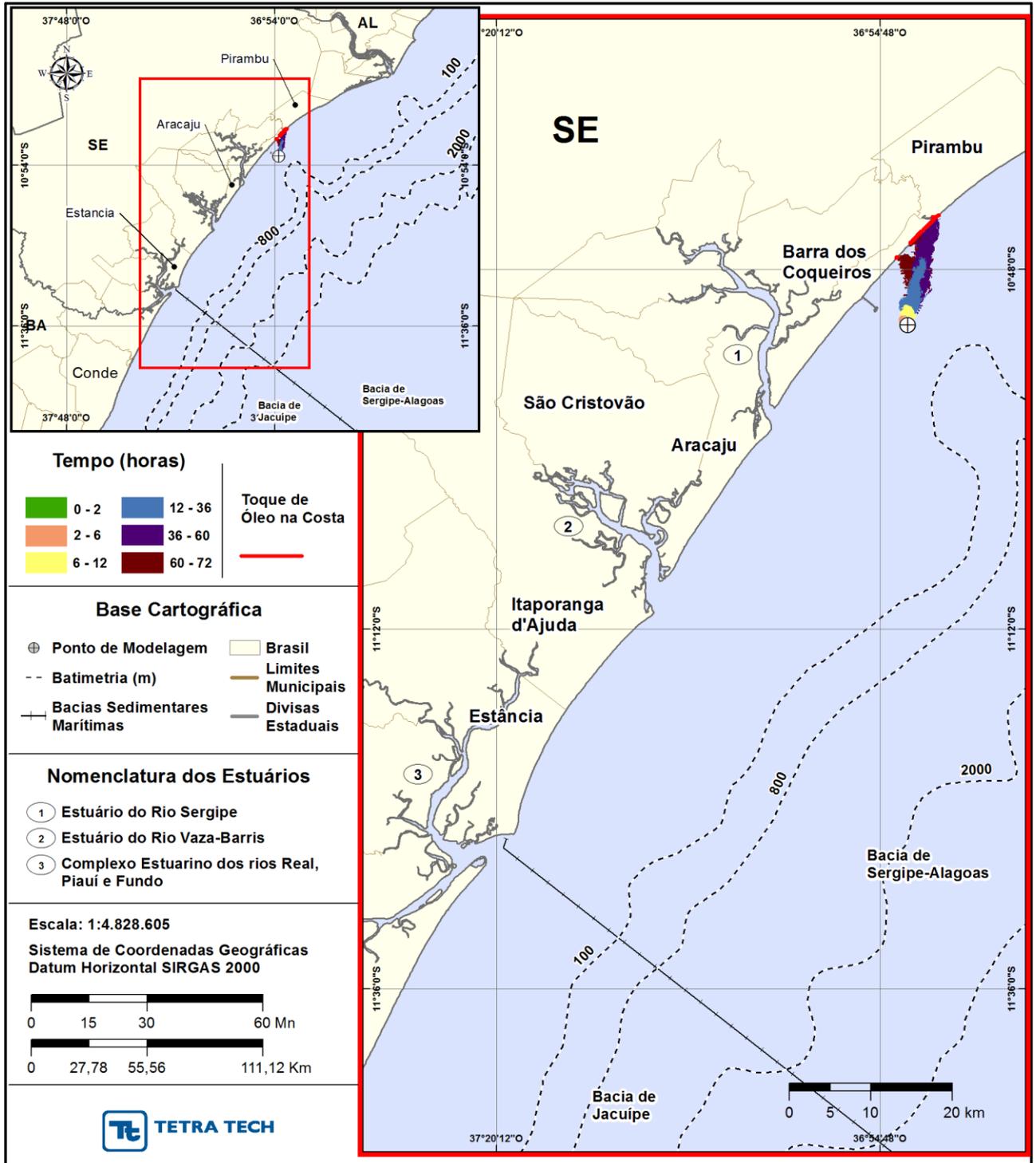


Figura 45 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFO. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré baixa e vento forte.

Balanço de massa

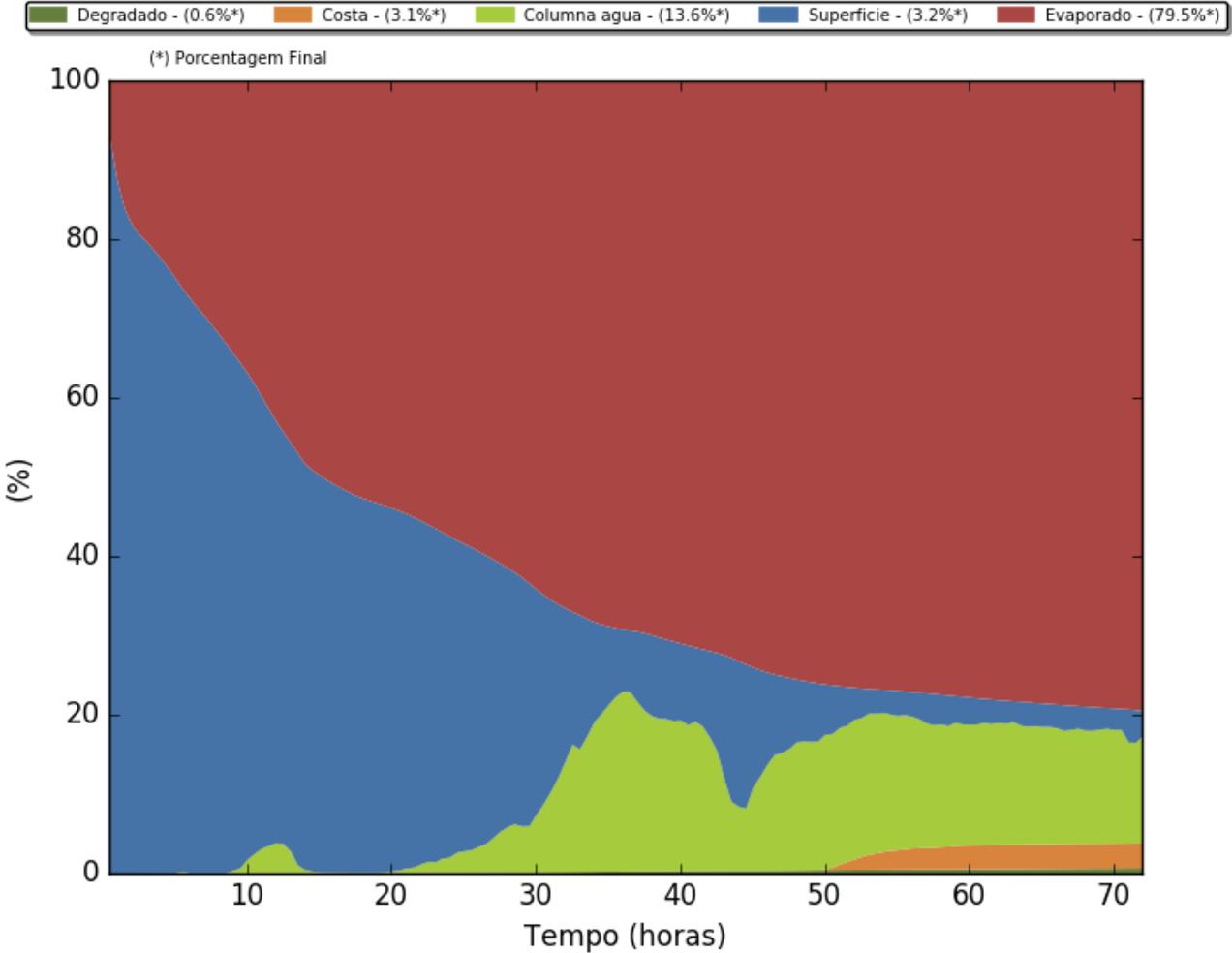


Figura 46 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFO: Balanço de massa.

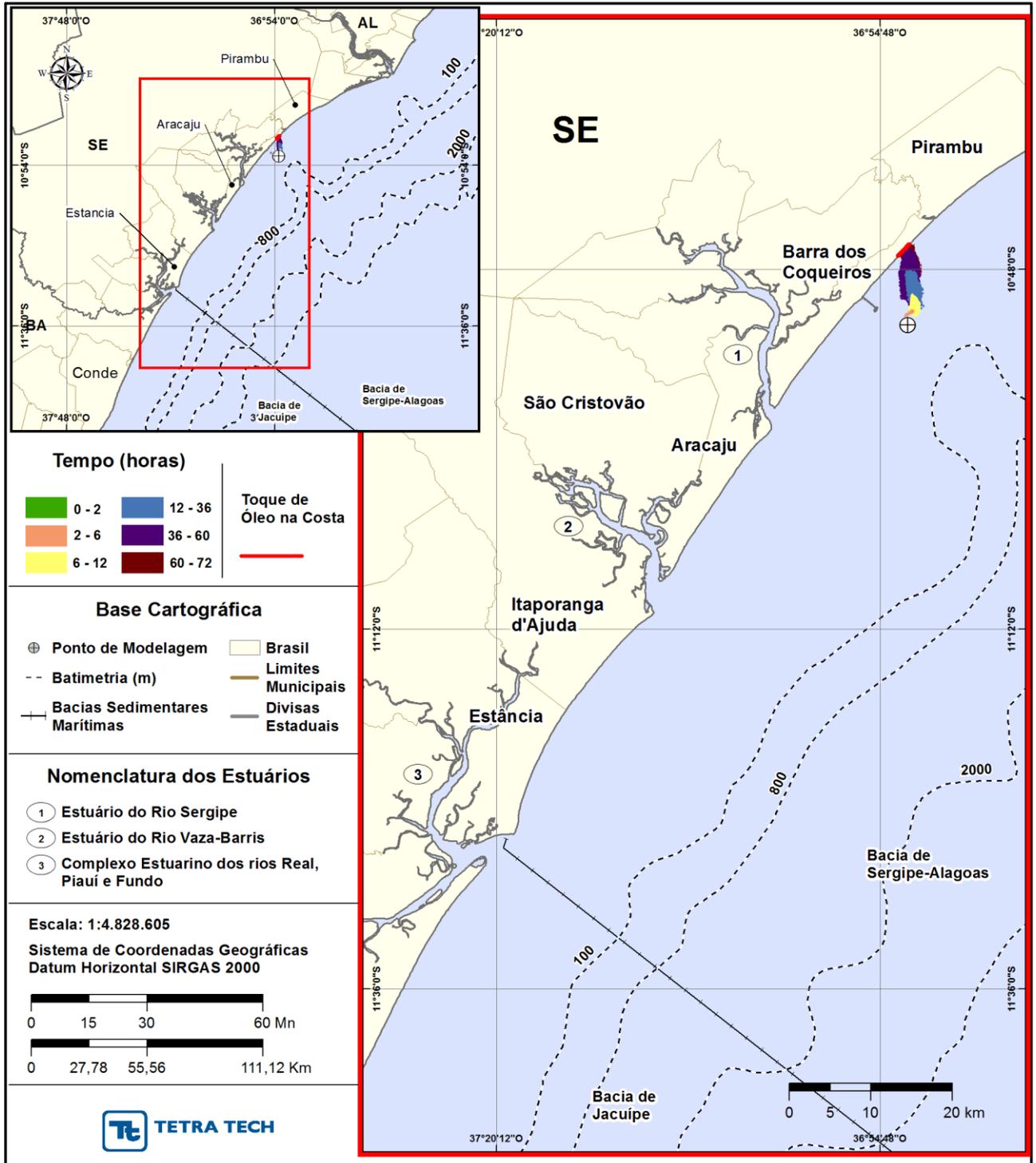


Figura 47 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFR. Contornos de tempo do deslocamento do petróleo na superfície da água, para o cenário determinístico de pior caso de inverno, maré baixa e vento fraco.

Balanço de massa

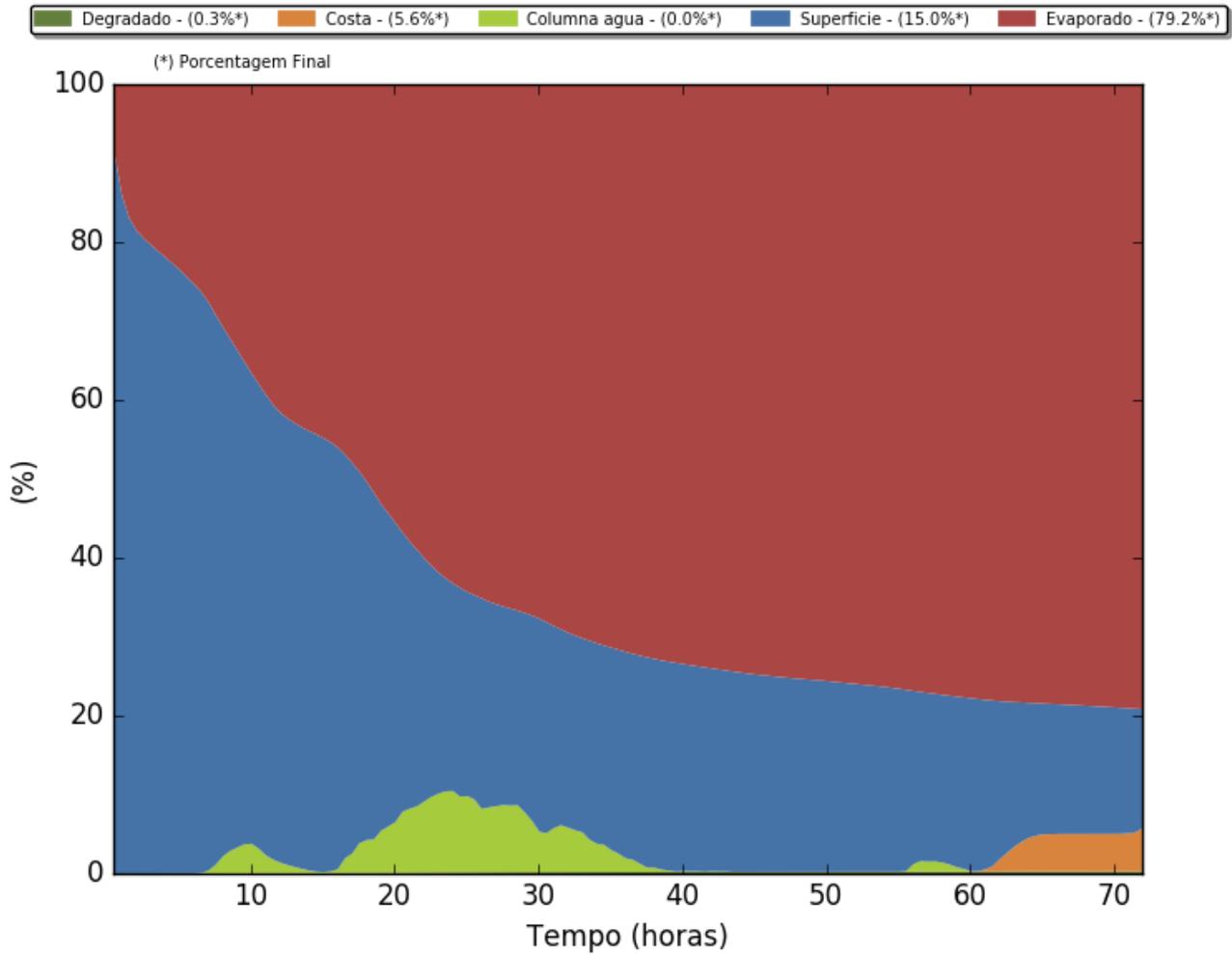


Figura 48 - DET_FSRU_PC_INV_MB_VFR: Balanço de massa.

4. BIBLIOGRAFIA

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

IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis), 2016. Mapeamento Ambiental para Resposta à Emergência no Mar – MAREM: Banco de Dados Geográficos. Rio de Janeiro, 2016. Escala indeterminável. Disponível em: <<http://www.marem-br.com.br/>>. Acesso em: 03 de junho de 2016.

SAHA S. et al. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91, p. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.

5. EQUIPE TÉCNICA

Equipe da Empresa Consultora Tetra Tech Consultoria Ltda.

Profissional	Ana Carolina R. Lammardo
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa / Ma. Oceanografia Geológica
Registro no Conselho de Classe	1.609 (AOCEANO)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 216.695.528-29)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Bruno António Duarte Passa
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	Não aplicável
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 844.997.370-87)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Bruno Scherr Martins
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo / Me. Eng. Oceânica
Registro no Conselho de Classe	Não aplicável
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 121.680.647-09)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Item 2.3, Anexo A e Anexo C
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Engenheiro Mecânico / Dr. Engenharia Oceanográfica
Registro no Conselho de Classe	0601847385 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Físico / Dr. Oceanografia Física
Registro no Conselho de Classe	Não aplicável
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 188.764.658-20)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Lara C. Ansanelli
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa
Registro no Conselho de Classe	Não aplicável
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 369.695.458-65)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Anexo A
Assinatura	_____

Profissional	Mariana Lino Gouvêa
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista
Registro no Conselho de Classe	5069291950 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5489811
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Item 2.2 e Anexo A
Assinatura	_____

Profissional	Maria Fernanda Mendes Fiedler
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa / Ma. Oceanografia Física
Registro no Conselho de Classe	Não aplicável
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 003.811.889-06)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Anexo A
Assinatura	_____

Profissional	Pedro Fabiano de Moraes Sarmiento
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	Não aplicável
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicável (CPF 303.524.648-36)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

ANEXO A – MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Este anexo apresenta a modelagem hidrodinâmica implementada na Baía de Sergipe-Alagoas, de forma que descreve os modelos numéricos e as configurações utilizadas na modelagem, além de apresentar uma caracterização da área de estudo, com o objetivo de demonstrar a capacidade da base hidrodinâmica em representar as condições ambientais locais. Os campos hidrodinâmicos obtidos através da modelagem serão utilizados como base para a modelagem numérica da trajetória de derrames de óleo.

A localização da Baía de Sergipe-Alagoas, enfoque do presente estudo, é apresentada na Figura A-1.



Figura A-1 - Localização da Baía de Sergipe-Alagoas.

Para obtenção da dinâmica oceânica na bacia e região adjacente utilizou-se o sistema de modelos Delft3D, através de seu módulo Delft3D-FLOW (DELTARES, 2013), em conjunto com os resultados do modelo HYCOM⁴. Para este estudo, duas grades numéricas foram utilizadas: uma grade maior cobrindo toda a principal região passível de ser atingida por eventuais vazamentos de óleo a partir da Bacia de Sergipe-Alagoas, coberta pelo HYCOM; e uma grade menor, compreendendo o litoral dos estados de Sergipe e parte de Alagoas, capaz de resolver com apropriadamente a dinâmica dos estuários dos rios São Francisco, Sergipe, Vaza-Barris e Piauí-Real. As grades implementadas, portanto, representam um domínio em larga escala e um domínio refinado em escala local, respectivamente. Os domínios de modelagens serão melhor caracterizados no Capítulo III.

A seguir, o Item A.1 descreve as principais características ambientais atuantes na área de estudo, sendo descritos os padrões de vento, elevação da superfície do mar e correntes oceânicas. No Item A.2, especifica-se o modelo hidrodinâmico implementado (domínio, batimetria, forçantes). A avaliação do modelo através da comparação de seus resultados com os dados de maré e correntes disponíveis é realizada no Item A.3. O Capítulo Item A.4 são apresentadas as considerações finais do presente estudo para a da Bacia de Sergipe-Alagoas. Por fim, os itens A.5 e A.6 apresentam, respectivamente, a descrição detalhada do sistema de modelos Delft3D-FLOW e as referências bibliográficas.

A.1 ANÁLISE DE DADOS AMBIENTAIS

A seguir, apresenta-se uma descrição dos principais padrões meteorológicos e oceanográficos da área de estudo a partir da análise de dados locais, de forma a dar suporte aos estudos de modelagem numérica.

