

# Modelagem de Vazamentos de Condensado no Campo de Mexilhão, Bacia de Santos



E&P

Revisão 00  
Março/2006



**PETROBRAS**



# **Modelagem de Vazamentos de Condensado no Campo de Mexilhão, Bacia de Santos**

**Revisão 00**

**Março / 2006**



**E&P**









## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	1
I INTRODUÇÃO .....	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO .....	I-2
I.1.1 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO NA REGIÃO .....	I-3
I.1.2 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO.....	I-4
II MODELO HIDRODINÂMICO .....	II-1
II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL.....	II-1
II.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM.....	II-2
II.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS.....	II-5
II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL .....	II-6
II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	II-6
II.3.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E BATIMETRIA .....	II-6
II.3.2 DADOS DE VENTO E MARÉ .....	II-8
II.3.3 ESTRUTURA TERMOHALINA .....	II-9
III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....	III-1
III.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR .....	III-2
III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES.....	III-2
III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA .....	III-6
IV MODELAGEM DE DERRAME DE CONDENSADO.....	IV-1
IV.1 MODELO SIMAP .....	IV-1
IV.1.1 MODELO DE INTEMPERISMO FÍSICO .....	IV-2
IV.1.1.1 Formulação do Modelo de Trajetórias Bidimen- sionais .....	IV-3
IV.1.1.2 Formulação do Modelo Tridimensional .....	IV-23
IV.1.1.3 Modelo Estocástico Tridimensional.....	IV-29
IV.2 DADOS DE ENTRADA.....	IV-31
V MODELAGEM DE DERIVA DE CONDENSADO PARA DERRAMES NO CAMPO DE MEXILHÃO.....	V-1
V.1 DADOS DE ENTRADA.....	V-1
V.1.1 CAMPO DE CORRENTES .....	V-2

---

V.1.2	DADOS DE VENTO.....	V-2
V.1.3	PONTO DE RISCO E VOLUMES.....	V-4
V.1.4	CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO UTILIZADO .....	V-5
V.2	RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....	V-7
VI	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA VAZAMENTOS DE CONDENSADO NO CAMPO DE MEXILHÃO.....	VI-1
VI.1	SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS .....	VI-1
VI.2	CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS.....	VI-53
VII	BIBLIOGRAFIA .....	VII-1
VIII	EQUIPE TÉCNICA.....	VIII-1

**TABELAS**

<b>TABELA</b>	<b>PÁG.</b>
<b>Tabela II.2-1</b> - Resumo dos dados de entrada do <i>Parallel Ocean Climate Model</i> (POCM).	II-6
<b>Tabela V.1.2-1</b> - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o ano de 1992, na Bacia de Santos.	V-4
<b>Tabela V.1.3-1</b> - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco de derrame de condensado no Campo de Mexilhão, Bacia de Santos.	V-4
<b>Tabela V.1.4-1</b> - Composição do condensado do Campo de Mexilhão.	V-5
<b>Tabela V.1.4-2</b> - Características do condensado utilizado nas simulações de vazamento.	V-6
<b>Tabela V.2-1</b> - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derramamento de condensado no ponto P1, Campo de Mexilhão.	V-7
<b>Tabela VI.2-1</b> - Resumo dos cenários determinísticos críticos para os pontos P1 e P2, nos períodos de verão e de inverno para o campo de Mexilhão.	VI-54

## FIGURAS

FIGURA	PÁG.
<b>Figura I.1-1</b> - Localização dos pontos de risco, ponto P1 e P2, no Campo de Mexilhão - Bacia de Santos.	I-2
<b>Figura I.1.2-1</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão.	I-5
<b>Figura I.1.2-2</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno.	I-5
<b>Figura II.3.1-1</b> - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Santos.	II-7
<b>Figura II.3.1-2</b> - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Santos.	II-8
<b>Figura II.3.3-1</b> - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno; (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.	II-9
<b>Figura III.1-1</b> - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.	III-2
<b>Figura III.2-1</b> - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes $u$ (E-W) e $v$ (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).	III-3
<b>Figura III.2-2</b> - Espectros de amplitude das componentes $u$ (E-W) (azul) e $v$ (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.	III-3
<b>Figura III.2-3</b> - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes $u$ (E-W) e $v$ (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as calculadas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.	III-4
<b>Figura III.2-4</b> - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes $u$ (E-W) e $v$ (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.	III-5
<b>Figura III.3-1</b> - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico no ano de 1992.	III-6
<b>Figura V.1-1</b> - Grade definindo os contornos de terra (grade <i>habitat</i> ) para a modelagem de transporte de condensado a partir do ponto P1, no Campo de Mexilhão: (a) células e (b) tipos de <i>habitats</i> .	V-1
<b>Figura V.1-2</b> - Grade definindo os contornos de terra (grade <i>habitat</i> ) para a modelagem de transporte de condensado a partir do ponto P2, no Campo de Mexilhão: (a) células e (b) tipos de <i>habitats</i> .	V-2

FIGURA	PÁG.
<b>Figura V.1.2-1</b> - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Santos.	V-3
<b>Figura VI.1-1</b> - Cenário MEXILHAO_COND_P1_VER_8_1H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m <sup>3</sup> após 1 hora.	VI-2
<b>Figura VI.1-2</b> - Cenário MEXILHAO_COND_P1_VER_8_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m <sup>3</sup> após 8 horas.	VI-3
<b>Figura VI.1-3</b> - Cenário MEXILHAO_COND_P1_VER_200_8H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m <sup>3</sup> após 8 horas.	VI-4
<b>Figura VI.1-4</b> - Cenário MEXILHAO_COND_P1_VER_200_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m <sup>3</sup> após 8 horas.	VI-5
<b>Figura VI.1-5</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 6 horas.	VI-6
<b>Figura VI.1-6</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 6 horas.	VI-7
<b>Figura VI.1-7</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 9 horas.	VI-8
<b>Figura VI.1-8</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 9 horas.	VI-9
<b>Figura VI.1-9</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 12 horas.	VI-10

FIGURA	PÁG.
<b>Figura VI.1-10</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 12 horas.	VI-11
<b>Figura VI.1-11</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 36 horas.	VI-12
<b>Figura VI.1-12</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 36 horas.	VI-13
<b>Figura VI.1-13</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 60 horas.	VI-14
<b>Figura VI.1-14</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 60 horas.	VI-15
<b>Figura VI.1-15</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 30 dias.	VI-16
<b>Figura VI.1-16</b> - Cenário MEXILHAO_P1_VER_PCASO_30DIAS. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 30 dias.	VI-17
<b>Figura VI.1-17</b> - Cenário MEXI_COND_P1_INV_8_1H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m <sup>3</sup> após 1 hora.	VI-18
<b>Figura VI.1-18</b> - Cenário MEXI_COND_P1_INV_8_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m <sup>3</sup> após 8 horas.	VI-19



FIGURA	PÁG.
<b>Figura VI.1-19</b> - Cenário MEXI_COND_P1_INV_200_8H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m <sup>3</sup> após 8 horas.	VI-20
<b>Figura VI.1-20</b> - Cenário MEXI_COND_P1_INV_200_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m <sup>3</sup> após 8 horas.	VI-21
<b>Figura VI.1-21</b> - Cenário MEXI_P1_INV_PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 6 horas.	VI-22
<b>Figura VI.1-22</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 6 horas.	VI-23
<b>Figura VI.1-23</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 9 horas.	VI-24
<b>Figura VI.1-24</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 9 horas.	VI-25
<b>Figura VI.1-25</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 12 horas.	VI-26
<b>Figura VI.1-26</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 12 horas.	VI-27
<b>Figura VI.1-27</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 36 horas.	VI-28

FIGURA	PÁG.
<b>Figura VI.1-28</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 36 horas.	VI-29
<b>Figura VI.1-29</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 60 horas.	VI-30
<b>Figura VI.1-30</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 60 horas.	VI-31
<b>Figura VI.1-31</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 30 dias.	VI-32
<b>Figura VI.1-32</b> - Cenário MEXILHAO_P1_INV_PCASO_30DIAS. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h após 30 dias.	VI-33
<b>Figura VI.1-33</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-34
<b>Figura VI.1-34</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-35
<b>Figura VI.1-35</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 9 horas.	VI-36
<b>Figura VI.1-36</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202m <sup>3</sup> após 9 horas.	VI-37

FIGURA	PÁG.
<b>Figura VI.1-37</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 12 horas.	VI-38
<b>Figura VI.1-38</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 12 horas.	VI-39
<b>Figura VI.1-39</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 36 horas.	VI-40
<b>Figura VI.1-40</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 36 horas.	VI-41
<b>Figura VI.1-41</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 60 horas.	VI-42
<b>Figura VI.1-42</b> - Cenário MEXILHAO_P2_VER_PCASO_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 60 horas.	VI-43
<b>Figura VI.1-43</b> - Cenário MEXI_P2_INV_PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um acidente ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-44
<b>Figura VI.1-44</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-45
<b>Figura VI.1-45</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 9 horas. agosto), com derrame de 3202 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-46

<b>FIGURA</b>	<b>PÁG.</b>
<b>Figura VI.1-46</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 9 horas.	VI-47
<b>Figura VI.1-47</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 12 horas.	VI-48
<b>Figura VI.1-48</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 12 horas.	VI-49
<b>Figura VI.1-49</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 36 horas.	VI-50
<b>Figura VI.1-50</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 36 horas.	VI-51
<b>Figura VI.1-51</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 60 horas.	VI-52
<b>Figura VI.1-52</b> - Cenário MEXILHAO_P2_INV_PCASO_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> após 60 horas.	VI-53
<b>Figura VI.2-1</b> - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P1 no período de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m <sup>3</sup> /h, após 9 horas.	VI-55
<b>Figura VI.2-2</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P1, no verão (janeiro a março).	VI-56
<b>Figura VI.2-3</b> - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P1, no período de inverno (junho a agosto), após 5 horas.	VI-57

<b>FIGURA</b>	<b>PÁG.</b>
<b>Figura VI.2-4</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P1, no inverno (junho a agosto).	VI-58
<b>Figura VI.2-5</b> - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2 no período de verão (janeiro a março), com derrame de 3202 m <sup>3</sup> , após 1 hora.	VI-59
<b>Figura VI.2-6</b> - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2 no período de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m <sup>3</sup> , ao final da simulação após 60 horas..	VI-60
<b>Figura VI.2-7</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P2, no verão (janeiro a março).	VI-61
<b>Figura VI.2-8</b> - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2, no período de inverno (junho a agosto), após 1 hora.	VI-62
<b>Figura VI.2-9</b> - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2, no período de inverno (junho a agosto), ao final da simulação após 60 horas.	VI-63
<b>Figura VI.2-10</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P2, no inverno (junho a agosto).	VI-64



## RESUMO

O sistema de modelos SIMAP da *Applied Science Associates (ASA), Inc.* foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de condensado, decorrente de *blowout* no Campo de Mexilhão, localizado na Bacia de Santos.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir da combinação dos resultados de dois modelos. O primeiro, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), implementado para simular as condições na plataforma continental, e o segundo baseado no *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

Foram conduzidas simulações probabilísticas em sub-superfície para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 3 (três) classes de derrame, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m<sup>3</sup> e médio, com 200 m<sup>3</sup>, ambos com derrame instantâneo e pior caso, com dois pontos de risco P1 e P2 ambos, com volumes de pior caso respectivamente 12.508,9 m<sup>3</sup> derramados ao longo de 30 dias (17,37 m<sup>3</sup>/h), correspondente à perda de controle de um poço, no ponto P1 (*blowout* por 30 dias), e para P2 3202 m<sup>3</sup> com derrame instantâneo correspondente ao rompimento do duto.

A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos críticos para condições de verão e inverno, utilizando como critério de seleção as maiores concentrações de condensado na água.

Os resultados da modelagem revelaram uma forte correlação entre a trajetória de uma mancha simulada e o padrão de circulação na região. Além disso, observou-se que a maior parte do condensado derramado permanece dissolvido na coluna d'água.

Este trabalho representa uma iniciativa pioneira da PETROBRAS na caracterização ambiental e utilização do estado-da-arte em ferramentas computacionais para a modelagem hidrodinâmica e do transporte e dispersão de poluentes no mar decorrente de potenciais acidentes com derramamento de condensado na Bacia de Santos.





## I INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a HABTEC/PETROBRAS no desenvolvimento de Estudos Ambientais na Bacia de Santos, apresenta-se este trabalho de modelagem computacional da trajetória e intemperismo de condensado no Campo de Mexilhão em dois pontos de risco, P1 e P2, decorrentes de um rompimento no duto de exportação do Sistema de Mexilhão e *blowout* de poço, respectivamente.

As modelagens foram conduzidas através da utilização de um sistema de modelos conhecido como SIMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** A **ASA** tem mais de 20 anos de experiência com utilização de ferramentas computacionais para estudos de impacto ambiental causados por acidentes com petróleo.

Para estudos de modelagem como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em larga escala, e (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira).

Para a modelagem de transporte das manchas de condensado foram utilizados dados de vento provenientes do modelo global NCEP<sup>1</sup>. O NCEP disponibiliza um conjunto de resultados provenientes de aproximadamente 15 anos de análises globais de campos atmosféricos para suprir as necessidades de pesquisa na área de clima, sendo um conjunto de dados dos mais confiáveis disponíveis.

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

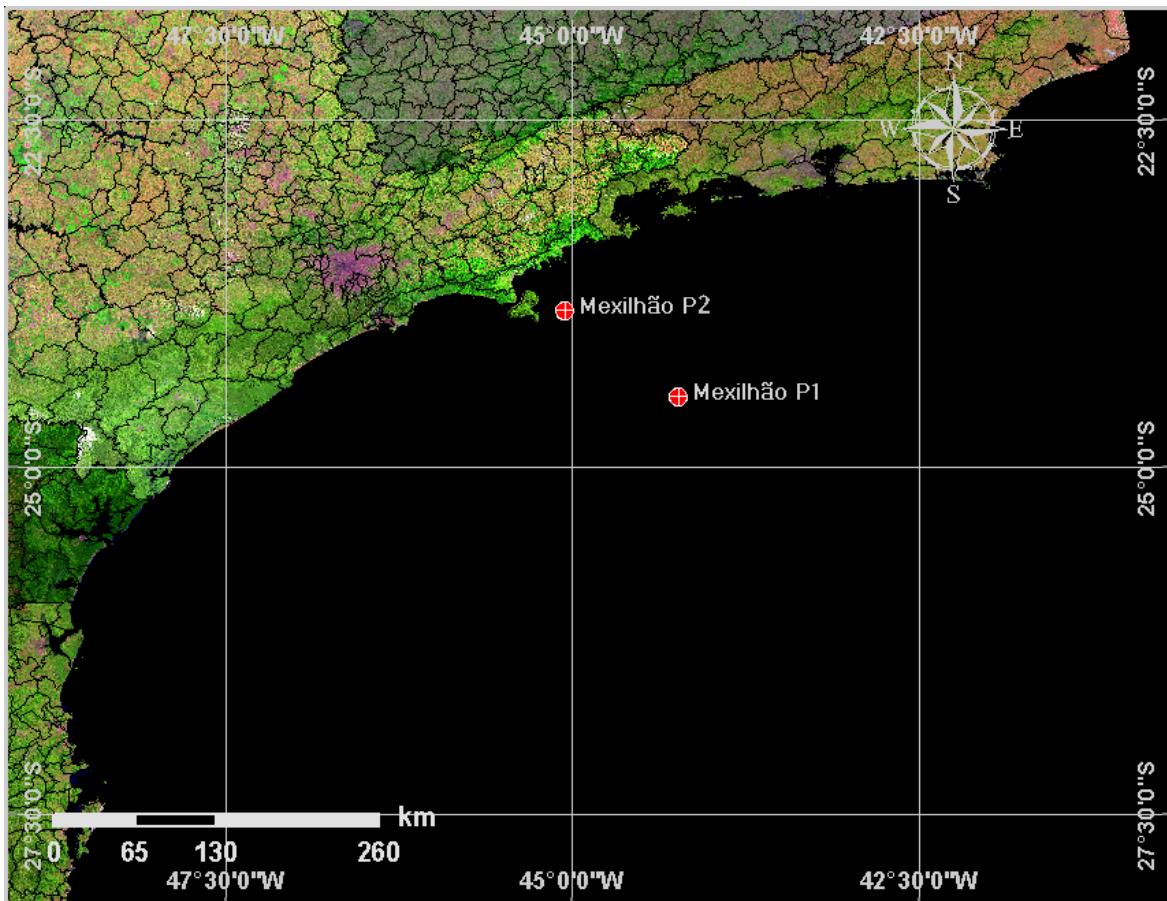
---

<sup>1</sup> *National Centers for Environmental Prediction.*

O Capítulo I discute o propósito do estudo e fornece informações sobre a área de estudo. O Capítulo II descreve o modelo hidrodinâmico e o Capítulo III apresenta a calibração do mesmo. O Capítulo IV descreve o modelo SIMAP utilizado na modelagem dos cenários acidentais com vazamento de condensado. O Capítulo V apresenta os cenários simulados, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas são apresentados no Capítulo VI.

## I.1 ÁREA DE ESTUDO

A figura I.1-1 apresenta a localização dos pontos de risco localizados na Bacia de Santos, para os quais foram realizadas simulações de potenciais acidentes com vazamento de condensado no mar.



**Figura I.1-1 - Localização dos pontos de risco, ponto P1 e P2, no Campo de Mexilhão - Bacia de Santos.**

### ***1.1.1 Padrões de Circulação na Região***

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

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

As primeiras medições diretas foram feitas por Evans & Signorini (1985), nas latitudes de 20°30'S e 23°S, as quais apresentaram um fluxo confinado aos primeiros 400 m de profundidade, com uma contra-corrente no sentido norte abaixo destes 400 m iniciais. Na parte norte da área, acima do Cabo de São Tomé, a direção da corrente é para 180°, variando para 220° na região de Cabo Frio. Esta mudança afeta significativamente a CB, induzindo a formação de vórtices e meandros. O volume estimado transportado pela CB na região da quebra da plataforma e do talude na latitude de 22°S é de  $5,5 \pm 2,6$  Sv (Lima, 1997).

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

A corrente que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos predominantes, que provêm principalmente de nordeste nessa estação, devido à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). No inverno, entretanto, a alta incidência de sistemas frontais induz a ocorrência de correntes com direção

nordeste nas porções interna e média da plataforma (Castro & Miranda, 1998). Outra consequência do predomínio dos ventos de NE é a “ressurgência” de águas frias (ACAS) em regiões costeiras. Esses eventos são muito comuns na região de Cabo Frio.

### ***1.1.2 Características Meteorológicas da Região***

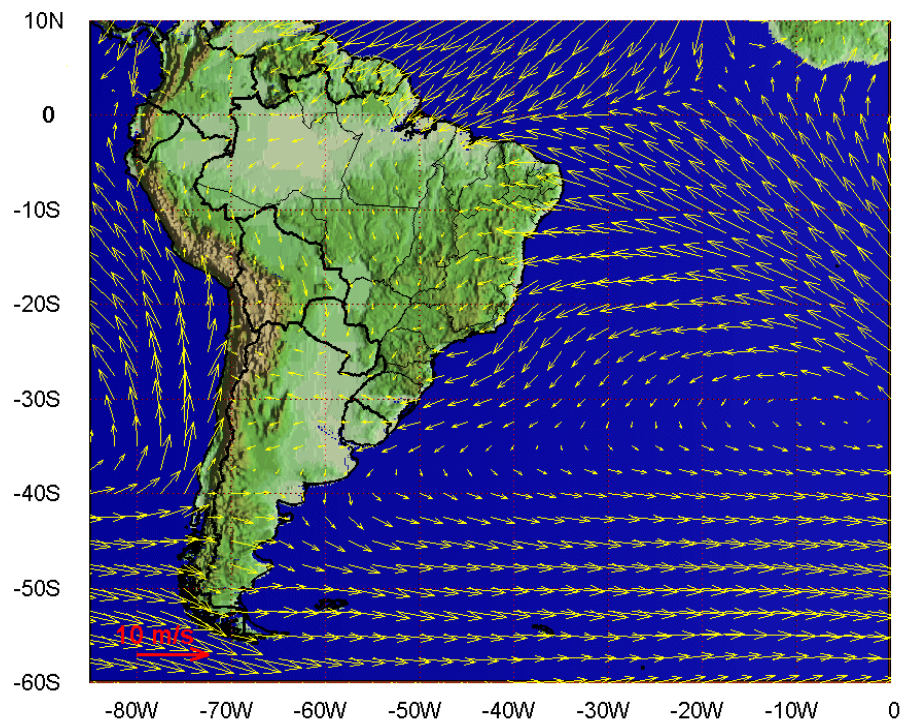
A circulação atmosférica de baixos níveis na região sudeste do Brasil é dominada pela ação da ASAS, pela passagem de sistemas frontais sobre a região e por circulações locais.

A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região sudeste devido ao deslocamento da ASAS é caracterizado pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste no inverno. Este padrão é ilustrado na figura I.1.2-1 e na figura I.1.2-2, que apresentam o comportamento sazonal da circulação atmosférica obtida através da média de 12 anos (1990 – 2001) das reanálises do modelo de circulação geral do NCEP. Nessa análise foram utilizados dados de vento na altura de 10 m. Observa-se a mudança do posicionamento sazonal da ASAS e o padrão de ventos gerados por esse sistema.

Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre o Brasil com freqüências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas, como se pode notar no estudo de Oliveira (1986). De acordo com o Boletim de Monitoramento e Análise Climática (Climanálise, 1996), que apresentou uma estatística de sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil entre os anos de 1975 a 1984 e 1987 a 1995, a média ficou entre 4 e 7 sistemas mensais atuando sobre a costa do sudeste brasileiro, com valores máximos nos meses de inverno e valores mínimos nos meses de verão.

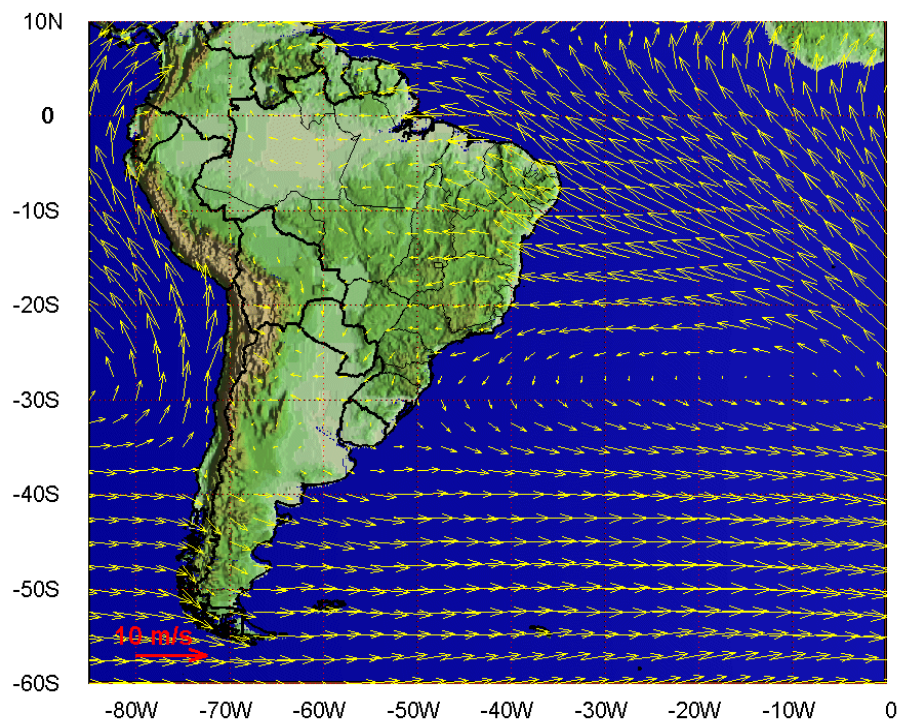


## Janeiro - Fevereiro - Março



**Figura I.1.2-1** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento a 10 m no período de verão.

## Junho - Julho - Agosto



**Figura I.1.2-2** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento a 10 m no período de inverno.

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

## II MODELO HIDRODINÂMICO

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

### II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

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

A formulação deste modelo possui estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas escritas na forma de fluxo, sob as aproximações de Boussinesq e hidrostáticas. Este modelo permite também a utilização de grades curvilíneas, de coordenadas  $\sigma$  na vertical e a resolução das camadas turbulentas de superfície e de fundo, por meio de um submodelo de fechamento turbulento de 2ª ordem.

No sistema de coordenadas  $\sigma$ , a coordenada  $z$  é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água local, conforme mostra a equação abaixo, onde  $D$  é a profundidade local,  $\eta$  a elevação da superfície e  $H$  a profundidade média local:

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

onde

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

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

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

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

### **II.1.1 Equações Básicas do POM**

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

O conjunto de equações básicas utilizadas no código é descrito abaixo. Consideremos um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com  $x$  crescendo para Leste,  $y$  para Norte e  $z$  para cima, no qual as coordenadas horizontais (i.e.  $x, y$ ) referem-se ao espaço computacional. A superfície livre está



localizada em  $z = \eta(x, y, t)$  e o fundo em  $z = -H(x, y)$ . Neste sistema as equações de conservação e a equação de estado são escritas como:

Equação da continuidade:

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

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

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

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

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

Conservação de Temperatura Potencial:

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

Conservação de Salinidade:

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

Equação de Estado:

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

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

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

Equação da Turbulência em Macro Escala:

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

sendo,

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

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (\text{II.1.1-11})$$

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \quad (\text{II.1.1-12})$$

onde

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

$F$  = parâmetro de Coriolis ( $s^{-1}$ );

$\rho_0$  = densidade de referência ( $kg/m^3$ );

$\rho$  = densidade *in situ* ( $kg/m^3$ );

$P$  = pressão ( $N/m^2$ );

$K_M$  = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ );

$K_H$  = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal ( $m^2/s$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\Theta$  = temperatura potencial ( $^{\circ}C$ );

$S$  = salinidade (PSU);

$A_M$  = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ );

$A_H$  = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor e sal ( $m^2/s$ );

$q^2 / 2$  = energia cinética turbulenta;

$L$  = escala característica de comprimento para o movimento turbulento;

$\tilde{W}$  = função proximidade-do-contorno;

$K$  = constante de von Karman ( $k=0,4$ );

$F_{q^2, q^2 l}$  = termos horizontais de mistura para  $q^2$  e  $q^2 l$ .

## II.1.2 Condições de Contorno Adotadas

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

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

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

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

## **II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL**

O modelo hidrodinâmico utilizado para fornecer o campo de correntes ao largo do talude foi o POCM, desenvolvido pelo Office of Naval Research dos Estados Unidos. Este modelo utiliza como forçantes fluxos de calor e ventos gerados pelo ECMWF<sup>2</sup>.

O modelo POCM é considerado pela comunidade oceanográfica do WOCE<sup>3</sup> o mais sofisticado para descrever a circulação oceânica, sendo capaz de reproduzir os fluxos da CB que afetam diretamente a Bacia do Espírito Santo. A tabela II.2-1 apresenta um resumo dos dados de entrada utilizados pelo modelo POCM.

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

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

DADOS DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
Fluxos de Calor	Dados de reanálise do ECMWF.
Ventos	Dados de reanálise do ECMWF.
Temperatura e Salinidade da água	Interpolados da Climatologia LEVITUS <sup>4</sup> , e depois simulado por um período de 33 anos para ajuste dos campos termohalinos

## **II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO**

### **II.3.1 Discretização do Domínio e Batimetria**

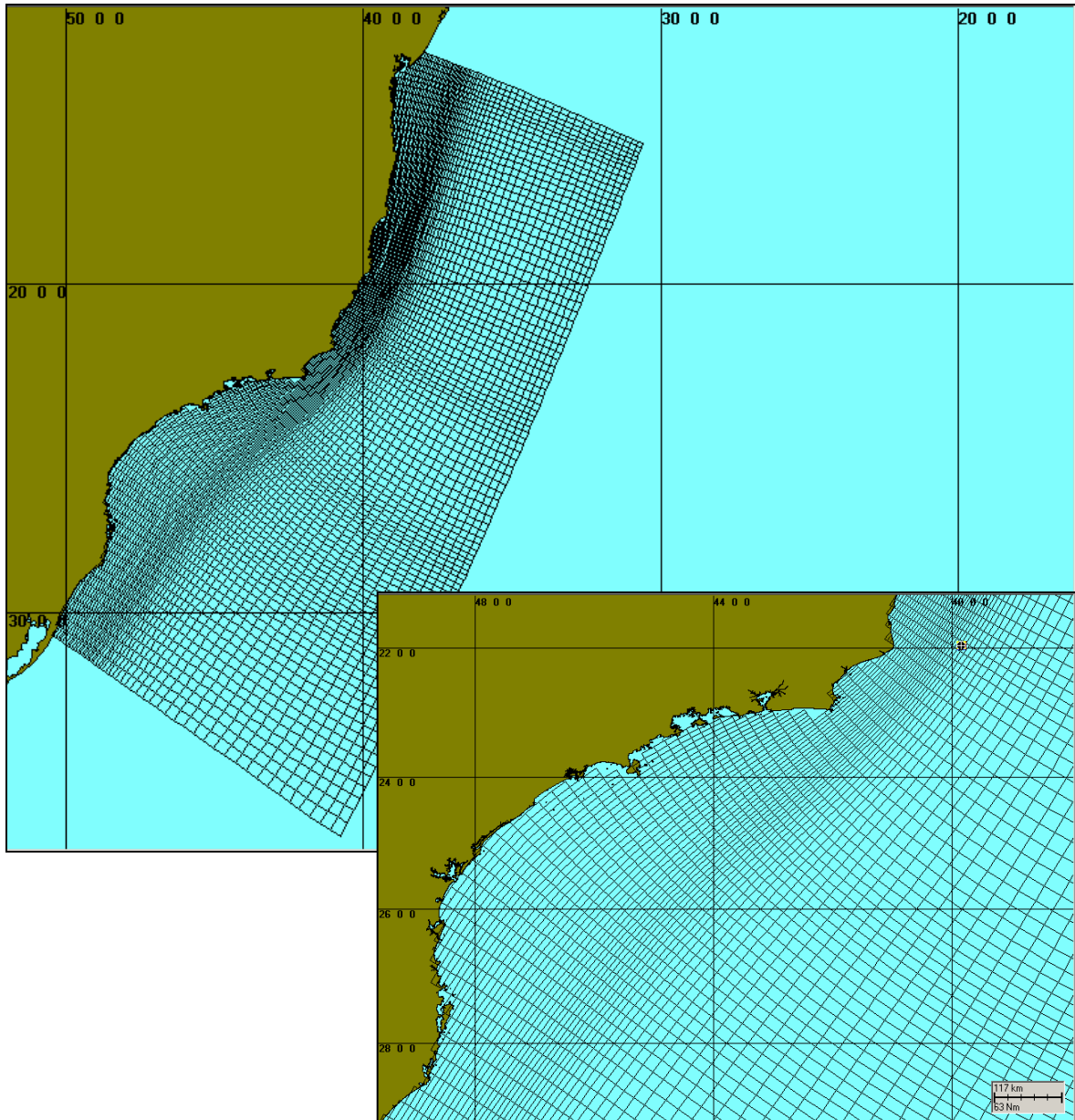
A grade final gerada para a região da Bacia de Santos possui dimensão horizontal máxima de 70x100 pontos, com resolução média de aproximadamente 3.000 m (figura II.3.1-1). A grade geral implementada representou um

<sup>2</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

<sup>3</sup> World Ocean Circulation Experiment.

<sup>4</sup> <http://ingrid.ldgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.

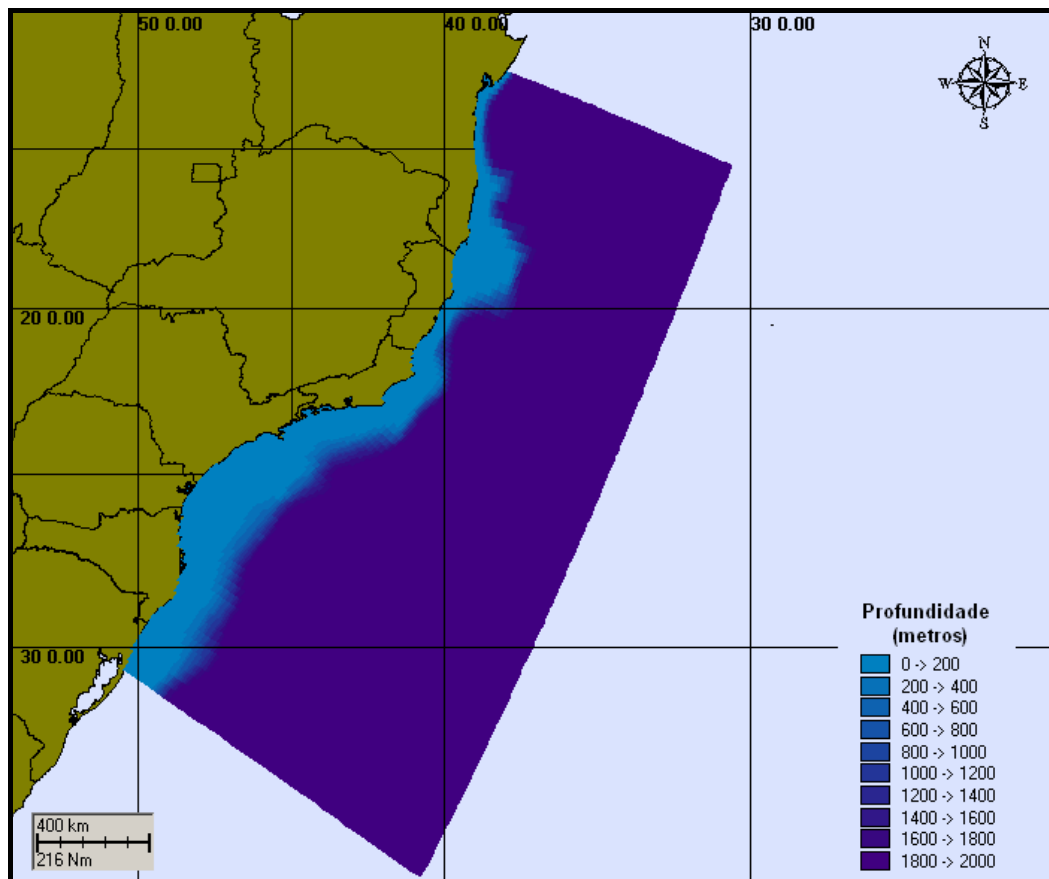
compromisso entre os objetivos do projeto, a capacidade computacional para o período de execução do modelo e a descrição dos processos hidrodinâmicos relevantes para a região de interesse (forçantes de maré e ventos sobre a plataforma continental, e Corrente do Brasil no talude continental).



**Figura II.3.1-1** - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Santos.

Em relação a discretização da batimetria no domínio modelado, agregam-se às características dinâmicas e morfológicas locais, questões relacionadas à

ausência e/ou baixa qualidade de dados batimétricos/altimétricos da região. Em regiões não hidrografadas ou com baixa qualidade/resolução nos dados foram usados recursos como o georreferenciamento de imagens de satélite, relatos de navegantes, entre outros, para complementar os níveis requeridos à base de dados da **ASA SOUTH AMERICA** na região, visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa (figura II.3.1-2).



**Figura II.3.1-2** - Batimetria discretizada do domínio considerado Bacia de Santos.

### **II.3.2 Dados de Vento e Maré**

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

O campo de elevação do nível do mar foi incorporado ao modelo hidrodinâmico, utilizando-se como forçante nos contornos os dados do modelo global de maré do Center for Space Research da Universidade do Texas - CSR3.