O levantamento de dados meteorológicos e oceanográficos nas imediações da região de estudo teve por objetivo: 1) obter informações para uma melhor compreensão e descrição da dinâmica da área; e 2) auxiliar a preparação das forçantes para as modelagens, bem como para a avaliação dos resultados da modelagem hidrodinâmica. As análises são baseadas em informações de dados pretéritos, descritos e analisados neste capítulo.

⁴ HYbrid Coordinate Ocean Model.

A.1.1 Ventos

A porção do Nordeste Brasileiro (NEB), que se estende do litoral da Bahia ao Rio Grande do Norte, onde se encontra a área de enfoque deste trabalho, possui clima classificado como litorâneo úmido (CAVALCANTI *et al.*, 2009). As principais características meteorológicas desta região são determinadas pela sua localização em baixa latitude, sendo influenciadas principalmente pelos sistemas atmosféricos em escala sinótica.

A circulação atmosférica é influenciada principalmente pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é formada pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte e do hemisfério sul. A sazonalidade da ZCIT é caracterizada por um deslocamento para sul durante o verão do hemisfério sul, chegando à posição aproximada de 2°S a 4°S entre os meses de fevereiro e abril, e para norte durante o inverno, chegando a até aproximadamente 14°N entre agosto e outubro (FERREIRA & MELLO, 2005). Outro sistema relacionado é a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que pode influenciar principalmente a porção sul do Nordeste Brasileiro. A ASAS se intensifica com regularidade, avançando de sudeste para noroeste a partir do final do verão no hemisfério sul, atingindo sua máxima intensidade em julho e declinando até janeiro (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

As brisas terrestre e marítima nem sempre são percebidas no nordeste do Brasil, onde os ventos alísios são persistentes e intensos durante todo o ano (FERREIRA & MELLO, 2005). Via de regra, as brisas contribuem para mudar um pouco a direção e a velocidade do vento. Dependendo da orientação da costa, a velocidade do vento, resultante da superposição alísio-brisa, pode ser maior ou menor que a do alísio (VAREJÃO-SILVA, 2001).

Para a caracterização do regime de ventos da Bacia de Sergipe-Alagoas são apresentados, a seguir, dois conjuntos de dados, sendo um associado especificamente ao regime costeiro e outro à descrição da condição *offshore*, conforme descrito a seguir:

- Região costeira: dados da codificação METAR medidos em Aracaju (SE), estação SBAR, localizada às coordenadas 10,98°S e 37,07°W, fornecidos através da rede REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica, www.redemet.aer.mil.br).

- Região *offshore*: dados da reanálise CFSR⁵ (SAHA *et al.*, 2010), avaliados sobre a célula de grade centrada nas coordenadas 11,4°S e 35,6°W. O produto de reanálise CFSR é constituído por um conjunto de assimilação de dados que acopla os sistemas oceano-superfície-atmosfera e continente-gelo, em escala global, disponibilizando informações sobre estes domínios no período desde 1979 até 2010, com resolução espacial de 0,3° e temporal horária.

Nota-se que os dados medidos na estação costeira SBAR são utilizados a fim de detalhar a circulação dos ventos em escala local, enquanto a base de dados CFSR apresenta reconhecida qualidade na descrição da condição atmosférica com distribuição espacial em meso e larga escala. As Figuras A-2 e A-3 apresentam as rosas de ventos mensais obtidas, respectivamente, a partir de cada um dos conjuntos de dados. Complementarmente, as Tabelas A-1 e A-2 apresentam um resumo das condições predominantes da intensidade e direção a cada mês. A análise dos ventos para a área de estudo indica uma semelhança entre os ventos de outubro a março e outra entre abril a setembro.

⁵ *Climate Forecast System Reanalysis.*

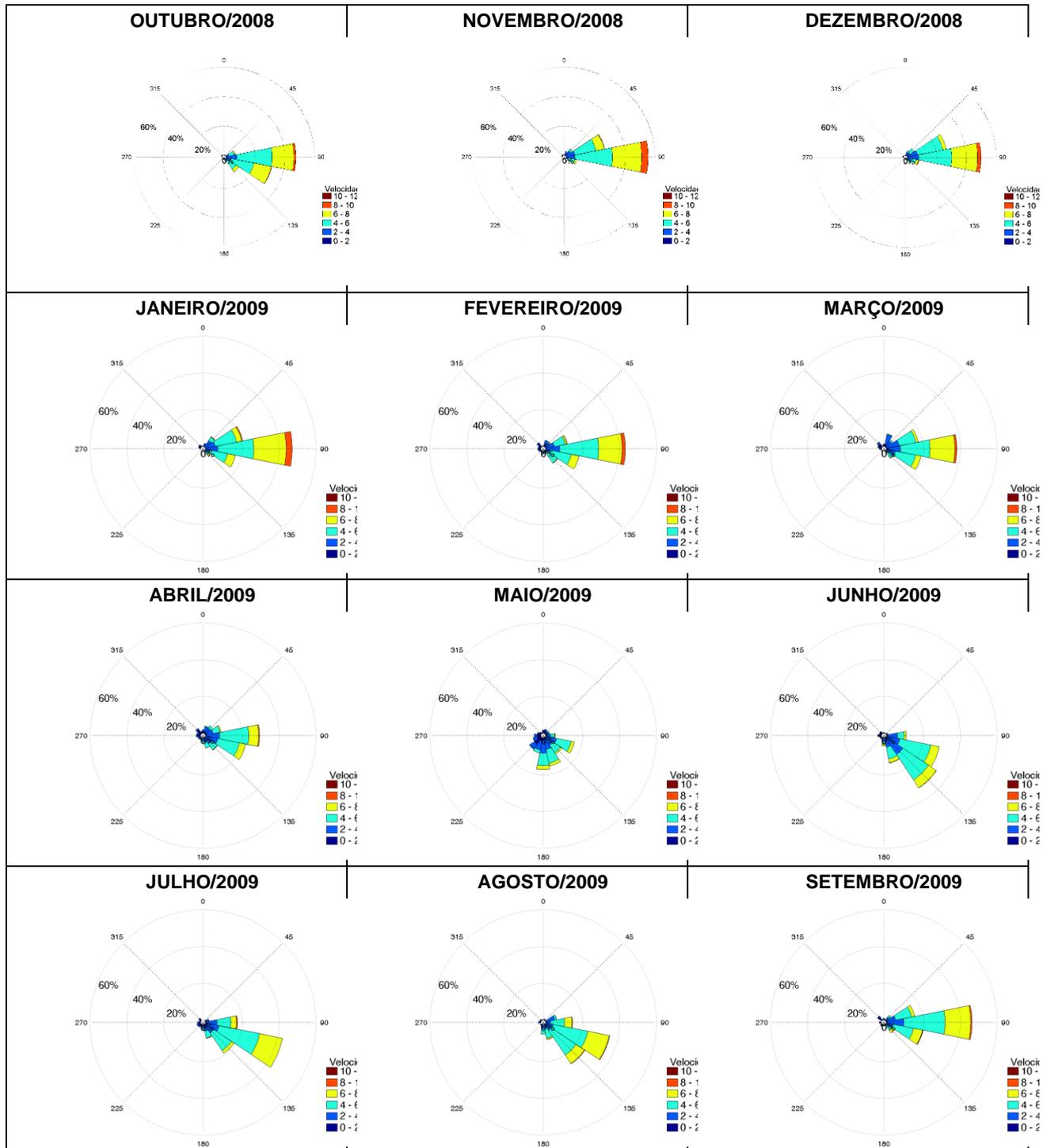


Figura A-2 - Rosas dos ventos mensais medidos na estação METAR SBAR, em Aracaju (SE), desde outubro de 2008 até setembro de 2009, representativo da condição costeira (ou local).

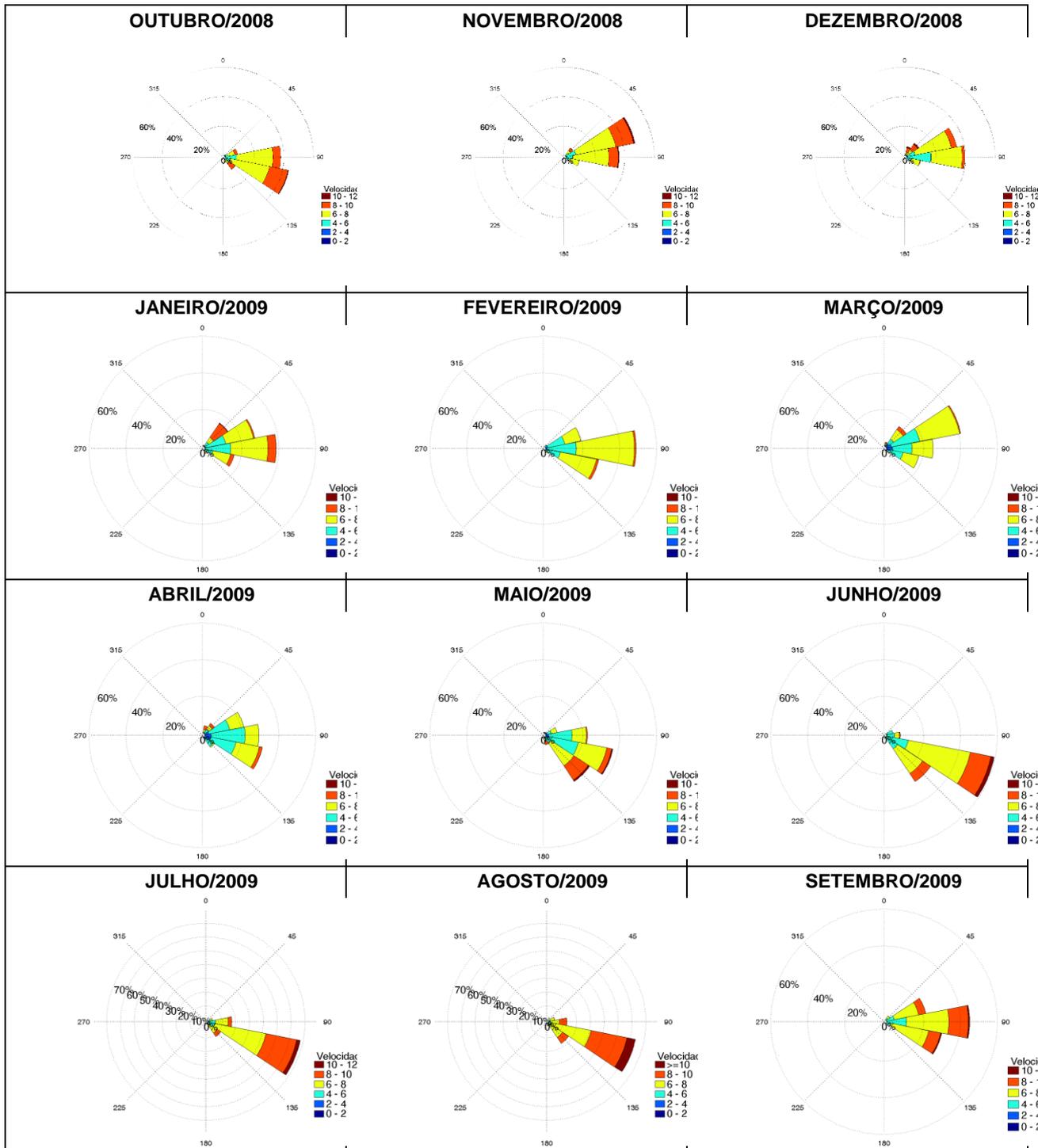


Figura A-3 - Rosas dos ventos mensais segundo a reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W, desde outubro de 2008 até setembro de 2009, representativo da condição offshore (ou de larga escala).

Tabela A-1 - Direção e intensidades predominantes por mês, e suas respectivas porcentagens de ocorrência, do vento medido na estação METAR SBAR, desde outubro de 2008 até setembro de 2009.

MESES	DIREÇÃO PREDOMINANTE	PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIA	INTENSIDADE PREDOMINANTE	PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIA
Janeiro	E	45,5%	4 a 6 m/s	45,4%
Fevereiro	E	42,2%	4 a 6 m/s	47,3%
Março	E	37,5%	4 a 6 m/s	41,5%
Abril	E	29,0%	4 a 6 m/s	41,7%
Maio	ESE	15,2%	2 a 4 m/s	41,8%
Junho	SE	32,9%	4 a 6 m/s	45,6%
Julho	ESE	42,8%	4 a 6 m/s	46,5%
Agosto	ESE	35,4%	4 a 6 m/s	52,8%
Setembro	E	46,5%	4 a 6 m/s	47,2%
Outubro	E	47,0%	4 a 6 m/s	52,6%
Novembro	E	53,9%	4 a 6 m/s	47,1%
Dezembro	E	49,1%	4 a 6 m/s	51,3%

Tabela A-2 - Direção e intensidades predominantes por mês, e suas respectivas porcentagens de ocorrência, do vento dado pela reanálise CFSR no ano de 2009.

MESES	DIREÇÃO PREDOMINANTE	PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIA	INTENSIDADE PREDOMINANTE	PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIA
Janeiro	E	38,7%	6 a 8 m/s	49,8%
Fevereiro	E	49,1%	6 a 8 m/s	61,3%
Março	ENE	42,0%	6 a 8 m/s	49,3%
Abril	ESE	31,8%	4 a 6 m/s	51,5%
Maio	ESE	37,1%	6 a 8 m/s	43,4%
Junho	ESE	58,7%	6 a 8 m/s	53,1%
Julho	ESE	67,0%	6 a 8 m/s	56,5%
Agosto	ESE	63,6%	6 a 8 m/s	50,0%
Setembro	E	44,9%	6 a 8 m/s	59,2%
Outubro	ESE	43,9%	6 a 8 m/s	60,1%
Novembro	ENE	47,5%	6 a 8 m/s	62,5%
Dezembro	E	40,2%	6 a 8 m/s	57,8%

A.1.2 Elevação

Para identificar o padrão da elevação de superfície do mar na região de estudo, foram realizadas análises com os dados da estação maregráfica do Terminal Portuário de Sergipe (SE), obtidos da FEMAR⁶. Os conjuntos de dados FEMAR oferecem informações sobre as constantes harmônicas e médias de sizígia e quadratura, conforme apresentado na Figura A-4.

Nome da Estação : TERMINAL PORTUÁRIO DE SERGIPE - SE					
Localização : Barra dos Coqueiros					
Organ. Responsável : DHN / CVRD					
Latitude : 10° 50,0' S		Longitude : 36° 55,7' W			
Período Analisado : 18/02/91 a 19/03/91			Nº de Componentes : 17		
Análise Harmônica : Método Almirante Santos Franco					
Classificação : Maré Semidiurna.					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 51 min	Nível Médio (Zo):		124 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		225 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		170 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		77 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	-	-
Ssa	-	-	N ₂	14,6	097
Mm	3,3	200	NU ₂	2,8	098
Mf	-	-	M ₂	74,0	107
MTM	-	-	L ₂	2,4	144
Msf	3,1	344	T ₂	1,6	122
Q ₁	2,1	088	S ₂	27,4	122
O ₁	6,4	120	K ₂	7,4	123
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	1,1	224	M ₃	-	-
K ₁	3,2	233	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	1,1	160
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	1,9	086	MS ₄	-	-
Referências de Nível: RN marco de concreto junto à balança rodoviária, no início da ponte de acesso ao cais. RN 1,2 e 3 d DHN localizadas próximo ao marégrafo, no cais da Sereia					

Figura A-4 - Tabela das componentes de maré com os valores de amplitude, fase e nível de referência para a Estação Terminal Portuário de Sergipe – Estado de Sergipe (Fonte: FEMAR).

⁶Fundação Estudos do Mar. Disponível em: <<http://www.fundacaofemar.org.br/>>. Último acesso em: 22 de junho de 2016.

A maré na área de estudo foi classificada de acordo com a razão entre as duas maiores amplitudes das componentes diurnas e semidiurnas, conforme apresentado na equação abaixo:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{S_2 + M_2} \quad (\text{Eq. A.1-1})$$

Os valores de F foram próximos de zero (de 0,09) para todas as estações, indicando domínio das amplitudes das componentes semidiurnas S_2 e M_2 . Portanto, a maré da região da área de estudo é classificada como semidiurna.

A obtenção das alturas da oscilação de maré astronômica foi realizada através do método de análise e previsão harmônica, baseada na análise de Fourier e desenvolvida por Schureman (1958). Este método considera as componentes de maré com ciclos mais curtos e com maiores amplitudes (Q_1 , P_1 , O_1 , K_1 , S_2 , M_2 , N_2 , K_2 , M_3 , MN_4 , M_4 , MS_4). A análise harmônica de maré é realizada admitindo-se que as variações do nível do mar próximo à costa podem ser expressas matematicamente pela soma de séries harmônicas relacionadas a condições astronômicas. Uma função harmônica simples é uma quantidade que varia com o cosseno de um ângulo, que progride uniformemente no tempo. Sua formulação é dada genericamente por $y = A \cos(at)$, onde y é a função harmônica do ângulo (at), a é uma constante e t representa o tempo decorrido a partir de uma data inicial.

A equação geral para uma altura h de maré a qualquer instante de tempo t pode ser escrita como:

$$h = Z_0 + A \cos(at + \alpha) + B \cos(bt + \beta) + C \cos(ct + \gamma) + \text{etc ...} \quad (\text{Eq. A.1-2})$$

Onde Z_0 é a altura do nível médio do mar acima do *datum* usado, e os termos com cossenos são conhecidos como constituintes ou componentes harmônicos. Os coeficientes A , B , C , etc., são as amplitudes de cada constituinte. Estes coeficientes são constantes, sendo obtidos através de observações de maré em cada localidade. A expressão entre parênteses nos constituintes harmônicos é um ângulo que varia uniformemente e seu valor é chamado de fase.

A previsão harmônica de maré para a análise da variabilidade anual foi gerada para os períodos correspondentes àqueles utilizados na simulação hidrodinâmica, sendo verão (outubro de 2008 a março de 2009) e inverno (abril a setembro de 2009), conforme subitem A.1.1. As séries de previsão harmônica de maré são apresentadas nas Figuras A-5 e A-6.

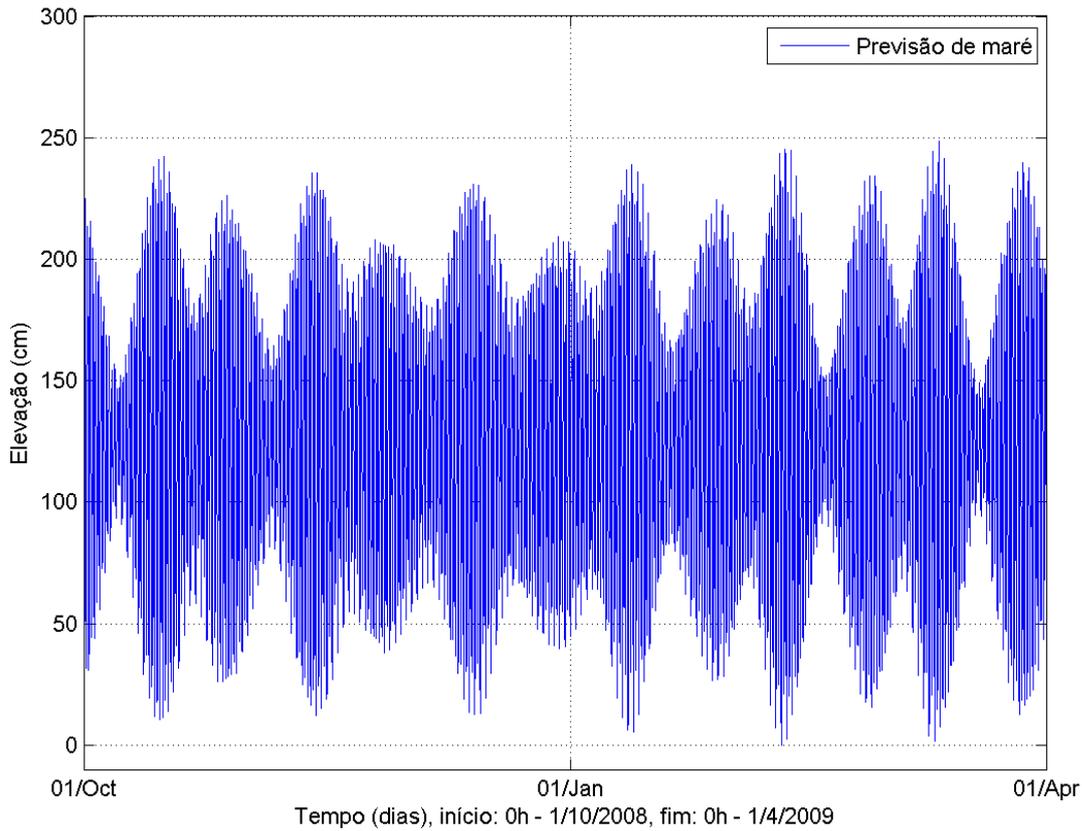


Figura A-5 - Previsão harmônica de maré obtida para o Terminal Portuário de Sergipe (SE) para o período de outubro de 2008 a março de 2009, a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR.