### II.3.3 Estrutura Termohalina

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

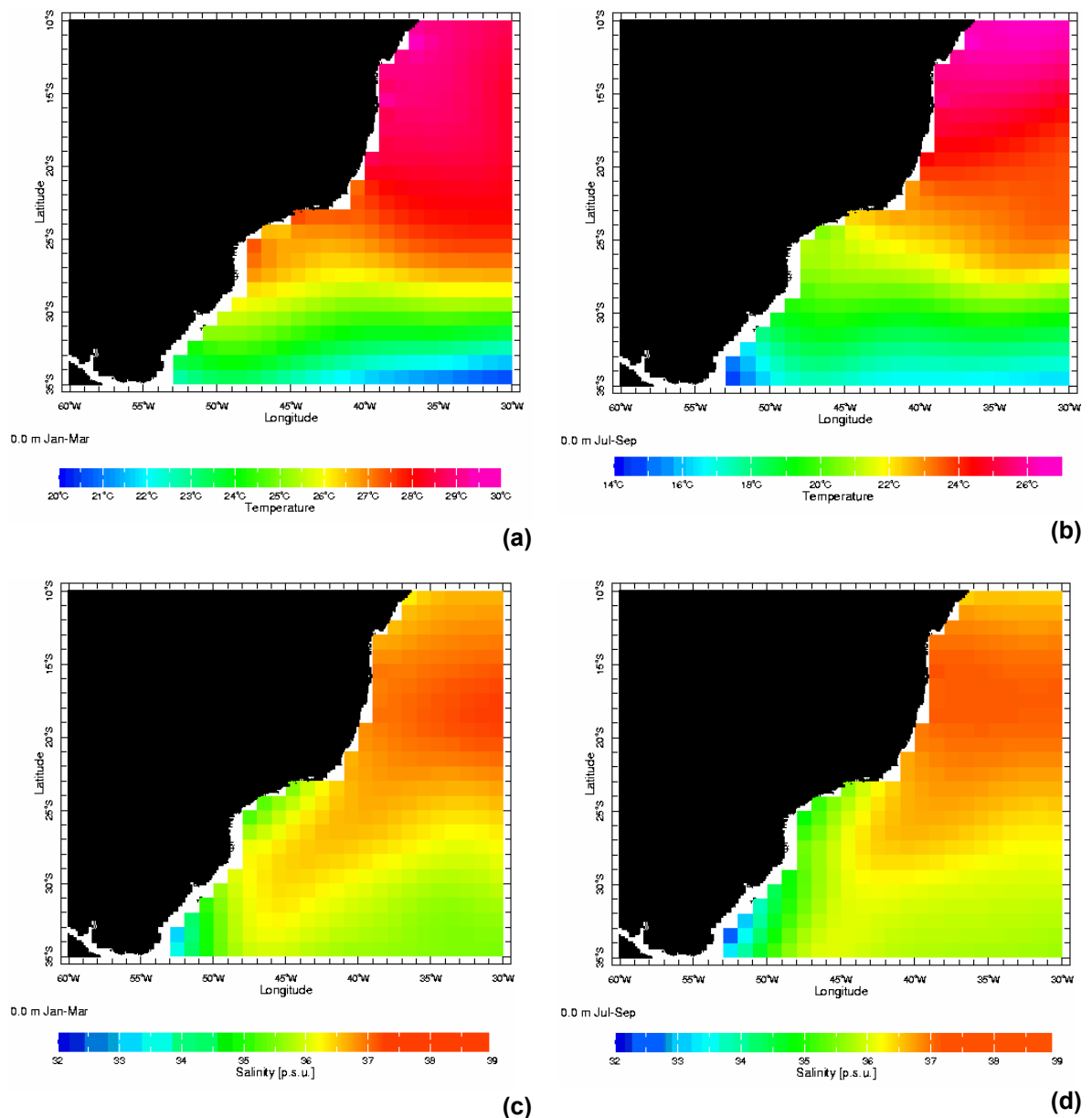


Figura II.3.3-1 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno; (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.





### III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

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

Para a calibração do nível do mar foi utilizada uma série obtida através de reconstituição harmônica, a partir de constantes fornecidas pela FEMAR<sup>5</sup> para a região do Cabo de São Tomé, nas coordenadas 22°07'42"S e 41°03'12"W.

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

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

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

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

onde

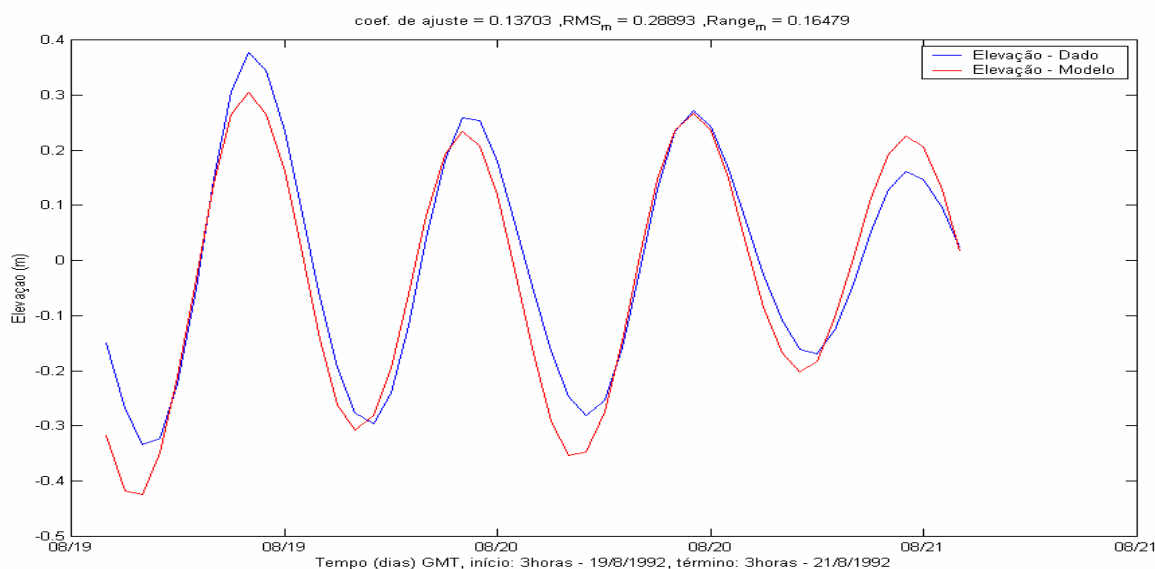
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

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

<sup>5</sup> Fundação de Estudos do Mar.

### III.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR

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

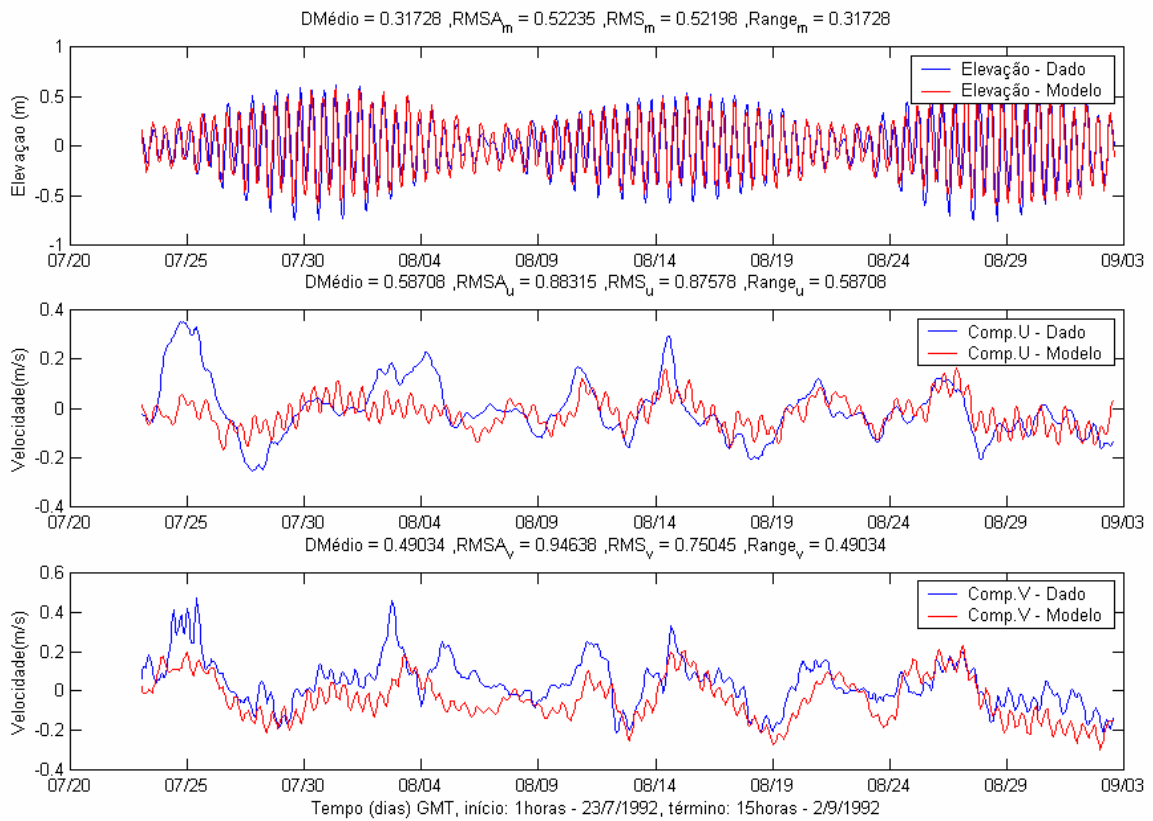


**Figura III.1-1** - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.

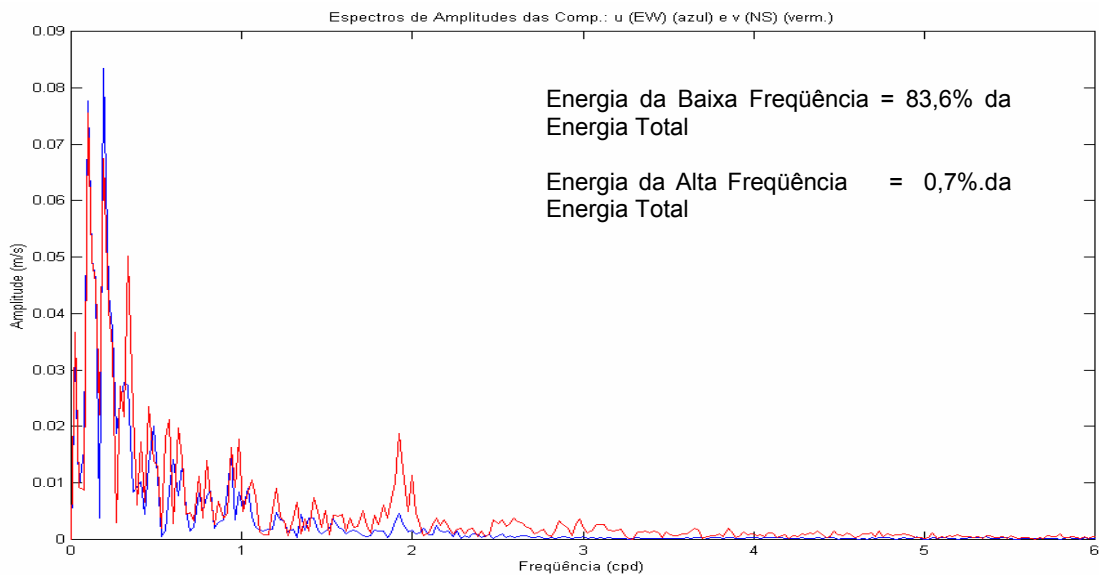
### III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES

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

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

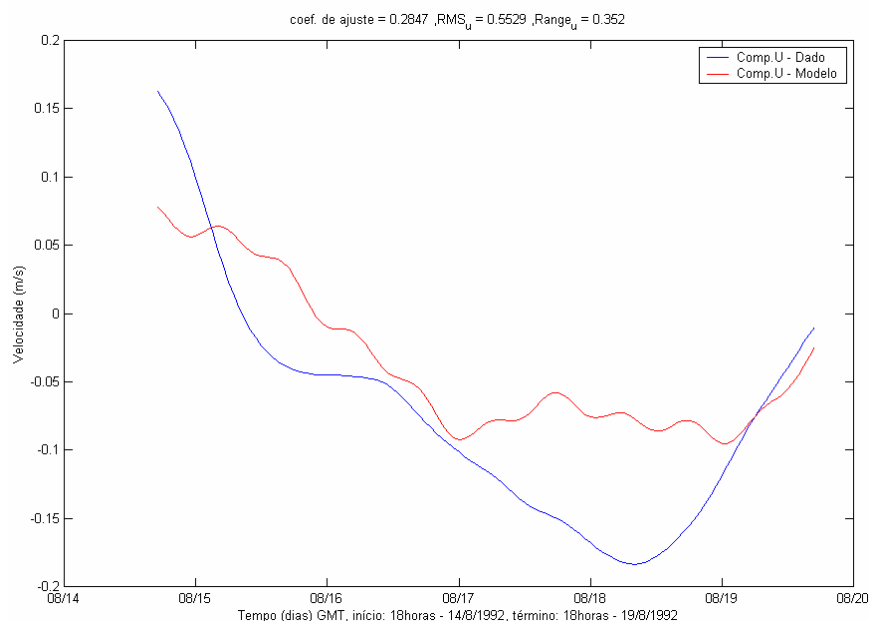


**Figura III.2-1 - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).**

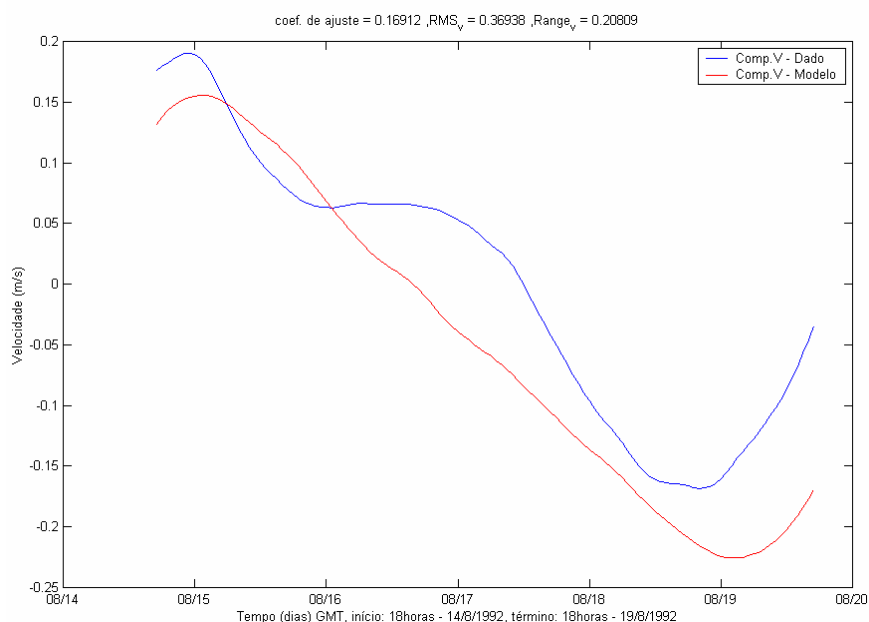


**Figura III.2-2 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.**

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



(a)

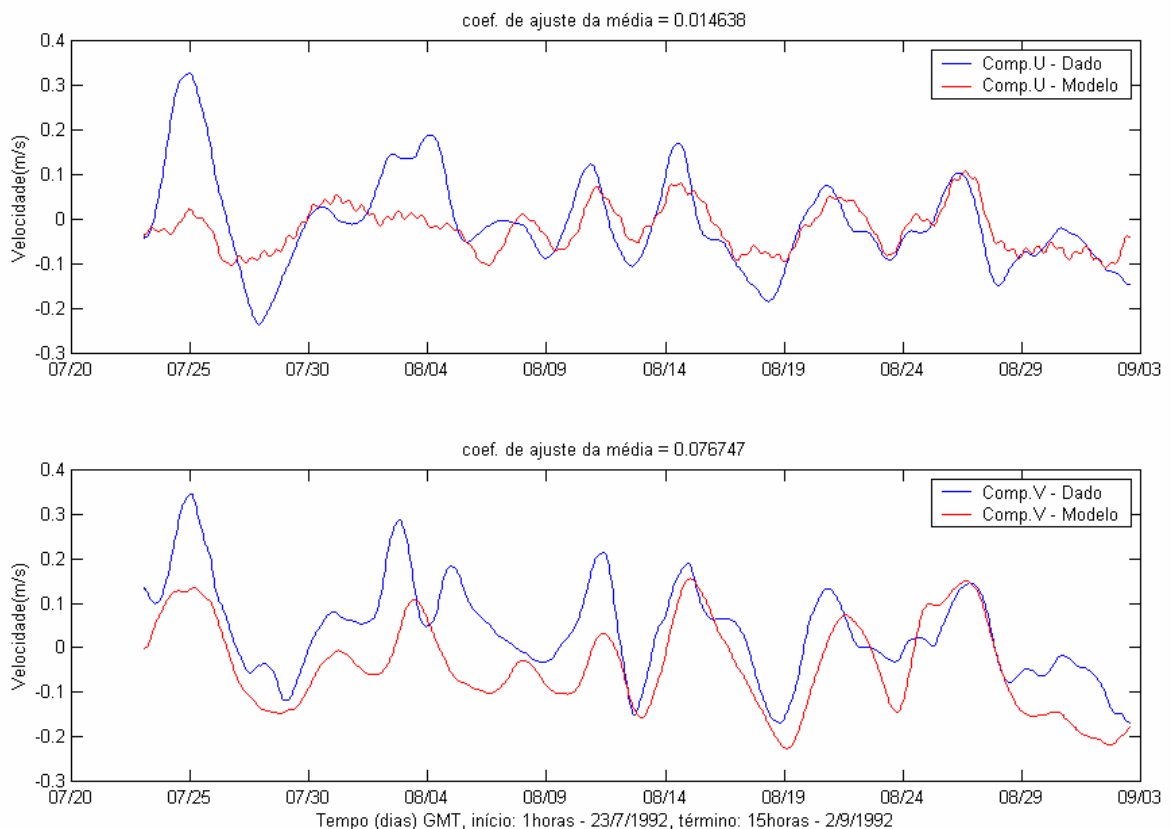


(b)

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

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

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



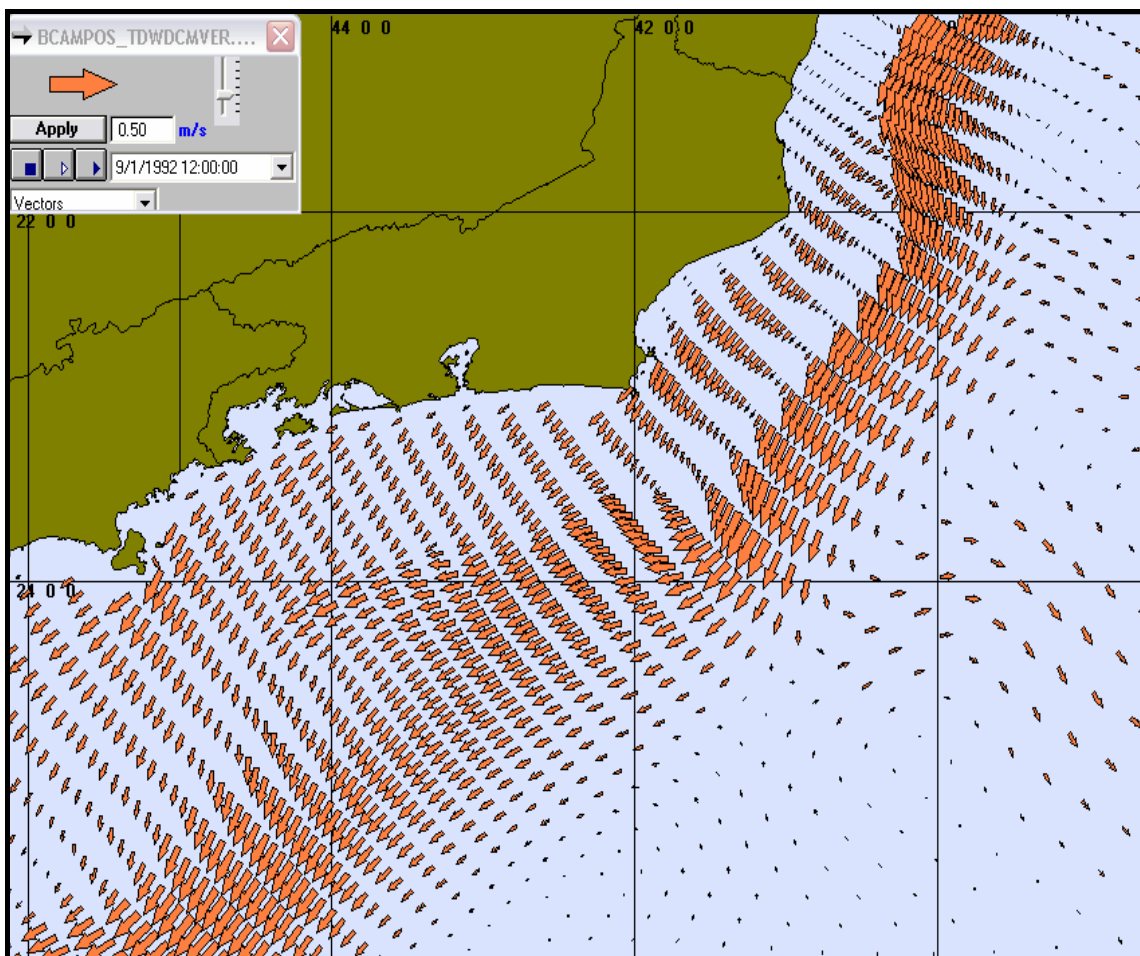
**Figura III.2-4 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.**

### III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA

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

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

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



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

## IV MODELAGEM DE DERRAME DE CONDENSADO

Na modelagem do condensado foi utilizado o modelo SIMAP, desenvolvido pela **ASA**. Este modelo é uma ferramenta utilizada para o acompanhamento e previsão do deslocamento e transformações químicas (*trajectory and fates*) de qualquer tipo de óleo cru e de derivados de petróleo derramados em acidentes.

O SIMAP é um sistema de modelos, baseados em plataforma PC, que pode ser utilizado em levantamentos de risco, planejamentos de contingências, Relatórios de Controle Ambiental (RCA) e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) (ASA, 2004).

Neste modelo, o óleo cru e os produtos derivados de petróleo são representados por sete pseudocomponentes: três frações de aromáticos, três frações não-aromáticas voláteis e relativamente insolúveis, e uma fração não volátil insolúvel (residual). No SIMAP o modelo de intemperismo é tridimensional.

### IV.1 MODELO SIMAP

O SIMAP foi projetado em uma configuração modular de forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, podem ser acoplados dependendo do problema e situação em estudo. Através de sua interface gráfica, o SIMAP permite ao usuário a especificação dos cenários; animação das trajetórias, correntes e vento; a importação e exportação de dados ambientais; a definição da grade computacional para qualquer área dentro do domínio; a geração de correntes médias ou de maré; a inclusão ou edição das características dos produtos registrados no banco de dados; a apresentação de dados contidos em objetos georreferenciados (Sistema de Informação Geográfica - SIG), bem como a determinação de impactos ambientais em recursos naturais. As funções do SIG permitem ao usuário a entrada, manipulação e exibição de objetos na tela através de pontos, linhas, e polígonos georreferenciados, no 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 SIMAP inclui os seguintes modelos:

- (1) um modelo de trajetórias bidimensional (*2-D trajectory and fates model*),
- (2) um sistema de modelos tri-dimensional para simulações de destino de contaminantes tanto em superfície quanto em subsuperfície (*3-D fates model*), onde pode ser acoplado o modelo biológico,
- (3) um modelo estocástico tridimensional (*stochastic model*), para aplicação em levantamentos de risco e planejamento de contingência.

Os modelos são acoplados a um SIG, que contém dados ambientais e biológicos, e a bancos de dados de propriedades físico-químicas e abundância biológica, contendo as entradas necessárias aos modelos. O modelo tem sido aplicado a uma variedade de ambientes marinhos e de água doce no planejamento de respostas a contingências, análises de risco e treinamentos.

Para elaboração de cenários de deriva para acidentes com petróleo e derivados deve ser definido um conjunto de duas grades computacionais, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo.

Uma das grades compreende apenas a região de água, definindo o campo de circulação e podendo, neste caso, ser baseada em resultados de um modelo hidrodinâmico implementado para a região de estudo. A outra grade (*habitat/depht grid*) define a variabilidade espacial, do limite entre a costa e a água, da batimetria e dos *habitats*. Como nas simulações realizadas neste estudo foi avaliado apenas o intemperismo físico do produto, não é apresentada a descrição do modelo de efeitos biológicos.

### **IV.1.1 Modelo de Intemperismo Físico**

O modelo de intemperismo físico estima (como massa e concentrações) a distribuição de contaminantes na superfície da água, em linhas de costa, na coluna d'água e nos sedimentos. Um SIG fornece os valores de profundidade, tipo de sedimento, *habitat* ecológico e tipo de costa para todo o domínio da grade. A base de dados químicos (propriedades dos contaminantes) fornece os parâmetros físicos e químicos necessários ao modelo. O usuário fornece a série temporal de ventos de acordo com a data e a localização do derrame.



O modelo estima o espalhamento na superfície, o transporte da mancha, o entranhamento na coluna d'água e a evaporação, para determinar a trajetória e destino do produto na superfície. A mancha na superfície interage com a linha de costa, depositando e liberando material de acordo com o tipo de costa. Em geral, uma parcela de qualquer contaminante derramado sempre existirá na coluna d'água e nos sedimentos. Na coluna d'água são simulados o transporte vertical e horizontal pelas correntes e a dispersão turbulenta (aleatória). Um contaminante na coluna d'água é parcialmente adsorvido a partículas de material em suspensão e parcialmente dissolvido, e a divisão entre estes dois estágios é assumida como sendo de proporções constantes. A fração do contaminante adsorvida ao material particulado em suspensão decanta a uma taxa que é função do tipo de sedimento. Contaminantes no fundo são misturados pela fauna bêntica, nas camadas subjacentes, com base em um simples algoritmo de bioturbação. A estimativa da degradação na coluna d'água e no sedimento contaminado é feita assumindo-se uma taxa constante de decaimento para cada ambiente.

O modelo de intemperismo físico calcula as concentrações dissolvidas na coluna d'água e nos sedimentos e a área de água e de costa cobertas por manchas superficiais de óleo, ao longo do espaço e do tempo. Estes resultados podem ser visualizados e avaliados utilizando a interface gráfica do modelo. A informação também pode ser transmitida para o modelo de impactos biológicos, o qual calcula os efeitos dessas concentrações sobre a biota e as áreas de cobertura.

A seguir são apresentadas as formulações teóricas dos modelos de intemperismo físico: modelo de trajetórias bi-dimENSIONAL, modelo de trajetórias e intemperismo 3-D e modelo 3-D estocástico. Neste estudo foram utilizados somente os modelos tridimensionais.

#### **IV.1.1.1 Formulação do Modelo de Trajetórias Bidimensionais**

O sistema SIMAP inclui um modelo de trajetória e intemperismo (*2-D surface trajectory model*) para produto na superfície, que prevê o transporte e a degradação do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. Os processos

de intemperismo incluem espalhamento, evaporação, entranhamento, emulsificação, degradação e interação com a linha de costa.

No SIMAP, a mancha de óleo é considerada como um conjunto de partículas lagrangianas contendo, cada uma delas, massa conhecida. O vetor posição ( $\vec{X}_t$ ) de uma dada partícula, num determinado instante  $t$ , é definido como:

$$\vec{X}_t = \vec{X}_{t-\Delta t} + \Delta t \vec{U}_{oil} \quad (IV.1.1.1-1)$$

onde

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

$\vec{X}_{t-\Delta t}$  = posição na mancha superficial em  $t - \Delta t$ ;

$\vec{U}_{oil}$  = velocidade da mancha (m/s).

A velocidade advectiva da partícula,  $\vec{U}_{oil}$  (m/s), é definida por:

$$\vec{U}_{oil} = \vec{U}_w + \vec{U}_t + \vec{U}_r. \quad (IV.1.1.1-2)$$

onde

$\vec{U}_w$  = componente da velocidade devido ao vento e às ondas (m/s);

$\vec{U}_t$  = componente da velocidade devido às correntes (m/s);

$\vec{U}_r$  = componente da velocidade devido à difusão turbulenta (m/s).

A componente da velocidade devido à deriva do vento,  $\vec{U}_w$ , é discutida nas equações IV.1.1.1-6 e IV.1.1.1-7. A componente da velocidade advectiva devida às correntes,  $\vec{U}_t$ , são determinadas por interpolação dos dados de correntes, utilizando-se o seguinte algoritmo de interpolação:

$$\vec{U} = \frac{U_{I,J} A_{I,J+1} + U_{I+1} A_{I,J+1} + U_{I,J+1} A_{I+1,J} + U_{I+1,J+1} A_{I,J}}{A_{I+1,J+1} + A_{I,J+1} + A_{I+1,J} + A_{I,J}} \quad (IV.1.1.1-3)$$

Utilizando a formulação *random walk* para a dispersão horizontal, é possível simular os processos dispersivos que ocorrem numa escala de movimento inferior à escala de resolução do campo de corrente fornecido pelos dados e ou modelo hidrodinâmico (Okubo, 1971; Okubo & Ozmidov, 1970).

As componentes da velocidade de dispersão da mancha,  $u_{dd}$  e  $v_{dd}$  (m/s), são definidas (Bear & Verruijt, 1987) por:

$$u_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_x}{\Delta t}} \quad (\text{IV.1.1.1-4})$$

$$v_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_y}{\Delta t}} \quad (\text{IV.1.1.1-5})$$

onde

$D_x$  = coeficiente de dispersão horizontal na direção Leste-Oeste (m<sup>2</sup>/s);

$D_y$  = coeficiente de dispersão horizontal na direção Norte-Sul (m<sup>2</sup>/s);

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

$\gamma$  = número aleatório entre (-1) e (1).

Os coeficientes de dispersão horizontal nas direções leste-oeste ( $x$ ) e norte-sul ( $y$ ) são, geralmente, iguais. A velocidade de deriva devida ao vento,  $u_{wc}$  e  $v_{wc}$  (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wc} = C_w u_w \quad (\text{IV.1.1.1-6})$$

$$v_{wc} = C_w v_w \quad (\text{IV.1.1.1-7})$$

onde

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

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

$C_w$  = fator de deriva (%).

O fator de deriva,  $C_w$ , é constante (Lange & Hühnerfuss, 1978; Wu, 1980; Samuels *et al.*, 1982), podendo variar entre 2,5 e 4,5%, baseado em observações. O valor *default* no modelo é 3,5%. Se as correntes de superfície, fornecidas pelo modelo hidrodinâmico (ou dados observacionais), já são forçadas pelo vento, então o fator de deriva deve ser reduzido, sendo sugeridos valores menores que 1%.

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

$$u_{wd} = u_{wc} \cos \theta + v_{wc} \operatorname{sen} \theta \quad (\text{IV.1.1.1-8})$$

$$v_{wd} = u_{wc} \operatorname{sen} \theta + v_{wc} \cos \theta \quad (\text{IV.1.1.1-9})$$

onde

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

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

$\theta$  = ângulo de deriva ( $^{\circ}$ ) constante. O valor *default* é zero.

Alternativamente, um algoritmo desenvolvido a partir do estudo de modelagem de Youssef (1993) e Youssef & Spaulding (1993, 1994) é utilizado em transporte localmente induzido pelo vento na camada de superfície sob influência direta de ondas em águas abertas. Os resultados deste estudo mostram que os fatores de deriva do vento na superfície,  $C_{wo}$ , são relacionados à velocidade do vento  $w$ :

$$C_{wo} = 3,9088 - 0,031885w \quad (\text{IV.1.1.1-10})$$

O fator de deriva do vento varia de 4% da velocidade para ventos fracos a 3% da velocidade quando for da ordem de 30 m/s. Similarmente, o ângulo de deriva do vento na superfície da água,  $C_{ao}$ , é relacionado à velocidade do vento  $w$  por:

$$C_{ao} = 23,627 - 7,971 \log(w) \quad (\text{IV.1.1.1-11})$$

O ângulo de deriva do vento varia de  $24^{\circ}$  para ventos fracos a  $12^{\circ}$  para ventos de 30 m/s. O fator de deriva diminui e o ângulo aumenta com o aumento da profundidade da água (Youssef, 1993; Youssef & Spaulding, 1993, 1994), sendo que foram elaboradas empiricamente funções aos resultados de tal modelo:

$$C_{wz} = \exp(K_{w1}w + 0,7768) \quad (\text{IV.1.1.1-12})$$

$$K_{w1} = 1/\left[\frac{24,289}{w} - 5,26\right] \quad (\text{IV.1.1.1-13})$$

$$C_{az} = K_{w2} \log_{10}(w) + K_{w3} \quad (\text{IV.1.1.1-14})$$

$$K_{w2} = -27,28w^{-1/2} - 6,5 \quad (\text{IV.1.1.1-15})$$

$$K_{w3} = 49,545w^{-1/2} + 23,9 \quad (\text{IV.1.1.1-16})$$

onde

$C_{wz}$  = fator de deriva;

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

$K_{w1}$ ,  $K_{w2}$ ,  $K_{w3}$  = constantes.

O destino do derrame de óleo que alcança a costa depende das características do óleo, do tipo de linha de costa e da energia do ambiente (Reed *et al.*, 1986, 1988, 1989; Gundlach, 1987; Reed & Gundlach, 1989; Harper & Harvey-Kelly, 1994; Humphrey, 1994).

Mesmo depositado na costa, o óleo continua se degradando. Entretanto, muitos processos adicionais tornam-se importantes: reflotação, penetração no substrato e retenção/transporte no sistema de água intersticial, além da erosão do substrato atingido pelo óleo. Os algoritmos do SIMAP para a interação do óleo com o litoral e a linha de costa são baseados no modelo COZOIL desenvolvido por Reed *et al.* (1986, 1988, 1989), Gundlach (1987), Reed & Gundlach (1989), que formula o problema em termos de uma capacidade de retenção dependendo do tipo da costa e de um índice de remoção exponencial.

No SIMAP são utilizados valores de espessuras de óleo na costa como função de 3 intervalos de viscosidade, penetração média de óleo, conteúdo médio de óleo e constantes de remoção para 10 tipos de costa (Gundlach, 1987; Reed & Gundlach, 1989; Reed *et al.*, 1988, 1989). Cada célula da linha de costa possui capacidade de retenção baseada no tipo de óleo, tipo de costa, declividade, largura da costa e comprimento da linha de costa.

A grade que representa a linha de costa do SIMAP (grade *habitat*) pode conter diferentes informações sobre as capacidades de retenção de óleo para cada elemento de grade. A deposição ocorre quando uma partícula de óleo cruza a linha de costa e termina quando a capacidade de absorção da superfície especificada é atingida. As partículas de óleo que posteriormente atingem um elemento de grade costeira já saturada não permanecem na superfície da linha de costa.

O óleo depositado na linha de costa é exponencialmente removido com o tempo, retornando à coluna d'água numa maré enchente suficientemente alta para umedecer a superfície com o óleo, aliada a ação do vento.