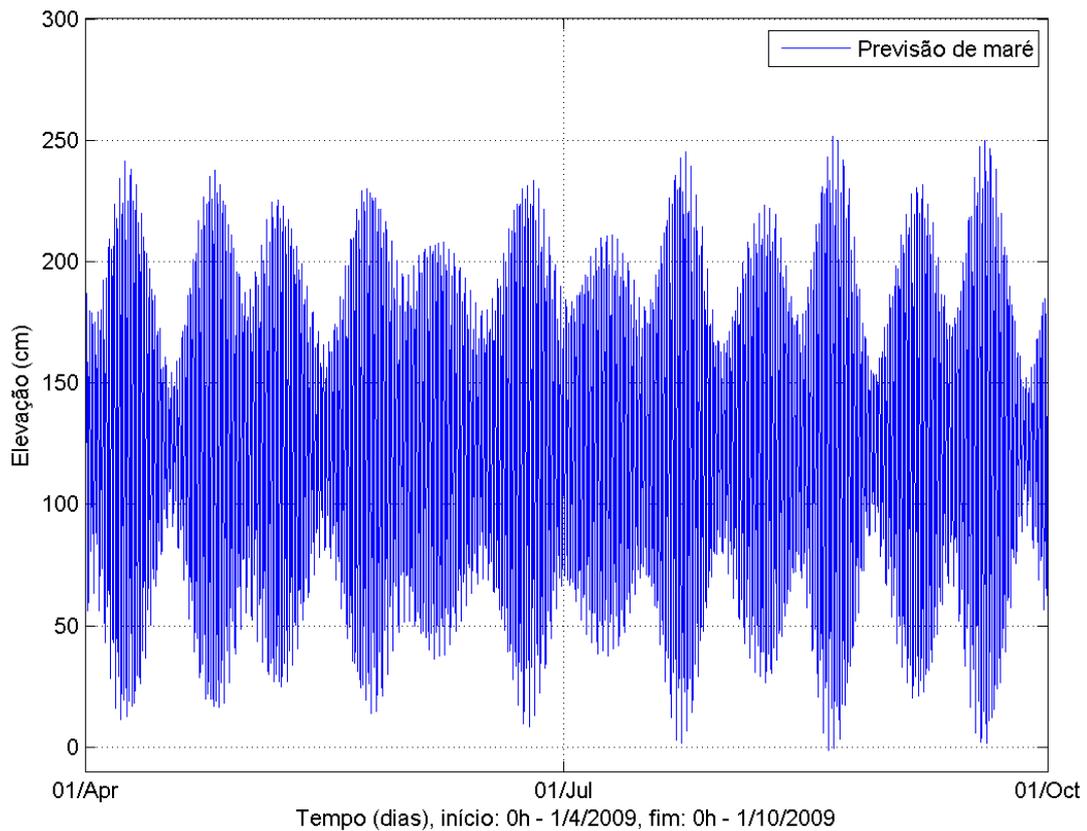


Figura A-6 - Previsão harmônica de maré obtida para o Terminal Portuário de Sergipe (SE) para o período de abril a setembro de 2009, a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR.

O nível médio (Z_0) de 124 cm, conforme apresentado na Figura A-4, foi somado às previsões harmônicas. A análise dos dados coletados (Figuras A-5 e A-6) demonstrou que a maré astronômica apresenta oscilações máximas da ordem de 250 cm na maré de sizígia, com mínimo de 0 cm, em ambos períodos sazonais analisados.

A.1.3 Correntes

A Plataforma Continental Leste Brasileira (PCLB), definida de acordo com suas características dinâmicas entre as latitudes de 8°S e 15°S (CASTRO & MIRANDA, 1998 *apud* AMORIM, 2011) abriga a Bifurcação da Corrente Sul Equatorial (BCSE). A Bifurcação dá origem às seguintes Correntes de Contorno Oeste (CCOs): Corrente do Brasil (CB), com fluxo em direção ao sul, e Corrente Norte do Brasil (CNB), com fluxo em direção ao equador (AMORIM, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2007).

De acordo com RODRIGUES *et al.* (2007), a BCSE na superfície ocorre entre 10°S e 14°S, deslocando-se para sul com o aumento da profundidade. Esta alcança cerca de 27°S aos níveis de 1000 metros de profundidade. A posição zonal da BCSE oscila não só com a profundidade, mas também de acordo com a sazonalidade. Ainda de acordo com os autores, devido ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical, que afeta diretamente o rotacional da tensão do vento, a BCSE sofre uma expressiva excursão latitudinal ao longo do ano. Durante os meses de primavera e verão, um rotacional positivo do vento produz uma circulação que move a BCSE para norte; o contrário se dá nos meses de outono e inverno, onde um rotacional negativo move a BCSE para sul.

A localização latitudinal da Baía de Sergipe-Alagoas faz com esta se encontre na região de influência da BCSE, sendo susceptível à sua sazonalidade. Desta forma, durante o período de verão, a porção *offshore* da região de estudo apresenta maior variabilidade na direção das correntes, devido à proximidade da BCSE, enquanto no inverno as correntes oceânicas são predominantes para norte, por estar a BCSE localizada mais ao sul.

Para a caracterização do regime de correntes sobre a plataforma continental da Baía de Sergipe-Alagoas foram analisados quatro conjuntos de dados privados, desta forma, suas análises não serão mostradas no presente estudo. Em linhas gerais os dados de corrente medidos sobre a plataforma continental da Baía de Sergipe-Alagoas, indicam um padrão semelhante, ou seja, com pequena variação sazonal, seguindo predominantemente na direção Sul-Sudoeste, influenciadas principalmente pelo padrão de ventos descrito no item anterior e pela orientação da costa. Um outro conjunto de dados mostrou uma leve predominância nas correntes na direção Sudoeste, como descrito para os demais conjuntos de dados, mas também uma maior variabilidade na direção das correntes, uma vez que o fundeio foi posicionado na região da quebra da plataforma continental. A circulação desta região é pautada pela influência das correntes costeiras, regidas principalmente pelo vento, como também pelas oceânicas, dominada em meso-escala pela Corrente Norte do Brasil, que segue em sentido oposto à anterior, em seu caminho para norte/nordeste.

A.2 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW (DELTARES, 2013), em conjunto com o modelo HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*, BLECK, 2002) foram selecionados como ferramenta para se atingir os objetivos propostos neste estudo de gerar uma base hidrodinâmica para a costa leste brasileira, com foco na Baía de Sergipe-Alagoas.

O sistema de modelos Delft 3D 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 do Delft3D-FLOW, que justificam sua escolha para este estudo, são descritas no Capítulo 5.

O modelo HYCOM é um modelo geral de circulação oceânica (do inglês, *Ocean General Circulation Model* - OGCM), considerado o estado da arte em modelos de equações primitivas. Seu sistema de coordenadas híbridas garante a implementação de coordenadas isopícnais em oceano profundo e estratificado que fazem uma transição suave para coordenada z na camada de mistura superficial oceânica, e para coordenadas do tipo *sigma*, que seguem o assoalho oceânico nas áreas de quebra de plataforma continental e regiões menos profundas, retornando à coordenada z em águas muito rasas.

Os resultados obtidos com a modelagem numérica foram comparados a dados disponíveis (dados de correntes e elevação) para avaliação da base hidrodinâmica gerada.

A.2.1 Implementação do Modelo Numérico

As grades implementadas representam um compromisso entre a descrição dos processos hidrodinâmicos presentes na região de interesse (escala temporal e espacial), dos recursos computacionais disponíveis no período de execução da simulação e do tempo de processamento necessário. Para este estudo, duas grades numéricas foram implementadas, conforme apresentado na Figura A-7. Uma grade engloba o domínio regional, coberta pelo HYCOM, e outra representa o domínio local, com melhor resolução espacial. A grade do domínio local foi implementada com o sistema Delft3D e abrange desde a região estuarina dos rios dos estados de Sergipe e parte de Alagoas até a fronteira

oceânica em 34,8°W, com limite norte em 9,95°S e sul em 12,2°S (Figura A-8). As características das grades são apresentadas na Tabela A-5.

A implementação da grade do HYCOM teve como intuito atender às demandas da modelagem de dispersão de óleo. Para isso, o domínio espacial definido pela grade local do Delft3D foi complementado através do acoplamento de resultados do modelo HYCOM às suas bordas, sendo desta forma o domínio hidrodinâmico estendido até os limites latitudinais de 2,1°N e 26,2°S e longitudinais de 48,6°W e 30°W. A base hidrodinâmica do HYCOM, com resolução espacial de 1/12° de grau (aproximadamente 8 km) e temporal de 3 horas, foi também utilizada como condição de contorno para a grade do Delft3D, conforme detalhado no Item seguinte. Esta base foi gerada pelo *HYCOM Consortium* e encontra-se disponível online em www.hycom.org.

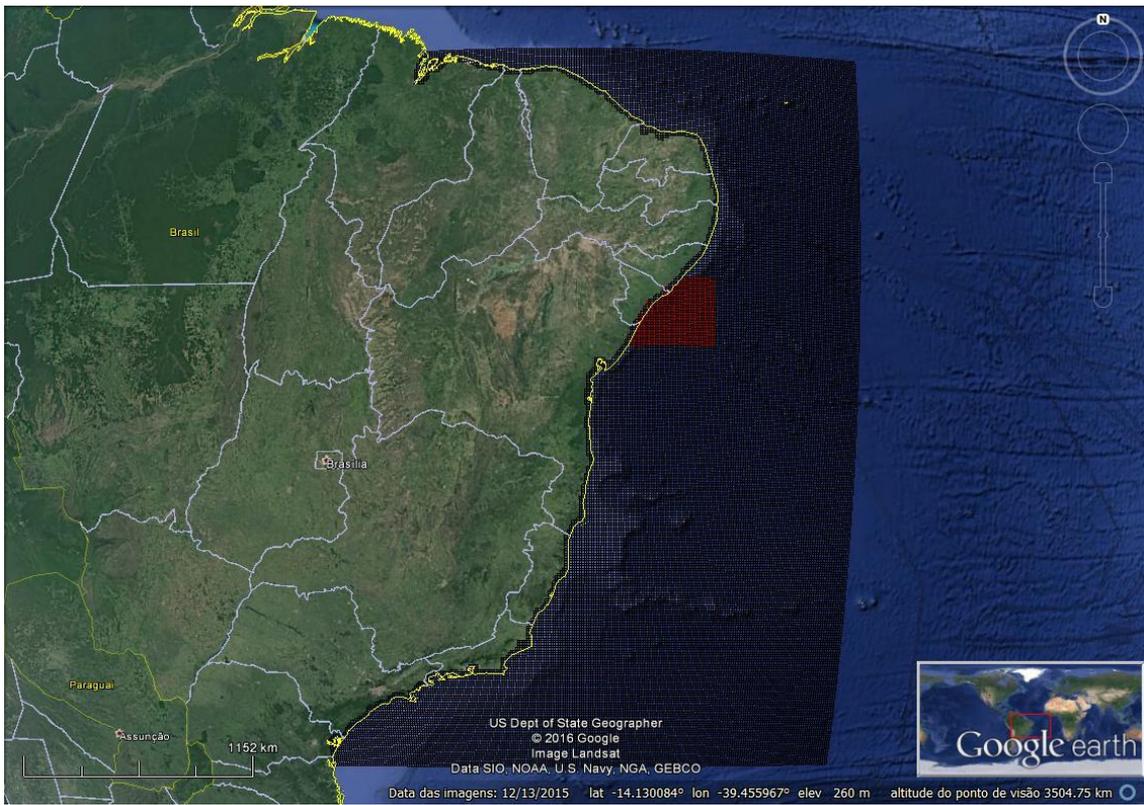


Figura A-7 - Domínio computacional considerado pelo HYCOM com detalhe em vermelho para o domínio do Delft

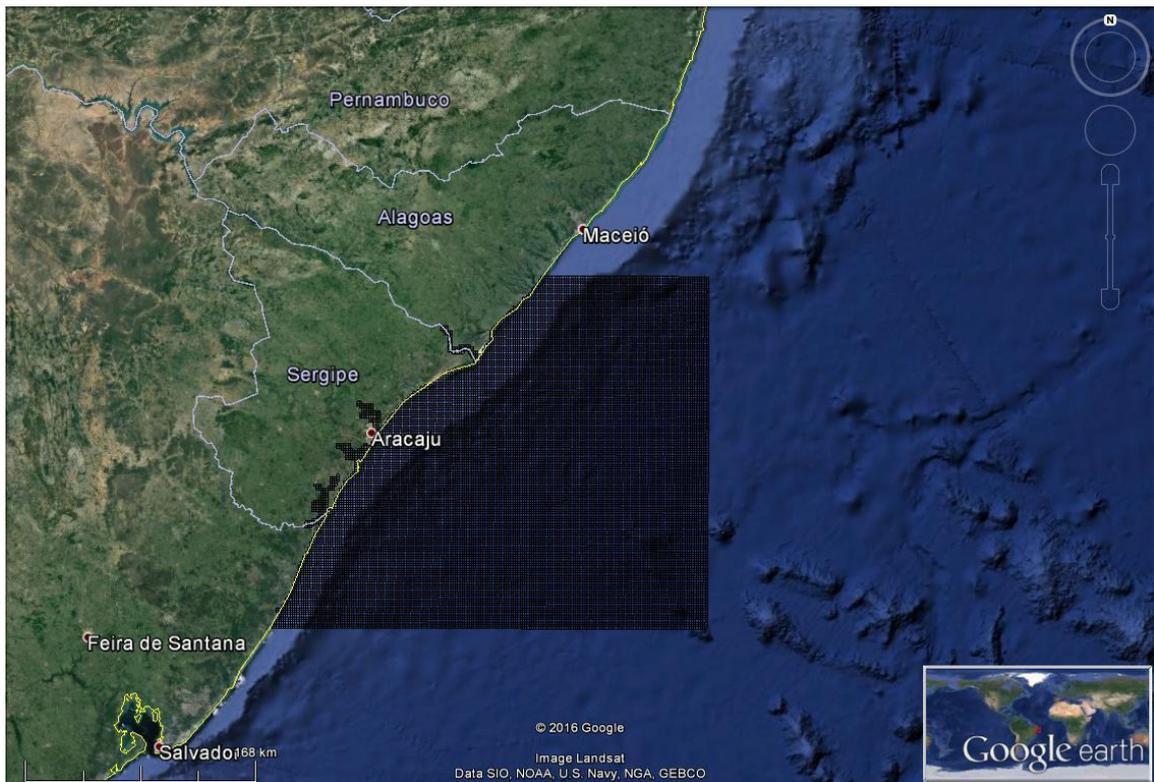


Figura A-8 - Domínio computacional considerado pela grade do Delft3D com maior resolução nos estuários dos estados de SE e AL.

Tabela A-5 - Características das grades numéricas do Delft3D.

GRADE	DIMENSÃO HORIZONTAL	ESPAÇAMENTO
Grade HYCOM	227 x 293	~8 km
Grade Delft3D	191 x 152	~1,5 km

Os dados de profundidade utilizados na modelagem local foram obtidos de informações batimétricas provenientes do banco de dados da TETRA TECH e, para as regiões mais profundas, foram utilizadas as informações disponibilizadas pelo GEBCO⁷. Os resultados finais da projeção da batimetria estão ilustrados na Figura A-9. A batimetria utilizada na simulação do HYCOM é proveniente da base de dados do *HYCOM Consortium*.

⁷ *General Bathymetric Chart of the Oceans*. Obtido em: <http://www.gebco.net/>. Data de último acesso: fevereiro de 2014.

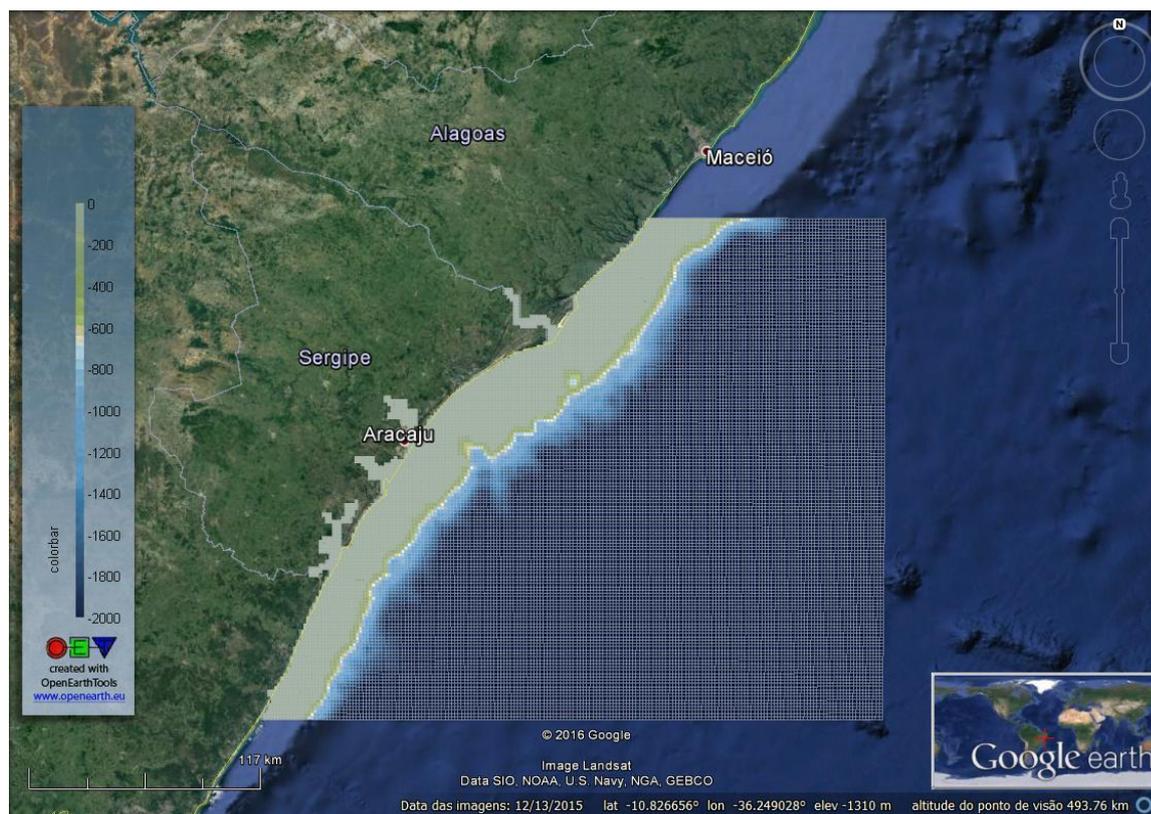


Figura A-9 - Batimetria (m) associada à grade implementada no Delft 3D.

A.2.2 Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno naturais do modelo são dadas pela velocidade normal nula nos contornos terrestres. Na superfície livre, além das condições dinâmicas locais (MELLOR & YAMADA, 1982), é também considerada a tensão de cisalhamento do vento. Opcionalmente, fluxos de calor e sal (evaporação) podem ser incluídos. No fundo são aplicadas as condições dinâmicas descritas em Mellor & Yamada (*op. cit.*). A velocidade de arrasto é calculada como uma função empírica da energia cinética turbulenta, por sua vez decorrente do fechamento turbulento de segunda ordem.

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

O sistema de modelos Delft3D possibilita a utilização de contornos abertos. Nesses contornos abertos (ou bordas abertas) podem ser atribuídas condições forçantes (ativas) ou condições radiacionais (passivas). Quando são aplicadas forçantes nas bordas abertas, pode se utilizar séries temporais ou valores constantes para diferentes variáveis pertinentes ao sistema estudado.

A.2.2.1 Fronteiras Oceânicas

Para as simulações numéricas da grade local foi considerado um conjunto de 40 bordas abertas. Foram utilizados (1) dados de elevação da superfície do mar oriundos do modelo global de maré TPXO⁸ e (2) dados de temperatura, salinidade e correntes em diversos níveis, provenientes da base de dados do consórcio HYCOM⁹.

As forçantes hidrodinâmicas de elevação e correntes foram impostas nas bordas do modelo 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 ondas transmitidas, 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, 2013).

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

$$f(t) = U + \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (\text{Eq. A.2.2.1-1})$$

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);

g é a aceleração da gravidade;

d é a profundidade.

⁸ <http://volkov.oce.orst.edu/tides/>

⁹ <http://hycom.org/>

A grade do HYCOM tem domínio global com resolução 1/12°, conforme descrito anteriormente, e maiores informações acerca das configurações da simulação podem ser encontradas em www.hycom.org.

A.2.2.2 Fronteiras Atmosféricas

Foram utilizados dados atmosféricos variáveis no tempo e no espaço para forçar o modelo hidrodinâmico, tendo como principal base a reanálise CFSR (SAHA *et al.*, 2010). A CFSR contempla em seu processamento o acoplamento entre o oceano e a atmosfera, possui um modelo interativo de gelo marinho e também incorpora uma técnica de assimilação dados de satélite, através de interpolação estatística, disponibilizando assim produtos globais de reanálise com resolução espacial de 0,3° e resolução temporal horária. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo também seus efeitos sobre o sistema climático terrestre. Esta série de fatores difere a CFSR de outros produtos de reanálise, permitindo a qualidade da representação dos campos atmosféricos em alta resolução espacial e temporal.

Para as simulações no domínio local, de maior resolução, optou-se pela inclusão, em caráter complementar, dos ventos observados na estação METAR de Aracaju (estação SBAR, descrita no subitem A.1.1), a fim de enriquecer o detalhamento da condição atmosférica forçante. Este processo foi realizado com a utilização de um filtro de interpolação aplicado sobre um raio de influência em torno da estação, com decaimento senoidal da influência dos dados medidos com a distância. A aplicação deste filtro permitiu a incorporação dos dados METAR ao campo da CFSR a cada hora de maneira coerente.

As Figuras A-10 e A-11 apresentam campos instantâneos do vento a 10 m, demonstrando exemplos do padrão espacial de circulação nos períodos de verão e de inverno, respectivamente. Ambas as figuras apresentam o campo sinótico sobre todo o domínio hidrodinâmico e um detalhamento do padrão local sobre o litoral do estado de Sergipe e região adjacente. Para representação do período de verão é apresentado o campo instantâneo em 10 de fevereiro de 2009 às 00 UTC, enquanto para o período de inverno o instante retratado é 10 de julho de 2009 às 12 UTC.

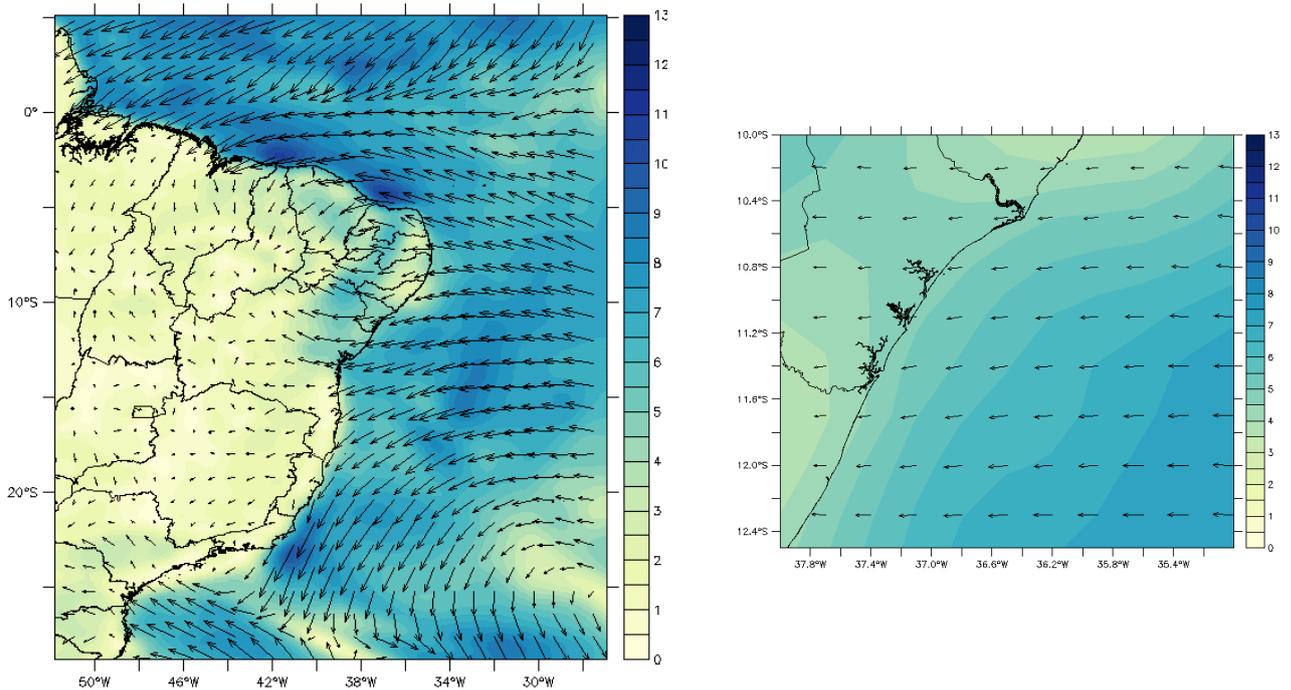


Figura A-10 - Campo de vento instantâneo representativo do período de verão, a partir da composição entre a CFSR e dados da estação METAR SBAR. A escala de cores indica a intensidade do vento (em m/s) e os vetores a direção (convenção meteorológica).

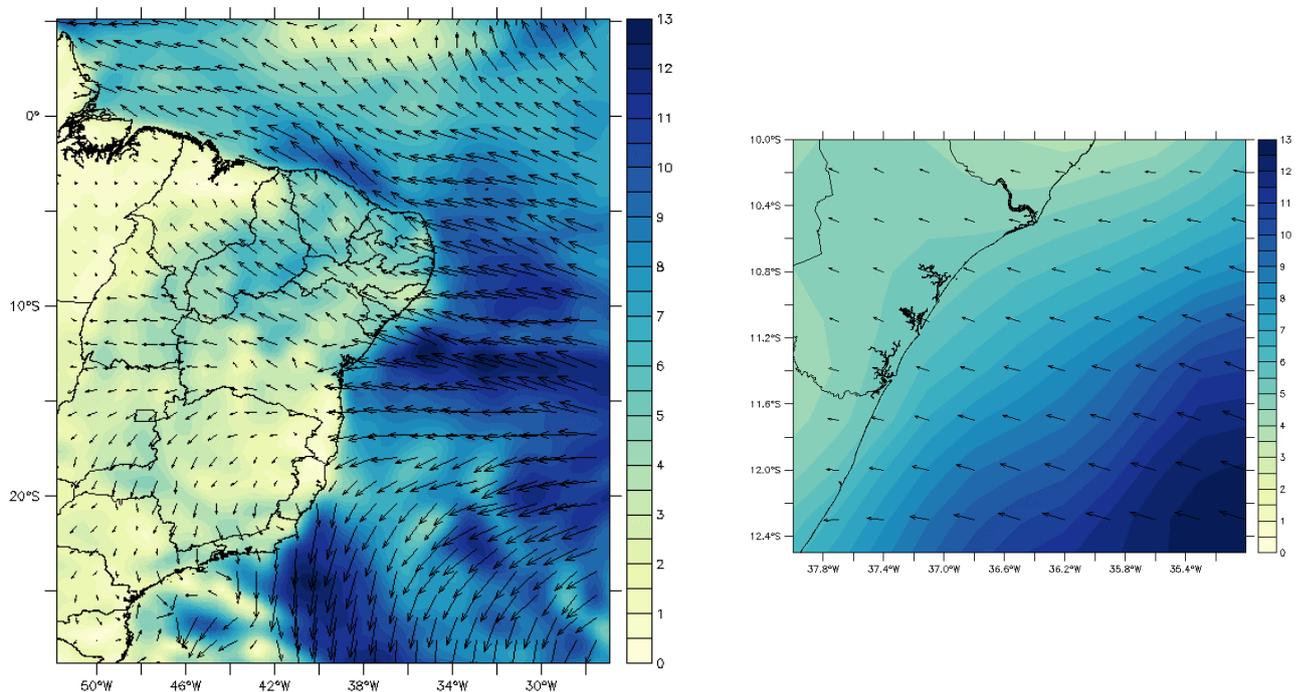


Figura A-11 - Campo de vento instantâneo representativo do período de inverno, a partir da composição entre a CFSR e dados da estação METAR SBAR. A escala de cores indica a intensidade do vento (em m/s) e os vetores a direção (convenção meteorológica).

A.2.3 PERÍODOS SIMULADOS

As simulações hidrodinâmicas foram conduzidas para o total de um ano, desde outubro de 2008 até setembro de 2009. Neste período, foram considerados dois períodos sazonais representativos de verão (outubro a março) e inverno (abril a setembro). A definição destes períodos ocorreu de forma a representar a variabilidade da dinâmica local de acordo com a análise dos padrões atmosféricos apresentadas no item II.1. Para o ano de 2009 a TETRA TECH dispõe de dados de corrente sem lacunas coletados na região de estudo.

A fim de verificar se este período de simulação é representativo de condições típicas da região de estudo, foi realizada uma comparação entre as condições de direção e intensidade dos ventos no período de simulação (outubro de 2008 até setembro de 2009) e na série climatológica de dados da CFSR. Esta comparação foi realizada sobre a mesma coordenada de análise apresentada no subitem A.1.1 (11,4°S e 35,6°W), sendo avaliados os padrões e frequências de incidência em cada um dos períodos sazonais propostos.

Esta análise foi realizada a partir de rosas direcionais e diagramas associados de direção e intensidade dos ventos. Na Figura A-12 são apresentadas as rosas para cada um dos períodos sazonais no ano de modelagem e nas Tabelas A-7 e A-8 os diagramas associados. Analogamente, as rosas direcionais e os diagramas associados segundo a base climatológica da CFSR são apresentados na Figura A-13, Tabelas A-9 e A-10.

No período representativo do verão (meses de ONDJFM) a direção predominante do vento mostra-se de E, seguida por ENE e ESE. A frequência de incidência nestas direções no ano de modelagem é de, respectivamente, 37,6%, 30,0% e 21,2%, enquanto a climatologia aponta frequências de 39,8%, 25,7% e 21,7%. A faixa de intensidades mais frequente neste período sazonal ocorre entre 6 e 8 m/s, representado 56,7% dos dados no ano de modelagem e 57,0% segundo a climatologia.

Já no período representativo do inverno, compreendendo os meses de AMJJAS, as direções predominantes são ESE, E e SE, com frequências de incidência de 48,2%, 22,5% e 15,9% no ano de modelagem e de 48,3%, 19,5% e 21,5% segundo a climatologia. Neste período as intensidades predominantes ocorrem, assim como no período de verão, na faixa entre 6 e 8 m/s, porém com frequência de 49,1% no ano de modelagem e de 46,0% na climatologia.

Esta comparação, portanto, indica que o período de simulação (de outubro de 2008 a setembro de 2009) apresenta padrões de intensidade e direção dos ventos coerentes com a climatologia nos períodos sazonais avaliados.

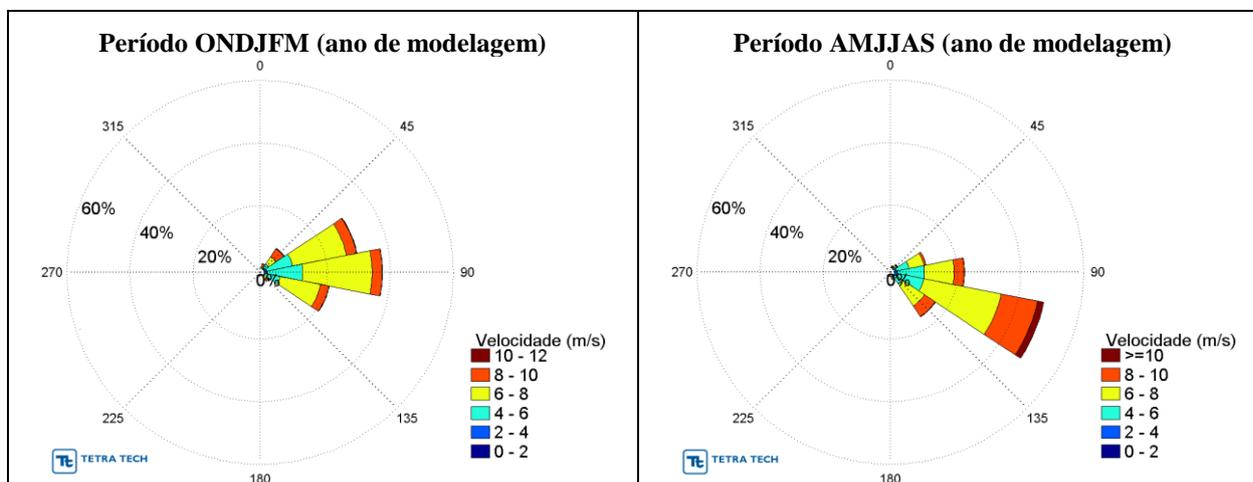


Figura A-12 - Rosas dos ventos para os períodos sazonais no ano de modelagem (outubro de 2008 até setembro de 2009), dados da reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W.

Tabela A-7 - Diagrama de ocorrência conjunta da intensidade (m/s) e direção dos ventos no período sazonal de ONDJFM (representativo do verão) no ano de modelagem, segundo os dados da reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W.

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0,0- 2,0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
2,0- 4,0	0	3	14	32	37	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2
4,0- 6,0	0	4	67	367	493	215	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,5
6,0- 8,0	1	15	121	762	964	572	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56,7
8,0-10,0	0	37	133	140	138	118	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,8
%	0,0	1,4	7,7	30,0	37,6	21,1	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	7,0	8,0	7,1	6,5	6,5	6,8	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A-8 - Diagrama de ocorrência conjunta da intensidade (m/s) e direção dos ventos no período sazonal de AMJJAS (representativo do inverno) no ano de modelagem, segundo os dados da reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W.

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0,0- 2,0	0	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1
2,0- 4,0	0	2	7	26	39	37	11	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2,9
4,0- 6,0	0	4	21	179	379	378	127	3	0	0	0	0	0	0	0	0	24,8
6,0- 8,0	0	10	31	213	412	1098	375	18	0	0	0	0	0	0	0	0	49,1
8,0-10,0	0	15	11	30	140	517	178	22	0	0	0	0	0	0	0	0	20,8
10,0-12,0	0	0	1	0	5	85	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2
%	0,0	0,7	1,6	10,2	22,2	48,2	15,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,0	7,3	6,1	6,0	6,3	7,2	7,1	7,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

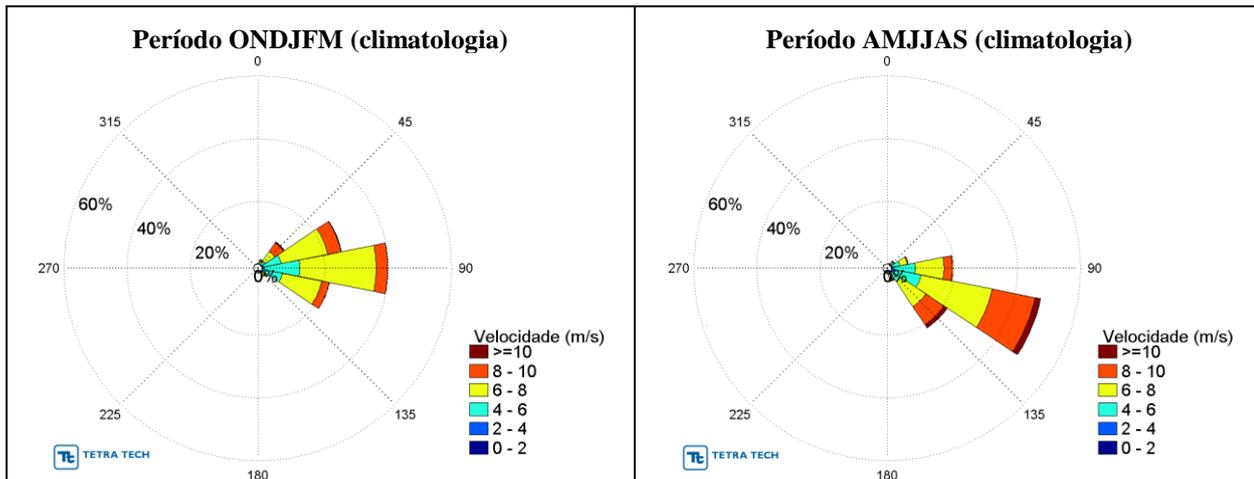


Figura A-13 - Rosas dos ventos para os períodos sazonais segundo a climatologia, dados da reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W.

Tabela A-9 - Diagrama de ocorrência conjunta da intensidade (m/s) e direção dos ventos no período sazonal de ONDJFM (representativo do verão) segundo a climatologia, dados da reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W.

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0,0-2,0	5	4	1	7	10	3	9	5	5	11	2	2	1	1	3	4	0,1
2,0-4,0	9	21	84	247	362	226	56	10	14	4	1	3	1	0	1	4	2,0
4,0-6,0	2	78	703	3017	5908	3246	290	44	22	1	2	1	0	0	2	6	25,4
6,0-8,0	18	270	1933	7869	12686	6636	440	48	6		5	2	0	0	0	4	57,0
8,0-10,0	31	316	1716	2258	1910	1283	149	17	5	0	0	0	0	0	0	15	14,7
10,0-12,0	1	100	179	70	22	18	6	6	0	0	0	0	0	0	0	7	0,8
12,0-14,0	2	6	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0
%	0,1	1,5	8,8	25,7	39,8	21,7	1,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
Média	7,1	8,0	7,5	6,8	6,5	6,6	6,4	6,3	4,6	2,9	3,8	2,5	1,7	1,0	2,5	7,3	

Tabela A-10 - Diagrama de ocorrência conjunta da intensidade (m/s) e direção dos ventos no período sazonal de AMJJAS (representativo do inverno) segundo a climatologia, dados da reanálise CFSR sobre as coordenadas 11,4°S e 35,6°W.