A fração de massa disponível para ser depositada na linha de costa,  $F_{sh}$ , é:

$$F_{sh} = \frac{A_{lg}}{A_s}; 0 \leq F_{sh} \leq 1 \quad (\text{IV.1.1.1-17})$$

onde

$A_{lg}$  = área da célula de grade terra;

$A_s$  = área da mancha em superfície.

A capacidade de retenção para um tipo de costa  $i$ ,  $M_{h,i}$  (kg), é:

$$M_{h,i} = \rho_o t_i W_i L_{gi} \quad (\text{IV.1.1.1-18})$$

onde

$i$  = tipo de linha de costa;

$\rho_o$  = densidade do óleo depositado (kg/m<sup>3</sup>);

$t_i$  = espessura máxima do óleo que pode ser depositado na costa (varia com o tipo de costa e viscosidade do óleo);

$W_i$  = largura da costa que é atingida pelo óleo;

$L_{gi}$  = comprimento da costa atingida pelo óleo.

A massa de óleo restante na costa em qualquer instante,  $M_R$  (kg), é:

$$M_R = M_0 [\exp(-K_r t)] \quad (\text{IV.1.1.1-19})$$

$$K_r = 0,693 / T \quad (\text{IV.1.1.1-20})$$

onde

$M_0$  = massa inicial do óleo depositado na costa (kg);

$t$  = tempo (dias);

$K_r$  = taxa instantânea de remoção (por dia);

$T$  = meio tempo de remoção, dependente do tipo de costa (dias).

O espalhamento determina a extensão da área superficial do óleo, o que influencia sua taxa de evaporação, dissolução, dispersão e foto-oxidação. O espalhamento é resultante da difusão turbulenta e do balanço entre as forças da gravidade, inércia, viscosidade e tensão superficial.

No modelo SIMAP, as manchas de óleo na superfície da água aumentam de diâmetro de acordo com o algoritmo de espalhamento derivado empiricamente por Mackay *et al.* (1980a,b, 1982) a partir das equações de Fay (1971) e do modelo de Hoult (1972). A taxa de mudança da área superficial para o espalhamento da mancha (Mackay *et al.*, 1980a,b; 1982), em  $\text{m}^2/\text{s}$ , é definida por:

$$dA / dt = K_1 A^{1/3} (V / A)^{4/3} \quad (\text{IV.1.1.1-21})$$

onde

$A$  = área superficial da mancha ( $\text{m}^2$ );

$K_1$  = taxa de espalhamento constante ( $\text{s}^{-1}$ ) = 150 s;

$V$  = volume da superfície da mancha ( $\text{m}^3$ );

$t$  = tempo (s).

A análise de sensibilidade deste algoritmo demonstrou que a solução é sensível ao número de partículas utilizadas. Com o objetivo de minimizar esta dependência, Kolluru (1992) derivou uma formulação, normalizando a solução para diferentes números de partículas superficiais. A taxa de mudança da área superficial de uma única partícula ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), é dada por:

$$\frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left( \frac{V_s}{A_{tk}} \right)^{4/3} \left( \frac{R_s}{R_e} \right)^{4/3} \quad (\text{IV.1.1.1-22})$$

onde

- $A_{tk}$  = área superficial de uma partícula ( $\text{m}^2$ );
- $K_1$  = taxa de espalhamento constante ( $\text{s}^{-1}$ );
- $V_s$  = volume de óleo de uma partícula ( $\text{m}^3$ );
- $R_s$  = raio de uma partícula (m);
- $R_e$  = raio efetivo da superfície da mancha (m).

O raio efetivo da superfície da mancha  $R_e$  (m), (Kolluru, 1992; Kolluru *et al.*, 1994) é dado por:

$$R_e = \left[ \left( \frac{I}{\pi} \right) \sum_{n=1}^N A_{tk} \right]^{1/2} \quad (\text{IV.1.1.1-23})$$

onde

- $A_{tk}$  = área superficial de uma partícula ( $\text{m}^2$ );
- $N$  = número de partículas usadas para representar a superfície da mancha.

A taxa evaporação depende da área superficial, espessura, pressão de vapor e coeficiente de transporte de massa, que são funções da composição do óleo, da velocidade do vento e da temperatura. À medida que o óleo evapora, sua composição altera-se, o que afeta sua densidade e viscosidade assim como sua subsequente evaporação. Os hidrocarbonetos mais voláteis (baixo valor de carbono) evaporam-se mais rapidamente, normalmente em menos de um dia e, algumas vezes, em menos de uma hora (McAuliffe, 1989). Na medida que o óleo continua se degradando e, particularmente, se for formada uma emulsão de água no óleo, a evaporação diminui de forma significativa.

O algoritmo de exposição evaporativa (Stiver & Mackay, 1984) é utilizado em muitos modelos de derrame de óleo como os modelos de Mackay & Leinonen (1977), Mackay *et al.* (1980a,b, 1982), ADIOS (Lehr *et al.*, 1992), OILMAP (Spaulding *et al.*, 1992) e nas versões anteriores do SIMAP (French *et al.*, 1999).



O algoritmo é baseado na teoria de evaporação que segue a Lei de Raoult, na qual cada componente vai evaporar com uma taxa proporcional à pressão de vapor saturada e à fração molar presente para aquele componente. Para o modelo de exposição evaporativa a suposição é de que a mistura de óleo se comporta como um componente único. O modelo utiliza uma aproximação analítica para prever o volume da fração evaporada, utilizando os dados de destilação para estimar os parâmetros necessários à equação analítica.

Em outros modelos (Payne *et al.*, 1984, 1987; Kirstein *et al.*, 1985; French *et al.*, 1996; Jones 1997; Lehr *et al.*, 2000; Reed *et al.*, 2000) e no SIMAP, os chamados pseudocomponentes (classes dos componentes químicos) são evaporados analogamente ao algoritmo de exposição evaporativa, onde o fluxo para a atmosfera é específico para o volume molar, pressão de vapor e peso molecular do componente. Jones (1997) simplificou esta aproximação em um modelo de pseudocomponentes (SPC), relacionando o volume molar, a pressão de vapor e o peso molecular, ao ponto de ebulição do componente.

Na atual versão do SIMAP, é utilizado o algoritmo do modelo SPC com seis componentes de evaporação para representar separadamente: o BTEX, duas frações de hidrocarbonetos poliaromáticos, os alifáticos voláteis e as frações alifáticas semivoláteis. Cada pseudocomponente evapora de acordo com sua pressão de vapor, difusividade e peso molecular.

O coeficiente de transferência de massa,  $K_e$  (m/h), é calculado utilizando-se a metodologia de Mackay & Matsugu (1973) como:

$$K_e = 0,029W^{0,78} D^{-0,11} S_c^{-0,67} C_e \quad (\text{IV.1.1.1-24})$$

$$C_e = [(MW + 29)/ MW]^{0,5} \quad (\text{IV.1.1.1-25})$$

onde

$W$  = velocidade do vento (m/h);

$D$  = diâmetro da espessura (m);

$MW$  = peso molecular do pseudocomponente;

$S_c$  = número de Schmidt.

Assume-se o número de Schmidt como sendo 2,7, seguindo Mackay *et al.* (1980a,b). O fator de correção  $C_e$  é uma correção da difusividade derivada das análises de Payne *et al.* (1984) que mostraram que a difusão dos aromáticos de baixo peso molecular é mais rápida que a prevista pelo número de Schmidt.

A taxa de transferência de massa de um pseudocomponente na mancha de superfície é:

$$dm / st = (K_e P_{vp} A / RT) FMW \quad (IV.1.1.1-26)$$

onde

$m$  = massa perdida da mancha;

$T$  = temperatura (K);

$P_{vp}$  = pressão de vapor (atm);

$A$  = área da mancha (m<sup>2</sup>);

$R$  = constante universal do gás (8,206 x 10<sup>-5</sup> atm-m<sup>3</sup>/mol-K);

$F$  = fração da mancha remanescente composta por pseudocomponentes.

O efeito da evaporação na viscosidade,  $\mu$  (cP), é dado por:

$$\mu = \mu_0 \exp(C_4 F_v) \quad (IV.1.1.1-27)$$

onde

$\mu_0$  = viscosidade inicial do óleo (cP);

$C_4$  = constante: 1 para combustíveis leves e 10 para pesados;

$F_v$  = fração evaporada na mancha superficial.

A dissolução é um processo pelo qual os hidrocarbonetos hidrossolúveis penetram na água a partir de uma mancha superficial ou a partir de gotículas entranhadas na coluna d'água. Os hidrocarbonetos de menor peso molecular tendem a ser mais voláteis e mais solúveis que os de maior peso molecular. Quando as pressões parciais tendem a exceder a solubilidade, a evaporação contribui numa maior proporção para o balanço de massa que a dissolução (McAuliffe, 1989).

Os processo de dissolução e evaporação são processos competitivos. A concentração do componente dissolvido de hidrocarbonetos na água, sob um filme superficial, apresenta um crescimento inicial seguido de um rápido decréscimo (após algumas horas) devido às perdas dos componentes voláteis. A maioria dos componentes solúveis é também volátil e a evaporação direta desses diminui a sua concentração na coluna d'água. A dissolução é particularmente importante em situações onde a evaporação é pequena (gotículas de óleo dispersas e superfícies recobertas por gelo).

A dissolução é modelada utilizando-se uma aproximação análoga à Lei de Raoult, onde a dissolução é tratada como um fluxo de massa através da área da superfície da mancha. No SIMAP é utilizado o modelo desenvolvido por Mackay & Leinonen (1977). Este modelo assume uma camada bem misturada que resiste à transferência de massa permanecendo numa região hipoteticamente estagnada, próxima do óleo. A taxa de dissolução,  $N_{id}$  (mols/s), é definida como:

$$dN_{id} / dt = K_d [e_i x_i C_i^S - C_i^W] A \quad (\text{IV.1.1.1-28})$$

onde

$N_{id}$  = massa dissolvida (mols) do componente  $i$ ;

$i$  =  $i$ -ésimo componente do óleo;

$A$  = área superficial da mancha ( $\text{cm}^2$ );

$K_d$  = coeficiente de transferência de massa dissolvida (cm/s)

$e_i$  = fator de solubilidade do componente  $i$  (geralmente maior que na mistura), assumido como 2,2;

$x_i$  = fração molar da fase óleo do componente  $i$ ;

$C_i^S$  = solubilidade do componente  $i$  puro ( $\text{mols}/\text{cm}^3$ );

$C_i^W$  = concentração atual do componente  $i$  na fase aquosa ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ).

A solubilidade do componente puro,  $C_i^S$ , é definida (Payne *et al.*, 1984) como:

$$C_i^S = C_i^0 / P_i \quad (\text{IV.1.1.1-29})$$

onde

$P_i$  = coeficiente de particionamento água-óleo para o componente  $i$ ;

$C_i^0$  = concentração do componente na fase óleo.

O coeficiente de transferência de massa dissolvida (Hines & Maddox, 1985),  $K_d$  (m/s), pode ser descrito como:

$$K_d = ShD_{AB} / L \quad (\text{IV.1.1.1-30})$$

onde

- $Sh$  = número de Sherwood médio;
- $L$  = diâmetro da mancha superficial (m);
- $D_{AB}$  = coeficiente de difusão a 25°C (m<sup>2</sup>/s).

As difusividades dos pseudocomponentes aromáticos são estimadas pelo método de Hayduk & Laudie descrito em Lyman *et al.* (1982).

$$D_{AB} = [RT] / [\mu_w^{1,14} V_B^{0,589}] \quad (\text{IV.1.1.1-31})$$

onde

- $R$  = constante universal do gás (8,206 x 10<sup>-5</sup> atm-m<sup>3</sup>/mol-K);
- $T$  = temperatura (k);
- $\mu_w$  = (absoluto) viscosidade (cP) da água a 25°C;
- $V'_B$  = volume molar *Les Bas* (cm<sup>3</sup>/mol).

A 25°C, assumindo viscosidade da água de 0,8904 cP, para benzeno ( $V'_B = 96$  cm<sup>3</sup>/mol)  $D_{AB}$  é estimado em 1,029 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s, para naftaleno ( $V'_B = 147,6$  cm<sup>3</sup>/mol)  $D_{AB}$  é 0,7988 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s e para o fenantreno e antraceno ( $V'_B = 199,2$  cm<sup>3</sup>/mol)  $D_{AB}$  é 0,669 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s. A viscosidade da água varia com a temperatura e a seguinte equação foi elaborada a partir de dados empíricos:

$$\mu_w = \exp(-24,71 + (4209/T) + 0,04527 - 0,00003376T^2) \quad (\text{IV.1.1.1-32})$$

O número de Sherwood médio,  $Sh$ , neste caso é:

$$Sh = 0,578Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (\text{IV.1.1.1-33})$$

onde

$Sc$  = número de Schimidt;

$Re$  = número de Reynolds.

Com o número de Schimidt,  $Sc$  :

$$Sc = \frac{\gamma}{D_{AB}} \quad (\text{IV.1.1.1-34})$$

$$\gamma = 10^{-6} \mu_w / \rho_w \quad (\text{IV.1.1.1-35})$$

onde

$\gamma$  = viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s);

$\rho_w$  = densidade da água (g/cm<sup>3</sup>).

E o número de Reynolds,  $Re_L$  :

$$Re_L = \frac{U_w L}{\gamma} \quad (\text{IV.1.1.1-36})$$

onde

$U_w$  = velocidade do vento (m/s).

O coeficiente de transferência de massa para gotículas de sub-superficiais (Hines & Maddox, 1985),  $K_{d_{ss}}$ , é:

$$K_{d_{ss}} = \frac{Sh D_{AB}}{d} \quad (\text{IV.1.1.1-37})$$

onde

$d$  = diâmetro da gotícula (m);

$Sh$  = número de médio de Sherwood;

$D_{AB}$  = coeficiente de difusão a 25°C (m<sup>2</sup>/s).

O número de Sherwood nesse caso é:

$$Sh = 2 + 0,552Sc^{1/3} Re_d^{1/2} \quad (IV.1.1.1-38)$$

onde

$Re_d$  = número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula;

$Sc$  = número de Schmidt.

Com o número de Reynolds,  $Re_d$  :

$$Re_d = \frac{Wd}{\gamma} \quad (IV.1.1.1-39)$$

onde

$W$  = velocidade resultante agindo na gotícula de óleo (m/s).

A dissolução possui importância primária para determinar a concentração de aromáticos em sub-superfície, pois os aromáticos dissolvidos são os componentes mais tóxicos do óleo. A dissolução no modelo é somente utilizada em aromáticos solúveis que podem impactar a biota, como os monoaromáticos (BTEX), poliaromáticos de dois anéis e poliaromáticos de três anéis.

Na medida que o óleo na superfície da água é exposto à ação do vento e das ondas, ele é entranhado (e dispersado) na coluna d'água. Os processos de entranhamento representam explicitamente índices de injeção de óleo para dentro da coluna de água através de gotículas de óleo.

Delvigne & Sweeney (1988), utilizando observações de experimentos em laboratório, desenvolveram uma relação para a taxa de entranhamento do óleo como uma função do tamanho da partícula de óleo,  $Q_d$  (kg/m<sup>2</sup>s), expressa como:

$$Q_d = C * D_d^{0,57} SFd^{0,7} \Delta d \quad (IV.1.1.1-40)$$

onde

$C^*$  = constante empírica de entranhamento que depende do tipo de óleo e do estado do tempo;

$D_d$  = energia dissipada da arrebentação da onda por unidade de área superficial ( $J/m^2$ );

$S$  = fração da superfície do mar coberta pelo óleo;

$F$  = fração da superfície do mar atingida pela arrebentação das ondas;

$d$  = diâmetro da partícula de óleo (m);

$\Delta d$  = intervalo de diâmetro da partícula de óleo (m).

A constante de entranhamento,  $C^*$ , foi ajustada aos dados relatados em Delvigne & Hulsen (1994) como:

$$C^* = \exp(a \ln(\mu / \rho) + b) \quad (\text{IV.1.1-18})$$

onde

$\mu$  = viscosidade do óleo (cP);

$\rho$  = densidade do óleo ( $g/cm^3$ );

$a = -0,1023$ ,  $b = 07,572$  para  $(\mu / \rho) < 132$  cSt;

$a = -1,8927$ ,  $b = 16,313$  para  $(\mu / \rho) > 132$  cSt.

O diâmetro médio da partícula,  $d_{50}$  ( $\mu m$ ) (Delvigne & Sweeney, 1988), é definido por:

$$d_{50} = 1818(E)^{-0,5} (\mu / \rho)^{0,37} \quad (\text{IV.1.1.1-42})$$

onde

$E$  = taxa de dissipação da energia da onda por unidade de volume ( $J/m^3s$ ), com  $10^3$  a  $10^4$  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;

$\mu$  = viscosidade do óleo (cP);

$\rho$  = densidade do óleo ( $g/cm^3$ ).

Delvigne & Sweeney (1988) descobriram que existe uma relação linear entre o log ( $N_i$ ) e log ( $d_i$ ), onde  $N_i$  é o número de partículas no intervalo de tamanho de  $0,5d_i$  a  $d_i$ , e  $d_i$  é o diâmetro da partícula. A distribuição relativa de número e volume (ou massa) para gotículas esféricas pode ser calculada como função do tamanho da gotícula, como nas equações de Delvigne & Sweeney (1988) que:

$$\sum_{j=1}^{i-1} V_j = 1,45V_i \quad (\text{IV.1.1.1-43})$$

onde

$V_i$  = volume na classe de tamanho de  $0,5d_i$  a  $d_i$ ;

$V_j$  = volume em cada classe de tamanho menor que  $0,5d_i$  a  $d_i$ .

A equação IV.1.1.1-43 indica um rápido decréscimo em volume à medida que o tamanho da gotícula decresce.

Os valores mínimo e máximo do diâmetro das partículas, entranhadas na coluna d'água, são respectivamente:

$$d_{\min} = 0,1d_{50} \quad (\text{IV.1.1.1-43})$$

$$d_{\max} = d_{50} \quad (\text{IV.1.1.1-44})$$

O valor mínimo é 10%  $d_{50}$  porque os volumes abaixo desse tamanho são relativamente pequenos (por volta de 2% do volume da classe de tamanho média) e podem ser negligenciados. O valor máximo é igual à média, pois (a partir de experimentos numéricos e testes com modelos) partículas maiores que  $d_{50}$  são ressuspendidas em menos que um passo de tempo e são, então, quantificadas como parte da mancha superficial. No modelo são utilizadas seis classes de tamanho, distribuídas pelo diâmetro a partir de  $d_{\min}$  a  $d_{50} = d_{\max}$ . A energia dissipada da onda,  $D_d$  ( $\text{J/m}^2$ ), é:

$$D_d = 3,4 \times 10^{-3} \rho_w g H^2 \quad (\text{IV.1.1.1-45})$$

onde

$\rho_w$  = densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );

$H$  = raiz quadrada média da altura da arrebenção da onda (m).



A fração da superfície marinha impactada pela arrebentação das ondas por unidade de tempo é  $F$ . Essa fração é parametrizada para  $W_w \leq U_{th}$  (baseado em Lehr *et al.*, 1992) como:

$$F = 3 \times 10^{-6} (U_w^{3,5} / T_w) \quad (\text{IV.1.1.1-46})$$

E para  $U_w > U_{th}$  (baseado em Delvigne & Sweeney, 1988) como:

$$F = 0,032(U_w - U_{th}) / T_w \quad (\text{IV.1.1.1-47})$$

onde

$U_w$  = velocidade do vento 10 m acima da superfície do mar (m/s);

$U_{th}$  = valor limite do vento para a quebra da onda (~5 m/s);

$T_w$  = período de onda significativo (s).

A massa total que sofre entranhamento na coluna d'água,  $M_E$  (kg), é:

$$M_E = A \Delta t \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q_d dD \quad (\text{IV.1.1.1-48})$$

onde

$D$  = diâmetro da partícula;

$A$  = área superficial da mancha (m<sup>2</sup>);

$t$  = passo de tempo (s);

$Q_d$  = taxa de entranhamento (kg/m<sup>2</sup>-s).

A profundidade de intrusão,  $z_m$  (m), é:

$$z_m = (1,5 \pm 0,3) H_b \quad (\text{IV.1.1.1-49})$$

onde

$H_b$  = altura da quebra da onda (m).

A velocidade de ascensão para cada tamanho de gotícula,  $w_i$  (m/s), é:

$$w_i = d_i^2 g (1 - \rho_0 / \rho_w) / 18 \nu_w \quad (\text{IV.1.1.1-50})$$

onde

$d_i$  = diâmetro da gotícula (m);

$g$  = constante gravitacional ( $m/s^2$ );

$\rho_0$  = densidade do óleo ( $kg/m^3$ );

$\rho_w$  = densidade da água ( $kg/m^3$ );

$\nu_w$  = viscosidade da água ( $m^2/s$ ).

Esta relação usa a Lei de Stokes e é válida para números de Reynolds baixos ( $Re < 20$ ). Essa aproximação é modificada aplicando-se um coeficiente de arrasto,  $C_D$ , o qual é função do número de Reynolds,  $Re$ :

$$C_D = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{35}\right)^{0,5}} \quad (IV.1.1.1-51)$$

onde

$$Re = \frac{w_i d_i}{\nu_w} \quad (IV.1.1.1-52)$$

Então, a velocidade de ascensão modificada é:

$$W_i = C_D w_i \quad (IV.1.1.1-53)$$

Essa aproximação é razoavelmente boa para um número de Reynolds de 1.000 e evita a necessidade de se determinar qual formulação de velocidade de ascensão é apropriada, se Stokes ou Reynolds.

A profundidade de mistura para cada tamanho de partícula,  $Z_i$  (m), é dada por:

$$Z_i = \max(D_v / w_i, Z_m) \quad (IV.1.1.1-54)$$

onde

$D_v$  = coeficiente de dispersão vertical ( $m^2/s$ );

$Z_m$  = profundidade da camada misturada por ondas (m);

$w_i$  = velocidade de ascensão do tamanho de gotícula  $i$  (m/s).

O coeficiente de dispersão vertical,  $D_v$  ( $m^2/s$ ), é definido (Thorpe, 1984) como:

$$D_v = 0,0015W_{10} \quad (\text{IV.1.1.1-55})$$

onde

$W_{10}$  = velocidade do vento a 10 m de altura (m/s).

A fração da massa que volta à superfície para cada tamanho de partícula,  $R_i$ , é dada por:

$$R_i = (w_i \Delta t) / Z_i \quad (\text{IV.1.1.1-56})$$

onde

$\Delta t$  = passo de tempo (s).

Uma taxa de entranhamento maior, devido à ação de ondas, pode ser utilizada na zona de surf, também com base nos algoritmos e dados de Delvigne & Sweeney (1988).

A formação de emulsões água-óleo depende da composição do óleo e do estado do mar. O método de emulsificação de Mackay *et al.* (1982) é implementado pelo usuário através dos valores dos parâmetros de entrada do coeficiente de viscosidade do *mousse* e uma taxa de emulsificação, que podem ser usados para diminuir a taxa em que a emulsificação está prevista para ocorrer. O aumento exponencial do algoritmo da formação do *mousse* é apresentado em Mackay *et al.* (1980a,b) e Mackay & Zagorski (1982). A taxa de água que é incorporada ao óleo,  $dF_w / dt$  ( $s^{-1}$ ) é dada por:

$$dF_w / dt = C_1 U_w^2 (1 - F_{wc} / C_2) \quad (\text{IV.1.1.1-57})$$

onde

$U_w$  = velocidade do vento (m/s);

$C_1$  = constante empírica:  $2 \times 10^{-6}$  para o óleo emulsificado; 0 para outros;

$C_2$  = fração máxima de água no óleo (valor de entrada para a caracterização do óleo no SIMAP);

$F_{wc}$  = fração de água no óleo.

A viscosidade do óleo emulsificado,  $\mu$  (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2,5F_{wc}}{1 - C_0 F_{wc}}\right) \quad (\text{IV.1.1.1-58})$$

onde

$\mu_0$  = viscosidade inicial do óleo (cP);

$F_{wc}$  = fração máxima de água no óleo;

$C_0$  = constante de emulsificação (0,65).

A degradação pode ocorrer como resultado da fotólise, que é um processo químico catalisado pela luz ultravioleta do sol e por biodegradação. No modelo, a degradação ocorre na superfície da mancha, no óleo depositado na linha de costa e no óleo e aromáticos entranhados na coluna d'água. É utilizado um algoritmo de decaimento de primeira ordem. A taxa de degradação,  $M_b^0$  (g/s), pode ser definida como:

$$M_b^0 = \frac{dM_{b,i}}{dt} = -K_i M_i \quad (\text{IV.1.1.1-59})$$

onde

$i$  = compartimento ambiental (superfície da água ou da linha de costa, coluna d'água e sedimentos);

$M_{b,i}$  = massa de óleo perdida por degradação de  $i$  (g);

$M_i$  = massa de óleo sujeita a degradação de  $i$  (g);

$K_i$  = constante de degradação para o compartimento  $i$  (1/dia).

A constante de degradação,  $K_i$ , inclui todos os processos de degradação. É um parâmetro de entrada no banco de dados de óleo. Valores distintos de  $K_i$  podem ser especificados para todo o óleo e aromáticos, em cada compartimento.

#### IV.1.1.2 *Formulação do Modelo Tridimensional*

No SIMAP é utilizado o método Lagrangiano de partículas, para a modelagem da distribuição das concentrações de óleo na sub-superfície no modelo 3-D, análogo ao modelo de trajetórias 2-D (superfície). Assim como no modelo de superfície, a dispersão e o transporte em sub-superfície são resolvidos através da técnica de *random walk*. A mancha de óleo é considerada como um conjunto de partículas contendo, cada uma delas, massa e tamanho conhecidos. Cada partícula é tratada em separado, e os aromáticos dissolvidos também são tratados separadamente como partícula lagrangiana.

O modelo tridimensional simula os seguintes processos para cada partícula lagrangiana, conforme a descrição apresentada no sub-item IV.1.1.1:

- Espalhamento de manchas superficiais;
- Evaporação;
- Emulsificação, formação das emulsões água-óleo ou *mousse*, resultante da alteração do conteúdo de água nas manchas superficiais;
- Entranhamento de óleo superficial na coluna d'água, com a formação de gotículas;
- Dissolução de aromáticos a partir de manchas superficiais e gotículas na coluna d'água;
- Particionamento de aromáticos (dissolvidos) entre as fases dissolvidas e particuladas na coluna d'água;
- Particionamento de aromáticos segmentados entre as fases dissolvidas e adsorvidas;
- Degradação de todos os componentes do óleo, variando de acordo com a localização no ambiente;

- Volatilização dos aromáticos dissolvidos na camada superficial para a atmosfera;
- Alteração no empuxo das gotículas por adsorção de partículas e/ou alteração no tamanho da gotícula de óleo.

Cada partícula lagrangiana é transportada através do domínio do modelo utilizando os seguintes algoritmos:

- Advecção por correntes (maré, *background* e deriva de vento na superfície) e dispersão aleatória (*randomized*);
- Interação com a linha de costa (empilhamento e subsequente remoção natural);
- Sedimentação por adsorção de particulados e deposição;
- Sedimentação por espessamento das gotículas que entram em contato com o fundo;
- Afundamento ou ascensão das partículas por mudanças no empuxo.

O entranhamento do óleo na coluna d'água e o transporte de sub-superfície subsequente são modelados utilizando duas componentes separadas, mas intimamente integradas: entranhamento e transporte de sub-superfície.

O entranhamento do óleo na coluna d'água é baseado em Delvigne & Sweeney (1988), sendo que os algoritmos descrevendo as formulações foram apresentados no sub-item IV.1.1.1. As únicas equações adicionais são referentes à especificação expandida da velocidade de ascensão da partícula,  $W_i$ .

No SIMAP, assume-se que os tamanhos de gotículas maiores que a média ressuspendem com um passo de tempo da mancha original e, então, essas classes de tamanho são modeladas em conjunto com a mancha superficial. Esta afirmação é baseada em experimentos numéricos realizados com o modelo, que indicaram que as partículas maiores ascendem rapidamente. Entretanto, para partículas submersas:

$$d_{\max} = d_{50} \quad (\text{IV.1.1.2-1})$$

A velocidade de ascensão é baseada na densidade do óleo, no diâmetro da partícula e na viscosidade da água do mar, utilizando uma modificação da Lei de Stokes:

$$w_{si} = d_i^2 g (1 - \rho_0 / \rho_w) / 18 \nu_w \quad (\text{IV.1.1.2-2})$$

onde

$d_i$  = diâmetro da partícula (m);

$g$  = constante gravitacional (m/s<sup>2</sup>);

$\rho_0$  = densidade do óleo (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_w$  = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);

$\nu_w$  = viscosidade da água (m<sup>2</sup>/s).

Essa aproximação é modificada aplicando-se o coeficiente de arrasto,  $C_D$ , que é função do número de Reynolds,  $Re$ :

$$C_D = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{35}\right)^{0,5}} \quad (\text{IV.1.1.2-3})$$

onde

$$Re = \nu \frac{w_{si} d_i}{\nu_w} \quad (\text{IV.1.1.2-4})$$

Portanto, a velocidade de ascensão da partícula modificada é:

$$w_i C_D w_{s,i} \quad (\text{IV.1.1.2-5})$$

Essa aproximação é razoavelmente boa para um número de Reynolds de 1.000 e evita a necessidade de se determinar qual formulação de velocidade de ascensão é apropriada, se Stokes ou Reynolds.

A dispersão vertical é simulada segundo Bear & Verruijt (1987):

$$w_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{dD_z}{\Delta t}} \quad (\text{IV.1.1.2-6})$$

onde

$w_{dd}$  = velocidade difusiva (m/s);

$D_z$  = coeficiente vertical de difusão ( $m^2/s$ );

$t$  = passo de tempo (s);

$\gamma$  = número aleatório (-1 a +1).

O valor de  $D_z$  é calculado como:

para  $z \leq 1,5H_b$  (i.e. na camada de misturada por ação de ondas)

$$D_z = 0,0015W_{10} \quad (\text{IV.1.1.2-7})$$

para  $z > 1,5H_b$

$$D_z = \alpha_z z_b \vec{U} \quad (\text{IV.1.1.2-8})$$

onde

$z$  = a profundidade da partícula sendo transportada (m);

$H_b$  = altura de onda (m);

$W_{10}$  = velocidade do vento a 10 m de altura (m/s);

$\alpha_z$  = coeficiente de mistura vertical;

$z_b$  = profundidade da água (m);

$U$  = velocidade local na profundidade  $z$  (m/s).

A primeira equação, baseada na velocidade do vento, é de Thorpe (1984). A segunda equação é baseada em Fischer *et al.* (1979), que sugeriu o valor de  $\alpha_z = 0,0025 \alpha_z$ . O usuário entra com valores para  $\alpha_z$ . Se  $\alpha_z < 0$ , assume-se o valor absoluto de entrada como um valor constante para  $D_z$  em todas as profundidades abaixo de  $1,5 H_b$ , a camada misturada por ação de ondas.

Gotículas de sub-superfície e aromáticos dissolvidos são transportados no modelo 3-D utilizando dados de corrente e maré fornecidos pelo usuário, adicionado à dispersão aleatória. A deriva do vento é adicionada às gotículas na superfície (profundidade  $< 1,5$  altura da onda) utilizando o mesmo algoritmo para manchas superficiais (sub-item IV.1.1.1). A equação de advecção é a mesma apresentada no sub-item IV.1.1.1, só que em três dimensões. A posição vetorial das partículas lagrangianas (gotículas e aromáticos dissolvidos) no tempo  $t$ ,  $\vec{x}$ , é:



$$\bar{x}_t - \bar{x}_{\Delta t-1} + \Delta t \left( \bar{U} + \gamma_x \sqrt{\frac{6D_x}{\delta t}} + \gamma_y \sqrt{\frac{6D_y}{\delta t}} + \gamma_z \sqrt{\frac{6D_z}{\delta t}} \right) \quad (\text{IV.1.1.2-9})$$

$$\bar{U} = \bar{U}_w + \bar{U}_t + \bar{U}_r + \bar{U}_b \quad (\text{IV.1.1.2-10})$$

onde

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

$\bar{x}_{\Delta t-1}$  = posição da partícula de superfície;

$\bar{U}$  = velocidade da partícula advectiva, incluindo as componentes x, y e z (m/s);

$\bar{U}_w$  = componente da velocidade devido ao vento e à ação de ondas (m/s);

$\bar{U}_t$  = componente da velocidade devido à ação das correntes de maré (m/s);

$\bar{U}_r$  = componente da velocidade devido ao fluxo residual, ou de *background*, (m/s) (e.g. fluxo induzido pela densidade);

$U_b$  = componente da velocidade (vertical) devido ao empuxo das gotículas e deposição das partículas;

$D_x$  = coeficiente de dispersão horizontal na direção Leste-Oeste (m<sup>2</sup>/s);

$D_y$  = coeficiente de dispersão horizontal na direção Norte-Sul (m<sup>2</sup>/s);

$D_z$  = coeficiente de dispersão vertical (m<sup>2</sup>/s);

$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$  = números aleatórios (-1 a +1).

$D_x$  e  $D_y$  são geralmente iguais e são tratados como tal no SIMAP.

A volatilização de aromáticos dissolvidos para a atmosfera ocorre é função de sua pressão de vapor e solubilidade. O procedimento descrito por Lyman *et al.* (1982), baseado na Lei de Henry e no fluxo de massa (Hines & Maddox, 1985), é reproduzido pelo SIMAP, como apresentado em French *et al.* (1996). A profundidade de volatilização para as substâncias dissolvidas é limitada à camada de mistura superior, no máximo de 1,5 da altura de onda. A altura de onda é calculada através da velocidade do vento (CERC, 1984). O procedimento, aplicado a cada pseudocomponente, é:

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

$$H = P_{vp} / (S / MW) \quad (\text{IV.1.1.2-11})$$

onde

$P_{vp}$  = pressão de vapor (atm);

$S$  = solubilidade (mg/L);

$MW$  = peso molecular (g/mol).

(2) Para  $H < 3 \div 10^{-7}$ , a volatilização por ser negligenciada.

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

$$H' = H / RT \quad (\text{IV.1.1.2-12})$$

onde

$R$  = constante universal do gás ( $8,206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol-K);

$T$  = temperatura (k).

(4) cálculo do coeficiente de troca da fase líquida ( $K_5$ , cm/h):

$$K_5 = 20\sqrt{44 / MW} \quad (\text{IV.1.1.2-13})$$

(5) cálculo do coeficiente de troca da fase gás ( $K_6$ , cm/h):

$$K_6 = 3000\sqrt{18 / MW} \quad (\text{IV.1.1.2-14})$$

(6) cálculo do coeficiente de transferência de massa como um todo ( $K_7$ , cm/h);

$$K_7 = (H' K_5 K_6) / (H' K_6 + K_5) \quad (\text{IV.1.1.2-15})$$

Portanto, a taxa de transferência de massa da coluna d'água para a atmosfera é:

$$dm/dt = K_7 m/d \quad (\text{IV.1.1.2-16})$$

Onde  $m$  é a quantidade de massa do poluente, assume-se distribuição uniforme na profundidade  $d$ . A profundidade de volatilização para substâncias dissolvidas é limitada a 1,5 da altura de onda, ou uma profundidade de difusividade  $d$ :

$$d = \sqrt{2D_z \Delta t} \quad (\text{IV.1.1.2-17})$$

onde

$D_z$  = difusividade vertical ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\Delta t$  = passo de tempo do modelo (s).

Os processos de adsorção de aromáticos ao material em suspensão bem como os de sedimentação e adsorção de gotículas não serão aqui apresentados, uma vez que não foi considerado nas simulações o transporte de condensado associado ao material em suspensão.

#### **IV.1.1.3 Modelo Estocástico Tridimensional**

Utilizando o SIMAP 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. O volume do derrame pode ser mantido constante ou escolhido aleatoriamente no intervalo de 0% a 100% do volume de pior caso, para cada rodada. O modelo permite definir um critério para a avaliação dos efeitos, que define o limite acima do qual as probabilidades são fornecidas. A saída do modelo inclui os seguintes mapas de óleo:

- (1) massa na superfície (micras ou  $g/m^2$ ),
- (2) massa na linha de costa (micras ou  $g/m^2$ ),
- (3) concentração de hidrocarbonetos (sub-superfície/entranhado) na coluna d'água;
- (4) concentração de aromáticos dissolvidos na coluna d'água,
- (5) concentração de partículas (hidrocarbonetos totais) submersas na coluna d'água,
- (6) massa nos sedimentos ( $g/m^2$ ).

Os resultados de múltiplas simulações são avaliados com a finalidade de desenvolver os seguintes indicadores de exposição ao óleo para cada local:

- (1) Probabilidade de exposição (a probabilidade de que um limite de espessura ou concentração seja ultrapassado em qualquer local, em qualquer momento depois do derrame);
- (2) Tempo (em horas) antes de atingir pela primeira vez o limite definido pelo usuário, em cada local.
- (3) O pior caso de exposição máxima (espessura, volume ou concentração) esperado em qualquer hora depois do derrame, num determinado local (i.e. o maior das exposições máximas observadas),
- (4) A média das exposições máximas previstas (espessura, volume ou concentração) em qualquer hora depois do derrame, num local informado (i.e. a média das exposições máximas de todas as simulações),

Na situação de pior caso (exposição máxima), para cada simulação individual (para cada data simulada), a quantidade máxima observada durante todo o período de simulação é salva para cada local na grade do modelo. Em seguida, todas as simulações individuais são avaliadas a fim de se determinar a maior quantidade em cada ponto da grade do modelo. Já para a média das exposições máximas previstas, para cada simulação (para cada data de simulação do derrame), a quantidade máxima durante todo o período da simulação é salva para cada local da grade do modelo. Em seguida, as simulações são avaliadas para

determinar a média das exposições máximas (exposição média para todos os processamentos) previstas para cada local da grade.

Neste trabalho são apresentados os mapas de condensado com a concentração de hidrocarbonetos na coluna d'água, usando os seguintes indicadores de exposição: (1) probabilidade de exposição e (2) a média das exposições máximas previstas (concentração dissolvida na coluna d'água).

## **IV.2 DADOS DE ENTRADA**

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

- √ localização geográfica do ponto de derrame;
- √ data e horário;
- √ duração do derrame;
- √ volume derramado;
- √ tipo de produto;
- √ duração da simulação;
- √ campo de correntes;
- √ arquivo de dados meteorológicos;
- √ opções de saída;
- √ parâmetros de simulação:
  - número de partículas,
  - fator de vento,
  - coeficiente de dispersão horizontal,
  - passo de tempo do modelo,
  - passo de tempo do arquivo de saída.

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

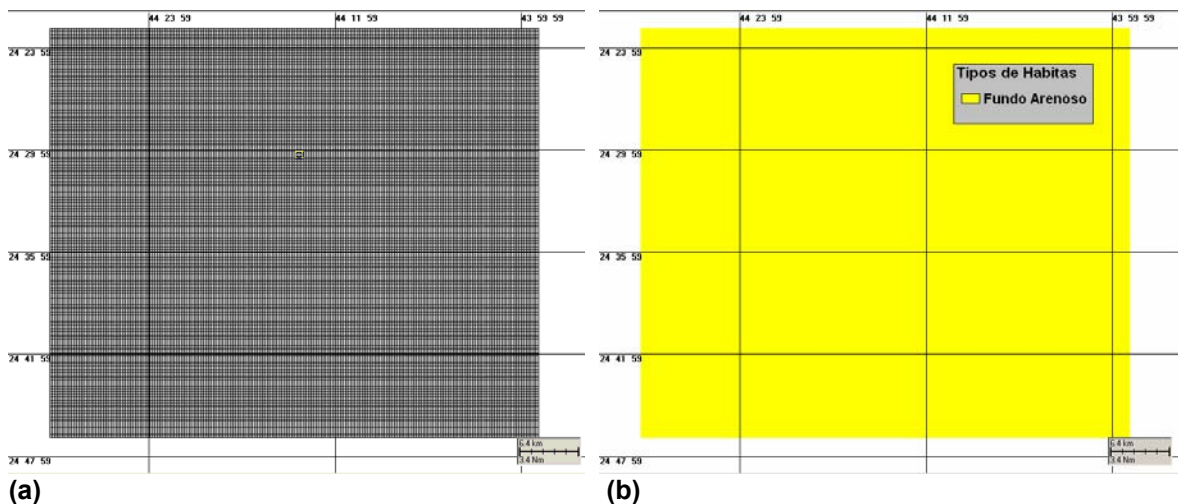


## V MODELAGEM DE DERIVA DE CONDENSADO PARA DERRAMES NO CAMPO DE MEXILHÃO

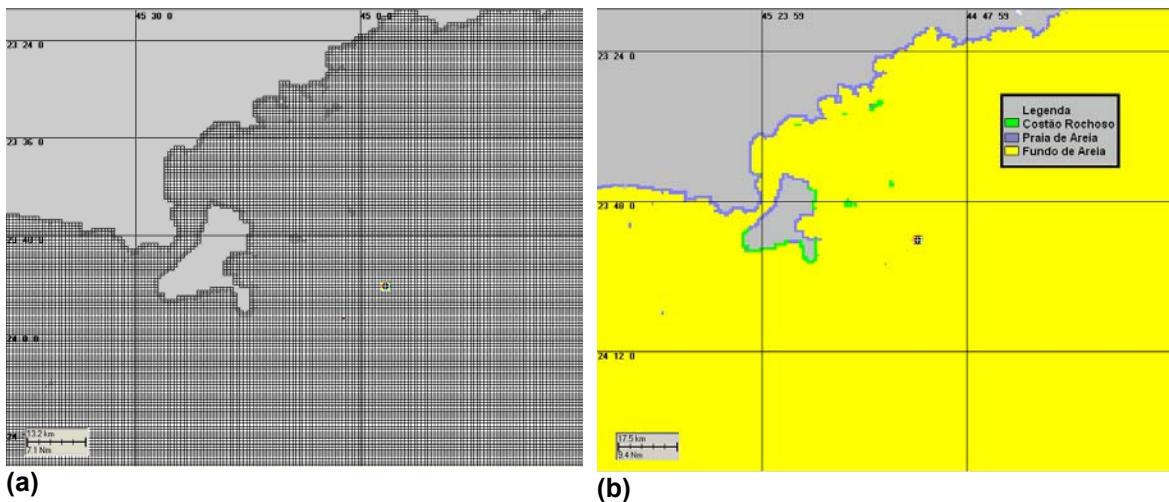
As simulações de transporte de condensado no campo de Mexilhão para os pontos P1 e P2, decorrentes de um *blowout* e de rompimento no duto, respectivamente, utilizaram a base hidrodinâmica descrita no Capítulo II e a grade *habitat* descrita a seguir. A PETROBRAS definiu o condensado 3-SPS-41D-TFR-01 para caracterizar o produto a ser modelado.

### V.1 DADOS DE ENTRADA

Para a elaboração dos cenários de deriva para vazamentos de condensado nos pontos P1 e P2, na Bacia de Santos, foram definidas duas grades *habitat*, com dimensões de 200x200, para os pontos P1 (figura V.1-1) e P2 (figura V.1-2).



**Figura V.1-1** - Grade definindo os contornos de terra (grade *habitat*) para a modelagem de transporte de condensado a partir do ponto P1, no Campo de Mexilhão: (a) células e (b) tipos de habitats.



**Figura V.1-2** - Grade definindo os contornos de terra (grade habitat) para a modelagem de transporte de condensado a partir do ponto P2, no Campo de Mexilhão: (a) células e (b) tipos de habitats.

### V.1.1 Campo de Correntes

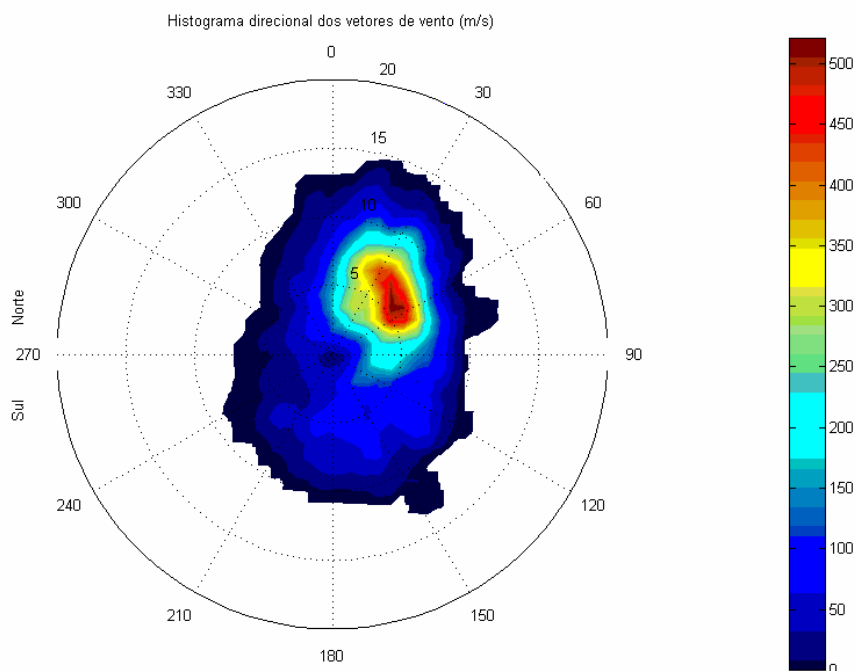
Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte e dispersão de condensado foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica, como descrito no Capítulo II.

Foram usados dois campos hidrodinâmicos de 3 meses cada: verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto), para se considerar os efeitos físicos da variabilidade sazonal existente na área.

### V.1.2 Dados de Vento

Para a modelagem de deriva de óleo, foram utilizados dados de vento obtidos do NCEP para a Bacia de Santos, para o ano de 1992, com intervalo de amostragem de 1 hora. A figura V.1.2-1 apresenta o histograma direcional para a série temporal, onde foi adotada a convenção meteorológica, isto é, a direção do vento corresponde à direção de onde este vem.





**Figura V.1.2-1** - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Santos.

A tabela V.1.2-1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para os dados fornecidos. Observa-se que os ventos mais freqüentes são de NE (22,7%) e NNE (21,9%). Os ventos com velocidades médias máximas (7,1 m/s) vieram de NNE; e os ventos mais fortes registrados foram provenientes de SE (12,9 m/s) e N e SSE (12,5 m/s). Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 10,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

**Tabela V.1.2-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o ano de 1992, na Bacia de Santos.**

Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do Vento.  
Obs.: a direção é medida em graus a partir do Norte geográfico, convenção meteorológica.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NW	Total	Porc.	Dir. méd.
0.0- 1.0	8	7	5	3	3	1	4	8	10	4	3	5	5	6	14	3	89	1.0	315
1.0- 2.0	17	36	20	8	17	9	12	10	5	15	4	10	11	13	21	20	228	2.6	11
2.0- 3.0	34	48	64	33	41	44	52	26	14	12	12	10	13	15	25	28	471	5.4	64
3.0- 4.0	69	142	124	86	93	87	36	30	26	19	5	1	9	10	18	17	772	8.8	61
4.0- 5.0	88	153	199	168	122	71	56	35	47	14	14	11	2	6	13	55	1054	12.0	59
5.0- 6.0	105	208	297	295	112	68	52	56	47	45	22	7	6	4	6	31	1361	15.5	59
6.0- 7.0	107	292	416	284	125	53	49	59	46	25	31	5	3	0	3	20	1518	17.3	55
7.0- 8.0	96	308	323	186	100	71	74	64	40	24	6	2	0	0	1	24	1319	15.0	56
8.0- 9.0	69	236	242	89	52	53	61	49	37	13	2	0	0	0	0	14	917	10.4	55
9.0-10.0	64	234	152	14	0	9	31	21	14	0	0	0	0	0	0	3	542	6.2	36
10.0-11.0	39	139	106	4	0	2	0	16	2	0	0	0	0	0	0	0	308	3.5	31
11.0-12.0	21	65	38	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	131	1.5	28
12.0-13.0	6	40	6	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0.6	26
13.0-14.0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0.2	17
14.0-15.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0
15.0-16.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0
16.0-17.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0
17.0-18.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0
18.0-19.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0
19.0-20.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0
Total	723	1926	1992	1173	665	468	429	380	288	171	99	51	49	54	101	215	8784		
Porc.	8.2	21.9	22.7	13.4	7.6	5.3	4.9	4.3	3.3	1.9	1.1	0.6	0.6	0.6	1.1	2.4			
Vel. méd.	6.4	7.1	6.7	5.9	5.4	5.4	5.9	6.2	5.8	5.1	5.0	3.6	2.9	2.7	2.8	4.8			
Vel. máx.	12.5	13.6	12.3	11.6	8.8	10.4	12.9	12.5	10.1	9.0	8.2	8.0	6.4	5.5	7.1	9.9			
Percts. (0,9)	9.0	10.0	9.0	7.0	7.0	8.0	8.0	9.0	8.0	7.0	6.0	6.0	5.0	4.0	4.4	7.0			

### V.1.3 Ponto de Risco e Volumes

As coordenadas dos pontos de risco de vazamento de condensado no campo de Mexilhão foram especificadas pela PETROBRAS, conforme a tabela V.1.3-1. As simulações foram realizadas considerando-se vazamentos em sub-superfície.

**Tabela V.1.3-1 - Coordenadas (SAD 69) dos pontos de risco de derrame de condensado no Campo de Mexilhão, Bacia de Santos.**

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
P1	24°30'14"S	44°14'17"W	468
P2	23°54'12"S	38°56'36"	70

Fonte: PETROBRAS.

Os volumes utilizados nas simulações realizadas para o ponto P1 foram definidos segundo a Resolução CONAMA nº 293/01:

- Pequeno: 8 m<sup>3</sup>
- Médio: 200 m<sup>3</sup>
- Pior caso: 12.508,9 m<sup>3</sup>

O volume de "pior caso" foi definido como o volume resultante da perda de controle de um poço, no ponto P1, por 30 dias (17,37 m<sup>3</sup>/h) sendo simulada sua

trajetoria e intemperismo nesse período. Nas simulações realizadas para os volumes pequeno ( $8 \text{ m}^3$ ) e médio ( $200 \text{ m}^3$ ), considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

Para o ponto P2, localizado no duto de exportação do Sistema de Mexilhão, foi estimado o volume de  $3.202 \text{ m}^3$  vazados referente à vazão máxima desde o instante inicial de uma ruptura até a detecção e interrupção da mesma, incluindo o volume ocupado pelo condensado no duto e sem levar em consideração os efeitos termodinâmicos. Neste caso também foi considerado o vazamento de todo o volume de óleo ( $3.202 \text{ m}^3$ ) instantaneamente, sendo simulada a trajetória e o intemperismo do condensado ao longo de 60 horas.

### V.1.4 Características do Produto Utilizado

As informações sobre o condensado, utilizado nas simulações, foram fornecidas pela PETROBRAS e são apresentadas nas tabelas V.1.4-1 e V.1.4-2. Observa-se que mais de 74% do condensado é formado por hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos voláteis, ou seja, com temperatura de ebulição menor que  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Destes 74%, 16% são hidrocarbonetos Aromáticos e 84% Alifáticos.

**Tabela V.1.4-1 - Composição do condensado do Campo de Mexilhão.**

HPAs	mg/g	n-Alcanos	mg/g	BTEX	mg/g
Naftaleno	0,5037	n-C10	7,789	Benzeno	11,987
2-Metil-Naftaleno	0,7942	n-C11	9,122	Tolueno	45,569
1-Metil-Naftaleno	0,2996	n-C12	9,578	Etilbenzeno	2,491
C2-Naftalenos	1,1605	n-C13	9,205	m,p-Xilenos	16,855
C3-Naftalenos	0,7184	n-C14	9,286	o-Xileno	4,666
C4-Naftalenos	0,3667	n-C15	8,941	<b>Σ BTEX</b>	<b>81,567</b>
Acenaftileno	0,0075	n-C16	7,580		
Acenafteno	0,0778	n-C17	6,482		
Fluoreno	0,2693	Pristano	1,827		
C1-Fluorenos	0,4183	n-C18	5,265		
C2-Fluorenos	0,4316	Fitano	1,023		
Fenantreno	0,2534	n-C19	4,871		

(continua)

**Tabela V.1.4-1 - Composição do condensado do Campo de Mexilhão (conclusão).**

C1-Fenantreno	0,4660	n-C20	4,067		
C2-Fenantrenos	0,2905	n-C21	3,609		
C3-Fenantrenos	0,1447	n-C22	3,331		
C4-fenantreno	0,0649	n-C23	2,954		
Antraceno	0,0055	n-C24	1,749		
Fluoranteno	N.D.	n-C25	1,424		
Dibenzotiofeno	0,0139	n-C26	1,565		
C1-Dibenzotiofeno	0,1511	n-C27	1,400		
C2-Dibenzotiofeno	0,0404	n-C28	1,251		
C3-Dibenzotiofeno	0,0255	n-C29	1,039		
Pireno	0,0082	n-C30	0,854		
Benzo(a)antraceno	0,0045	n-C31	0,797		
Criseno	0,0132	n-C32	0,652		
C1-Criseno	0,0577	n-C33	0,738		
C2-Criseno	0,0572	n-C34	0,499		
Perileno	N.D.	n-C35	0,424		
Benzo[b]fluoranteno	N.D.	n-C36	0,295		
Benzo[k]fluoranteno	N.D.	<b>∑ n-Alcanos</b>	<b>104,766</b>		
Benzo[a]pireno	N.D.	<b>∑ UCM</b>	<b>226,726</b>		
Indeno[1,2,3-D]pireno	N.D.				
Dibenzo[a,h]antraceno	N.D.				
<b>∑ 16 HPAs rioritários</b>	<b>1,1431</b>				
<b>∑ HPAs</b>	<b>6,6444</b>				

Fonte: PETROBRAS.

**Tabela V.1.4-2 - Características do condensado utilizado nas simulações de vazamento.**

PARÂMETRO	VALOR			
Grau API a 25°C	49,7			
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,782			
Viscosidade dinâmica a 25°C (cP)	1,495			
Tensão interfacial (din/cm)	20.503			
Concentração da fase óleo (fração) em diferentes pontos de ebulição	Fases	< 180°C	180 – 264°C	265 – 380°C
	Aromáticos	0,12945	0,00438	0,00617
	Alifáticos	0,60840	0,09650	0,15510
	Hidrocarbonetos totais	0,73785	0,10088	0,16127

## V.2 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações probabilísticas foram realizadas através da variação aleatória do momento de início do derrame dentro do período para o qual se dispunha de dados de vento (1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992), divididas em dois períodos correspondendo ao verão (janeiro a março) e ao inverno (junho a agosto). Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteorológicas e oceanográficas, foi realizada com o modelo SIMAP uma série de 100 simulações para cada cenário probabilístico.

O critério de parada adotado nas simulações de “pior caso” foi o período de 30 dias para o ponto P1. Para o ponto P2, o critério de parada das simulações baseou-se na redução das concentrações de condensado na coluna d’água em cerca de 68 vezes as concentrações iniciais, em aproximadamente 60 h. Neste período as concentrações máximas observadas são inferiores a 20 ppm, valor estabelecido como critério de parada para simulações de deriva e intemperismo de petróleo e derivados (PETROBRAS, 2002). A tabela V.2-1 apresenta os cenários simulados para os pontos de risco P1 e P2.

**Tabela V.2-1 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derramamento de condensado nos pontos P1 e P2, Campo de Mexilhão.**

CENÁRIOS	PRODUTO	VOLUME (m³)	ESTAÇÃO DO ANO	TEMPO
MEXILHAO_COND_P1_VER_8_1H	Condensado	8	Verão	1 horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_200_8H	Condensado	200	Verão	8 horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_6H	Condensado	12.508,9	Verão	6horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_9H	Condensado	12.508,9	Verão	9 horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_12H	Condensado	12.508,9	Verão	12 horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_36H	Condensado	12.508,9	Verão	36 horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_60H	Condensado	12.508,9	Verão	60 horas
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_30DIAS	Condensado	12.508,9	Verão	30 dias
MEXILHAO_COND_P1_INV_8_1H	Condensado	8	Inverno	1 horas
MEXILHAO_COND_P1_INV_200_8H	Condensado	200	Inverno	8 horas
MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_6H	Condensado	12.508,9	Inverno	6horas
MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_9H	Condensado	12.508,9	Inverno	9 horas
MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_12H	Condensado	12.508,9	Inverno	12 horas

(continua)

**Tabela V.2-1 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derramamento de condensado nos pontos P1 e P2, Campo de Mexilhão (conclusão).**

MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_36H	Condensado	12.508,9	Inverno	36 horas
MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_60H	Condensado	12.508,9	Inverno	60horas
MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_30DIAS	Condensado	12.508,9	Inverno	30 dia
MEXILHAO_COND_P2_VER_3202_6H	Condensado	3.202	Verão	6horas
MEXILHAO_COND_P2_VER_3202_9H	Condensado	3202	Verão	9 horas
MEXILHAO_COND_P2_VER_3202_12H	Condensado	3.202	Verão	12 horas
MEXILHAO_COND_P2_VER_3202_36H	Condensado	3.202	Verão	36 horas
MEXILHAO_COND_P2_VER_3202_60H	Condensado	3.202	Verão	60 horas
MEXILHAO_COND_P2_INV_3202_6H	Condensado	3.202	Inverno	6horas
MEXILHAO_COND_P2_INV_3202_9H	Condensado	3.202	Inverno	9 horas
MEXILHAO_COND_P2_INV_3202_12H	Condensado	3.202	Inverno	12 horas
MEXILHAO_COND_P2_INV_3202_36H	Condensado	3.202	Inverno	36 horas
MEXILHAO_COND_P2_INV_3202_60H	Condensado	3.202	Inverno	60horas

## **VI RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA VAZAMENTOS DE CONDENSADO NO CAMPO DE MEXILHÃO**

### **VI.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS**

Para determinar a área de influência de acidentes com derrame de condensado no Campo de Mexilhão, foi utilizado o modelo SIMAP para produzir as múltiplas trajetórias das plumas, para a confecção de curvas de contorno de probabilidade de condensado na coluna d'água e a média das máximas concentrações esperadas em cada ponto de grade. Para incorporar a variabilidade das forçantes oceanográficas e meteorológicas foram realizadas 100 simulações considerando os padrões de circulação e transporte obtidos através da modelagem hidrodinâmica (Capítulo II) e os dados de vento obtidos para a Bacia de Santos (Item V.1.2) para o ano de 1992.

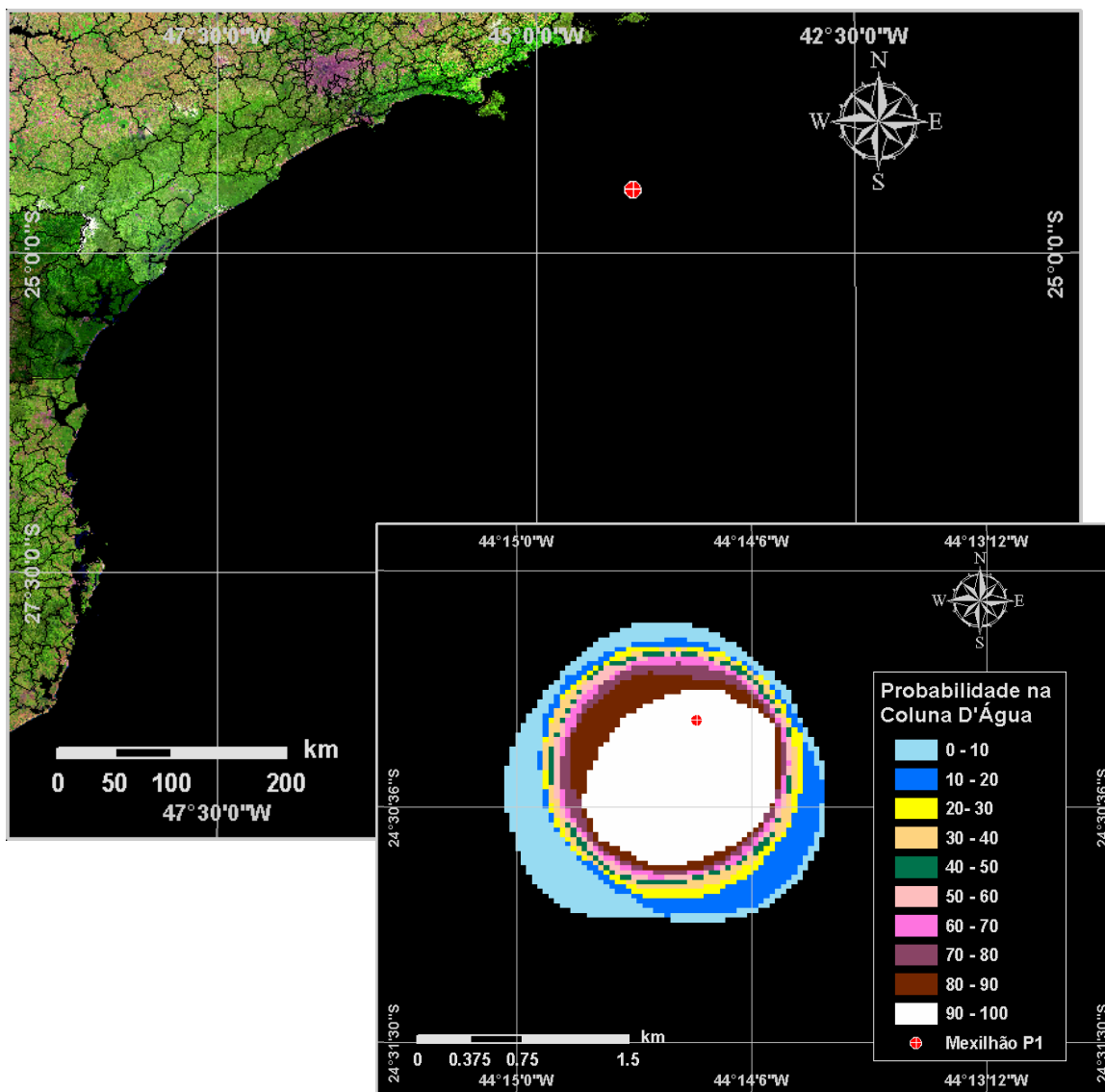
Assim, ao final de cada uma das 100 simulações realizadas, registra-se o valor máximo de concentração para cada ponto de grade e, ao final de todas as simulações, calcula-se a média de todas as máximas concentrações obtidas. Salienta-se que a concentração mínima (ou limite) de condensado considerado no cálculo das probabilidades foi de 100 ppb.

Nas figuras VI.1-1 a VI.1-32 são apresentados os resultados dos cenários de derrame de condensado a partir do ponto P1, enquanto as figuras VI.1-33 a VI.1-52 apresentam os resultados dos cenários de derrame de condensado a partir do ponto P2, ocorrendo durante os meses de verão e inverno. Essas figuras mostram contornos de probabilidade da presença de condensado e os contornos de concentrações médias máximas esperadas de condensado na coluna d'água. Nas figuras de concentrações dissolvidas na água, são apresentados os contornos até a concentração de 100 ppb. Salienta-se que todo o condensado fica dissolvido na coluna d'água e não na superfície da mesma.

Cabe aqui ressaltar que em todas as ilustrações de contornos de probabilidade, o valor correspondente ao limite inferior 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 ou iguais a 10% e menores que 20%.

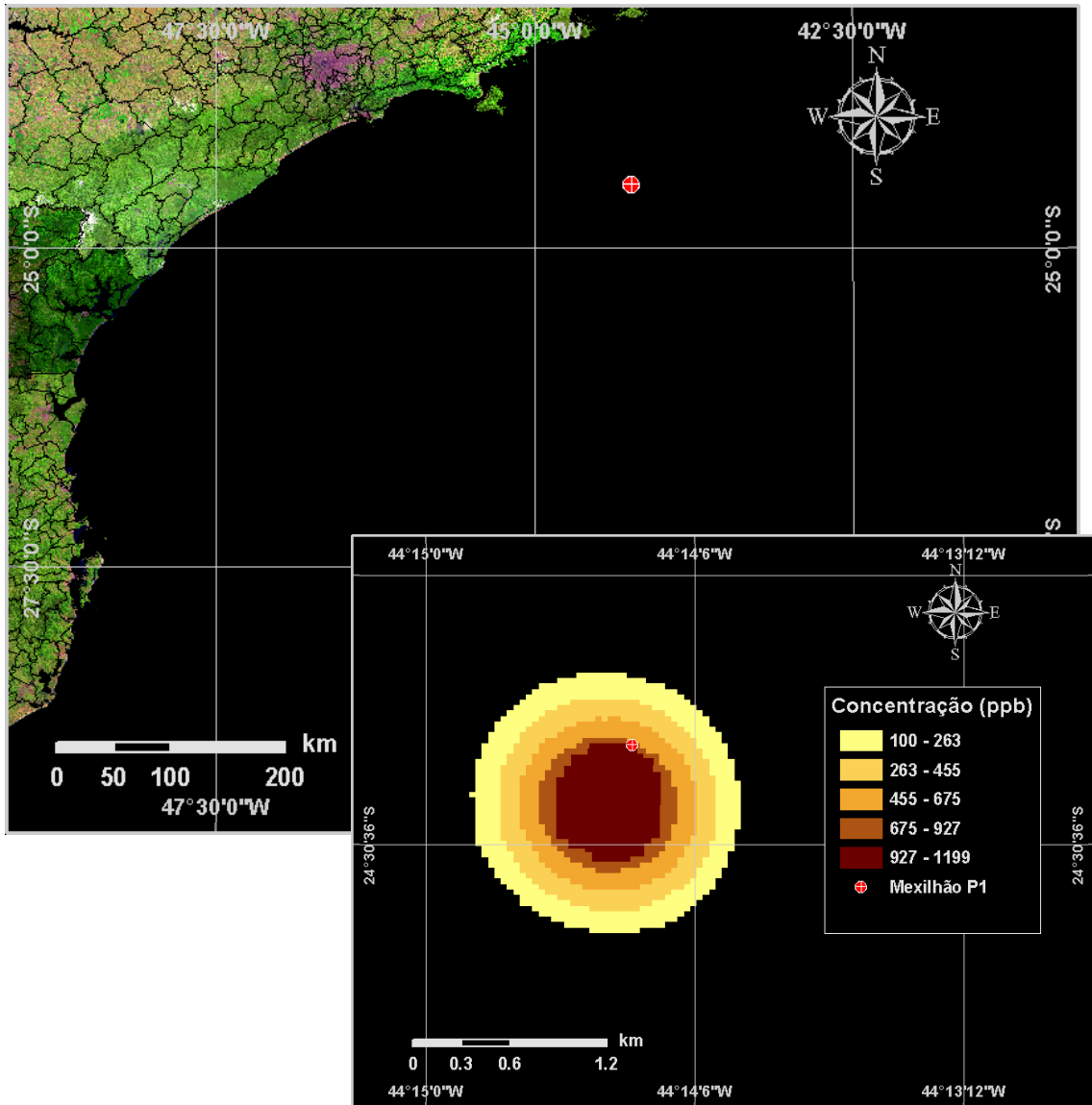


Nas simulações realizadas não são levadas em conta as ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Ações Emergenciais.

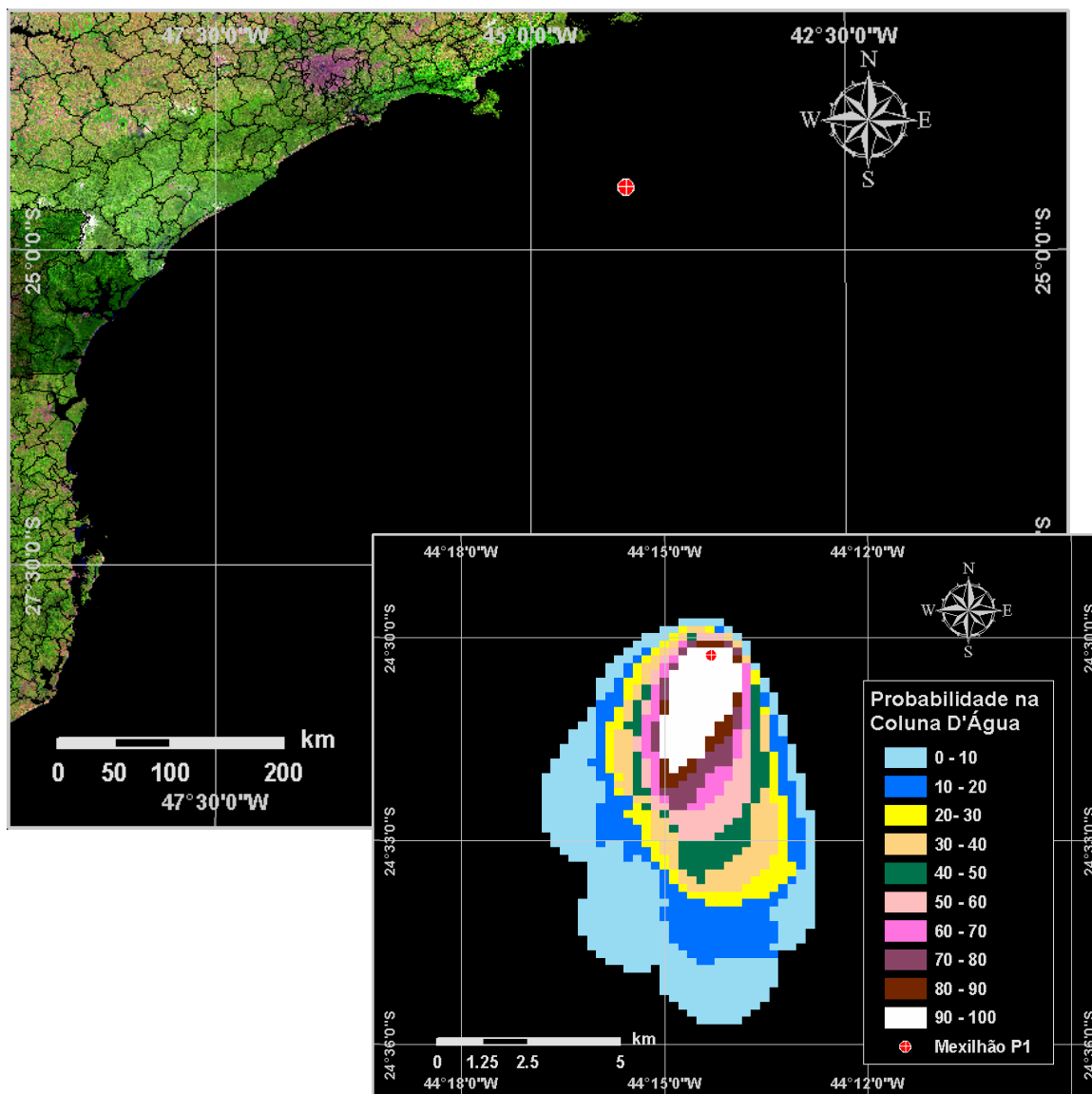


**Figura VI.1-1** - Cenário MEXILHAO\_COND\_P1\_VER\_8\_1H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m<sup>3</sup> após 1 hora.