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0,0-2,0	1	4	5	9	8	10	14	7	5	0	0	0	1	5	1	1	0,1
2,0-4,0	3	23	94	218	424	531	215	97	60	16	2	1	1	1	5	1	3,2
4,0-6,0	2	27	272	1258	3541	4526	1747	278	27	0	3	1	2	2	1	1	22,2
6,0-8,0	0	43	333	1277	4828	12123	5060	540	43	2	5	1	0	1	1	0	46,0
8,0-10,0	0	31	85	159	1410	7305	3676	356	43	10	0	0	0	0	0	1	24,8
10,0-12,0	2	3	1	0	56	938	621	227	10	5	0	0	0	0	0	1	3,5
%	0,0	0,2	1,5	5,5	19,5	48,3	21,5	2,9	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Média	5,1	6,2	6,0	5,9	6,4	7,2	7,4	7,4	5,9	6,2	5,6	4,9	3,5	3,1	3,4	5,2	

Vale ressaltar que, o El-Nino registrado no ano de 2009, com início no mês de julho, foi classificado como um evento de categoria fraca. Além disso, de forma geral, a influência do El-Nino sobre o Nordeste brasileiro e região adjacente do Atlântico se dá de forma moderada, podendo afetar os seguintes aspectos: leve aumento da temperatura da água, diminuição da precipitação e intensificação dos ventos zonais (ventos de E). Estas influências podem ocorrer, ainda que de forma indireta, no primeiro semestre do ano, em função da presença da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) ao sul do Equador. No segundo semestre do ano (período de início do El-Nino no ano de 2009) não são conhecidas influências significativas do El-Nino sobre a região. Assim, não se espera que o El-Nino registrado no ano de 2009 afete os estudos apresentados, conforme a representatividade discutida acima.

A.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de avaliação 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 (1) previsões harmônicas realizadas para a estação Terminal Portuário de Sergipe, da FEMAR, e (2) dados de corrente gerados a partir de derivadores e dados coletados em campo.

A3.1 Elevação

Para a avaliação da modelagem hidrodinâmica com relação à variável elevação do nível do mar, os resultados do modelo foram comparados com as previsões harmônicas realizadas para a estação Terminal Portuário de Sergipe da FEMAR (análise apresentada no item A.1).

A comparação entre os resultados da modelagem e os dados foi quantificada através dos seguintes parâmetros:

1. Erro Estatístico Relativo (*Relative Error Statistic*), erro relativo entre o valor previsto pelo modelo e as observações, definido como (EPA, 2000):

$$Erel = \frac{\sum_{i=1}^n |dado_i - modelo_i|}{\sum_{i=1}^n dado_i} \quad (\text{Eq. A.3.1-1})$$

Como o erro estatístico relativo é a razão entre o erro absoluto médio (o numerador da expressão acima) e a média das observações, ele pode ser expresso como uma porcentagem. O erro estatístico relativo ideal é nulo.

Esta mesma definição é apresentada em WALSTRA *et al.* (2001), a qual é denominada pelos autores como *Relative Mean Absolute Error* (RMAE). Os autores também classificam (ou qualificam) os valores dos erros conforme a Tabela A-11.

Tabela A-11 - Classificação do RMAE por ranges (Fonte: WALSTRA *et al.*, 2001).

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

2. Erro Estatístico Absoluto Médio (*Absolute Mean Error Statistic*), definido como (EPA, *op. cit.*; WILLMOTT, 1982):

$$Eabs = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |dado_i - modelo_i| \quad (\text{Eq. A.3.1-2})$$

O erro estatístico absoluto médio é o desvio médio entre o valor previsto pelo modelo e o observado nos dados. O desvio médio ideal é zero. O erro estatístico absoluto tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

3. Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root-Mean-Square Error*), definida como (EPA, *op. cit.*, WILLMOTT, *op. cit.*):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2} \quad (\text{Eq. A.3.1-3})$$

A raiz do erro médio quadrático é um indicador do desvio entre o valor previsto pelo modelo e as observações, assim como o desvio médio, contudo é em geral maior do que ele. A raiz do erro médio quadrático ideal é nula. A raiz do erro médio quadrático tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

4. *Skill Parameter*, proposto por Hess & Bosley (1992) como forma de quantificar a capacidade do modelo de reproduzir os dados observados. O *skill parameter* é definido por:

$$\text{Skill} = 1 - D' \quad (\text{Eq. A.3.1-4})$$

onde o termo D' é dado pelo erro quadrático médio normalizado pelo range médio do dado:

$$D' = \frac{\text{RMS}}{\text{range médio do dado}} \quad (\text{Eq. A.3.1-5})$$

e o range médio do dado é definido por:

$$\text{Range}_{\text{médio}} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{média do dado}| \quad (\text{Eq. A.3.1-6})$$

O “*skill parameter*” tem seu valor variando entre 0 e 1, sendo 1 (um) o valor ideal.

5. *Index of Agreement (d)*, proposto por Willmott & Wicks (1980) (*apud* WILLMOTT, 1982), definido por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\text{modelo}_i - \overline{\text{dado}}| + |\text{dado}_i - \overline{\text{dado}}|)^2} \right] \quad (\text{Eq. A.3.1-7})$$

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

A Figura A-14 apresenta as séries temporais de elevação do nível do mar na estação Terminal Portuário de Sergipe, para o mês de outubro de 2009, representando o período de verão. A série temporal referente à previsão harmônica é apresentada em azul (dados), e os resultados gerados pelo Delft3D são apresentados em vermelho (modelo).

De forma análoga, a Figura A-15 apresenta as séries temporais de elevação do nível do mar para a estação Terminal Portuário de Sergipe, para o mês de abril de 2009, representativo do período de inverno. Observa-se que o modelo implementado representa o comportamento da maré de forma extremamente satisfatória na área de interesse, tanto em amplitude quanto em fase. A Tabela A-12 apresenta os índices de avaliação obtidos considerando os meses avaliados, em que todos indicam um desempenho excelente do modelo.

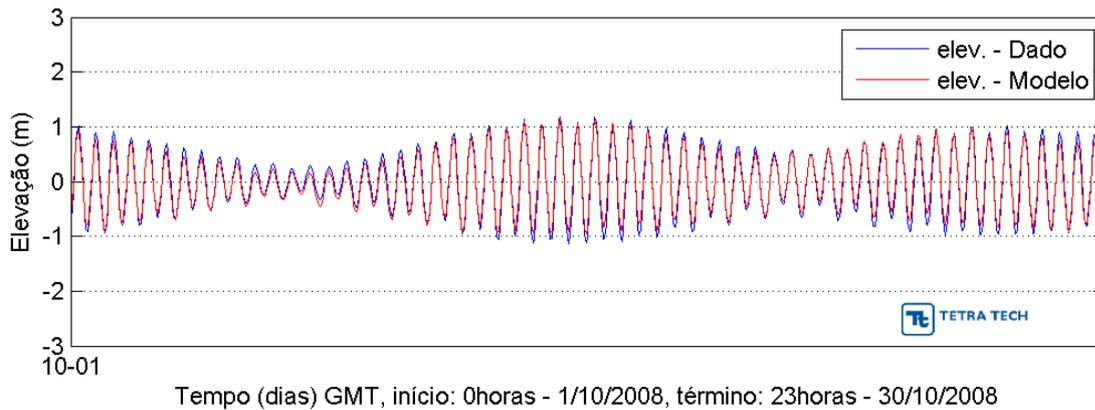


Figura A-14 - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) no Terminal Portuário de Sergipe, para o período de 01 a 30 de outubro de 2008. A previsão harmônica é apresentada em azul e os resultados do modelo em vermelho.

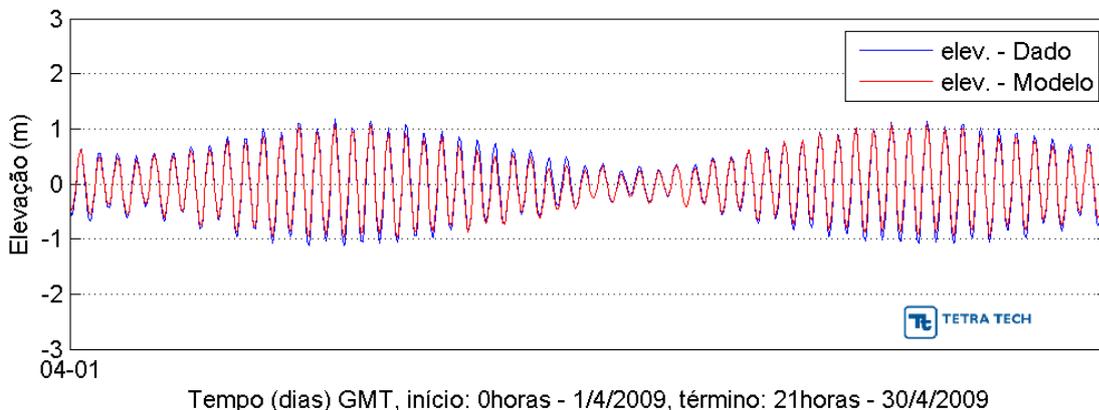


Figura A-15 - Séries temporais de elevação do nível do mar (em metros) no Terminal Portuário de Sergipe, para o período de 01 a 30 de abril de 2009. A previsão harmônica é apresentada em azul e os resultados do modelo em vermelho.

Tabela A-12 - Índices de avaliação dos resultados do modelo na estação Terminal Portuário de Sergipe, para os períodos de fevereiro a maio e junho a outubro de 2009.

PARÂMETRO	Outubro/2008	Junho a Outubro/2009
RMAE	0,16	0,13
Eabs	0,08	0,06
RMS	0,09	0,08
Skill	0,90	0,98
Index of Agreement	0,99	0,99

A3.2 Campo de Correntes

Para a avaliação do modelo em relação ao campo espacial de correntes, utilizou-se uma climatologia de correntes gerada por dados de derivadores. Estes dados pertencem ao Programa de Derivadores de Superfície, uma extensão do Sistema Integrado de Observação dos Oceanos da NOAA e foram descritos por Lumpkin & Garraffo (2005)¹⁰. Através dos dados fornecidos pelo programa, foi possível reproduzir campos de correntes próximos à superfície com resolução espacial de 1 grau, oriundos da decomposição dos dados de observação da circulação, registrada através de uma rede de boias de deriva rastreadas por satélite.

O campo superficial médio das correntes gerado a partir da modelagem numérica para o período representativo de verão (outubro a março) representa as feições oceanográficas observadas no campo médio gerado por derivadores, conforme apresentado nas Figuras A-16 e A-17. Em todas as bases observa-se a presença da Bifurcação da Corrente Sul-Equatorial em aproximadamente 11°S. Semelhança entre os campos superficiais médios também é observado para o período de abril a setembro, conforme apresentado na Figura A-18 (resultados da modelagem numérica) e na Figura A-19 (derivadores). Neste período, a Bifurcação da Corrente Sul-Equatorial encontra-se posicionada mais ao sul, em torno de 14°S, conforme relata a bibliografia.

¹⁰ A drifter derived climatology of global near-surface currents – NOAA (http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/drifter_climatology.html). Último acesso em 20 de junho de 2016.

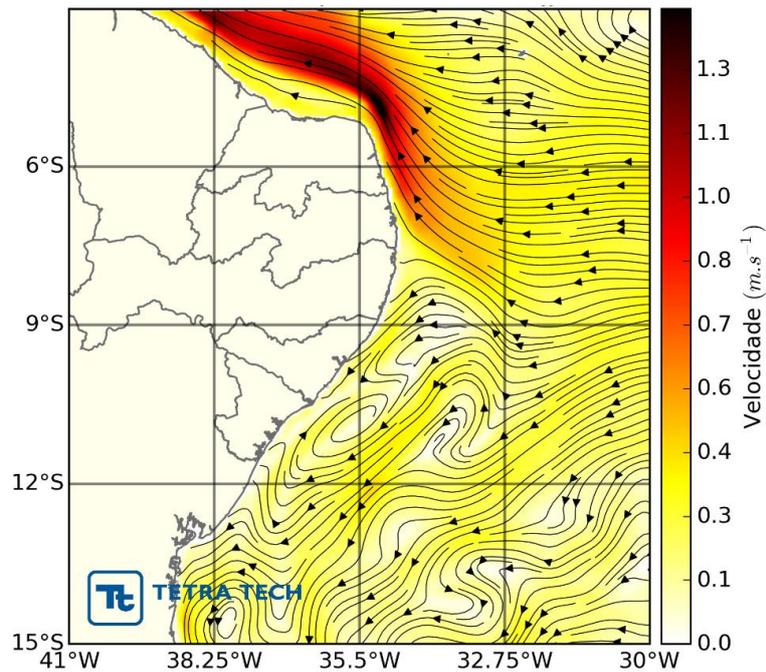


Figura A-16 - Média da circulação próximo à superfície para o período de outubro a março, obtida a partir da base hidrodinâmica gerada.

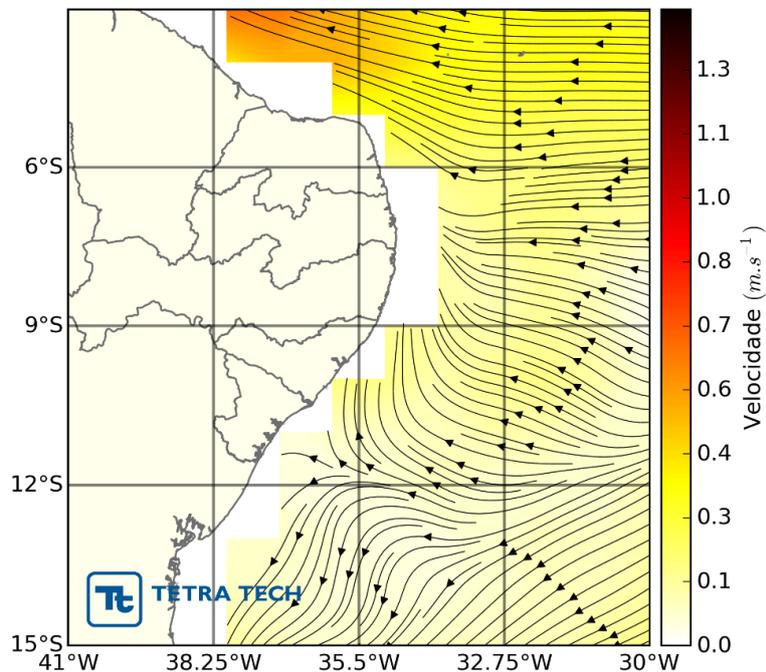


Figura A-17 - Média da circulação próximo à superfície para o período de outubro a março, obtida por derivadores (LUMPKIN & GARRAFFO, 2005).

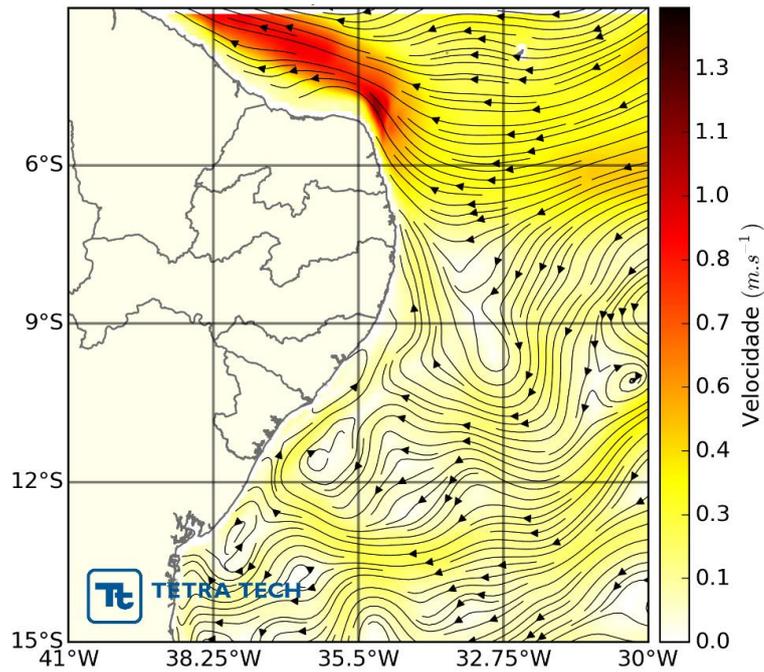


Figura A-18 - Média da circulação próximo à superfície para o período de abril a setembro, obtida a partir da base hidrodinâmica gerada.

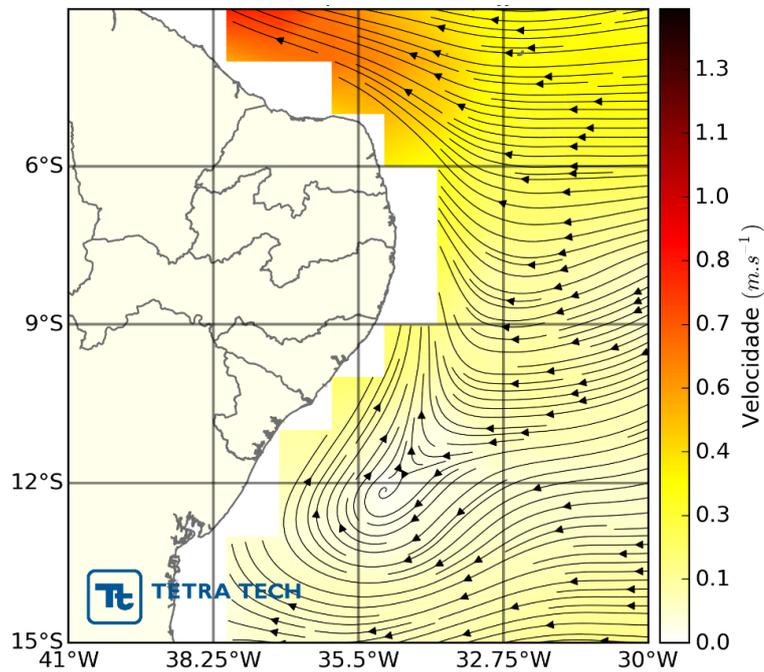


Figura A-19 - Média da circulação próximo à superfície para o período de abril a setembro, obtida por derivadores (LUMPKIN & GARRAFFO, 2005).

A3.3 Padrão Local de Correntes

Uma avaliação pontual das correntes foi realizada para verificar o comportamento da base hidrodinâmica localmente na área de estudo, através da análise da série temporal de velocidade da corrente em diversos pontos na região costeira e um sobre a quebra da plataforma continental. Os pontos de análise foram escolhidos de forma a possibilitar uma comparação com os dados medidos em campo, mesmo que os períodos de medição fossem diferentes do período de modelagem. As análises foram realizadas através de rosas direcionais de velocidade das correntes. No entanto, uma vez que os dados são privados, as análises não serão apresentadas, apenas comentadas.

Os dados coletados sobre a plataforma continental da área de estudo: por apresentar uma plataforma continental rasa, a circulação desta região é governada principalmente pelo vento, o que resulta num padrão com pouca variabilidade em que as correntes seguem preferencialmente paralelas à costa na direção SW. Conforme observado na comparação entre os resultados numéricos e os dados medidos nos pontos dos fundeios na plataforma, a dinâmica é representada satisfatoriamente pela base hidrodinâmica implementada.

Na área de estudo, a plataforma continental estreita e rasa, com extensão de até aproximadamente 30 km e profundidades em torno de até 80 m, é margeada por profundidades de quase 3.000 m. Um dos desafios enfrentados neste trabalho foi desenvolver uma base hidrodinâmica capaz de reproduzir com precisão a complexa dinâmica desta região da costa leste brasileira. Conforme visto anteriormente, a circulação costeira é pautada principalmente pelo vento, e esta “negocia” na região do talude continental seu papel com a dinâmica oceânica, que por sua vez é influenciada por processos de mesoescala associados às correntes de contorno oeste.

Ao se analisar os dados do fundeio posicionado na região da quebra da plataforma continental, observou-se um padrão diferenciado dos demais. Nesta localidade uma variabilidade maior na direção das correntes foi encontrada. Além da circulação principal para direção SW, correntes seguindo no sentido NE também marcaram a análise.