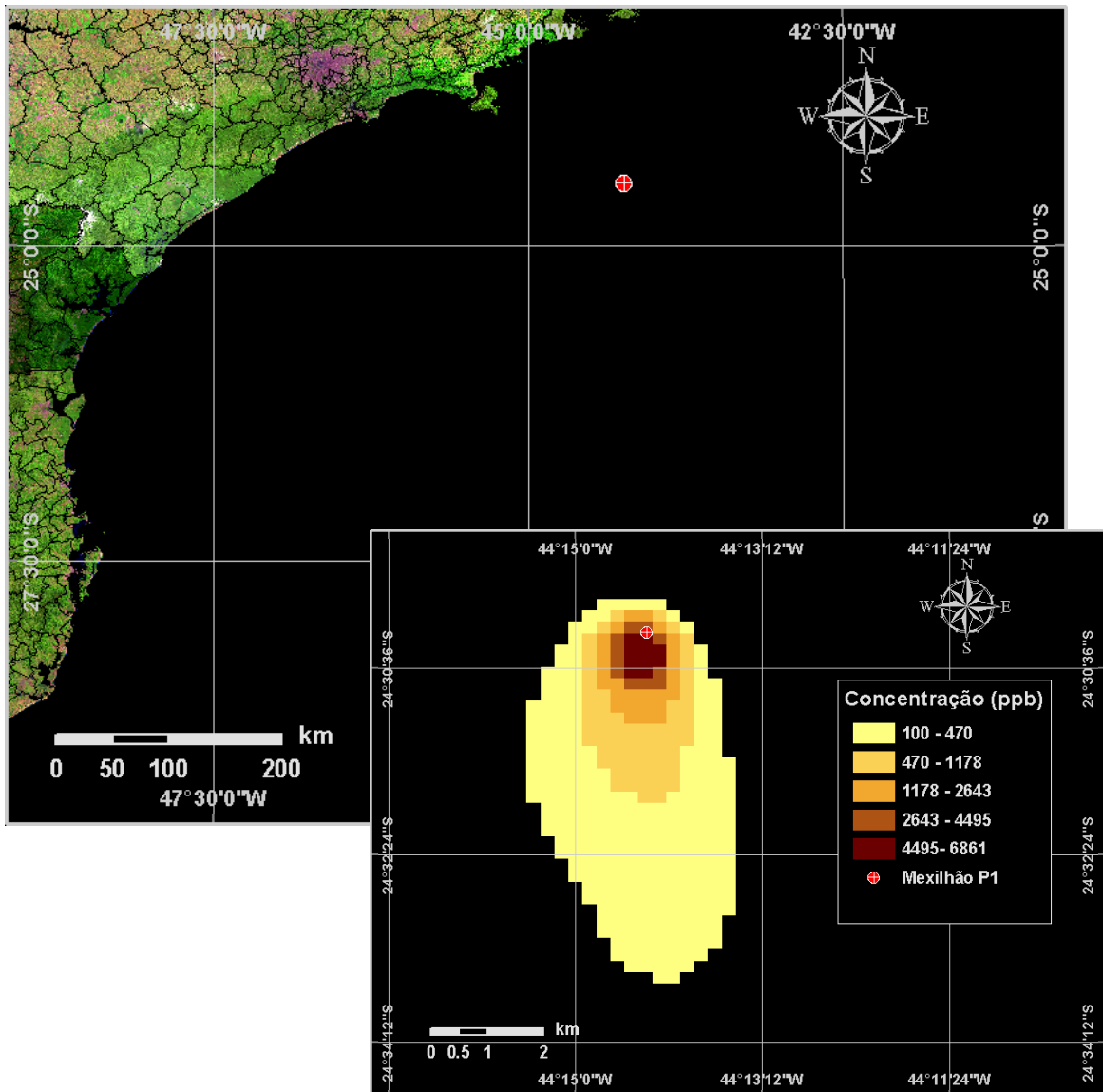




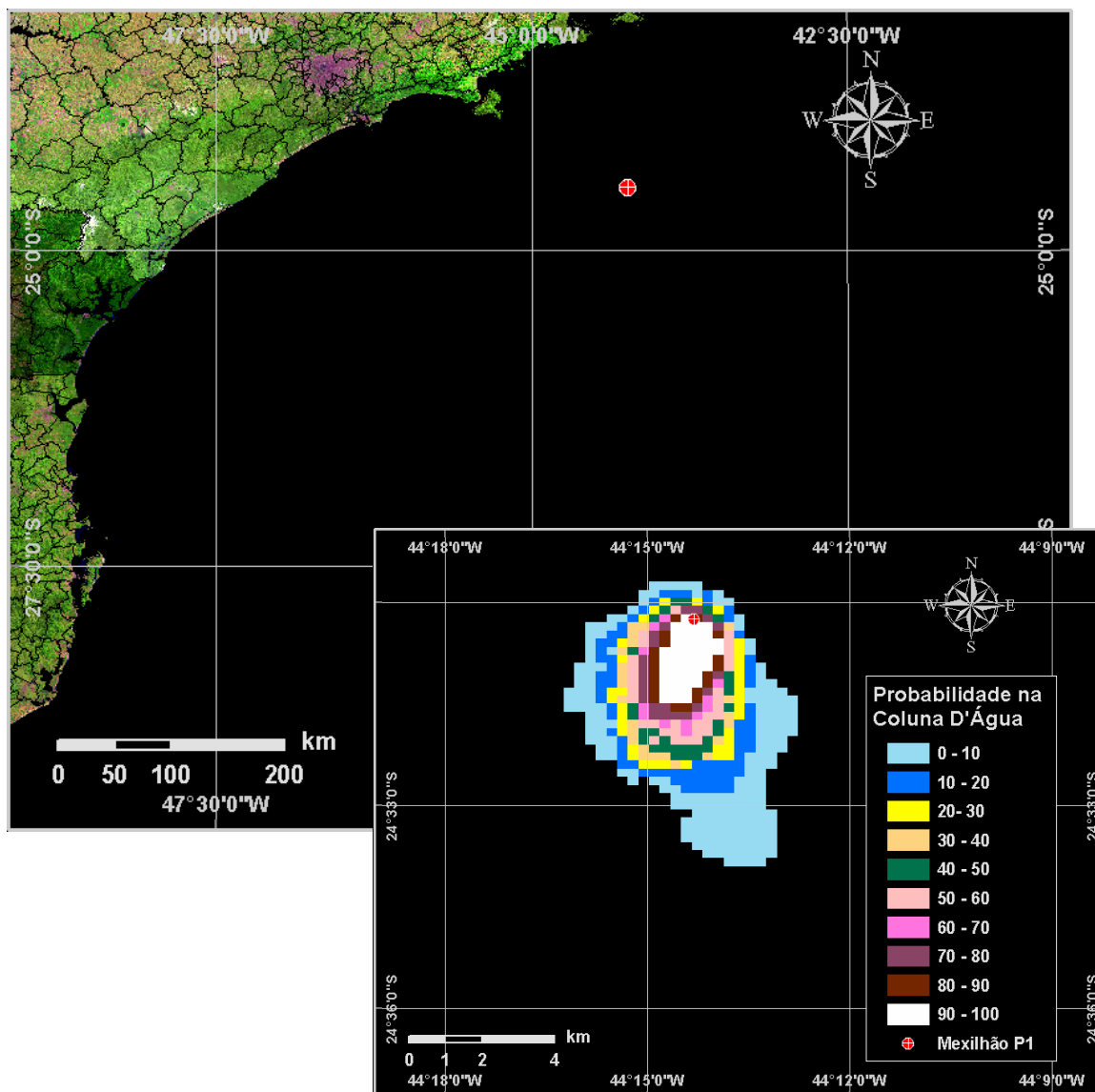
**Figura VI.1-2 - Cenário MEXILHAO\_COND\_P1\_VER\_8\_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m<sup>3</sup> após 8 horas.**



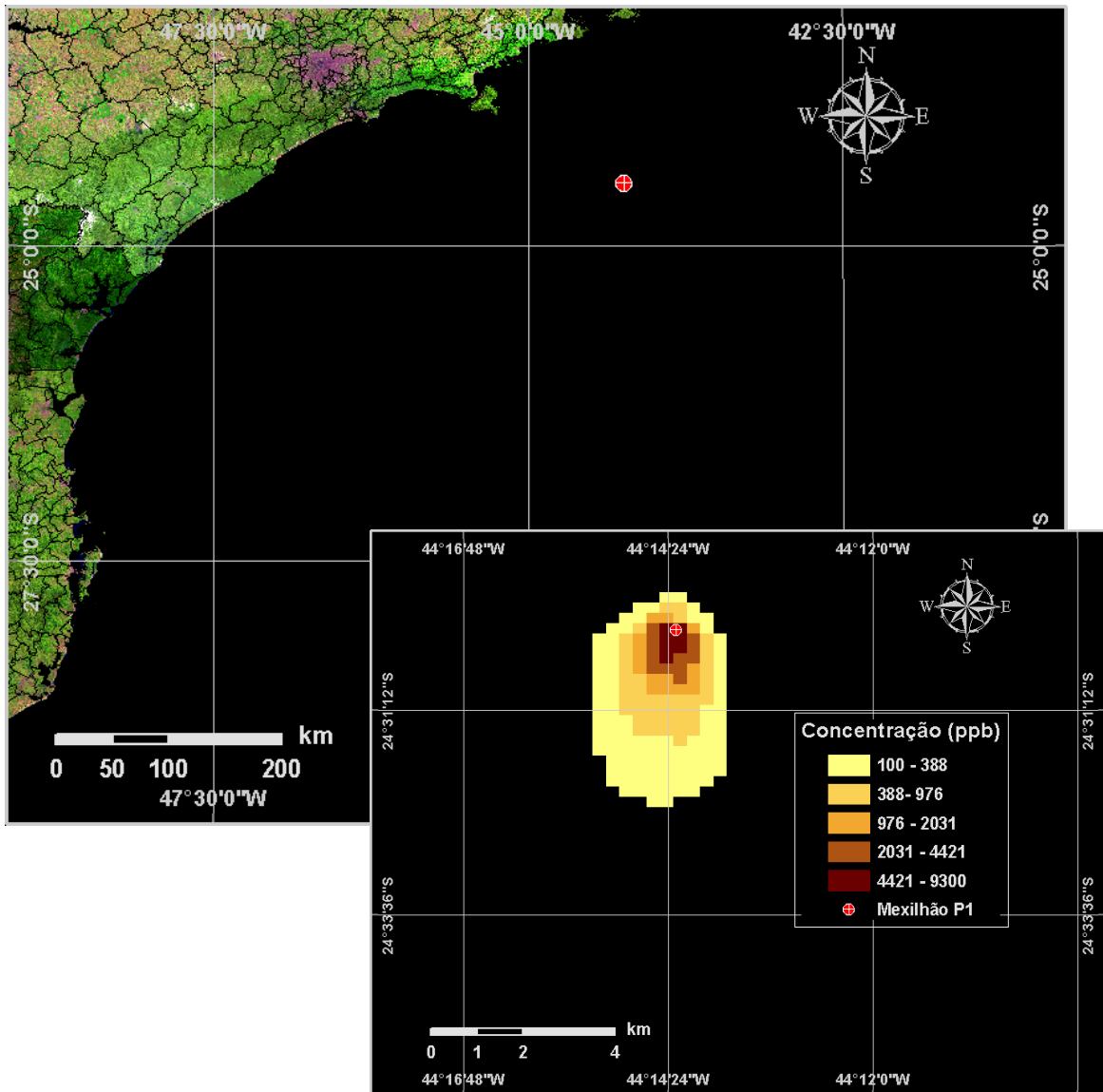
**Figura VI.1-3** - Cenário MEXILHAO\_COND\_P1\_VER\_200\_8H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m<sup>3</sup> após 8 horas.



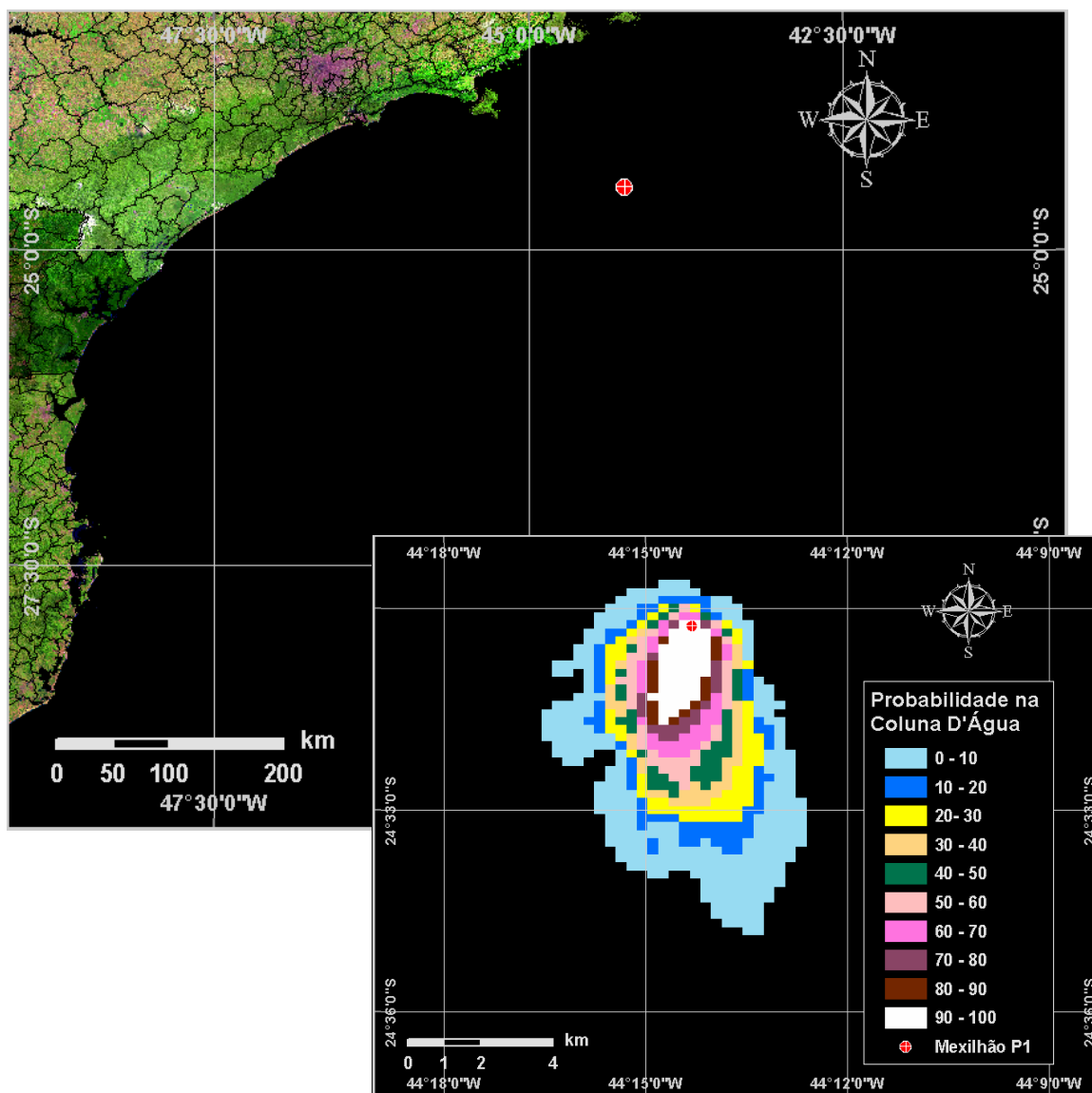
**Figura VI.1-4 - Cenário MEXILHAO\_COND\_P1\_VER\_200\_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m<sup>3</sup> após 8 horas.**



**Figura VI.1-5** - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 6 horas.

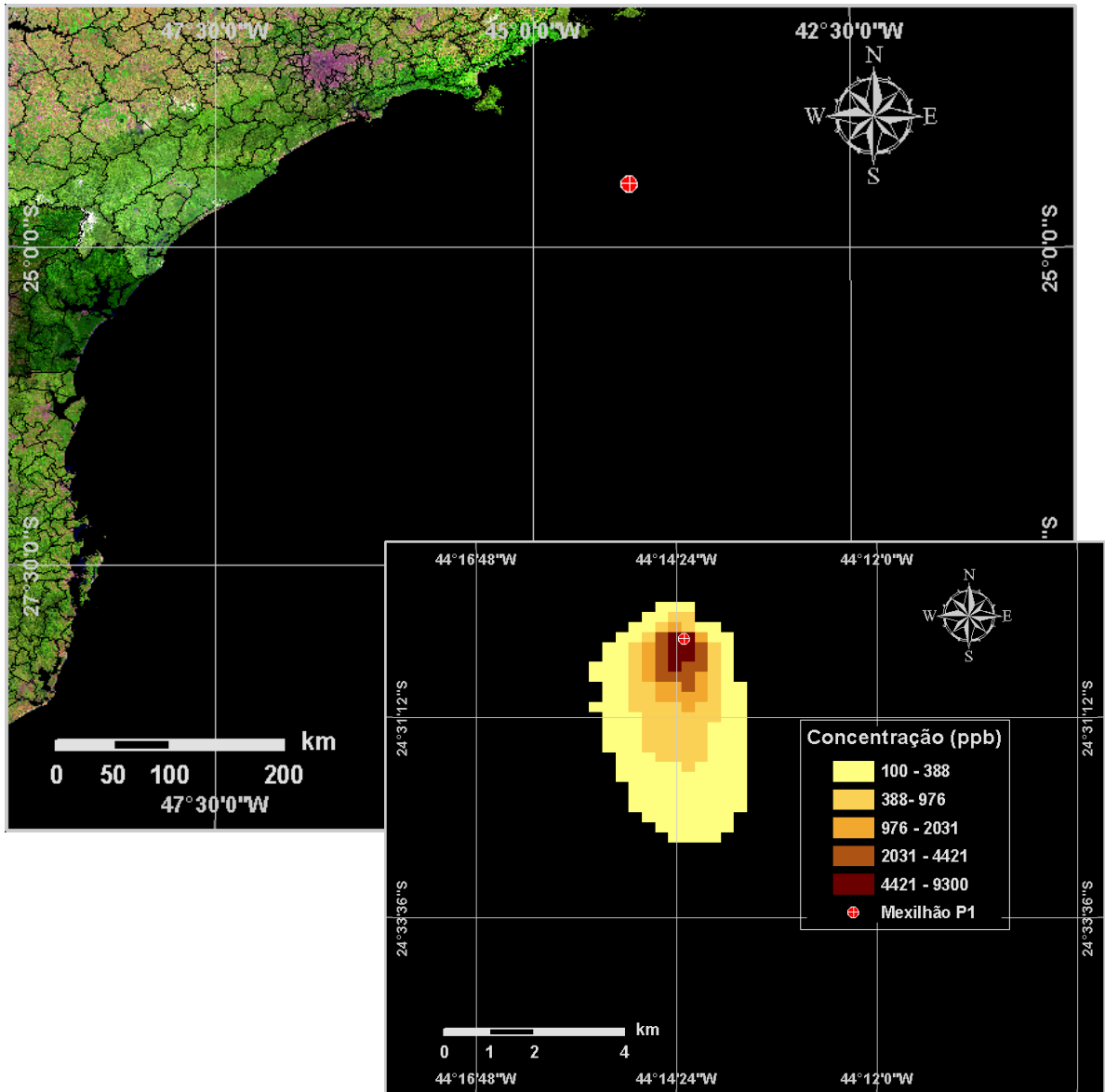


**Figura VI.1-6 - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 6 horas.**

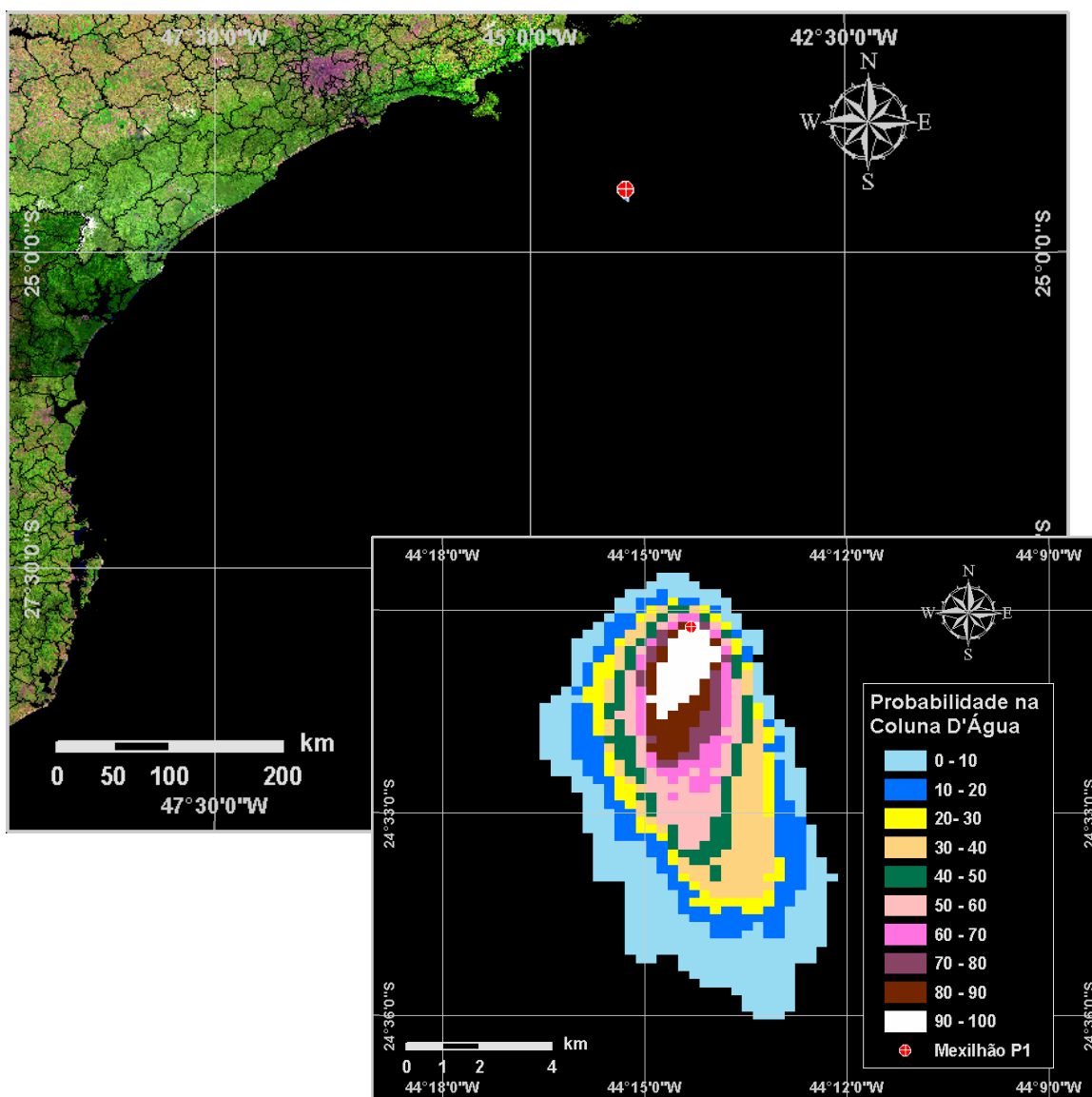


**Figura VI.1-7** - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 9 horas.



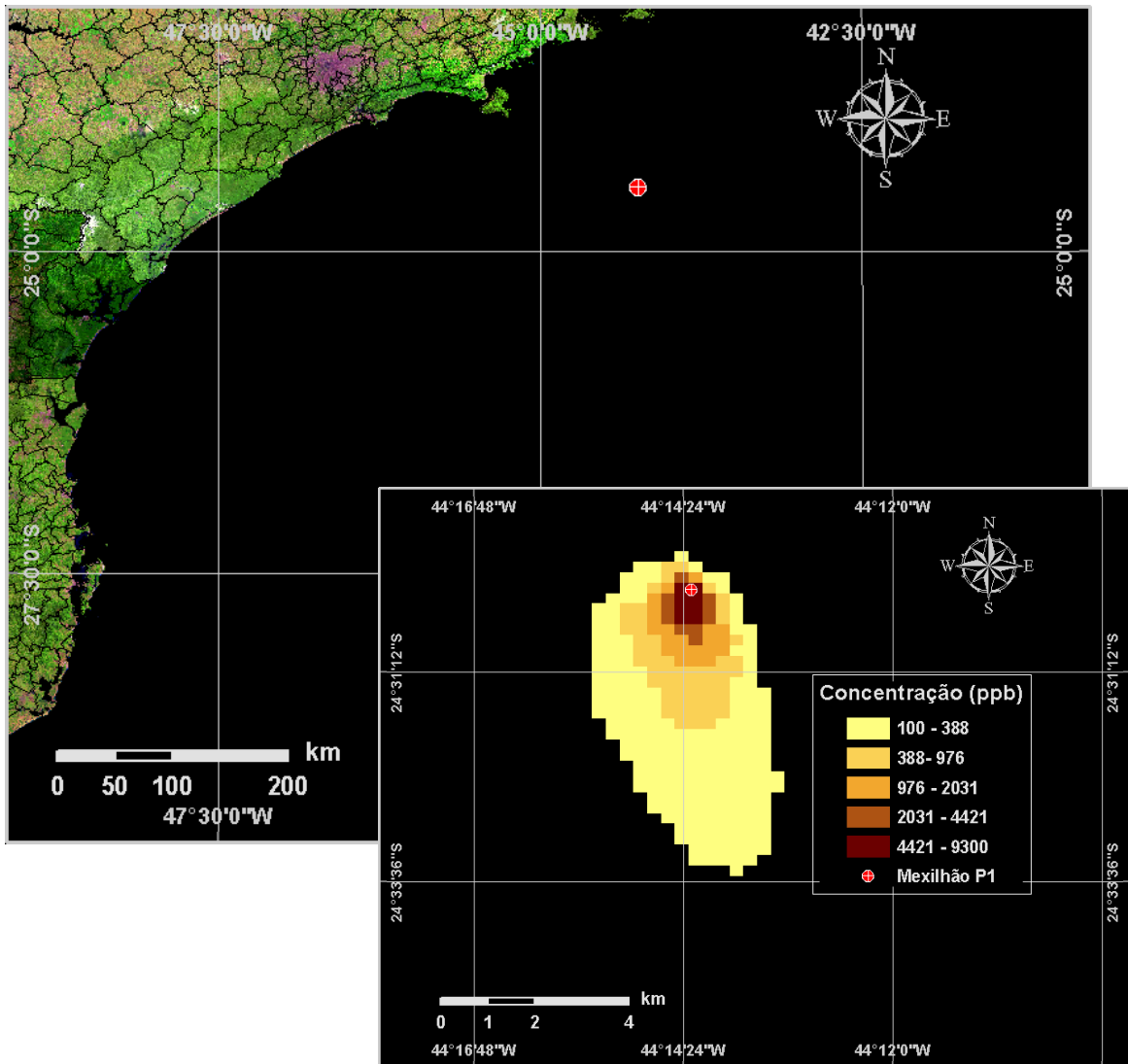


**Figura VI.1-8 - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 9 horas.**

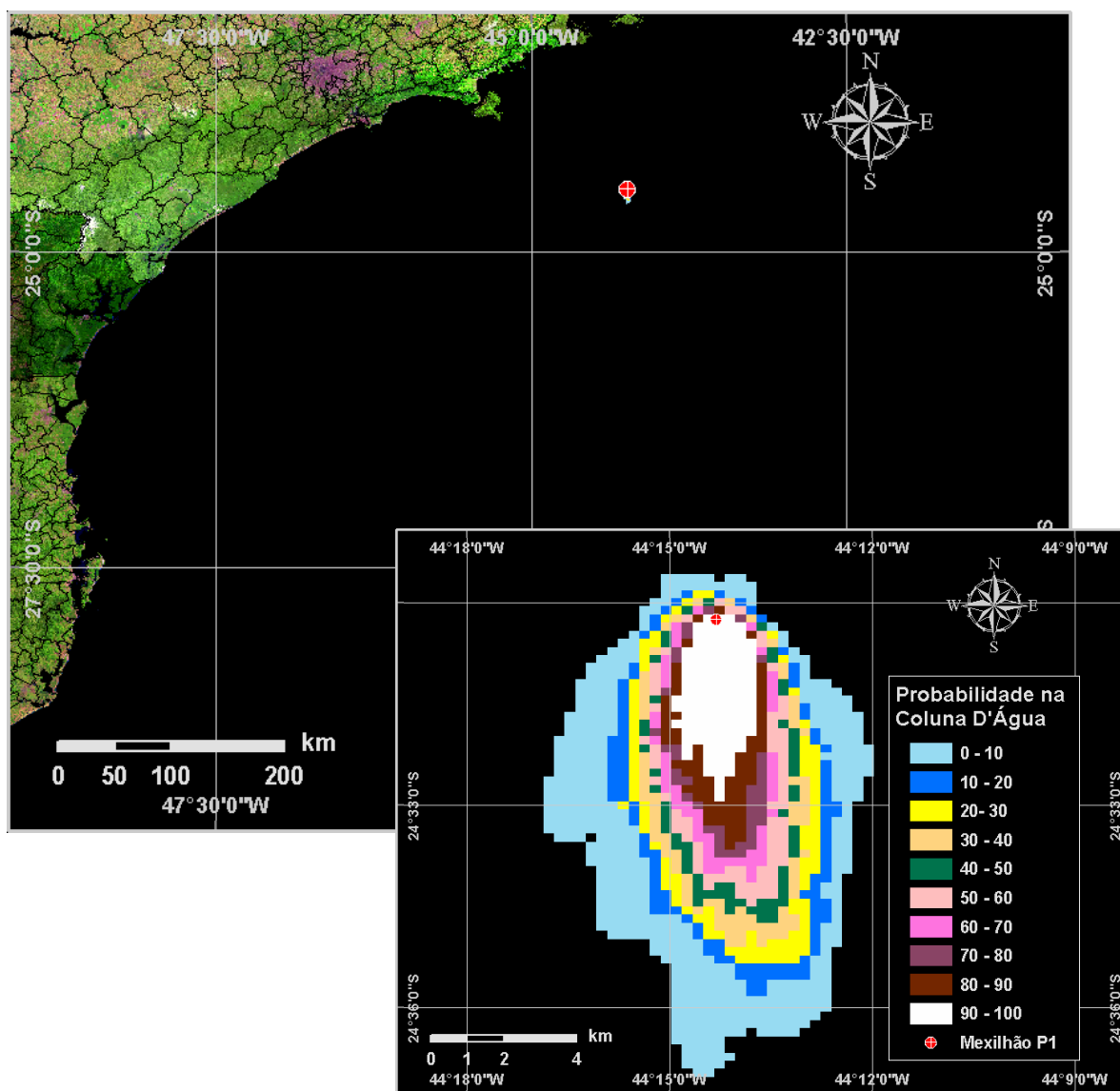


**Figura VI.1-9** - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de  $17,37 \text{ m}^3/\text{h}$  após 12 horas.

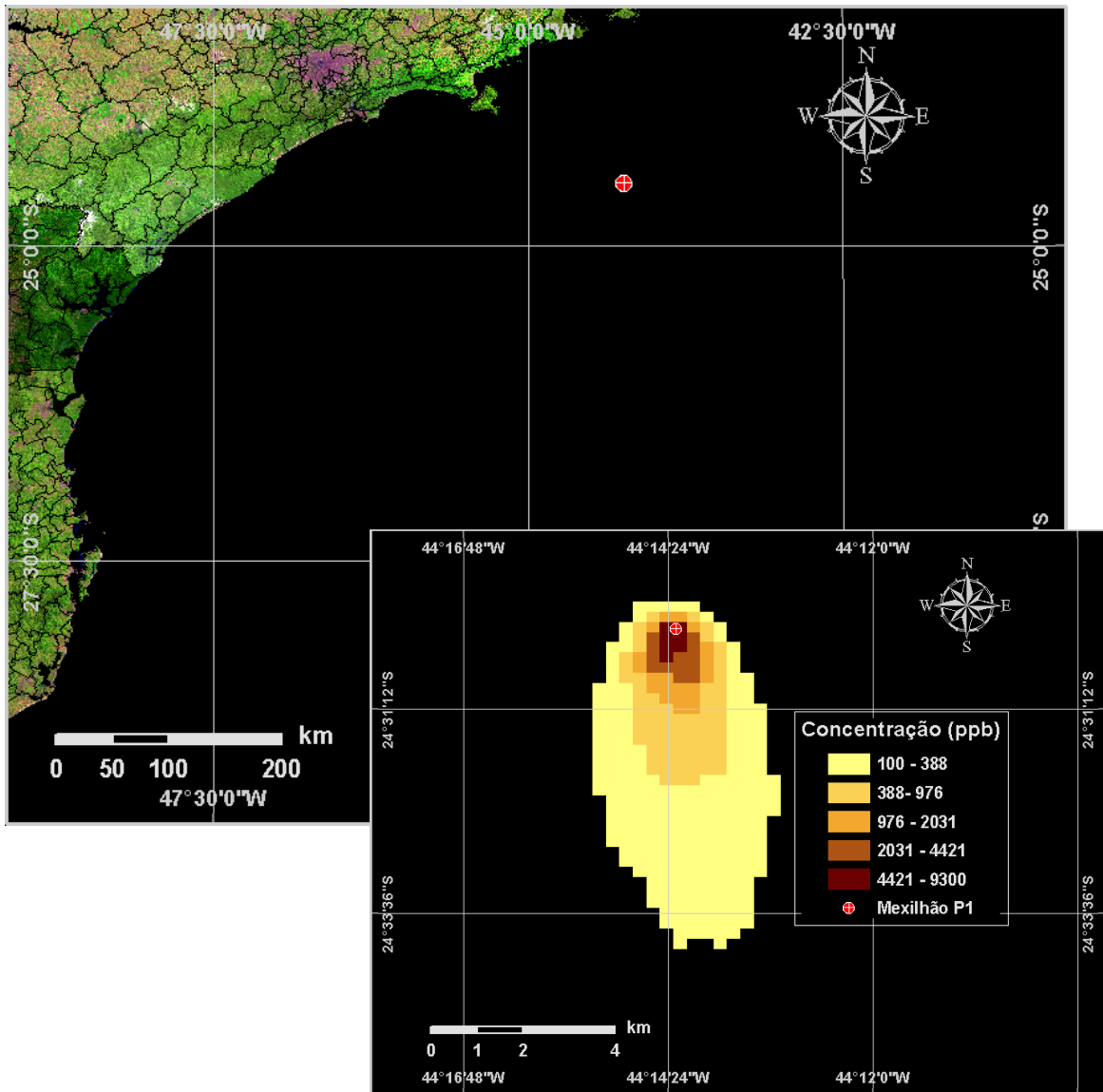




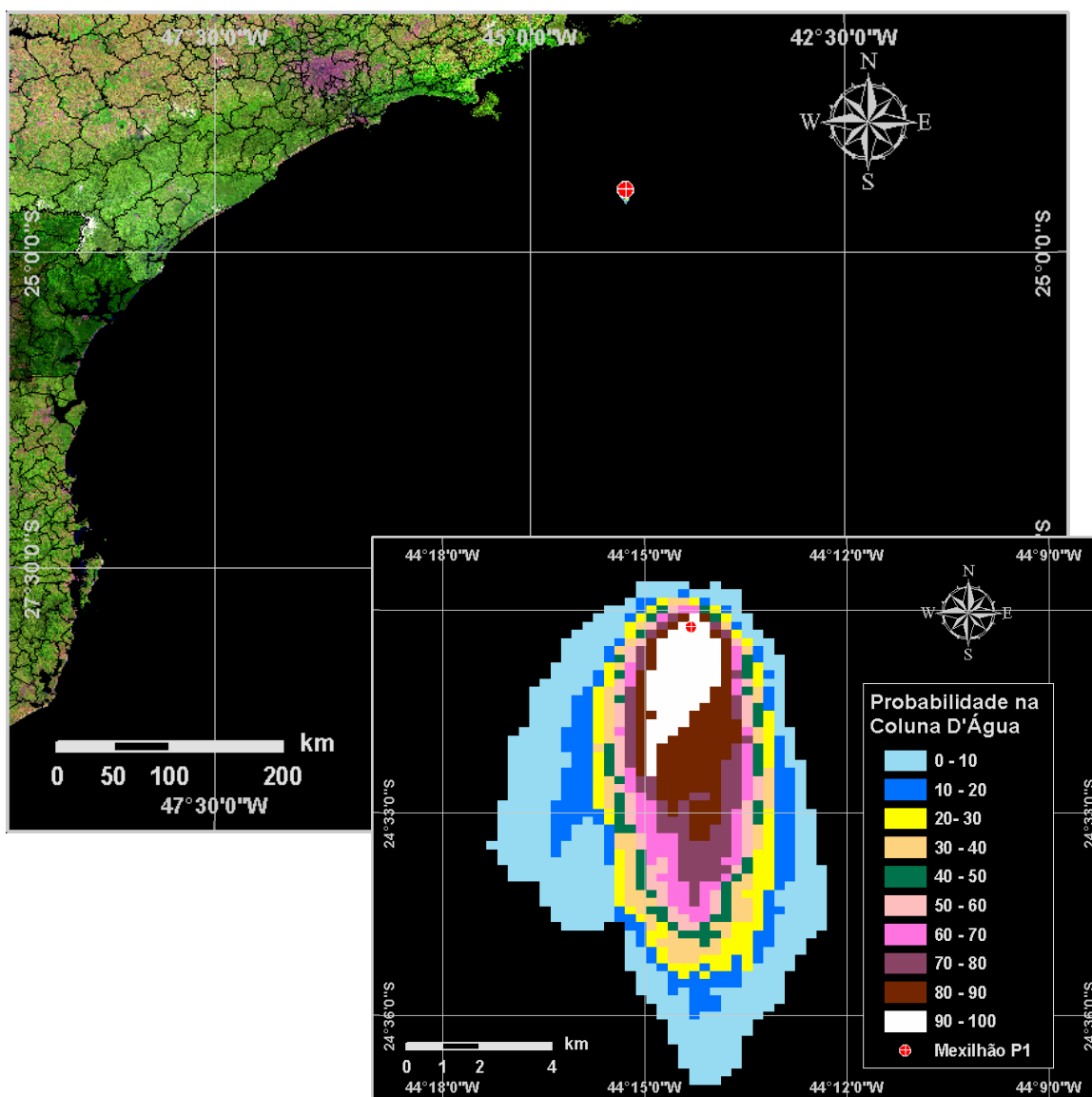
**Figura VI.1-10 - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 12 horas.**



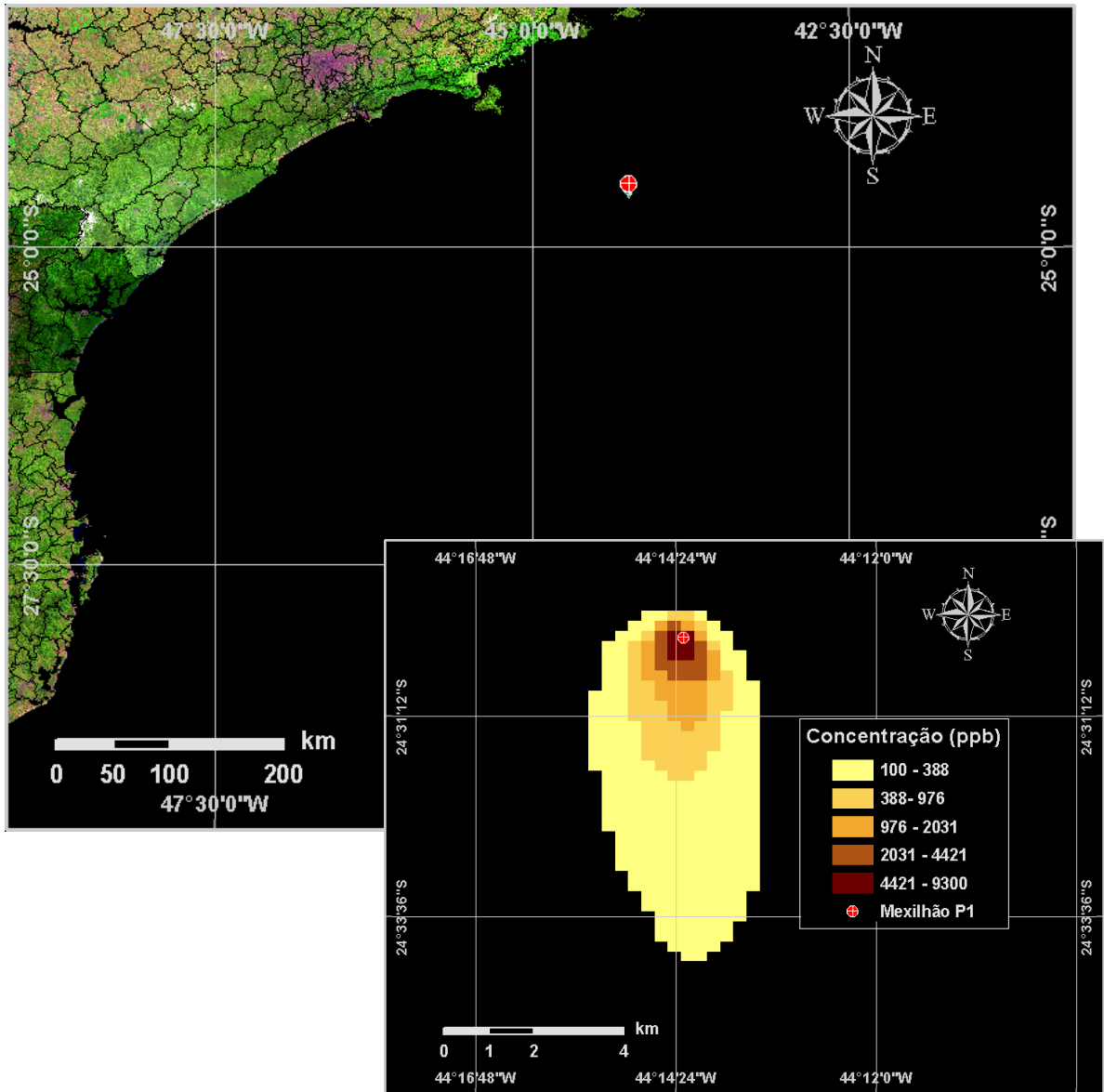
**Figura VI.1-11** - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 36 horas.



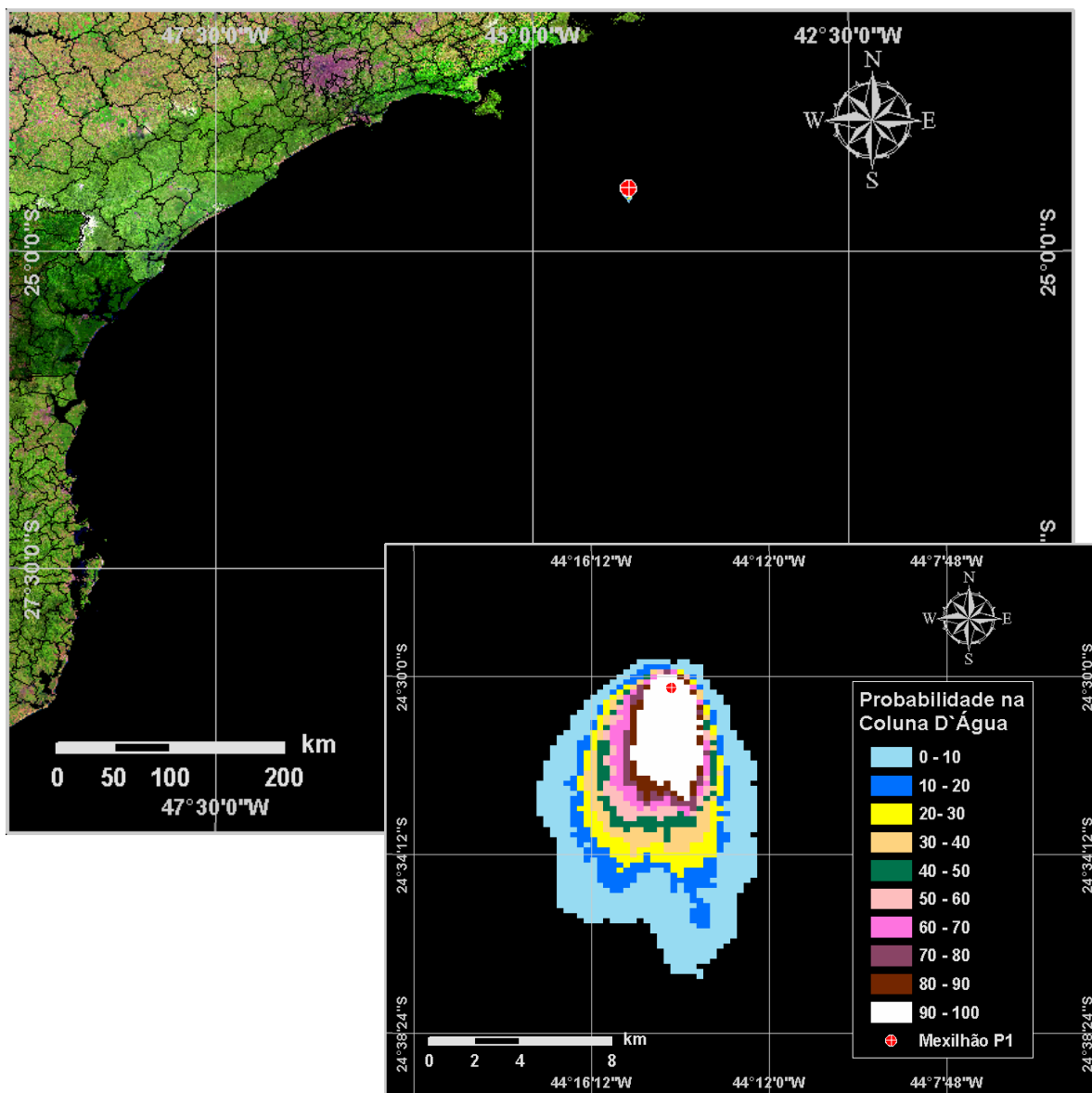
**Figura VI.1-12 - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 36 horas.**



**Figura VI.1-13** - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de  $17,37 \text{ m}^3/\text{h}$  após 60 horas.

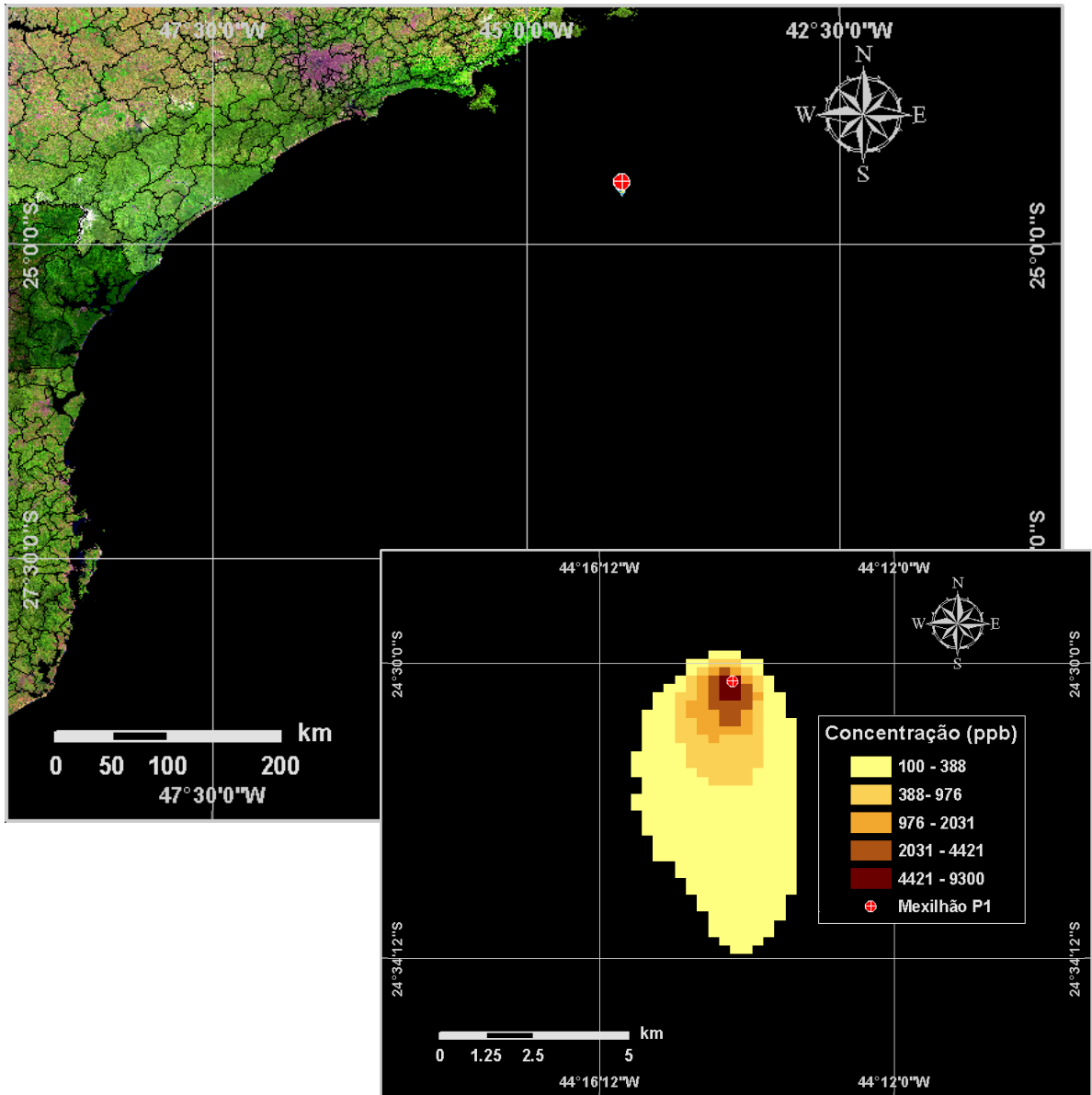


**Figura VI.1-14 - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 60 horas.**

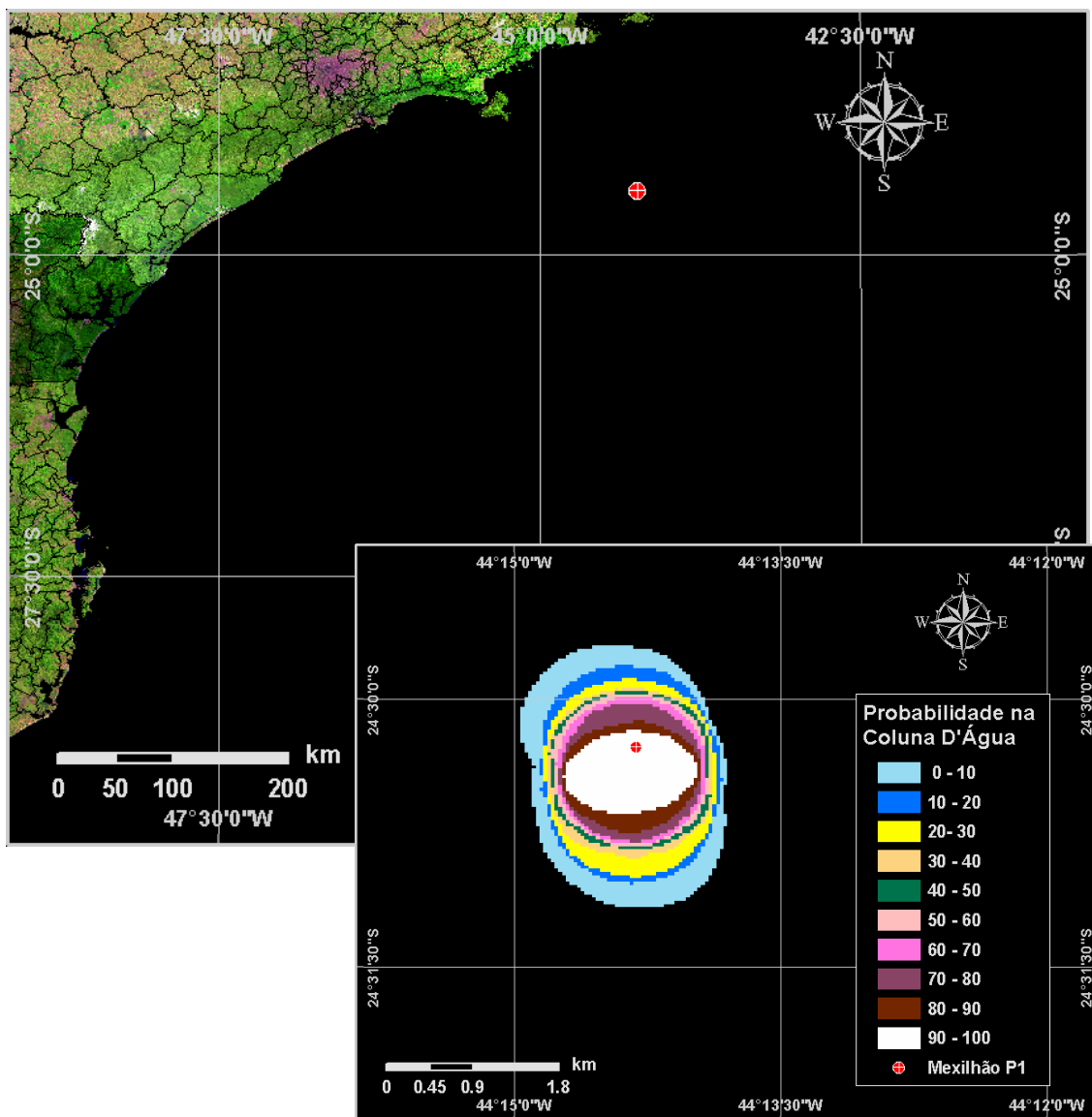


**Figura VI.1-15** - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_30DIAS. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 30 dias.



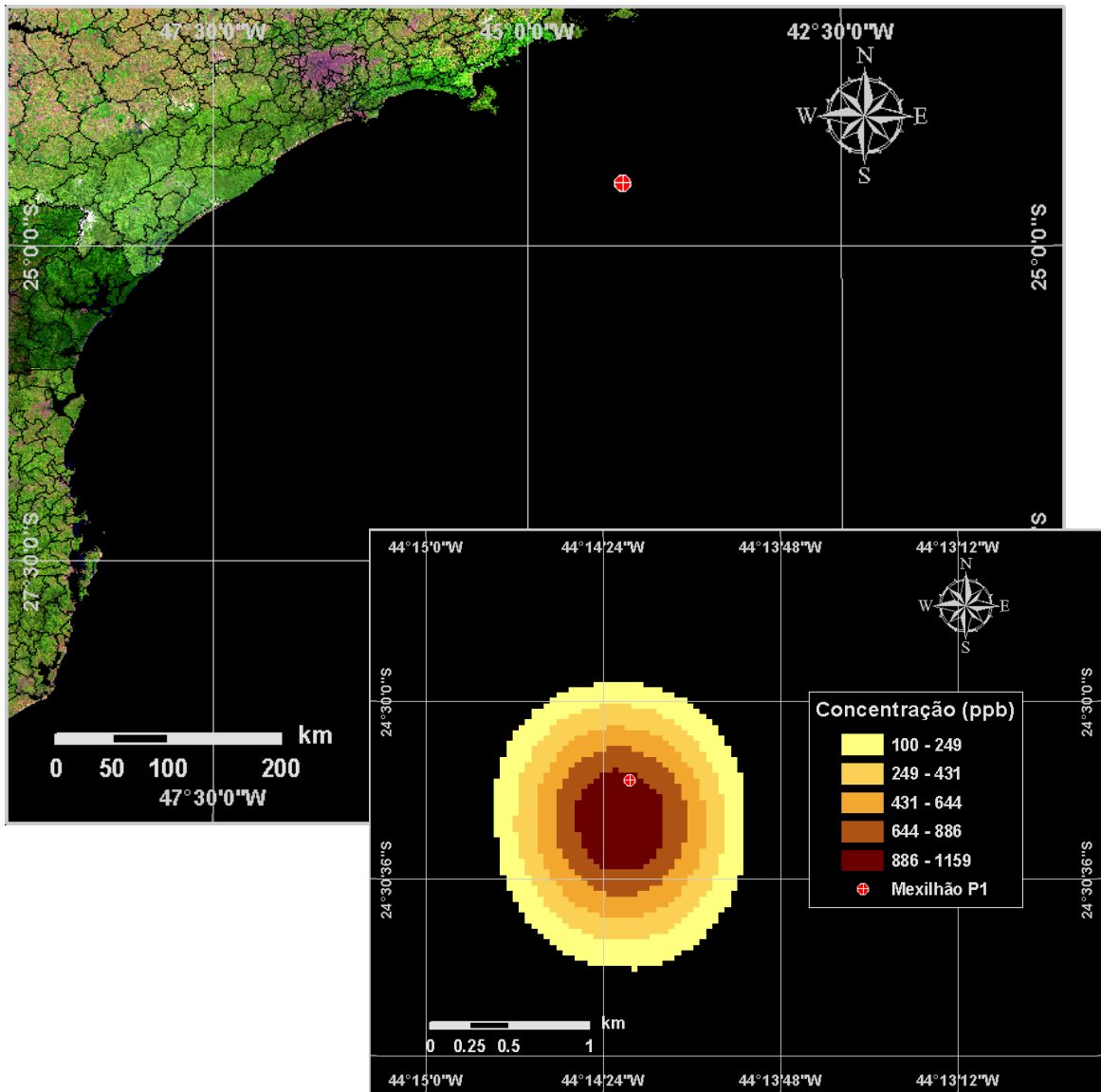


**Figura VI.1-16 - Cenário MEXILHAO\_P1\_VER\_PCASO\_30DIAS. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 30 dias.**

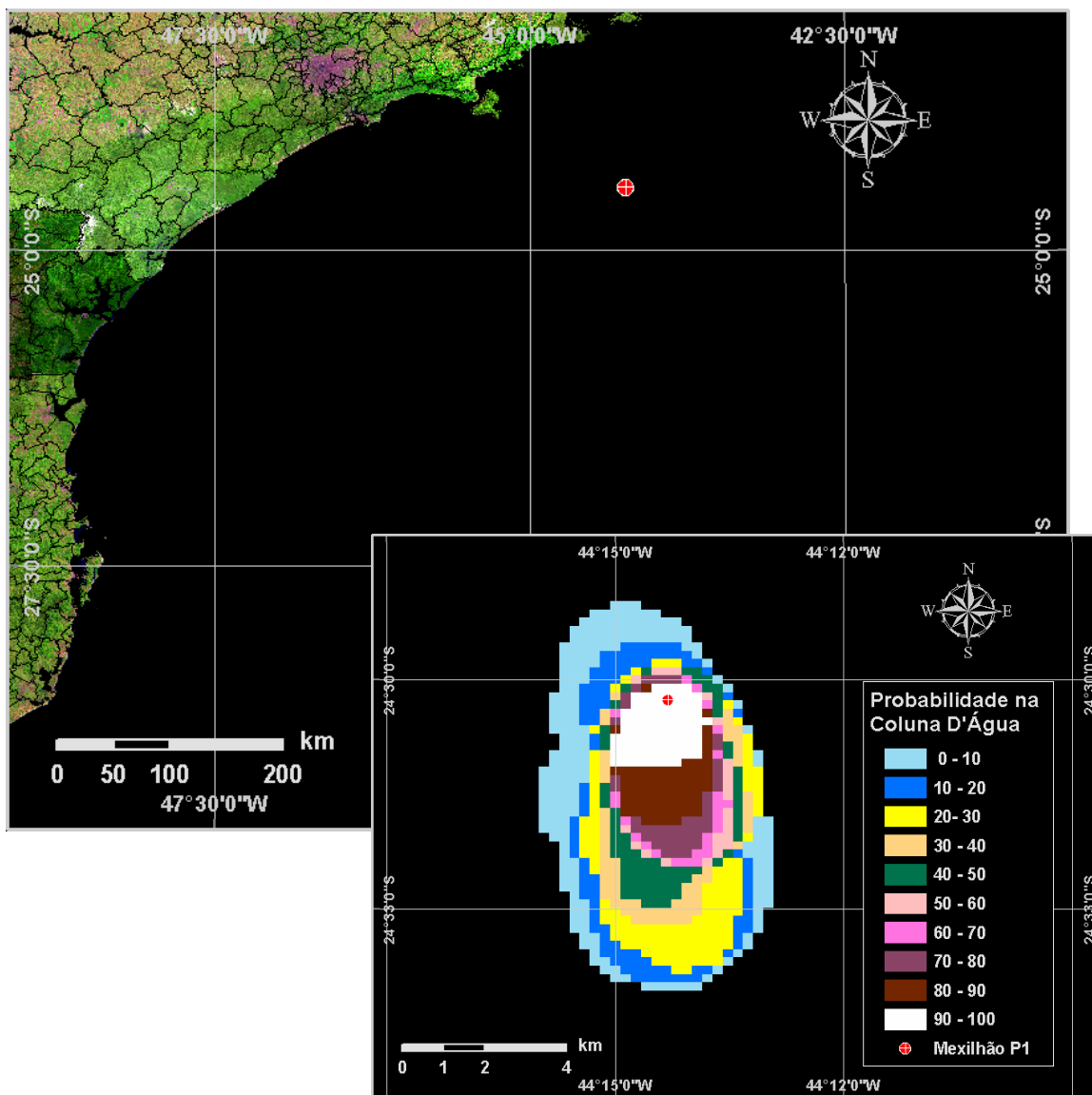


**Figura VI.1-17** - Cenário MEXI\_COND\_P1\_INV\_8\_1H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $8 \text{ m}^3$  após 1 hora.

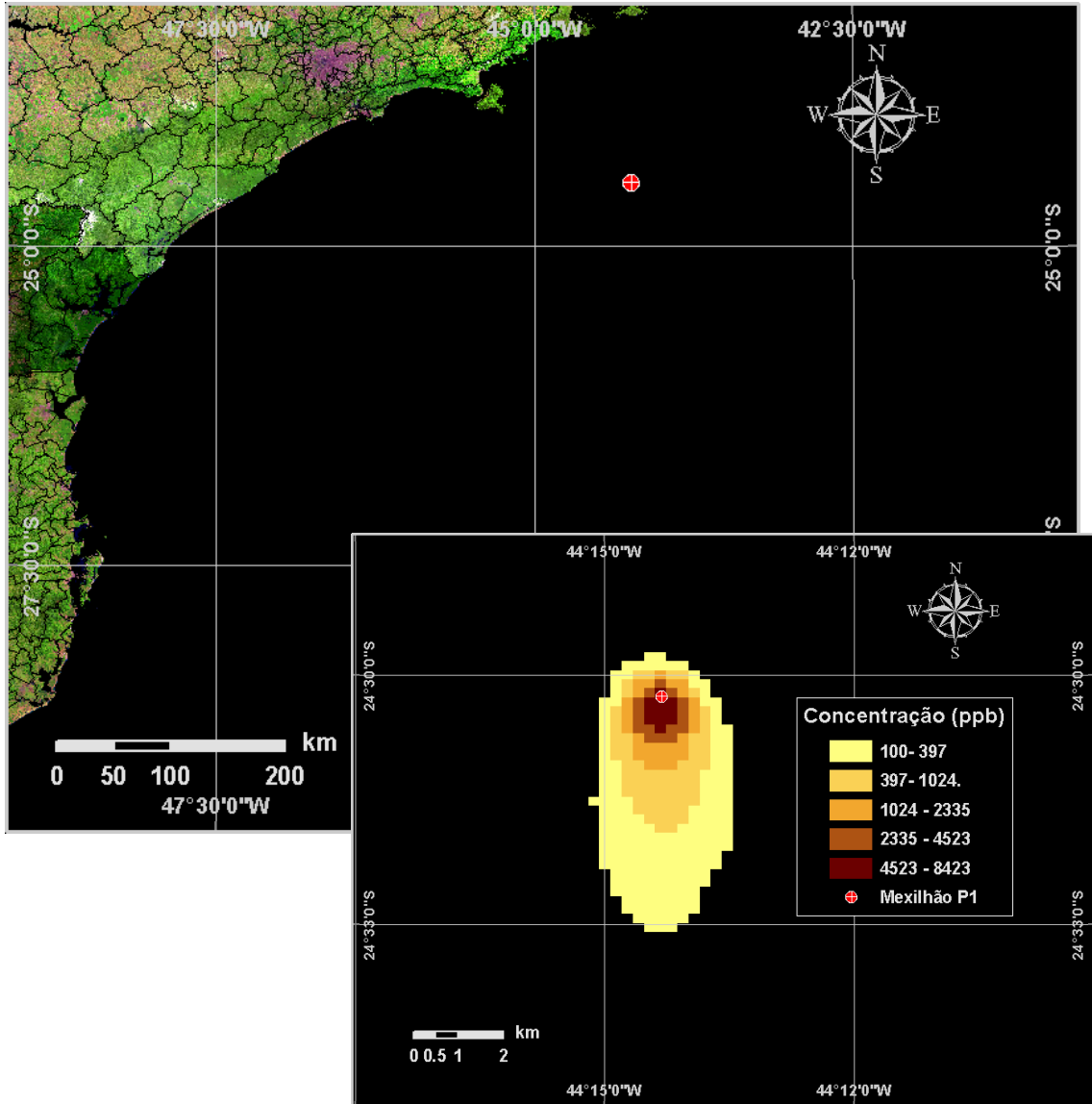




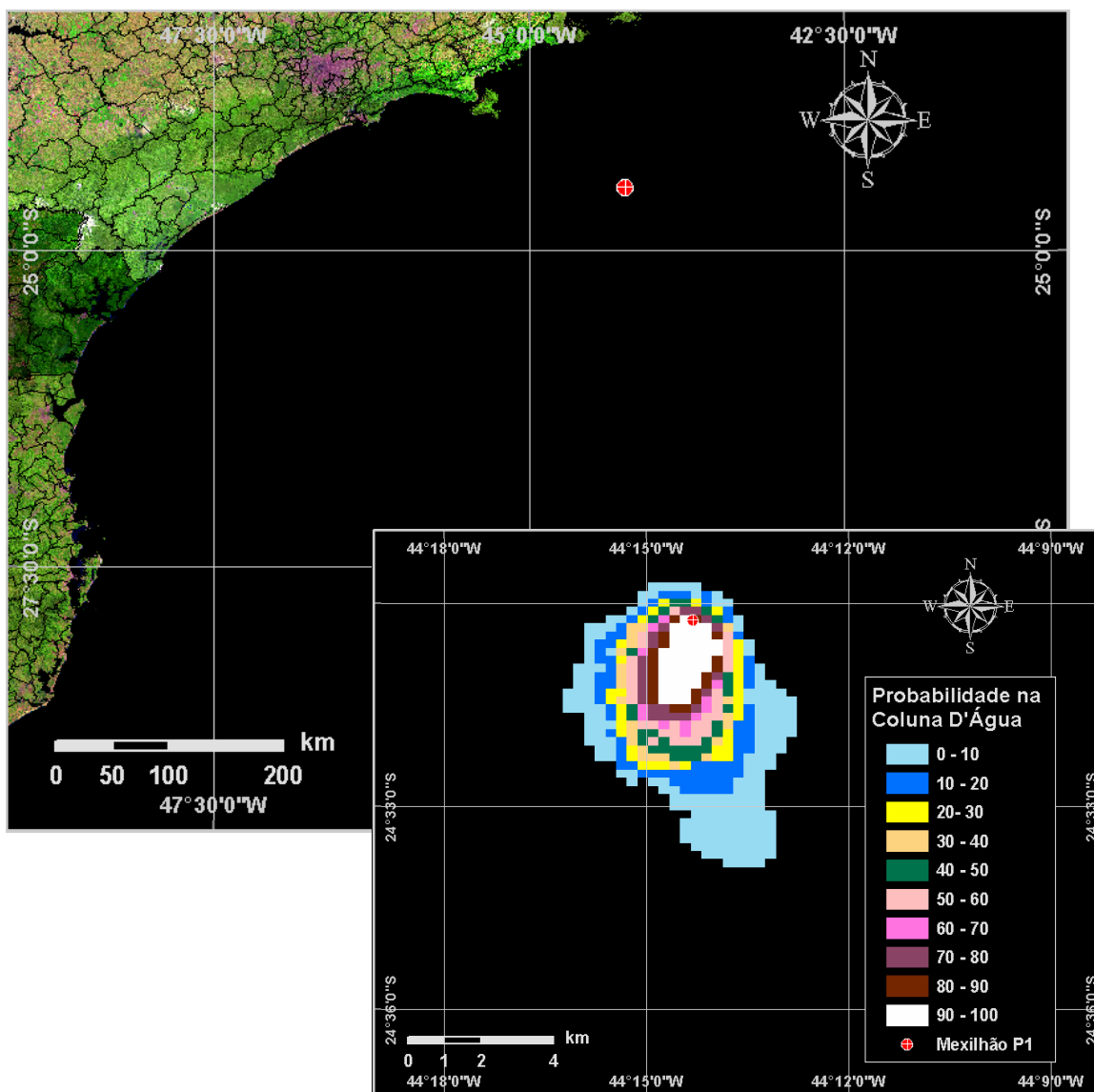
**Figura VI.1-18 - Cenário MEXI\_COND\_P1\_INV\_8\_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m<sup>3</sup> após 8 horas.**



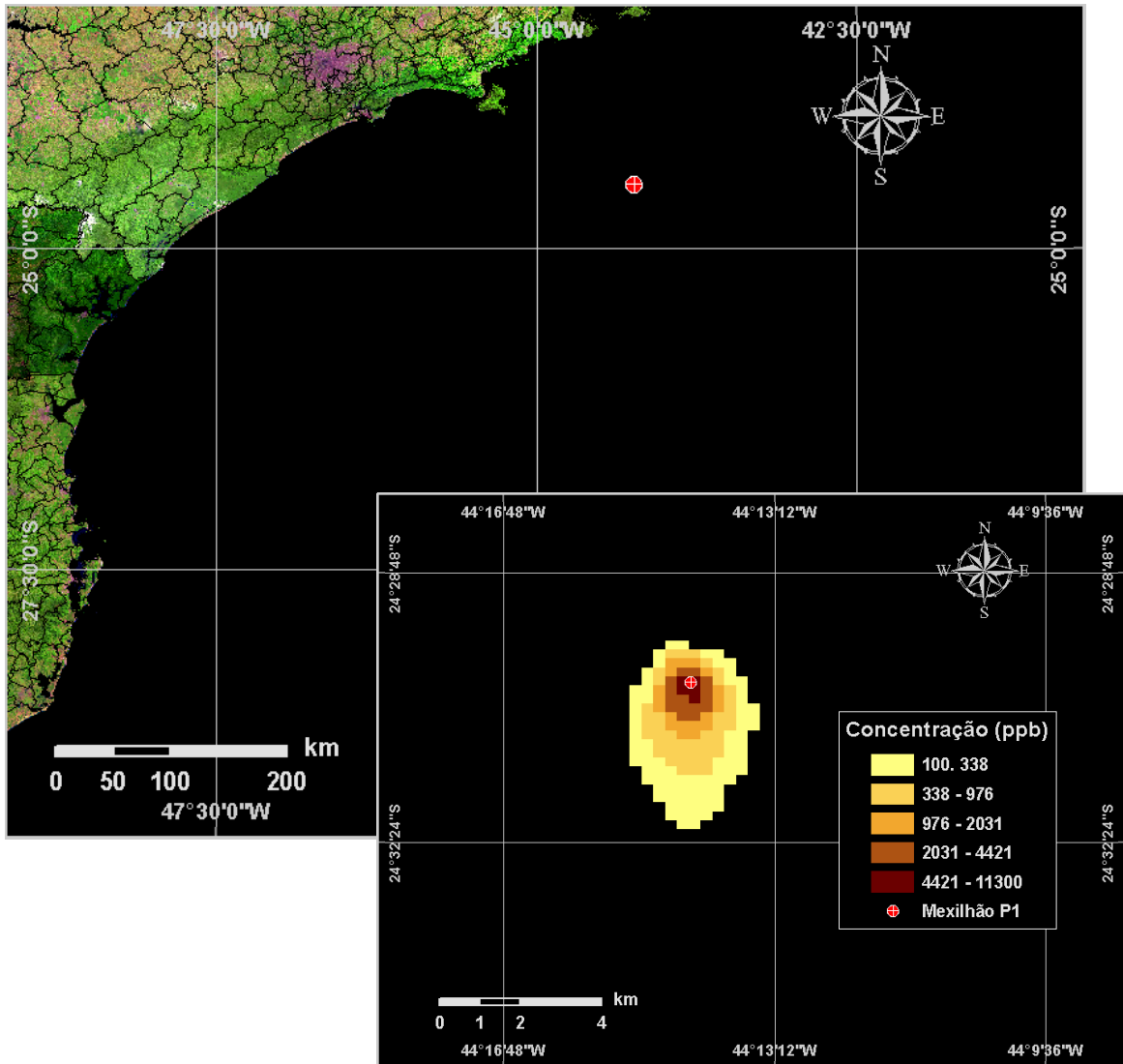
**Figura VI.1-19** - Cenário MEXI\_COND\_P1\_INV\_200\_8H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água em um acidente no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m<sup>3</sup> após 8 horas.