Para demonstrar a capacidade do modelo em representar a variabilidade da dinâmica na região de transição entre área costeira e *offshore*, foram realizadas comparações nos períodos de janeiro a março de 2009, representativo do período de verão, e junho a agosto de 2009, abordando todo o período de inverno simulado. As comparações englobam os

períodos coincidentes de dados e modelo. As correntes simuladas para o período de verão seguem preferencialmente na direção SW, assim como também observado nos dados medidos em campo. Já para o período representativo de inverno, o padrão encontrado tanto na simulação numérica como no dado medido indicou correntes preferenciais seguindo para NE. Isso reflete um posicionamento mais para sul da Bifurcação da Corrente Sul Equatorial e a capacidade da base hidrodinâmica de reproduzir adequadamente a dinâmica oceânica da área de estudo.

A.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D

O sistema de modelos Delft3D (DELTARES, 2013) 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 pode atualizar 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.4.1 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 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.4.1.1 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:

- O Delft3D permite que se adote o sistema de coordenadas sigma (σ) ou coordenadas Z 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 usuário¹¹. 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.
- 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

¹¹ Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

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.4.1.1.2 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 A1-1).

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).

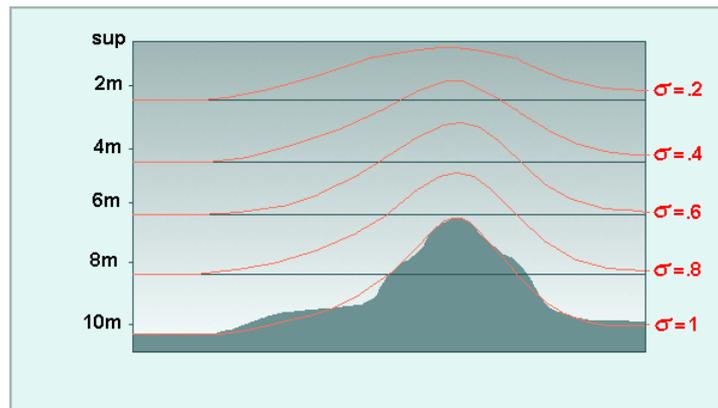


Figura A1-1- Exemplo de uma aplicação de coordenadas.

O sistema de coordenadas σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

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 $\sigma = 0$ (ver Figura 1.1.2-1). 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:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

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:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E$$

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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \end{aligned}$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \end{aligned}$$

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 :

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

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 (u e v), profundidade da coluna d'água (H), elevação do nível d'água (ζ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right)$$

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,

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H$$

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

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma'$$

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:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi}$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta}$$

Parâmetro de Coriolis

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

$$f = 2\Omega\sin\phi$$

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 (ν_{SGS}) e a viscosidade turbulenta na horizontal (ν_H^{amb}). O Delft3D-FLOW simula os movimentos turbulentos na horizontal (em larga escala) através da metodologia denominada *Horizontal Large Eddy Simulation (HLES)*. O ν_{SGS} será computado por um modelo de turbulência.

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

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{amb}$$

A parte ν_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, (ν_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). Conseqüentemente, o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical é definido por:

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{amb})$$

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:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta}$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta}$$

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:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{G_{\eta\eta}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\}$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right)$$

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:

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right)$$

$$F_\eta = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right)$$

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):

$$\rho = \frac{1000P_0}{\lambda + \alpha_0 P_0}$$

onde:

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

$$\alpha_0 = 0,6980$$

$$P_0 = 5890 + 38 t - 0,375t^2 + 3 s$$

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

A.5 BIBLIOGRAFIA

AMORIM, F. N. 2011. A Dinâmica Sazonal da Plataforma Continental Leste Brasileira entre 10°S e 16°S. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, área de Oceanografia Física. Universidade de São Paulo (USP) – Instituto Oceanográfico. São Paulo.

BLECK, R., 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnal-cartesian coordinates. **Ocean Modelling**. vol. 4, p.55–88.

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

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. S. & SILVA, M. G. A. J., 2009. Tempo e Clima no Brasil. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 463p.

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

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.

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

FERREIRA, A. G. & MELLO, N. G. S., 2005. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 1, p. 15-28.

HESS, K.W. & BOSLEY, K.T. 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.

LUMPKIN, R. & GARRAFFO, Z. 2005. Evaluating the Decomposition of Tropical Atlantic Drifter Observations. **J. Atmos. Oceanic Techn.**, vol. 1-22, p. 1403-1415.

MELLOR, G. L. & T. YAMADA, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Review of Geophysics and Space Physics**, vol. 20 (4), p. 851-875.

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.

RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M. & WIMBUSH, M. 2007. Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. **Journal of Physical Oceanography**, vol. 37, p. 16-30.

SAHA, S., and coauthors, 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, vol. 91:8, p. 1015-1057.

SCHUREMAN, P., 1958. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Special Publication n°98, Revised 1940. U.S. Dept. of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Washington, DC. 317p.

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.

VAREJÃO-SILVA, M. A, 2001. Meteorologia e Climatologia. PAX Gráfica e Editora Ltda, 2ª Edição, 532 p.

WALSTRA. L.C., VAN RIJN. L.C.. BLOGG, H.. & VAN ORMONDT. M. 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**, p. 1309-1313

ANEXO B – DESCRIÇÃO DO MODELO OILMAP DEEP/3D

O OILMAP DEEP/3D é uma atualização do OILMAP, sendo um sistema de modelos de vazamento de óleo utilizado na previsão das trajetórias e destino do óleo em ambientes aquáticos desenvolvido pela ASA-RPS. O sistema de modelos OILMAP DEEP/3D consiste em vários componentes integrados, incluindo um Sistema de Informação Geográfica (SIG) embutido, dados ambientais, definição de cenários de vazamento, cálculos de blowout de óleo e modelos de transporte.

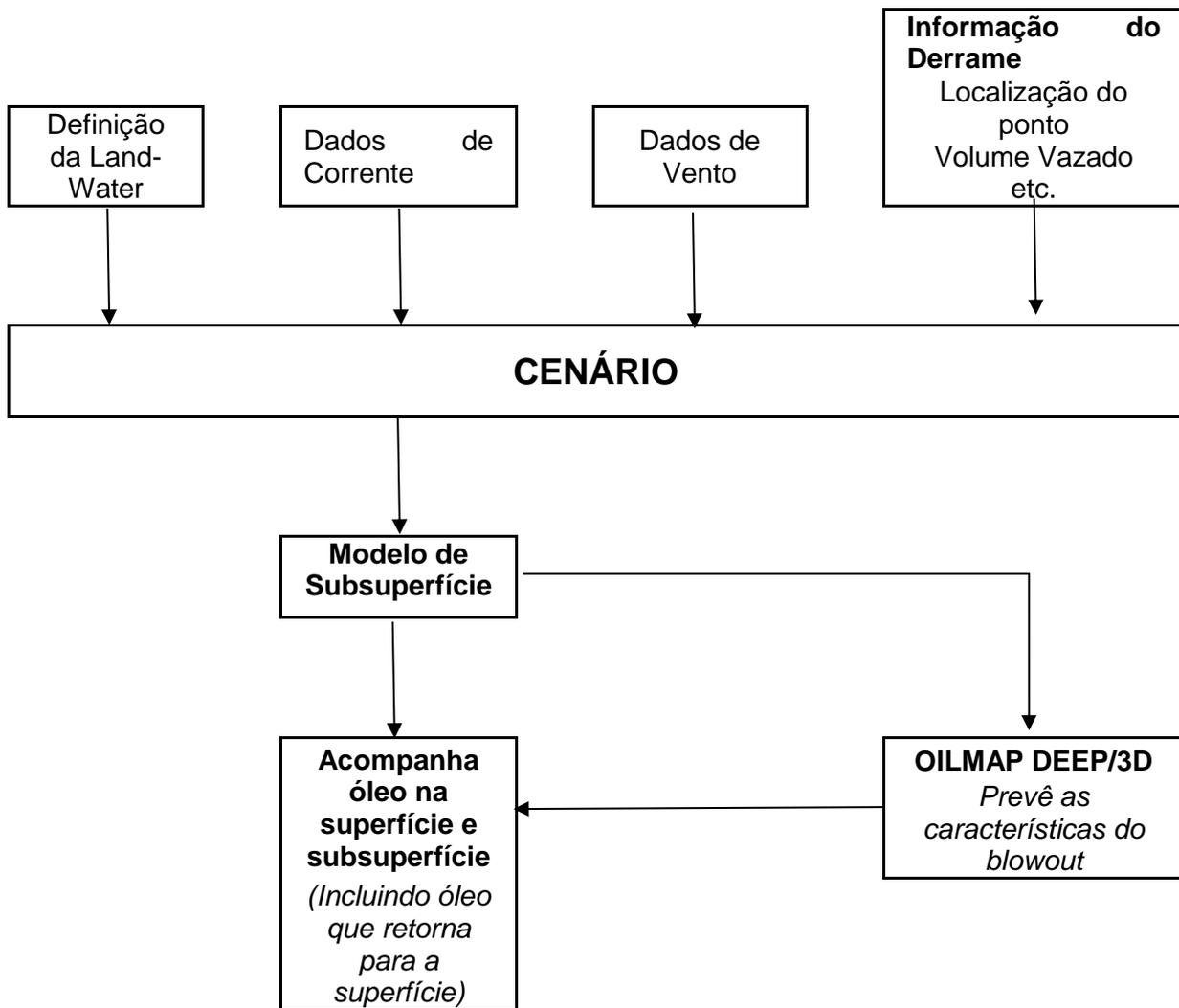
Para realizar os cálculos o modelo baseia-se em dados ambientais, tais como ventos e correntes, dados do ambiente físico como como proximidade da linha de costa e dados químicos que definem as propriedades do óleo. Cada um desses tipos de dados pode ser inserido e editado usando adequadamente os componentes do sistema OILMAP DEEP/3D.

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 OILMAP completo inclui os seguintes modelos: um modelo de deriva e intemperismo para óleo de superfície e subsuperfície, um modelo de resposta a derramamento de óleo, modelo probabilístico, e um modelo receptor que através do método reverso localiza a origem do derramamento a partir de informações da posição da mancha.

Esta versão do OILMAP contém o Modelo de Subsuperfície/3D (Subsurface/3D Model) e o modelo OILMAPDeep, os quais acompanham a trajetória do óleo tanto em superfície quanto em subsuperfície, assim como calcula a dinâmica de *blowout* em poços. A distribuição do óleo nos vários compartimentos ambientais, ou seja, na superfície da água, atmosfera, coluna d'água e linha de costa, é determinada pelo modelo. A fonte do vazamento pode ser tanto em superfície como abaixo da mesma; o modelo acompanha a trajetória tanto do óleo entranhado na coluna d'água pela quebra de ondas (devido a ação do vento) como da pluma de óleo que retorna para a superfície.

O esquema abaixo ilustra o sistema OILMAP DEEP/3D, seus modelos e aplicações (FRENCH MACCAY *et al.*, 2016):



B.1 PREMISSAS

Para elaboração de cenários de deriva para acidentes com óleo 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 (*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 óleo pode se movimentar em uma determinada direção, dependendo tipo de costa (e.g. manguezais, costões rochosos, praias).

Como opção alternativa, o OILMAP apresenta a opção de se utilizar o *shapefile* da linha de costa para definir os ambientes de água e costa, sem a necessidade de utilização de uma grade *land-water*.

O modelo de deriva de óleo prevê o transporte e intemperismo do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. As estimativas demonstram a localização e massa do óleo *versus* o tempo. O modelo estima a variação temporal da cobertura de área, espessura da mancha e viscosidade do óleo. O modelo também estima o balanço da massa de óleo ou a quantidade de óleo sobre a superfície do mar, na coluna de água, evaporado, na costa e degradado *versus* o tempo.

O OILMAP Deep/3D quantifica trajetórias e concentrações de componentes de óleo em subsuperfície (FRENCH MCCAY, 2003, 2004) bem como o transporte e trajetória do óleo flutuante. Os algoritmos de subsuperfície do modelo OILMAP (FRENCH MCCAY, 2002, 2003, 2004) foi desenvolvido ao longo das últimas três décadas para simular destino e os efeitos de derrames de óleo sob uma variedade de condições ambientais. O OILMAP Deep/3D foi derivado do Modelo de Avaliação de Danos de Recursos Naturais para ambientes costeiros e marinhos (NRDAM/CME, FRENCH *et al.*, 1996), o qual foi desenvolvido para o Departamento do Interior dos Estados Unidos (USDO) como base da Lei de Resposta Ambiental Abrangente, Compensação e Responsabilidade de 1980 (CERCLA) (43 CFR PARTE 11 [1995], alterado no Registro Federal de 61, 20609, de 7 de Maio de 1996) para o tipo A. O modelo foi validado com dados de mais de 20 grandes derrames, incluindo o Exxon Valdez (FRENCH & RINES, 1997; FRENCH MCCAY, 2003, 2004; FRENCH MCCAY & ROWE, 2004), bem como derrames de teste concebidos para verificar o modelo (FRENCH *et al.*, 1997).

No modelo tridimensional de dispersão de óleo OILMAP, os volumes de óleo derramado são representados por elementos lagrangianos ("spilletts"), cada um caracterizado pela massa de componentes hidrocarbonetos e água, localização, espessura, diâmetro, densidade e viscosidade. Um conjunto separado de elementos lagrangianos é usado para rastrear os movimentos dos hidrocarbonetos (FRENCH MCCAY *et al.*, 2016).

A cada passo do modelo, são feitos cálculos dos processos de transporte e destino para cada "spillett": transporte e dispersão de componentes na coluna de água, emulsificação, entranhamento, diluição, degradação e ressuspensão (retorno do óleo a superfície).

O transporte é a soma das velocidades advectivas por correntes de entrada para o modelo, movimento vertical de acordo com a flutuabilidade (usando a Lei de Stokes) da partícula (gotículas) e velocidades difusivas turbulentas aleatorizadas em três dimensões. A abordagem de modelagem desenvolvida por Mackay (2004 *apud* FRENCH MCCAY, 2004), baseada na Lei de Raoult, é usada no OILMAP para diluição, aplicada separadamente a cada um dos componentes de hidrocarbonetos solúveis e semi-solúveis usando propriedades específicas de componentes. A Lei de Stokes é usada para calcular a taxa de sedimentação ou elevação da partícula combinada, com base na flutuabilidade relativa e no diâmetro de partícula. Sedimentação de gotículas de óleo ocorre uma vez que estas partículas atingem o fundo do mar. Estes algoritmos são descritos em French McCay (2004) e French McCay *et al.* (2015a).

A degradação pode ocorrer como resultado da foto-oxidação, que é um processo químico mantido pela luz ultravioleta do sol, e pela degradação biológica (microbiana), denominada biodegradação. A biodegradação primária é o primeiro passo de degradação da ação microbiana em hidrocarbonetos. Abaixo de 20 m, a foto-oxidação é desprezível. A degradação é calculada como uma taxa de decaimento exponencial para cada partícula a cada passo de tempo.

Utilizando-se o OILMAP Deep/3D em modo probabilístico, é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de derrame são realizadas através da variação aleatória do início do mesmo dentro do período para o qual se dispõe de dados meteorológicos e oceanográficos. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar estocasticamente. As múltiplas trajetórias são, então, utilizadas para a produção de curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da grade computacional (área de estudo). As probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (SIG), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.

B.1.1 Componentes do Óleo

O óleo é uma mistura de dezenas de milhares de hidrocarbonetos de características físicas e químicas variáveis. No modelo, o espalhamento do óleo é representado como um “total de hidrocarbonetos”. Sendo assim, uma abordagem "pseudo-componente" (PAYNE

et al., 1984, 1987, FRENCH *et al.*, 1996, JONES 1997) é usada, onde os produtos químicos na mistura de óleo são agrupados por propriedades físico-químicas e a categoria de componente resultante se comporta como se fosse um único produto químico com características típicas do grupo químico.

O OILMAP agrupa quatro diferentes frações de componentes através dos Intervalos de Ponto de Ebulição:

Tabela B-1 - Pseudo-componentes considerados no OILMAP.

Corte de Destilação (Hidrocarbonetos Total – THC)	Ponto de Ebulição (°C)	Características Químicas dos Componentes Solúveis (aromáticos) e Insolúveis (alifáticos)	
		Aromáticos (MAH e PAH)	Alifáticos
THC - 1	40 - 180	Volátil e Altamente Solúvel	Volátil
THC - 2	180 – 280	Semi-Volátil e Solúvel	Semi-Volátil
THC - 3	280 – 380	Baixa Volatilidade e Ligeiramente Solúvel	Baixa Volatilidade
Residual - 4	> 380	Fração de Óleo Residual (não volátil e solubilidade muito baixa)	

B.1.2 Vazamentos em Subsuperfície

Para vazamentos em subsuperfície, é preciso definir a energia do vazamento, sendo baixa para vazamentos lentos, de baixa pressão, como vazamentos em dutos, e alta para vazamentos de elevada turbulência, como um *blowout* sob pressão, enquanto média destina-se a turbulência intermediária. Este parâmetro controla a distribuição de tamanho das gotículas de óleo em subsuperfície.

Baixa turbulência leva à formação de partículas maiores e que ascendem com maior velocidade à superfície do mar, enquanto alta turbulência significa menores tamanhos de partículas, as quais se deslocam mais lentamente até a superfície. O modelo utiliza a distribuição de tamanho de partículas de Delvigne & Sweeny (1988), onde o tamanho máximo das gotículas é baseado no nível de energia turbulenta considerada: Alta = 200 um; Média = 1,000 um e baixa = 5,000 um.

B.1.3 Espessuras na Costa e Superfície da Água

Ressalta-se que a espessura do óleo na costa é calculada com base na largura da linha de costa, no diâmetro na partícula de óleo que atingiu a costa, assim como na viscosidade do óleo e na capacidade de retenção do tipo de costa. Por sua vez, para o óleo presente na superfície, o cálculo de espessura é realizado considerando-se as dimensões da grade e a massa do conjunto de partículas.

B.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DO MODELO

As limitações identificadas para o modelo estão listadas, abaixo:

- ✓ Na interface gráfica, a grade de cálculo da probabilidade do modelo apresenta limitação numérica de 1.000 células no eixo X e 1.000 células no eixo Y, distribuídas de forma regular.
- ✓ Pode ser utilizado somente um perfil de temperatura e salinidade da água para realizar os cálculos do intemperismo do óleo ao longo de toda a simulação, ou seja, a temperatura não apresenta variação no tempo e no espaço;
- ✓ Não é possível visualizar, na coluna d'água, as parcelas de óleo particulado e dissolvido separadamente;
- ✓ Coeficiente de arrasto de vento é fixo para todo o domínio espacial;
- ✓ Arquivos em inglês e que devem ser traduzidos;
- ✓ Apesar de permitir o usuário definir até 100 camadas na vertical, as simulações apresentam erro devido tamanhos de arquivos muito grande para a interface gráfica em plataforma Windows;
- ✓ Cenários simulados com 1.000 simulações são muito lentos e geram arquivos extramamente "pesados";
- ✓ Apesar de mostrar o óleo presente na coluna d'água, o modelo não estima a interação do óleo com o assoalho oceânico ou com bancos de corais submersos;

- ✓ Ressalta-se que, no modelo OILMAP, os resultados para o óleo na superfície da água, na coluna d'água e na costa são calculados de forma segregada. Ou seja, a partícula do óleo pode ser transferida entre cada compartimento, mesmo que a espessura esteja abaixo do valor de corte do compartimento de origem. Assim, caso uma partícula do óleo na superfície da água com valor abaixo do corte atinja a costa, o toque será computado;
- ✓ Não é possível zerar os processos de biodegradação que fazem parte do cálculo de degradação do modelo.

B.3 FORMULAÇÃO

B.3.1 Modelo Físico de Dispersão

O modelo físico tridimensional de dispersão estima a distribuição (massa e concentrações) de óleo e pseudo-componentes (isto é, frações do óleo tratado como um todo com propriedades representativas dos produtos químicos incluídos) na superfície da água, na linha de costa e na coluna d'água. Os processos incluídos no destino do óleo são transporte, toque na costa, espalhamento (gravitacional e por cisalhamento), evaporação, emulsificação, entranhamento e degradação. A massa de óleo é monitorada separadamente por peso molecular (aromáticos 1-3-anéis), toxicidade [50-62], outros voláteis, e não voláteis.