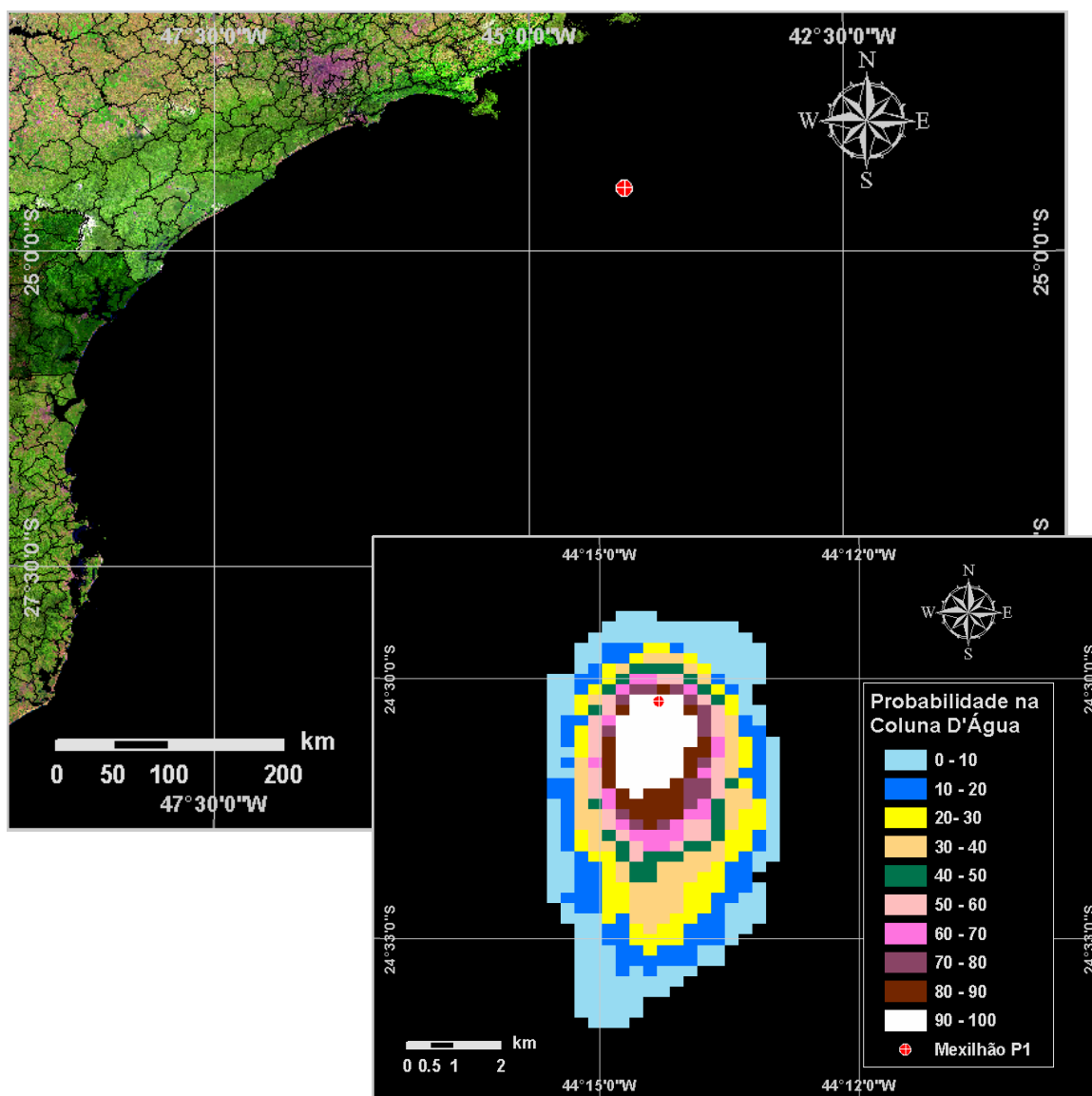
**Figura VI.1-20 - Cenário MEXI\_COND\_P1\_INV\_200\_8H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m<sup>3</sup> após 8 horas.**



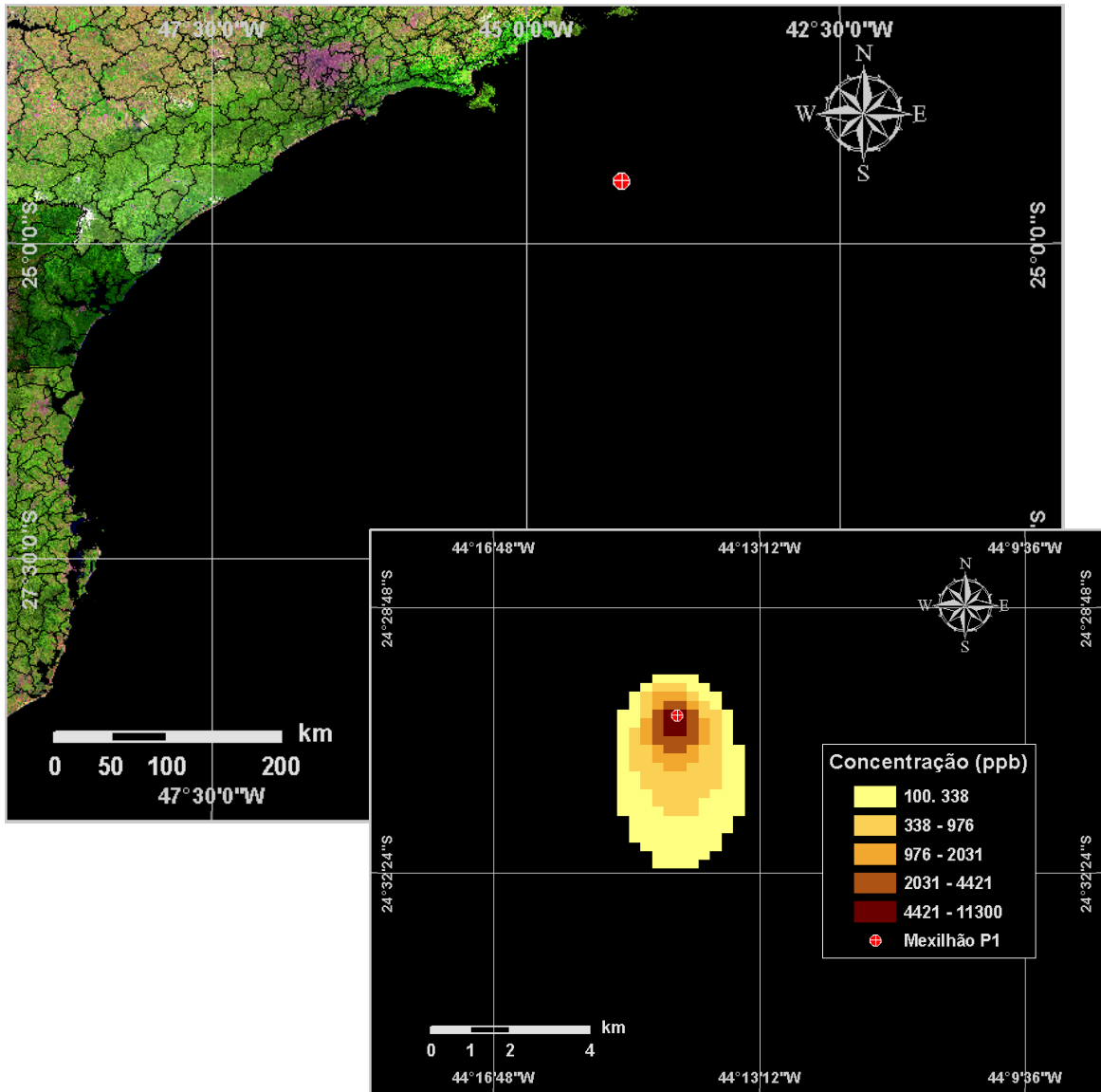
**Figura VI.1-21** - Cenário MEXI\_P1\_INV\_PIORCASO\_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um acidente ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $17,37 \text{ m}^3/\text{h}$  após 6 horas.



**Figura VI.1-22 - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 6 horas.**

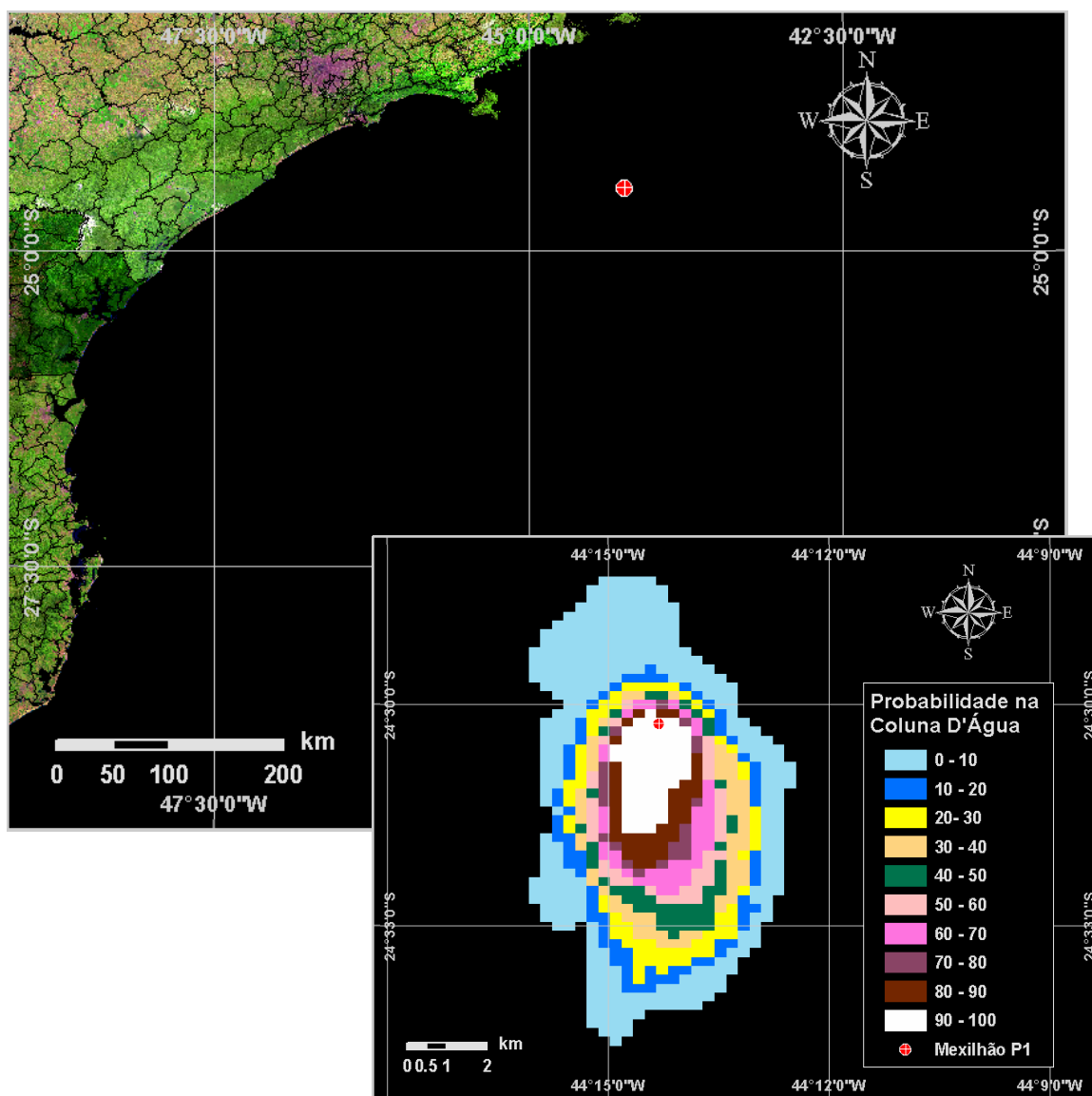


**Figura VI.1-23** - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $17,37 \text{ m}^3/\text{h}$  após 9 horas.



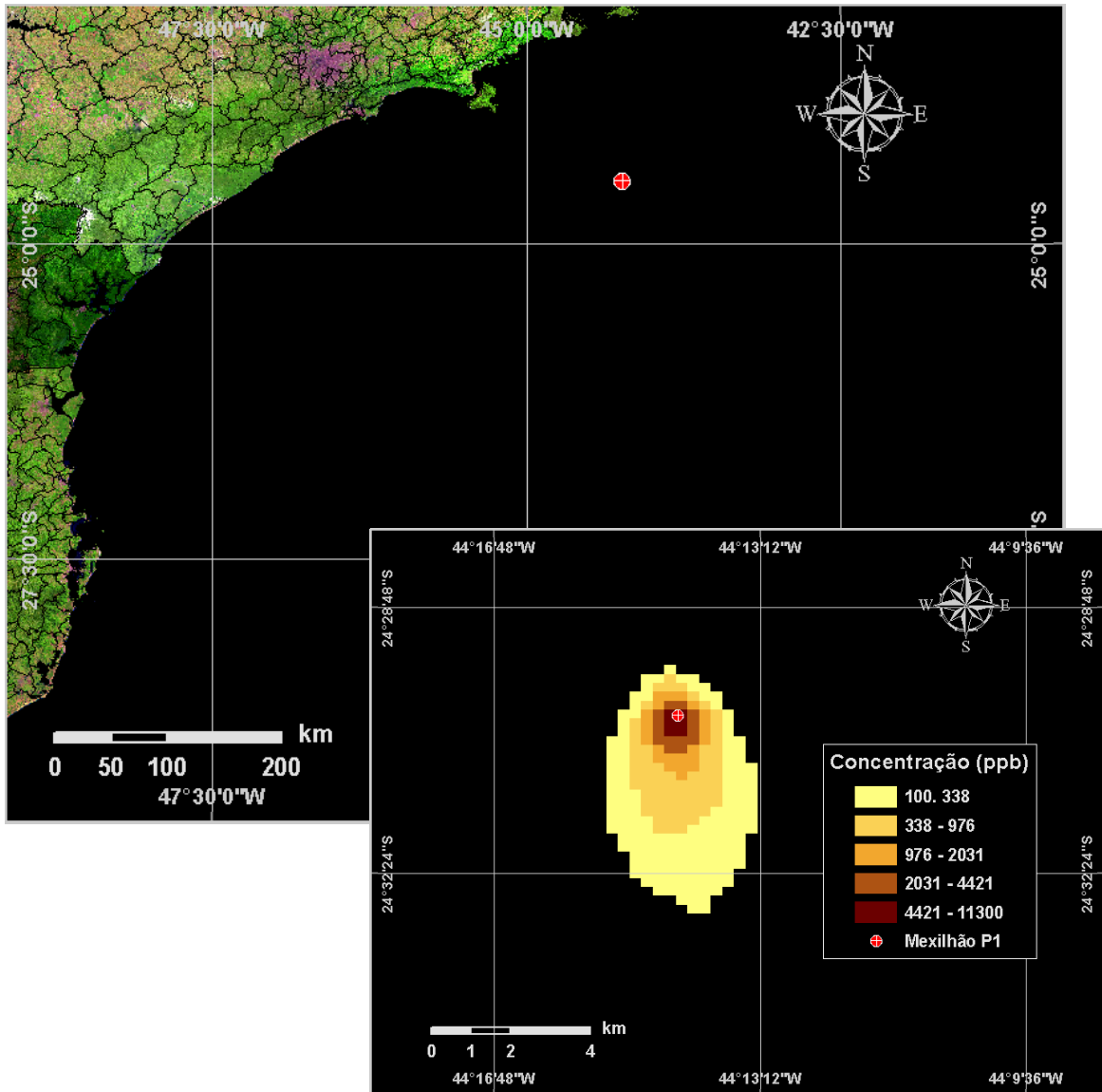
**Figura VI.1-24 - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 9 horas.**



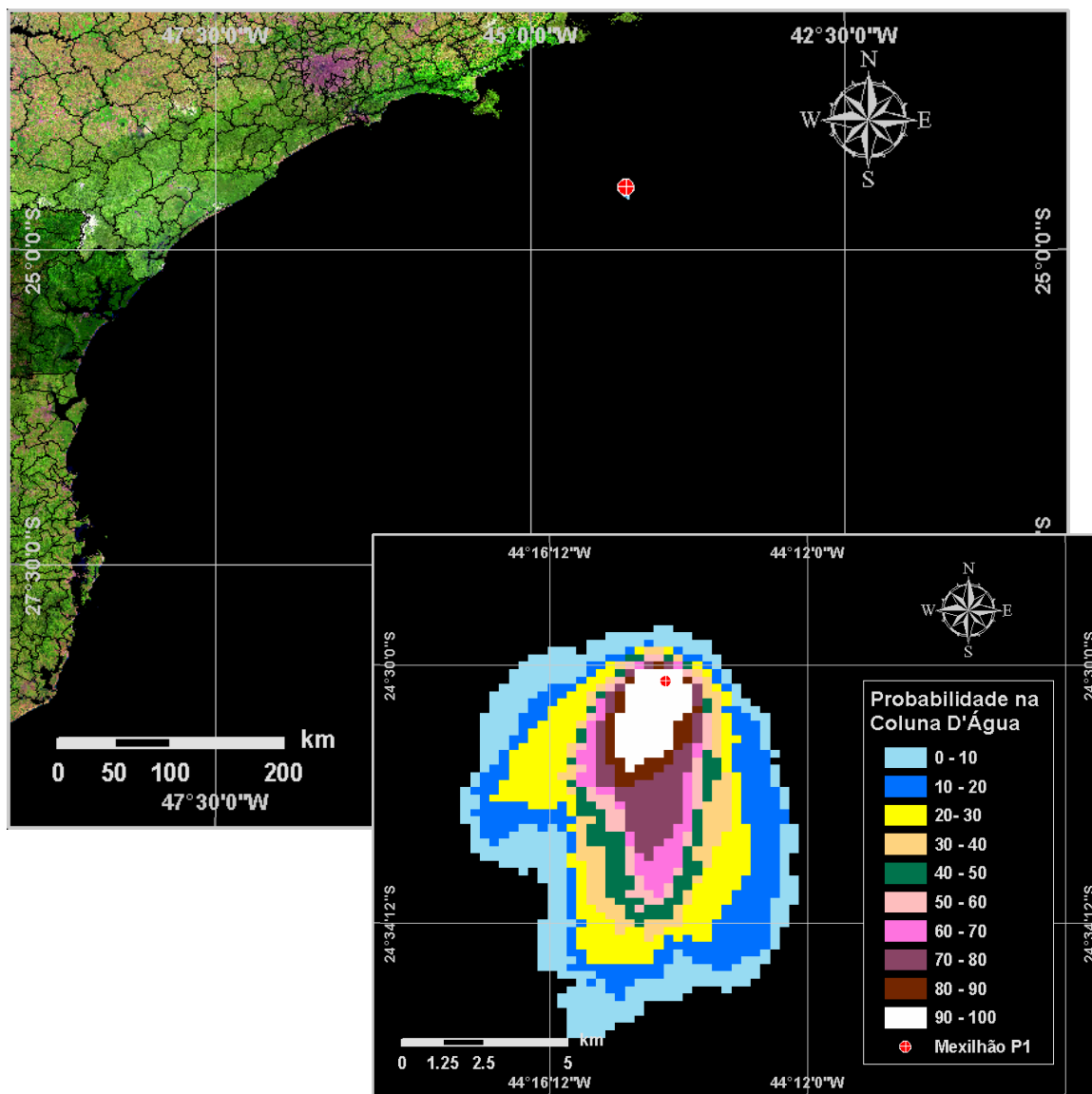


**Figura VI.1-25** - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 12 horas.

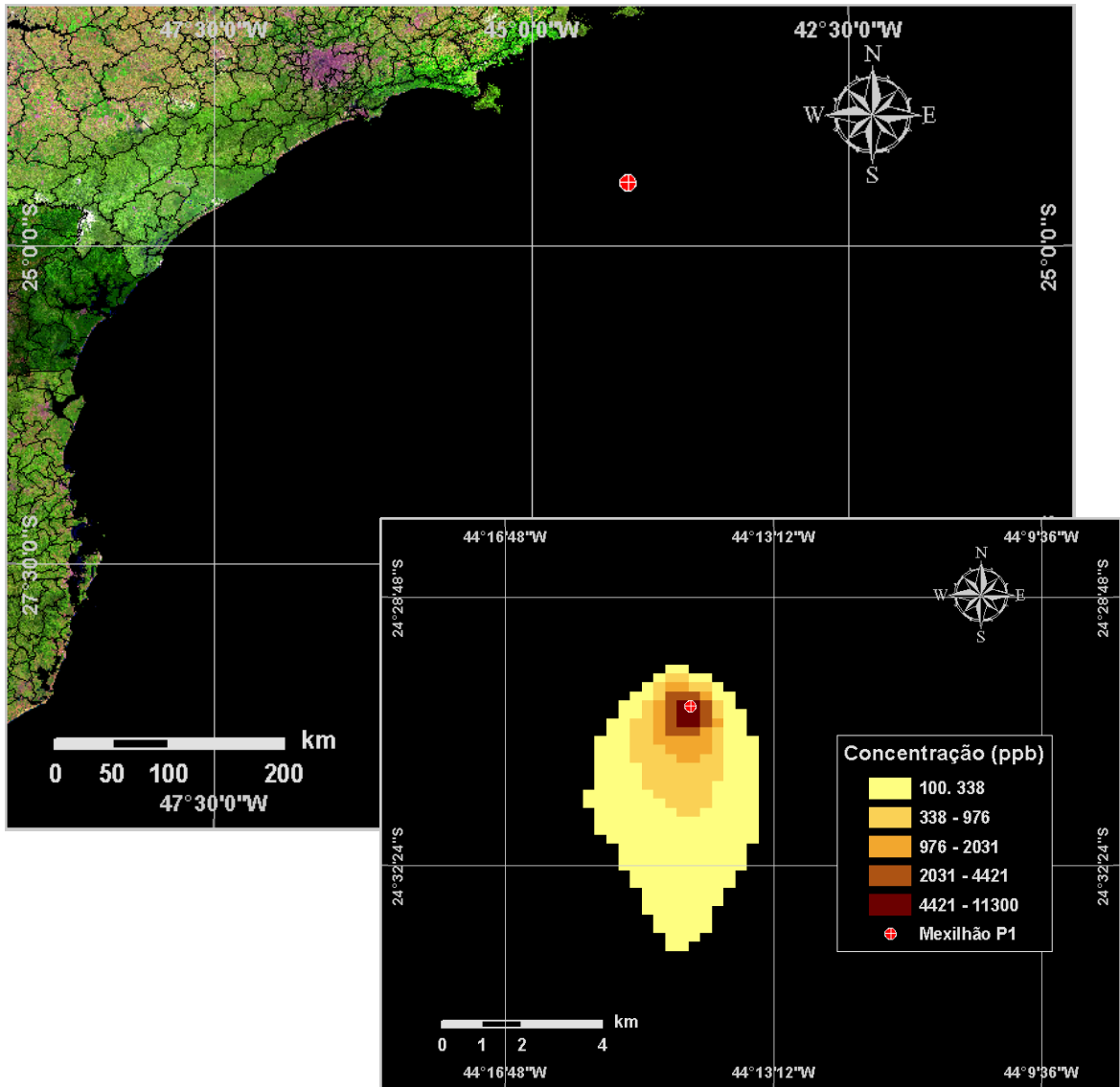




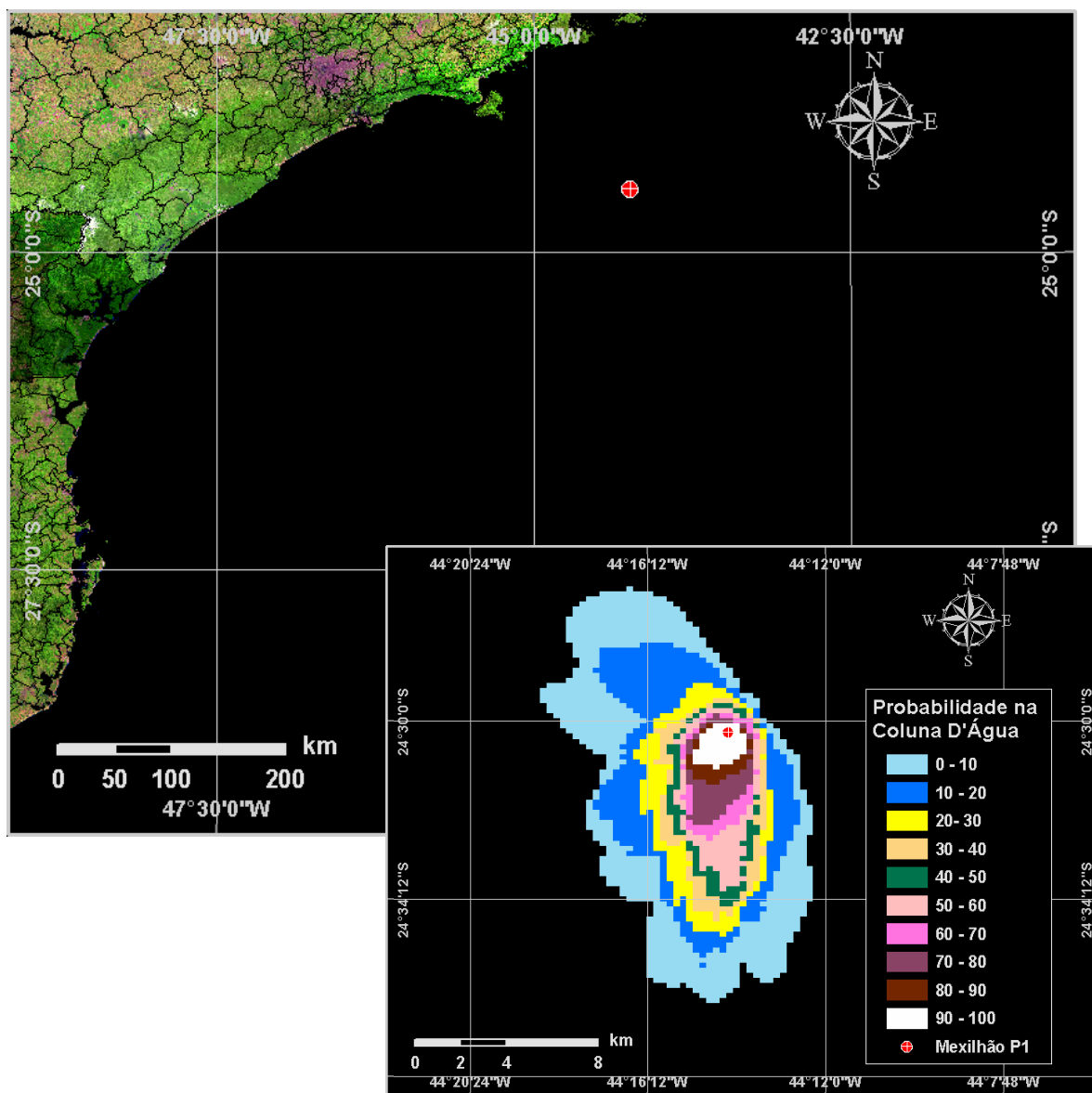
**Figura VI.1-26 - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 12 horas.**



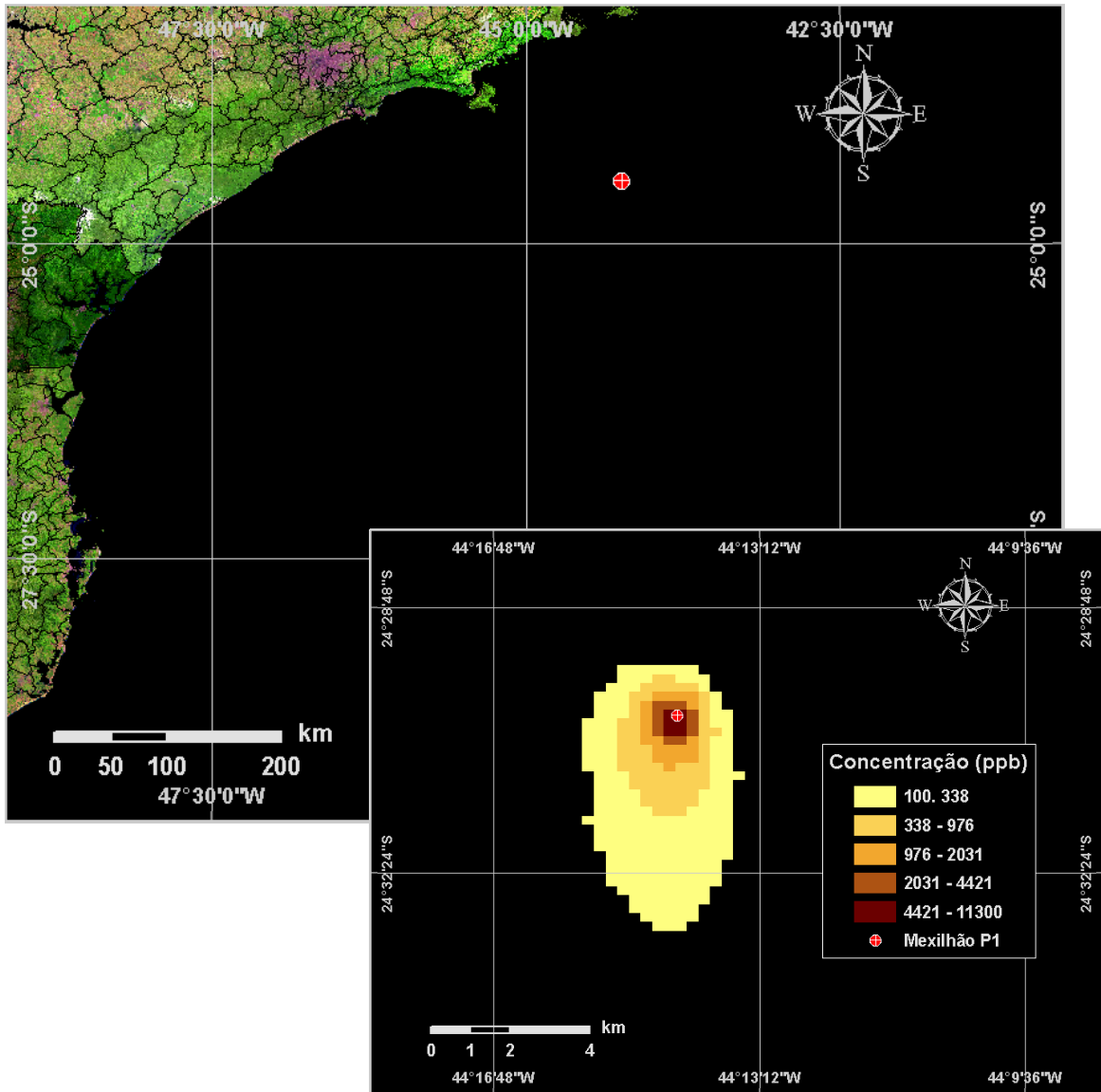
**Figura VI.1-27** - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 36 horas.