No modelo, o óleo é tratado como quatro pseudo-componentes, caracterizados por volatilidade (ponto de ebulição), hidrofobicidade (octanol-água), e aromático ou alifáticos: Alifáticos voláteis (AL1), alifáticos semi-voláteis (AL2), alifáticos de baixa volatilidade (AL3), alifáticos não voláteis (no óleo residual, Tabela B-2) e aromáticos não voláteis (no resíduo, Tabela B-2).

Tabela B-2 - Características dos componentes alifáticos e residuais do óleo.

4 Componentes	Taxa Degradação Instantânea (/dia)			Meia-Vida (dias)		
	Óleo Flutuante	Na Água	Nos Sedimentos	Óleo Flutuante	Na Água	Nos Sedimentos
AL1	0,001	0,240	0,001	693,0	2,9	693
AL2	0,001	0,078	0,001	693,0	8,9	693
AL3	0,001	0,042	0,001	693,0	16,5	693
Residual	0,001	0,020	0,001	693,0	34,7	693

A.3.2 Transporte

Elementos lagrangianos separados (“spillets”) que representam sublotos de óleo flutuante superficial, gotículas subterrâneas e componentes dissolvidos são usados para simular os movimentos de componentes de óleo em três dimensões ao longo do tempo. O transporte é a soma das velocidades advectivas das correntes de entrada no modelo, a deriva de vento de superfície (usando uma porcentagem constante da velocidade do vento e ângulo de deflexão, tipicamente observada como 3-4% e 0-108° à direita do vento no Hemisfério Norte ou baseado no modelo de Youssef & Spaulding (1993) e velocidades difusivas turbulentas aleatorizadas em duas (óleo flutuante) ou três (óleo subsuperficial) camadas.

As magnitudes dos componentes direcionais da difusão aleatória são escalonadas por coeficientes de difusão horizontais e verticais (OKUBO, 1971) usando uma técnica de caminhada randômica (BEAR, 1987). O coeficiente de difusão vertical (Dv , m²/s) é calculado em função da velocidade do vento (a 10 m acima da superfície do mar, W_{10}), com base no Thorpe (1984):

$$Dv = 0,0015W_{10} \quad (1)^*$$

* Os coeficientes de difusão horizontal e o de difusão vertical da água são condições fornecidas pelo usuário

As gotículas de óleo também sofrem movimentos verticais de acordo com a flutuabilidade usando a lei modificada de Stokes. A velocidade (w_i em m/s) de subida para cada gotícula de tamanho i , w_i (m / s), é:

$$w_i = d_i^2 g \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_w}\right) / 18 \nu_w \quad (2)$$

Onde,

d_i é o diâmetro da gotícula (m),

g é a aceleração gravitacional (m/s²),

ρ_o é a densidade do óleo (kg/m³), ρ_w é a densidade da água (kg/m³)

ν_w é a viscosidade cinemática da água (m²/s).

Esta relação é válida para números de Reynolds baixos ($Re < 20$). O número de Reynolds descreve o grau de turbulência no fluxo sobre a partícula e é definido como $Re = L_v / \nu_w$, onde L_v é a escala de comprimento (d_i neste caso).

O diâmetro médio da gotícula, d_{50} (μm), é definido por:

$$d_{50} = 1818(E)^{-0,5} \left(\frac{\mu}{\rho_o} \right)^{0,34} \quad (3)$$

onde

E = taxa de dissipação da energia da onda por unidade de volume (J/m³s), com 10³ a 10⁴ para ondas em zona de arrebentação, 1 a 10 para camada superficial, 10⁻¹ a 1 para estuários e 10⁻⁴ a 10⁻² para oceano profundo;

μ = viscosidade do óleo (cP);

ρ = densidade do óleo (g/cm³).

B.3.3 Transporte em Subsuperfície

As partículas se movem em 3 dimensões ao longo do tempo. A cada passo de tempo o novo vetor de posição do centro da partícula é calculado a partir da soma das componentes leste-oeste, norte-sul e vertical das velocidades de advecção e de difusão, multiplicada pelo passo de tempo:

$$X_{t+1} = X_t + \Delta t(U_t + D_t + R_t) \quad (4)$$

onde, X_t é o vetor de posição no instante t , X_{t+1} é o vetor de posição no passo de tempo seguinte, Δt é o passo de tempo, U_t é a soma das componentes da velocidade advectiva (corrente) em 3 dimensões e no tempo (inputs do modelo), D_t é a soma das velocidades difusivas em 3 dimensões e no tempo. A escala da magnitude das componentes de D_t é de acordo com os coeficientes de difusão vertical e horizontal (OKUBO & OZMIDOV, 1970; OKUBO, 1971). R é computado pela lei de Stoke, onde a velocidade é relacionada à diferença de densidade entre a partícula e da água, e ao diâmetro da partícula.

O processo de dispersão aleatória (*random walk*) adiciona velocidade horizontal para considerar os processos dispersivos e advectivos que ocorrem em escala menor que a resolução do campo de corrente utilizado. As velocidades de dispersão na direção leste (U_{dd}), norte (V_{dd}) e vertical (W_{dd}) podem ser definidas como (BEAR & VERRUIJT, 1987):

$$u_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{D_x}{\Delta t}} \quad (5)$$

$$v_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{D_y}{\Delta t}} \quad (6)$$

$$w = \gamma \sqrt{\frac{D_z}{\Delta t}} \quad (7)$$

Onde,

D_x é o coeficiente de dispersão horizontal na direção leste-oeste (m^2/s)

D_y é o coeficiente de dispersão horizontal na direção norte-sul (m^2/s)

D_z é o coeficiente de dispersão vertical (m^2/s)

Δt é o passo de tempo

γ número entre -1 e +1

D_x e D_y são usualmente iguais, e tratados desta forma no modelo. Valores por camada vertical da coluna d'água (uma ou mais camadas) são inputs do modelo, com a opção de grade variável no espaço e no tempo.

Uma "nuvem" de gotículas de óleo em subsuperfície é representada como um aglomerado de partículas por difusão turbulenta. O raio da "nuvem" é estimado como a distância de dispersão (D_d), definida como 2 desvios-padrão da Gaussiana de espalhamento de massa, que aumenta com o tempo desde o lançamento:

$$D_d = 2\sqrt{2D_{xy}t_a} \quad (8)$$

Onde D_{xy} é o coeficiente de espalhamento horizontal nas direções leste-oeste e norte-sul (m^2/s).

Com relação à velocidade de ascensão da partícula, para partículas pequenas (menores que 1 mm) ela é dada pela lei de Stokes:

$$W_d = gd^2(1 - \Delta)/18\nu \quad (9)$$

Onde W_d é a velocidade vertical (m/s), d é o diâmetro da partícula (m), g é a gravidade (m/s^2), Δ é a razão entre as densidades do óleo e da água (adimensional, com valores típicos entre 0,75 e 0,95), e ν é a viscosidade cinemática da água (m^2/s).

A viscosidade cinemática da água em função da temperatura foi ajustada aos dados em Lindeburg (2003) como se segue:

$$\begin{cases} v_t = a_v + b_v t + c_v t^2 \\ \text{se } S > 0, v_t = v_t + [1,55 \times 10^{-9}(S - 35)] \end{cases} \quad (10)$$

Onde v_t é a viscosidade cinemática da água à temperatura t (em $^{\circ}C$) e a_v , b_v e c_v são coeficientes. Esta equação foi ajustada para os dados de viscosidade cinemática da água do mar (salinidade $S = 35$ ppt) no range de 0 a 50 $^{\circ}C$, conforme reportado no apêndice 14.B de Lindeburg (2003), obtendo-se os seguintes valores dos coeficientes:

Água salgada (salinidade >0 ppt):

$$a_v = 1,79 \times 10^{-6}; b_v = 4,53 \times 10^{-8}; c_v = 4,40 \times 10^{-10}$$

Para partículas com tamanho maior ou igual a 1 mm, o coeficiente de arrasto do fluxo ao redor da partícula é calculado como se segue (WHITE, 2005):

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4 \quad (11)$$

Onde Re é o número de Reynolds, calculado como o produto entre a velocidade de ascensão e o diâmetro da partícula dividido pela viscosidade cinemática da água do mar

(ambiente). A equação (11) apresenta um erro de 10% para o amplo range de Re entre 0 e 2×10^5 .

A velocidade de ascensão é então calculada como:

$$W_d = \sqrt{\frac{4dg(1-\Delta)}{3C_D}} \quad (12)$$

A velocidade de ascensão é calculada iterativamente, onde o coeficiente de arrasto e a velocidade vertical são refinados até que a velocidade calculada tenha variação menor que um limite estabelecido. Para iniciar este cálculo, a velocidade terminal de partículas pequenas ($d < 1$ mm) é estimada com base na equação (9) e a velocidade de partículas maiores com a equação (12). Para partículas com diâmetros entre 1 mm e 1 cm é atribuído o coeficiente de arrasto inicial de 1,0, enquanto aquelas maiores que 1 cm são inicializadas com coeficiente de arrasto de 0,45.

B.3.4 Toque na Costa

O destino do óleo derramado que chega ao litoral depende das características do mesmo, do tipo de costa e da energia do ambiente. O algoritmo de toque na costa é baseado em dados e análise de Gundlach (1987) e Reed & Gundlach (1989). No OILMAP, a deposição ocorre quando um filete de óleo intersecta a superfície da costa e cessa quando a capacidade de retenção de volume para a superfície da costa é atingida. Porque o óleo subsequente que vem em terra não é permitido permanecer na superfície da costa, é ressuspensionado e carregado ao mar pelas correntes. O óleo da zona costeira é então removido exponencialmente ao longo do tempo. Os dados para a capacidade de retenção e taxa de remoção são retirados de Gundlach (1987) e são uma função da viscosidade do óleo e do tipo de costa. O algoritmo e os dados estão em French *et al.* (1996). Espessura e tipo de costa devem ser fornecidos pelo usuário.

B.3.5 Espalhamento

Espalhamento de óleo flutuante é modelado de três maneiras. O rápido espalhamento e alargamento das manchas de superfície, causadas por forças gravitacionais (FAY, 1971), é modelado como um aumento no diâmetro de cada “*spillet*” flutuante de acordo com o algoritmo de dispersão empiricamente derivado por Mackay *et al.* (1980a, 1980b), que modificaram a abordagem de Fay e descreveram o óleo como manchas finas e espessas (como descrito em FRENCH *et al.*, 1996). Assume-se que a mancha de maior espessura alimenta a camada fina e que 80 a 90% da área total mancha é representada pela mancha de menor espessura. A formulação é corrigida quanto ao número de “*spilletts*” de superfície (KOLLURU *et al.*, 1994). O espalhamento é interrompido quando se atinge uma espessura específica de óleo, com base nos dados de McAuliffe (1987), descritos na Tabela A-3. Além disso, o óleo espalha-se por cisalhamento, arrasto e retificação do óleo, uma vez que é afetado diferencialmente pela corrente de vento e correntes subsuperficiais (FAY, 1971).

Este processo posterior foi observado por Reed *et al.* (1994) e em estudos de validação do SIMAP utilizando derrames experimentais no Mar do Caribe (FRENCH *et al.*, 1997).

Finalmente, o uso de múltiplos “*spilletts*” para simular derrames ao longo do tempo e em mais de um local (como ao longo da trajetória de um navio), efetivamente espalha o óleo flutuante. Ambos os derrames de superfície e subsuperfície são modelados. Para um derrame subsuperficial, o óleo é iniciado como gotículas sob uma distribuição de tamanho de gotícula atribuída.

*Tabela B-3 - Espessura mínima do óleo para espalhamento gravitacional
 Dados em McAuliffe (1987).*

Viscosidade do óleo (mPa/s)	Espessura mínima da mancha (mm)
< 10	0.01
10 – 20	0.05
20 – 1000	0.1
< 1000	1

B.3.6 Evaporação

O algoritmo de evaporação no OILMAP é baseado na bem conhecida teoria da evaporação, que segue a lei de Raoult onde cada componente evapora a uma taxa proporcional à pressão de vapor de saturação e fração molar correspondente a esse componente. Cada pseudo-componente evapora de acordo com a sua pressão média de vapor e e peso molecular (Tabela B-4).

O coeficiente de transferência de massa é calculado usando a metodologia de Mackay & Matsugu (1973), conforme descrito em French *et al.* (1996) e análogo ao descrito por Jones (1997). A evaporação do óleo da superfície e da costa aumenta com a área de superfície do óleo, a temperatura e a velocidade do vento.

À medida que os componentes mais leves se evaporam, o óleo persistente permanece mais viscoso. Jones (1997) comparou os resultados do modelo de pseudo-componentes com dados laboratoriais em Fingas (1995) e o modelo de Stiver & Mackay (1984), que utilizaram uma abordagem analítica para prever a fração volumétrica evaporada usando dados de destilação para estimar parâmetros necessários.

O modelo de pseudo-componentes concordou com os dados de Fingas em condições quase equivalentes (20 g de óleo de 1,5 mm de espessura e sem vento). O modelo prevê taxas de evaporação ligeiramente mais baixas do que o modelo Stiver e Mackay, com os dois modelos variando sistematicamente (paralelo em função da temperatura). A diferença é explicada pela aproximação da pressão de vapor a partir dos dados de destilação para o modelo Stiver & Mackay (op.cit.).

Tabela B-4 - As propriedades físico-químicas médias para cada pseudo-componente aromático.

Pseudo-componente	Anéis	Peso molecular (g/mol)	Ponto de ebulição (°C)	Pressão de vapor (atm)
1-Anel aromático	1	111	149	1,53E-02
2-Anel aromático	1,7	142	222	6,20E-04
3-Anel aromático	3,1	187	324	2,65E-06

B.3.7 Emulsificação

A formação de emulsões água-em-óleo, ou mousse, depende do estado do mar e da resina, asfalto e conteúdo de cera do óleo [78,80-82]. Os óleos variam na sua capacidade de formar emulsões estáveis. O óleo emulsionado pode conter até 80% de água na forma de gotículas da ordem de micrometros dispersas dentro de uma fase contínua de óleo (FINGAS, 1995; DALING *et al.*, 1988; FINGAS *et al.*, 1997). Esses autores argumentam que, para fins de precisão, uma abordagem empírica com curvas de óleo é necessária para considerar taxas de emulsificação específicas de óleo e o grau de estabilidade da emulsão.

No entanto, para aplicação geral do OILMAP, a emulsificação (água em óleo, isto é, formação de mousse) é modelada utilizando o esquema de Mackay & Zagorski (1982), como descrito em French *et al.* (1996). O teor de água aumenta exponencialmente, com a taxa relacionada ao quadrado da velocidade do vento e incorporação da água anterior. A viscosidade aumenta à medida que o teor de água aumenta no óleo, e a viscosidade crescente retorna ao modelo para diminuir a taxa de arrastamento. À medida que a informação se torna mais disponível, deve ser desenvolvido um novo algoritmo de incorporação de água que responda pela resina de óleo, asfalto e conteúdo de cera, bem como a estabilidade da emulsão água-em-óleo.

B.3.8 Entranhamento

O entranhamento por ondas de superfície é modelado com base em Delvigne & Sweeney (1988) que, usando observações experimentais de laboratório e de campo, desenvolveram uma relação para a taxa de entranhamento em função do diâmetro da gota de óleo, que por sua vez está relacionada com o nível de energia turbulenta por ondas de ruptura) e viscosidade do óleo. Os dados e as relações em Delvigne & Sweeney (op. cit.) e Delvigne & Hulsen (1994) são usados para calcular a distribuição de massa e tamanho de partículas de gotículas entranhadas:

$$Q_d = C * D_d^{0.57} S F d^{0.7} \Delta d \quad (13)$$

Onde,

Q_d é a taxa de entranhamento ($\text{kg/m}^2\text{-s}$) para o diâmetro de gota d (m),

C^* é a constante de entranhamento empírica que depende do tipo de óleo e do estado de intemperismo,

D_d é a energia de onda de ruptura dissipada por unidade de área de superfície (J/m^2),

S é a fração da superfície do mar coberta por óleo,

F é a fração da superfície do mar atingida por ondas de quebra

Δd é o diâmetro do intervalo de partículas de óleo (m).

Utilizando os dados reportados em Delvigne & Hulsen (1994), a constante de entranhamento C^* foi ajustada para o seguinte:

$$\text{Se } (\mu/\rho) < 132 \text{ cSt} \quad C^* = \text{Exp}[-0.1023 \ln\left(\frac{\mu}{\rho_0}\right) + 7.572] \quad (14)$$

$$\text{Se } (\mu/\rho) \geq 132 \text{ cSt} \quad C^* = \text{Exp}[-1.8927 \ln\left(\frac{\mu}{\rho_0}\right) + 16.313] \quad (15)$$

Em que μ é a viscosidade (mPa/s) e ρ é a densidade (g/cm^3) do óleo. O diâmetro médio das gotículas de óleo entranhado, d_{50} (μm), foi ajustado por uma curva aos dados em Delvigne & Sweeney (1988) para produzir:

$$d_{50} = 1,818E^{-5}d\left(\frac{\mu}{\rho_0}\right)^{0.34} \quad (16)$$

Onde E é a velocidade de dissipação da energia das ondas por unidade de volume ($\text{J/m}^3\text{-s}$) com E ajustado para 10^3 ($\text{J/m}^3\text{-s}$) para ondas de ruptura. Delvigne e Sweeney (1988) descobriram que existe uma relação linear entre $\log(N_i)$ e $\log(d_i)$, onde N_i é o número de partículas no intervalo de tamanho $0.5 \cdot d_i$ a d_i , sendo d_i o diâmetro de partícula. Assim, a distribuição relativa de números e volume (ou massa) para gotículas esféricas, pode ser calculado como uma função do tamanho da gota. Segue-se (Delvigne & Sweeney, 1988, Eq. 14) que

$$\sum_{j=1}^{i-1} V_j = 1,45V_i \quad (17)$$

Onde,

V_i é o volume em classe de tamanho de $0.5d_i$ a d_i ,

V_j é o volume em cada uma das classes de tamanho menores que $0.5d_i$ a d_i , sendo a soma de $j = 1$ a $(i - 1)$.

Esta equação indica a diminuição rápida do volume à medida que o tamanho das gotas diminui. Os diâmetros mínimos e máximos assumidos para as gotículas arrastados na coluna de água são de $0,1 d_{50}$ e d_{50} , respectivamente. O mínimo é fixado em 10% do d_{50} , uma vez que volumes abaixo deste tamanho são relativamente pequenos (cerca de 2% do volume na classe de tamanho médio) e podem ser negligenciados. O valor máximo assumido é igual à média pois em experimentos numéricos e teste de modelo, gotículas maiores do que d_{50} foram encontradas para ressurgir em menos de um passo de tempo e, portanto, não são quantificados como separado das manchas de superfície. No modelo, são utilizadas seis classes de tamanho, distribuídas uniformemente pelo diâmetro do mínimo ao máximo. A energia de onda dissipada, D_d (J/m^2), é:

$$D_d = 0,0034 p_w g H^2 \quad (18)$$

Onde

p_w é a densidade de água (kg/m^3),

g é a aceleração da gravidade (m/s^2),

H é o valor quadrático médio da altura da onda de ruptura (m).

A fração da superfície do mar atingida por ondas de ruptura por unidade de tempo, F , é parametrizada para $U_w \leq U_{th}$ (LEHR, 1992) como:

$$F = 3 \times 10^{-3} \left(\frac{U_w^{3,5}}{T_w} \right) \quad (19)$$

E, para $U_w > U_{th}$ (DELVIGNE & SWEENEY, 1988):

$$F = 0,032 ([U_w - U_{th}]) / T_w \quad (20)$$

Onde

U_w é a velocidade do vento a 10 m acima da superfície do mar (m/s),

U_{th} é a velocidade do vento limiar para o início das ondas de ruptura (~6m/s)

T_w é o período de pico de onda (s).

A massa total entranhada para dentro da coluna de água num passo de tempo Δt (s), M_E (kg), é:

$$M_E = A \Delta t \sum (Q_d \Delta d) \quad (21)$$

Onde,

A é a área de superfície lisa (m^2).

A profundidade de intrusão, Z_m (m), é:

$$Z_m = (1,5 \pm 0,3)H_b \quad (22)$$

Onde,

H_b é a altura da onda de ruptura (m).

A altura das ondas é calculada a partir da velocidade do vento, da duração e da busca (distância do vento à terra), usando os algoritmos do Coastal Engineering Research Center (CERC, 1984). Neste cálculo considera-se a velocidade do vento a 10 m, a pista (*fetch*) de vento e a profundidade local:

$$H_s T_s = f(X, U, t, h, g) \quad (23)$$

Onde,

H_s e T_s são a altura e período significativo da onda,

X é a pista de vento (*fetch*) pela qual U sopra (velocidade mais comum usada é obtida a 10 m acima da superfície),

t é o tempo,

h é a profundidade da água, e

g é a aceleração gravitacional:

$$\frac{gH_s}{U^2}, \frac{gT_s}{U} = f\left(\frac{gX}{U^2}, \frac{gt}{U}, \frac{gh}{U^2}\right) \quad (24)$$

A profundidade de mistura (exceto quando condicionada pelo fundo do mar) para cada classe de tamanho de gotícula, Z_i (m), é:

$$Z_i = \max(D_v/w_i, Z_m) \quad (25)$$

Onde

D_v é o coeficiente de dispersão vertical (Eq. 1)

w_i é a velocidade de subida para o tamanho da gota (Eq. 2).

Para óleos de maior viscosidade, a taxa de penetração é mais lenta e o tamanho da gota é maior. A viscosidade do óleo aumenta pela emulsificação e perda de evaporação de componentes voláteis mais leves. O tamanho da gota determina se o óleo irá ressurgir e quão rápido este processo ocorre. Considera-se que as gotas superiores a 70 μm de diâmetro flutuam uma vez que atingem a superfície da água por difusão vertical. Gotas menores que atingem a superfície, são misturadas no nível abaixo se sua velocidade de ascensão é superada pela velocidade de difusão vertical, ressurgindo de outra forma. O limiar de 70 μm baseia-se em observações de Lunel (1993) de tamanhos de gotículas que parecem estar dispersas permanentemente. À medida que o óleo da superfície é encaminhado para camadas inferiores, mais rápido do que a água subjacente, gotas ressurgentes incorporam-se a borda superior do óleo, espalhando de maneira eficaz as manchas na direção do vento.

Quebras de ondas iniciam-se em cerca de 12 nós (6m/s) da velocidade do vento e quebra de onda aumenta à medida que a velocidade do vento se torna maior. Assim, o entranhamento torna-se cada vez mais importante (maior taxa de transferência de energia para a massa de água) quanto maior a velocidade do vento. Abaixo de 12 nós de velocidade do vento, a porcentagem de massa entranhada não é significativa. À medida que o vento e a turbulência aumentam, os tamanhos de gotículas de óleo tornam-se menores, embora haja um retardamento do processo de entranhamento com o intemperismo do óleo e/ou emulsificação, tornando-o mais viscoso. A aplicação de dispersante químico diminui a tensão superficial do óleo, e assim aumenta a taxa de entranhamento (a um nível de turbulência) e diminui o tamanho das gotas. A distribuição de tamanho de gotículas de óleo quimicamente disperso é baseada em diâmetros observados em Lunel (1993). Tipicamente, os dispersantes são eficazes em óleos até uma viscosidade de cerca de 10000 mPa/s, um limiar acima do qual o entranhamento é negado no modelo.

B.3.9 Entranhamento de surf

A altura das ondas na zona de arrebenção (ou *surf*) pode ser introduzida no modelo para induzir o entranhamento. O algoritmo acima baseado em Delvigne & Sweeney (1988) é usado para determinar a distribuição de tamanho de gotícula do óleo entranhado pela arrebenção, que é assumido como bem misturado na zona de *surf*. A

sedimentação de partículas não ocorre em profundidades onde as ondas atingem o fundo (sendo 1,5 multiplicado pela altura da onda).

B.3.10 Degradação

A degradação pode ocorrer como resultado da fotossíntese, que é um processo químico alimentado por energia ultravioleta do sol, e por biodegradação. Para óleos baixo de 20 m na coluna d'água, a degradação é primordialmente microbiana.

Um algoritmo de decaimento de primeira ordem é usado, com taxas de degradação especificadas. Assim, a degradação é calculada como uma taxa de decaimento exponencial para cada partícula a cada passo de tempo. A massa degradada não é rastreada espacialmente, porém, é mantida no balanço de massa. As taxas de degradação do OILMAP são apresentadas na Tabela B-2.

B.3.11 Propriedades Físicas

A temperatura e intemperismos alteram a composição química do óleo, afetando sua viscosidade e densidade. A composição química da fração volátil (sendo as porções voláteis e semi-voláteis aquelas destiladas a temperatura abaixo de 380°C) muda devido à dissolução dos compostos solúveis e semi-solúveis e à degradação.

A viscosidade é função da temperatura e estado de intemperismo do óleo. O modelo utiliza o algoritmo de Mackay *et al.* (1982), uma equação de Arrhenius, para estimar as mudanças na viscosidade em função da temperatura:

$$\mu_{temp} = \mu_0 \exp \left[C_{temp} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (26)$$

onde μ_0 é a viscosidade do óleo não degradado (*fresh oil*) à temperatura de referência T_0 (K) e C_{temp} é um fator de correção da temperatura constante para cada tipo de óleo. C_{temp} pode ser estimado como E_a/R , onde E_a é a energia de ativação (J/mol) e R a constante universal dos gases (8,314 J/mol-K). A temperatura T do óleo não é disponibilizada usualmente, portanto o modelo usa a aproximação pela temperatura da água no entorno.

Com relação aos intemperismos, o efeito de perda de frações voláteis e solúveis sobre a viscosidade dinâmica μ é dado como:

$$\mu = \mu_{temp} \times \exp(C_{evap} \times F_v) \quad (27)$$

Onde μ_{temp} é a viscosidade dinâmica inicial do óleo corrigida para a temperatura ambiente, C_{evap} é uma constante, F_v é a fração do óleo inicialmente liberado que foi perdida devido a evaporação, dissolução e degradação. Nesta aplicação as perdas são devido a dissolução e degradação, de forma que a constante C_{evap} é denominada de coeficiente de intemperismo.

Já o efeito combinado da temperatura e da perda de frações solúveis e voláteis sobre a densidade do óleo e modelado através da formulação de Lehr *et al.* (2002), sendo:

$$\rho = \rho_0 [1 - k_{temp}(T - T_0)] (1 + k_{evap} F_v) \quad (28)$$

onde ρ_0 é a densidade do óleo-fonte, T é a temperatura ambiente (K), T_0 é a temperatura de referência (K), e F_v é a fração do óleo perdida por evaporação, dissolução e degradação. Os coeficientes k_{temp} e k_{evap} são constantes ajustadas empiricamente, com pequena variação para diferentes tipos de óleos.

B.3.12 Saída do Modelo de Dispersão

O modelo físico de dispersão cria arquivos de saída registrando a distribuição da substância derramada no espaço tridimensional e tempo como área coberta por óleo e espessura na superfície da água (área varrida), volumes na coluna de água a várias concentrações de hidrocarbonetos totais em gotas suspensas, concentrações totais de hidrocarbonetos, comprimentos e locais da linha costeira impactados e o volume de óleo em terra em cada segmento.

A concentração de hidrocarbonetos na coluna de água é calculada a partir da massa em “spillets”. Concentração é contornada em um sistema de grade Lagrangiana tridimensional, no qual é resolvido cada passo de tempo para cobrir apenas o volume ocupado por partículas diluídas, incluindo a dispersão ao redor de cada “spillet”. Isto maximiza a resolução das concentrações em cada passo de tempo e reduz o erro

Pág.	Modelagem de Derrame de Óleo, Estado de Sergipe	
B-22/27		

causado pela média da massa em grandes volumes de células. A distribuição da massa em torno do centro do “*spillet*” é descrita como Gaussiana em três dimensões, com um desvio padrão igual ao dobro da distância difusiva ($2D_{xt}$ na horizontal, $2D_{zt}$ na vertical, onde D_x é a horizontal e D_z é o coeficiente de difusão vertical e T é a idade da partícula). As bordas da grade de pluma são definidas num desvio padrão para fora da partícula mais externa.

BIBLIOGRAFIA

BEAR J. & VERRUIJT A., 1987. Modeling Groundwater Flow and Pollution with Computer Programs for Sample Cases. Kluwer Academic, London, UK.

COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. 1984. Shore Protection Manual, Vol 1—Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.

DALING P.S. & BRANDVIK P.J., 1988. A study of the formation and stability of water-in-oil emulsions. Proceedings, 11th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 7–9, 1992. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 153–170.

DELVIGNE G.A.L. & SWEENEY C.E., 1988. Natural dispersion of oil. Oil Chem Pollut 4:281–310.

DELVIGNE G.A.L. & HULSEN L.J.M., 1994. Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficient - Application in computations of natural oil dispersion. Proceedings, 17th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 8–10. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 173–187.

FAY J.A., 1971. Physical processes in the spread of oil on a water surface. In Proceedings, Joint Conference and Control of Oil Spills, June 15–17, Washington, DC.

Revisão 01 07/2017	<hr style="width: 20%; margin: 0 auto;"/> Técnico Responsável	TBZ 017094
-----------------------	------------------------------------------------------------------	------------

FINGAS M., 1995. Water-in-oil emulsion formation: A review of physics and mathematical modelling. *Spill Science and Technology Bulletin* 2:55–59.

FINGAS M, FIELDHOUSE B, MULLIN JV. 1997. Studies of water-in-oil emulsions: Stability studies. Proceedings, 20th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 10–13. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 21–42.

FRENCH D, REED M, JAYKO K, FENG S, RINES H, PAVIGNANO S, ISAJI T, PUCKETT S, KELLER A, FRENCH FW III, GIFFORD D, MCCUE J, BROWN G, MACDONALD E, QUIRK J, NATZKE S, BISHOP R, WELSH M, PHILLIPS M, INGRAM BS. 1996. The CERCLA type A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments (NRDAM/CME), technical documentation, Vols 1–6. Contract 14-0001-91-C-11. Final Report. U.S. Department of the Interior, Office of Environmental Policy and Compliance, Washington, DC.

FRENCH D.P., RINES H., MASCIANGIOLI P. 1997. Validation of an Oil emulsion spill fates model using observations from field test spills. Proceedings, 20th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 10–13. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 933–961.

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

FRENCH MCCAY D.P., 2003. Development and Application of Damage Assessment Modeling: Example Assessment for the North Cape Oil Spill. **Marine Pollution Bulletin**, 47 (9-12), pp. 341-359.

FRENCH MCCAY, D.P., 2004. “Oil Spill Impact Modeling: Development and Validation”, **Environmental Toxicology and Chemistry**, 23(10):2441-2456.

FRENCH MCCAY, D.P., AND J.J. ROWE, 2004. “Evaluation of Bird Impacts in Historical Oil Spill Cases Using the SIMAP Oil Spill Model”, in Proceedings of the 27th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, Canada, 421-452.

FRENCH MCCAY, D., LI, Z.; HORN, M.; CROWLEY, D.; SPAULDING, M.; MENDELSON, D. & TURNER, C. 2016. Modeling Oil Fate and Subsurface Exposure Concentrations from the Deepwater Horizon Oil Spill. Proceeding of the Thirty-nine AMOP Technical Seminar, Environmental and Climate Change Canada, Ottawa, ON, pp. 115-150.

FRENCH MCCAY, D., JAYKO, K., LI, Z., M. HORN, Y. KIM, T. ISAJI, D. CROWLEY, M. SPAULDING, L. DECKER, C. TURNER, S. ZAMORSKI, J. FONTENAULT, R. SHMOOKLER, ROWE, J.J., 2015. Technical Reports for Deepwater Horizon Water Column Injury Assessment – WC_TR.14: Modeling Oil Fate and Exposure Concentrations in the Deepwater Plume and Rising Oil Resulting from the Deepwater Horizon Oil Spill. DWH NRDA Water Column Technical Working Group Report. Prepared for National Oceanic and atmospheric administration (NOAA) by RPS ASA, South Kingstown, RI, USA. September 29. Administrative Record no. DWH-AR0285776 [<https://www.doi.gov/deepwaterhorizon/adminrecord>].

GUNDLACH E.R., 1987. Oil holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer-simulated spills in coastal waters. Proceedings, 1987 Oil Spill Conference, Baltimore, MD, USA, April 6–9. American Petroleum Institute, Washington, DC, pp 451–457.

JONES RK. 1997. A simplified pseudo-component oil evaporation model. Proceedings, 20th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 10–13. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 43–61.

KOLLURU V, SPAULDING ML, ANDERSON E. 1994. A three-dimensional subsurface oil dispersion model using a particle-based approach. Proceedings, 17th Arctic and

Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 8–10. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 815–835.

LEHR W.J., OVERSTREET R., JONES R., WATABAYASHI G., 1992. ADIOS - Automatic data inquire for oil spill. Proceedings, 15th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Edmonton, AB, Canada, June 9–11. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 31–45.

LEHR W., JONES R., EVANS M., SIMECEK-BEATTY D., OVERSTREET R., 2002. Revisions of the AGIOS oil spill model. *Environmental Modelling & Software* 17(2):189-197.

LINDEBURG, M.R. 2003. Environmental Engineering Reference Manual for the PE Exam. Professional Publications, Inc. Belmont, CA.

LUNEL T. 1993. Dispersion: Oil droplet size measurements at sea. Proceedings, 16th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Calgary, AB, June 7–9. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 1023–1056.

MACKAY D. & MATSUGU R.S., 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. *Can J Chem Eng* 51:434–439.

MACKAY D., BUIST I., MASCARENHAS R., PATERSON S., 1980a. Oil spill processes and models. Report EE-8. Environmental Emergency Branch, Department of Fisheries and Environment, Environment Canada, Ottawa, ON.

MACKAY D., PATERSON S., TRUDEL K., 1980b. A mathematical model of oil spill behavior. Environmental Emergency Branch, Department of Fisheries and Environment, Environment Canada, Ottawa, ON.

MACKAY D. & ZAGORSKI W., 1982. Water-in-oil emulsions. Environment Canada Manuscript Report EE-34. Environment Canada, Ottawa, ON.

MACKAY D., SHIU W.Y., HOSSAIN K., STIVERW., MCCURDY D., PETERSON S., 1982. Development and calibration of an oil spill behavior model. Report CG-D-27-83. U.S. Coast Guard, Research and Development Center, Groton, CT.

MCAULIFFE C.D., 1987. Organism exposure to volatile/soluble hydrocarbons from crude oil spills - A field and laboratory comparison. Proceedings, 1987 Oil Spill Conference, Baltimore, MD, USA, April 6 - 9. American Petroleum Institute, Washington, DC, pp 275–288.

OKUBO, A. AND R.V. OZMIDOV. 1970. Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question. **Atmospheric and Ocean Physics** 6: 534-536.

OKUBO, A. 1971. Oceanic diffusion diagrams. *Deep-Sea Res* 8:789–802.

PAYNE J.R., KIRSTEIN B.E., MCNABB JR. G.D., LAMBACH J.L., REDDING R., JORDAN R.E., HORN W., DE OLIVERIA C., SMITH G.S., BAXTER D.M., GAEGEL R., 1984. Multivariate analysis of petroleum weathering in the marine environment - sub Arctic. Environmental Assessment of the Alaskan Continental Shelf, OCEAP, Final Report of Principal Investigators, Vol. 21 and 22, Feb. 1984, 690p.

REED M. & GUNDLACH E., 1989. Hindcast of the Amoco Cadiz event with a coastal zone oil spill model. **Oil Chem Pollut** 5:451–476.

REED M., TURNER C., ODULO A., 1994. The role of wind and emulsification in modeling oil spill and drifter trajectories. **Spill Sci Technol Bull** 1:143–157.

STIVER W. & MACKAY D., 1984. Evaporation rate of oil spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. **Environ Sci Technol** 18: 834–840.

THORPE SA. 1984. On the determination of K_v in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. **J Phys Oceanogr** 14:861–863.

WHITE, P.M. 2005. Viscous Fluid Flow, 3rd ed. McGraw-Hill.

YOUSSEF M. & SPAULDING M.L., 1993. Drift current under the action of wind waves. Proceedings, 16th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Calgary, AB, Canada, June 7–9. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 587–615.

ANEXO C - DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS – SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS

Para a definição do início das simulações determinísticas, foram realizadas análises combinadas do vento e da maré em pontos representativos da região de interesse. A análise de vento foi realizada no ponto 10°48,0'S e 36°50,00'W, a partir da reanálise do CFSR¹², base utilizada para gerar as condições atmosféricas da simulação hidrodinâmica. As definições foram realizadas para dois períodos, compreendendo os meses de verão (novembro de 2008 a janeiro de 2009) e inverno (junho a agosto de 2009). A maré foi analisada através de uma previsão harmônica gerada pelas constantes fornecidas pela FEMAR¹³, para a estação maregráfica do Terminal Portuário de Sergipe (SE), localizada em 10° 50,0'S e 36° 55,0'W.

A análise buscou selecionar 8 combinações de condições ambientais para definição do início das simulações, sendo estas:

- verão – maré alta – vento forte
- verão – maré alta – vento fraco
- verão – maré baixa – vento forte
- verão – maré baixa – vento fraco
- inverno – maré alta – vento forte
- inverno – maré alta – vento fraco
- inverno – maré baixa – vento forte
- inverno – maré baixa – vento fraco

A definição de sazonalidade seguiu aquela utilizada pela base hidrodinâmica, com os meses de novembro de 2008 a janeiro de 2009 referentes ao período de verão e junho a agosto de 2009 representativos do período de inverno.

¹² *Climate Forecast System Reanalysis*

¹³ *Fundação Estudos do Mar*. Disponível em <<http://www.fundacaofemar.org.br/>>. Último acesso em: 01 de junho de 2016.

A definição de ventos fortes ou fracos foi realizada a partir da análise estatística da intensidade do vento para os períodos descritos acima. Os percentis de 10% e 90% foram utilizados como limiares. Assim, ventos fracos de inverno foram aqueles que apresentaram intensidades menores que 4,8 m/s (percentil de 10 %) e ventos fortes aqueles que com intensidades superiores à 7,9 m/s (percentil de 90%). Para o verão, os ventos fracos foram aqueles com intensidades inferiores a 4,1 m/s (percentil de 10%) enquanto os ventos fortes foram os que apresentaram velocidades acima de 7,9 m/s (percentil de 90%).

A partir da análise da variação do nível do mar obtida com a previsão harmônica, assumiu-se que o período de maré baixa seria aquele com início na vazante de maré. Já o período de maré alta foi aquele com início na enchente de maré.

A definição dos instantes iniciais de simulação se baseou na seguinte sequência de critérios: i) período de maré de sizígia, ii) análise da intensidade do vento e iii) maré enchente ou vazante. Os resultados da análise são apresentados na Tabela C-1.

Tabela C-1 - Datas iniciais das simulações determinísticas e respectivas condições ambientais.

SAZONALIDADE	MARÉ	VENTO	DATA DE INÍCIO
Verão	Alta	Forte	13/11/2008 10:00
Verão	Alta	Fraco	13/01/2009 11:00
Verão	Baixa	Forte	13/11/2008 16:00
Verão	Baixa	Fraco	14/01/2009 07:00
Inverno	Alta	Forte	27/07/2009 01:00
Inverno	Alta	Fraco	23/06/2009 23:00
Inverno	Baixa	Forte	27/07/2009 07:00
Inverno	Baixa	Fraco	24/06/2009 05:00