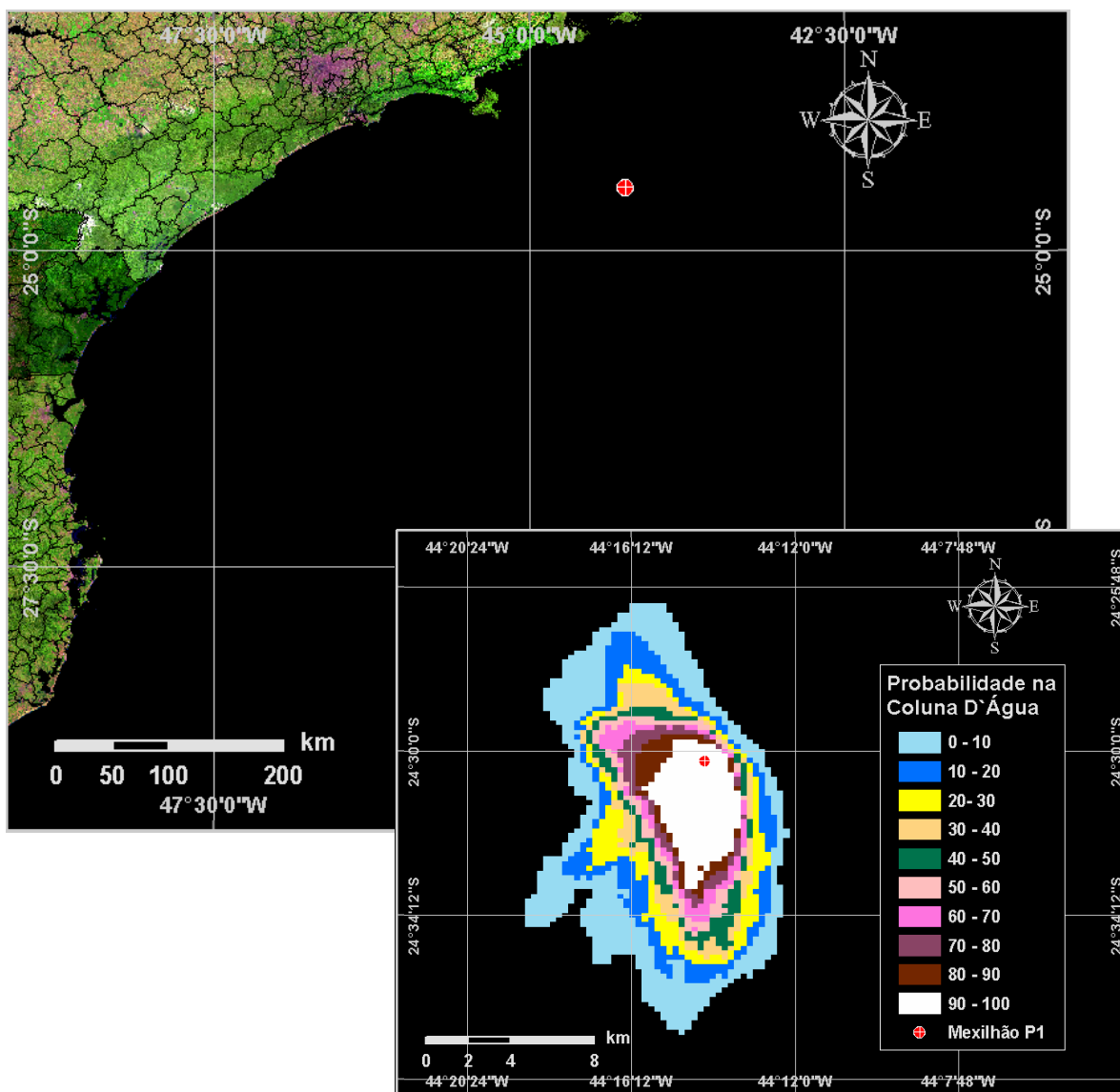
**Figura VI.1-28 - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $17,37 \text{ m}^3/\text{h}^3$  após 36 horas**



**Figura VI.1-29** - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 60 horas.

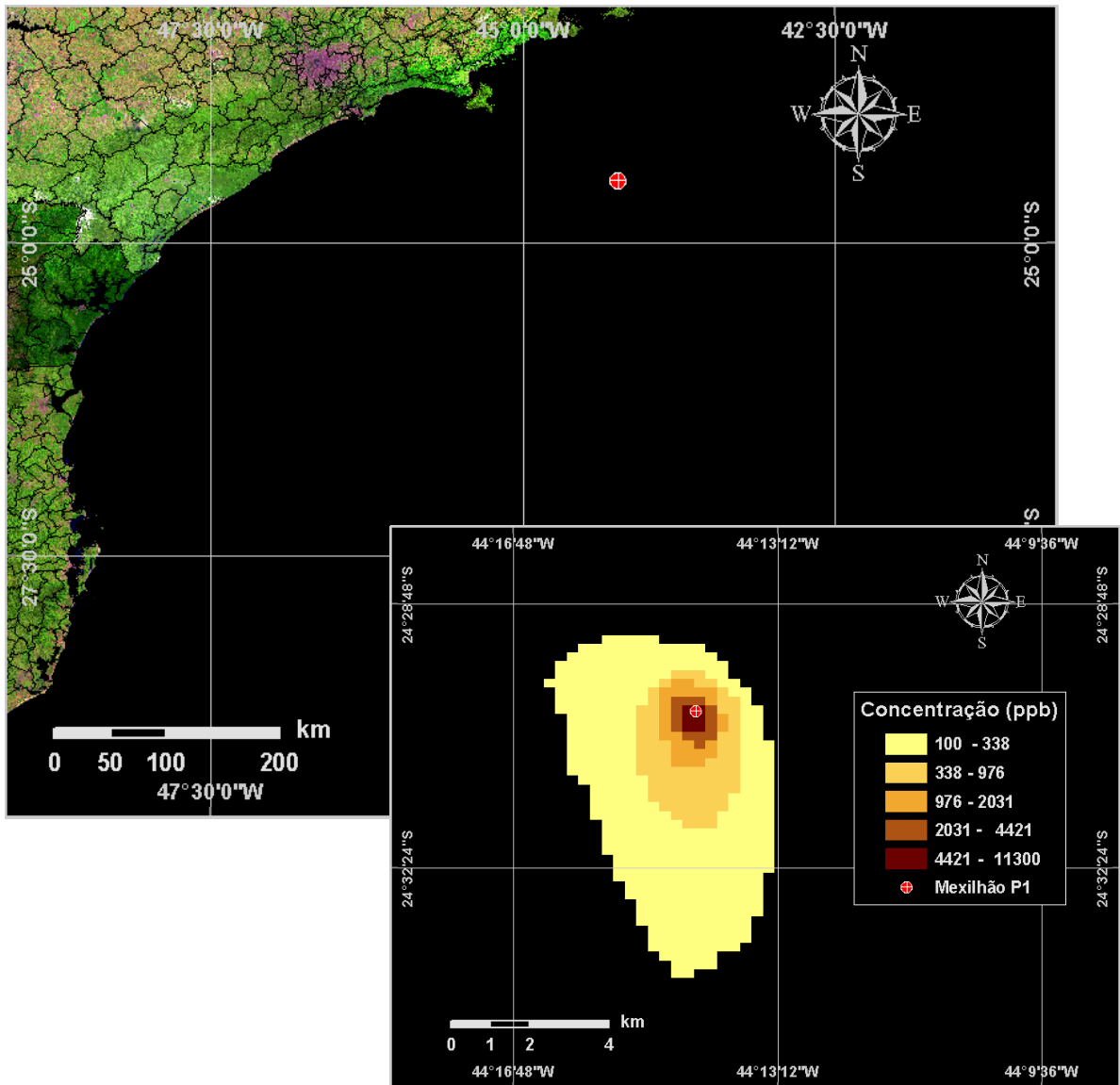


**Figura VI.1-30 - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 60 horas.**

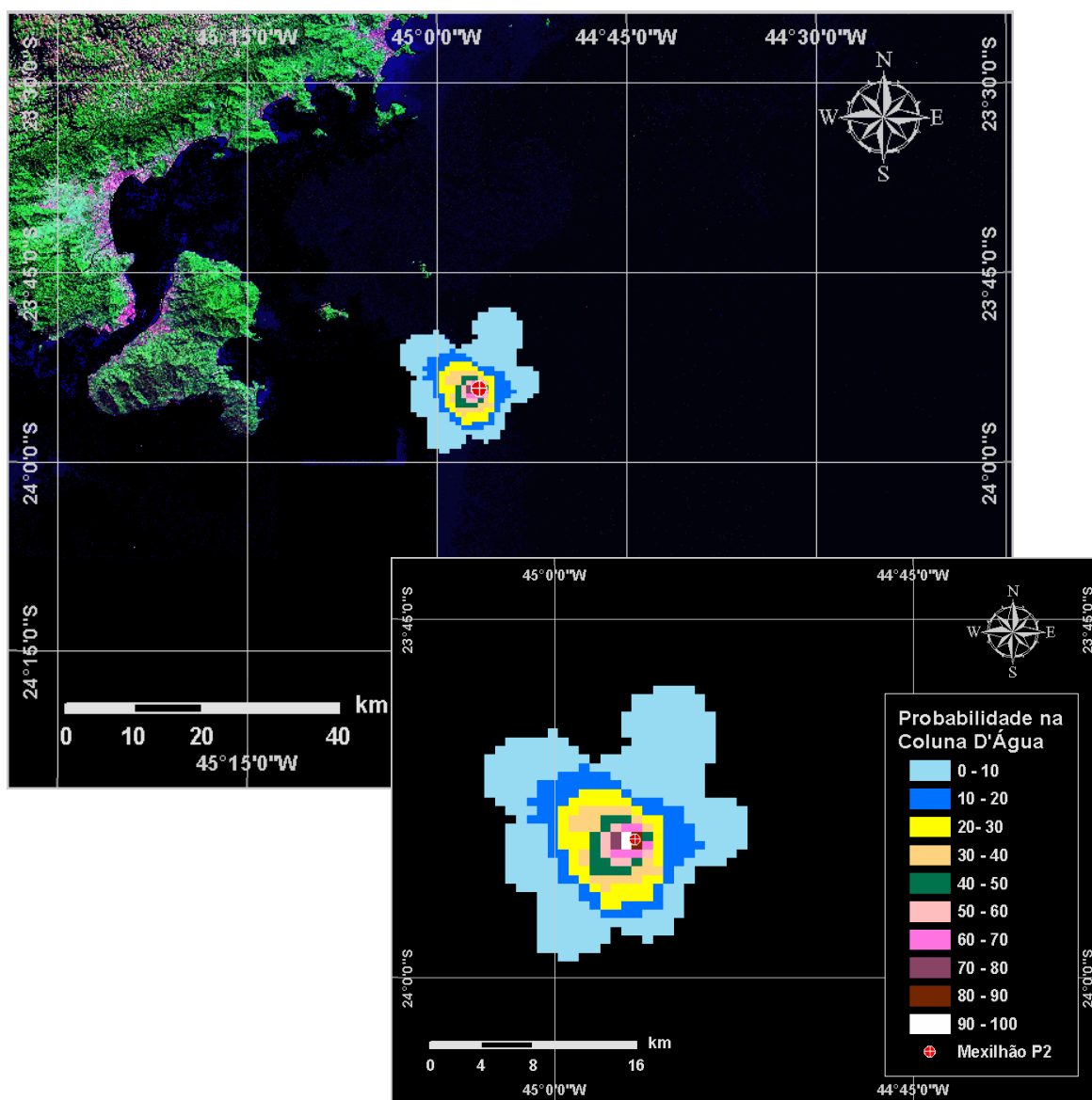


**Figura VI.1-31** - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_30DIAS. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 30 dias.



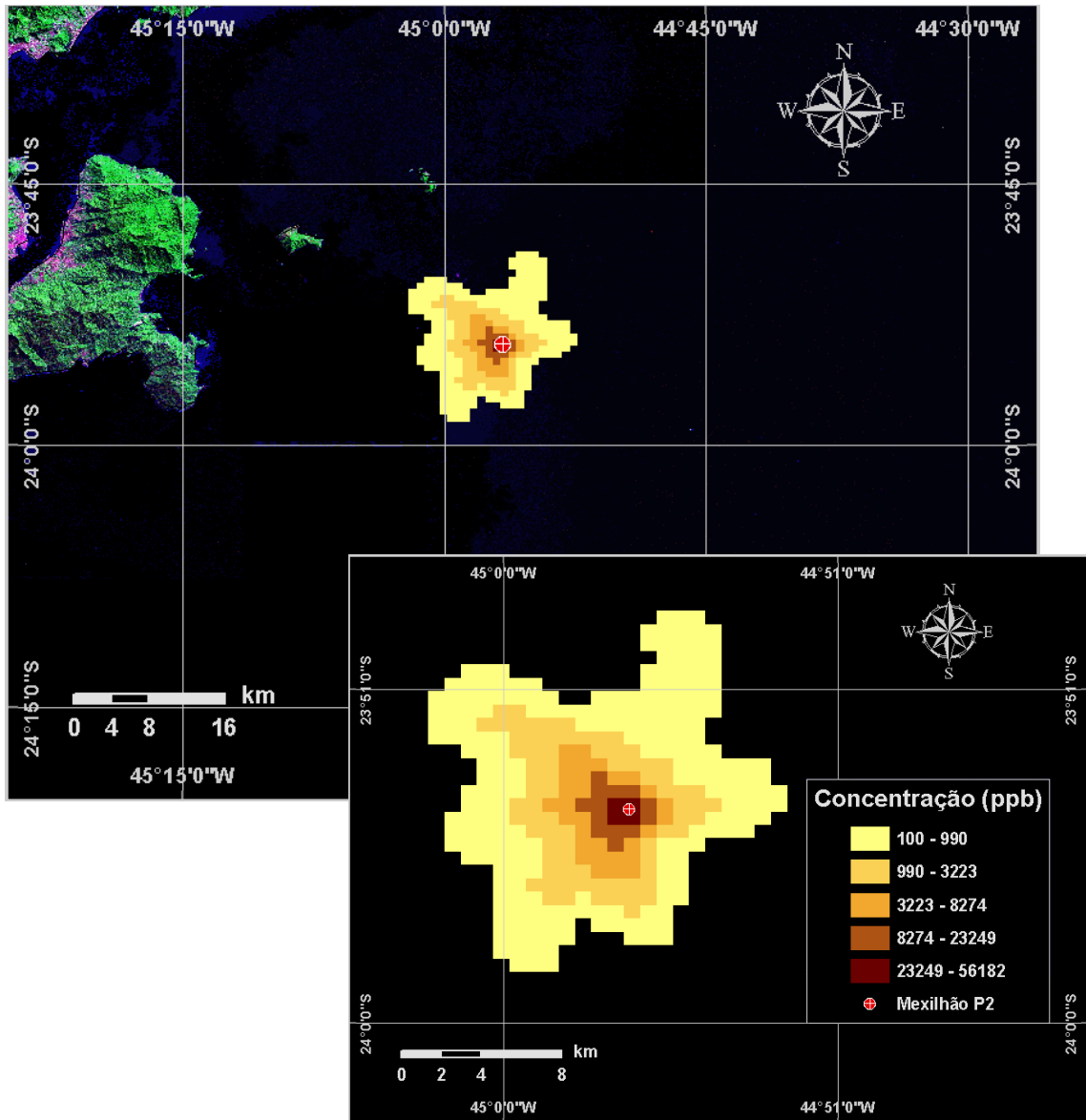


**Figura VI.1-32 - Cenário MEXILHAO\_P1\_INV\_PCASO\_30DIAS. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P1, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h após 30 dias.**

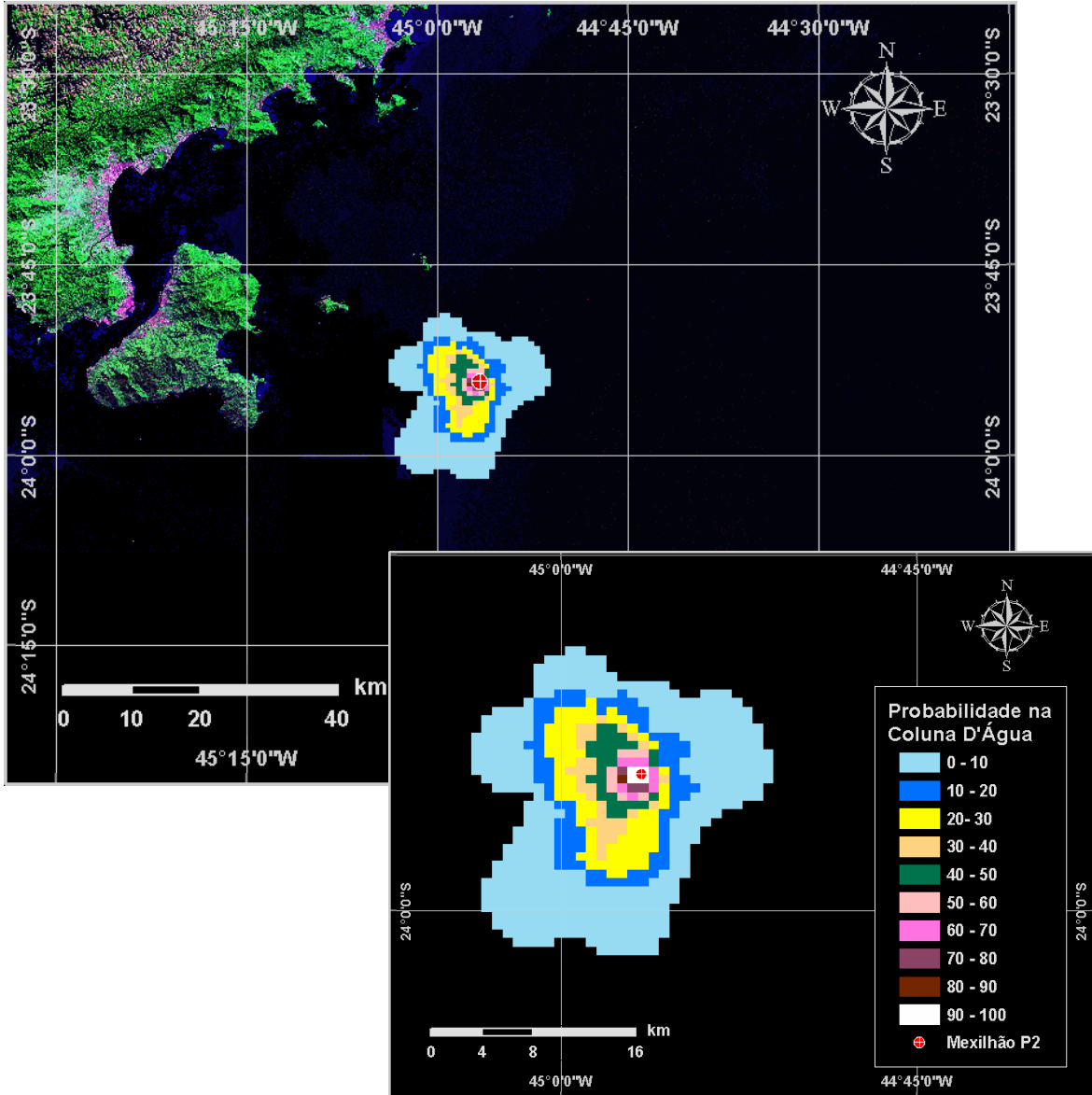


**Figura VI.1-33** - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 6 horas.

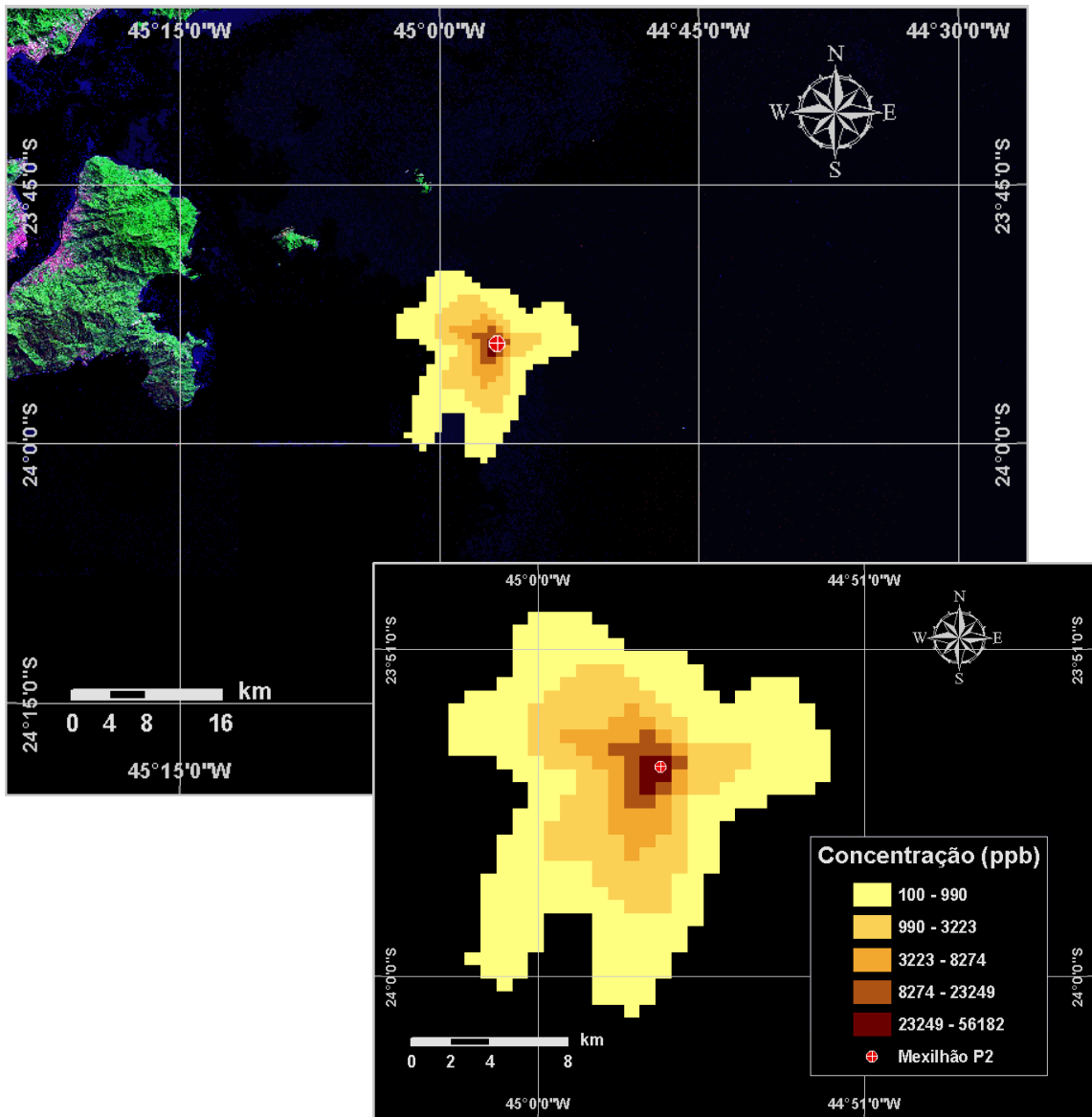




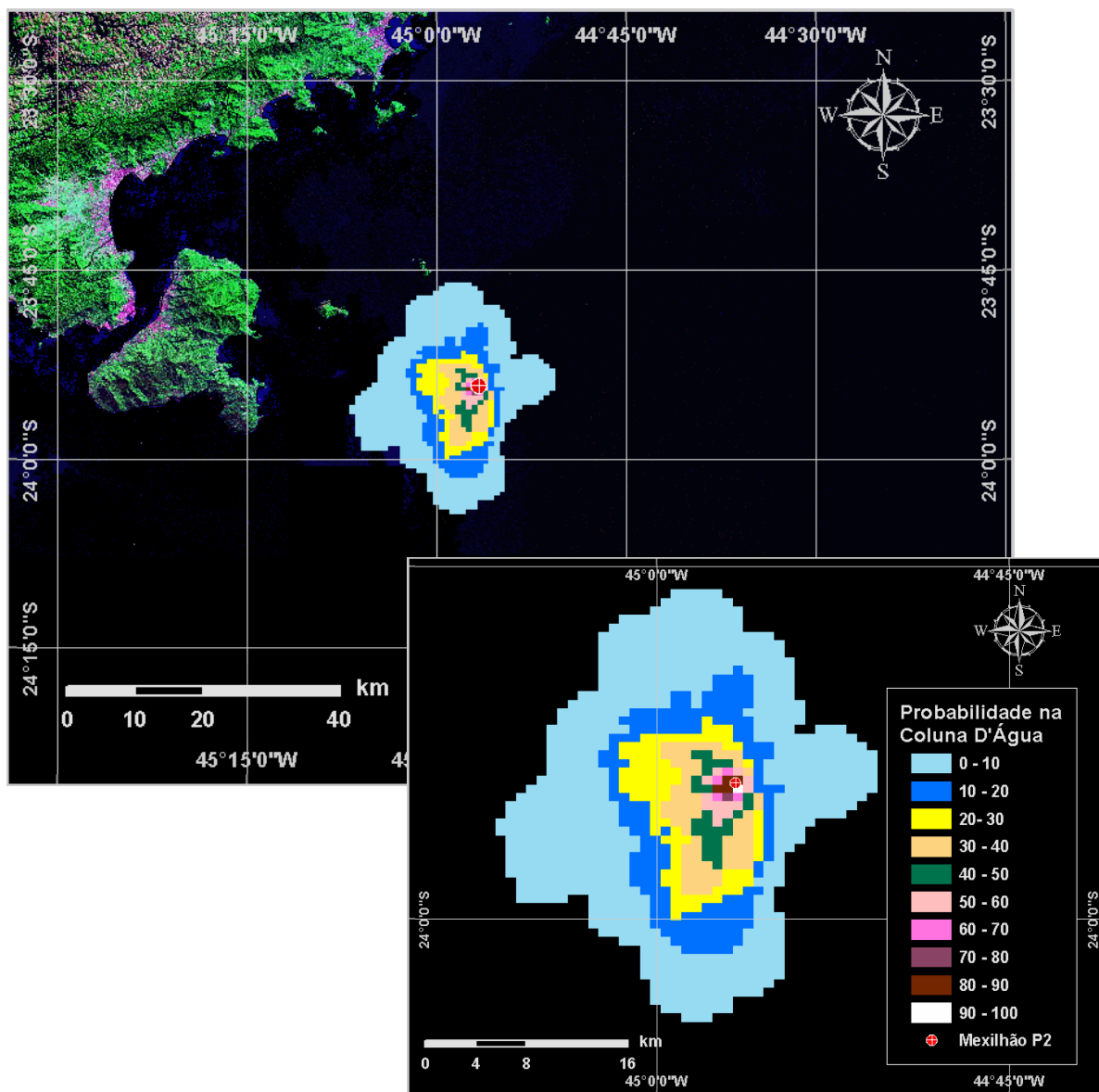
**Figura VI.1-34 - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 6 horas.**



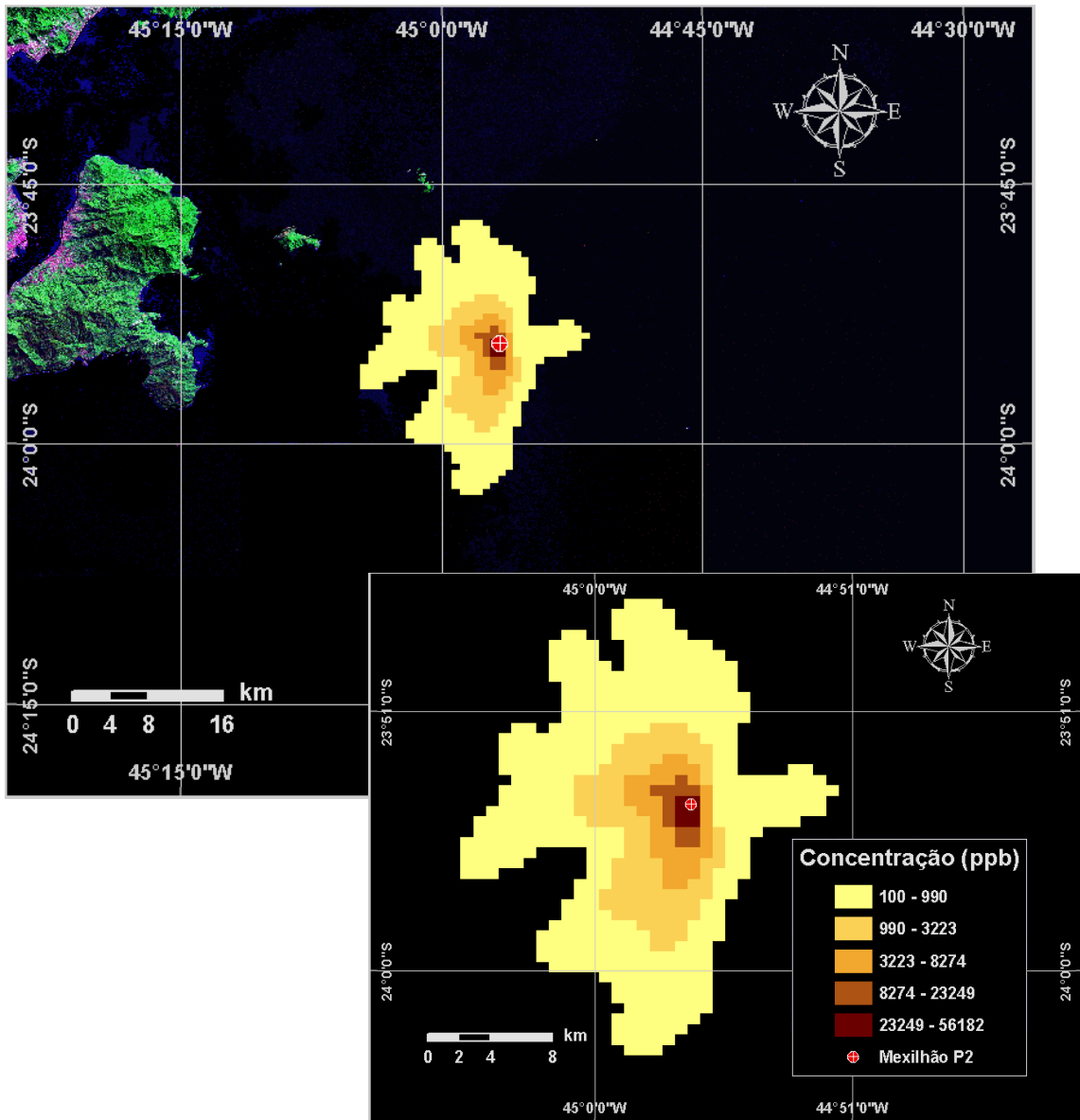
**Figura VI.1-35** - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de  $3.202 \text{ m}^3$  após 9 horas.



**Figura VI.1-36 - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 9 horas.**

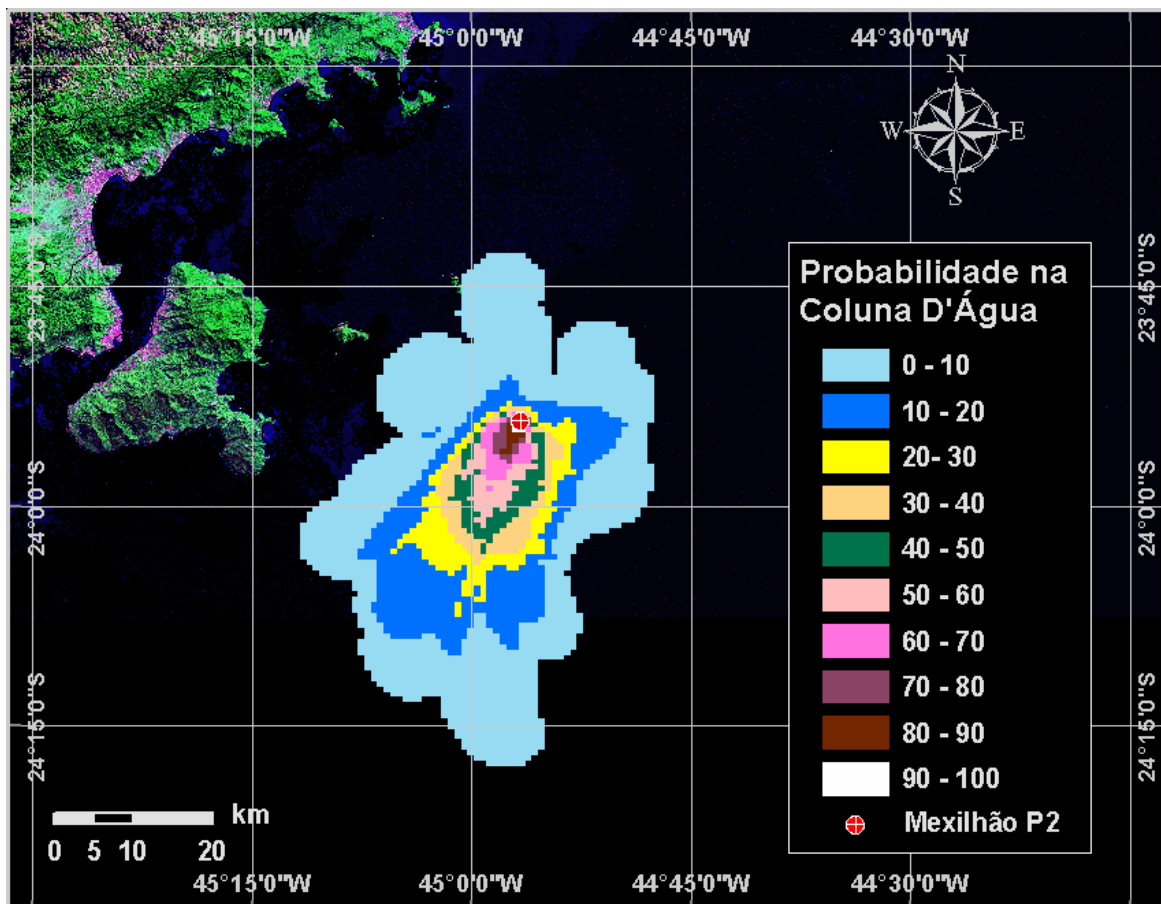


**Figura VI.1-37** - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 12 horas.

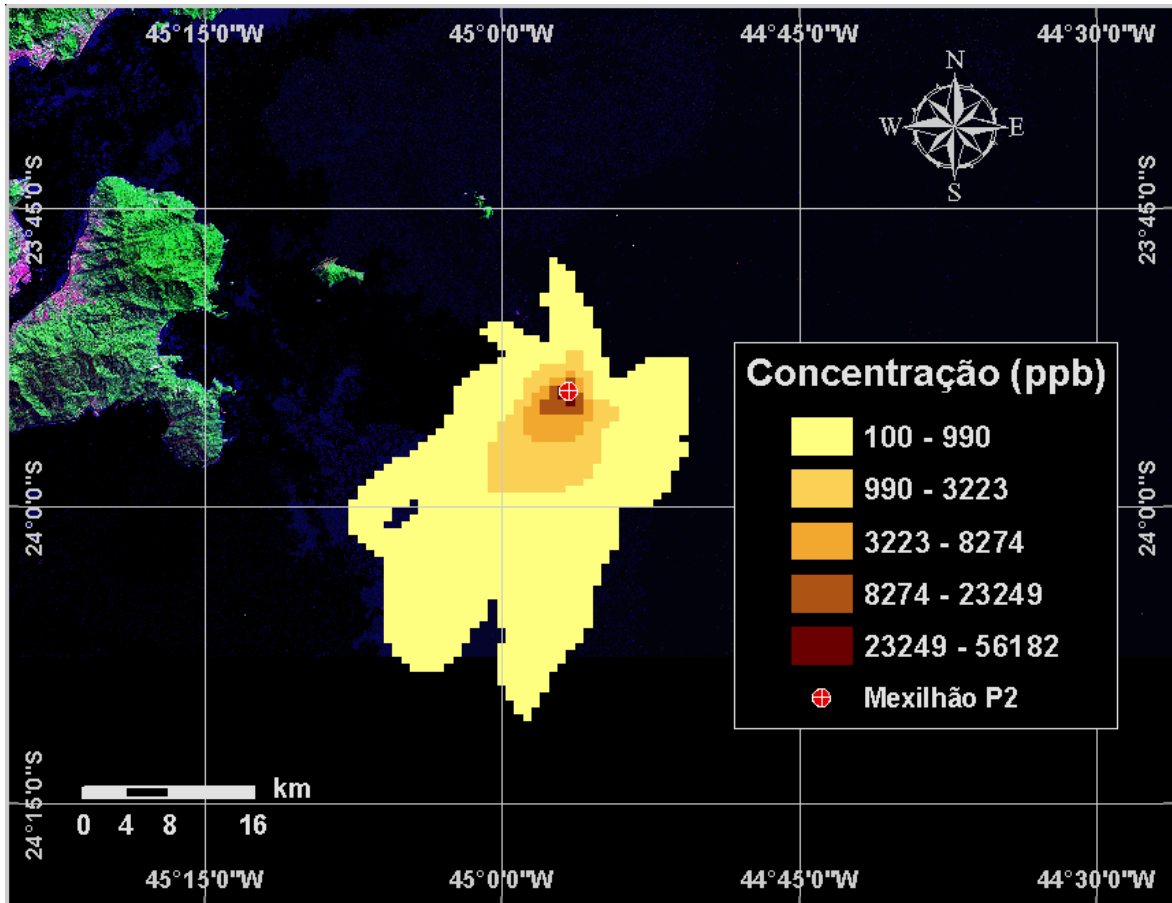


**Figura VI.1-38 - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 12 horas.**

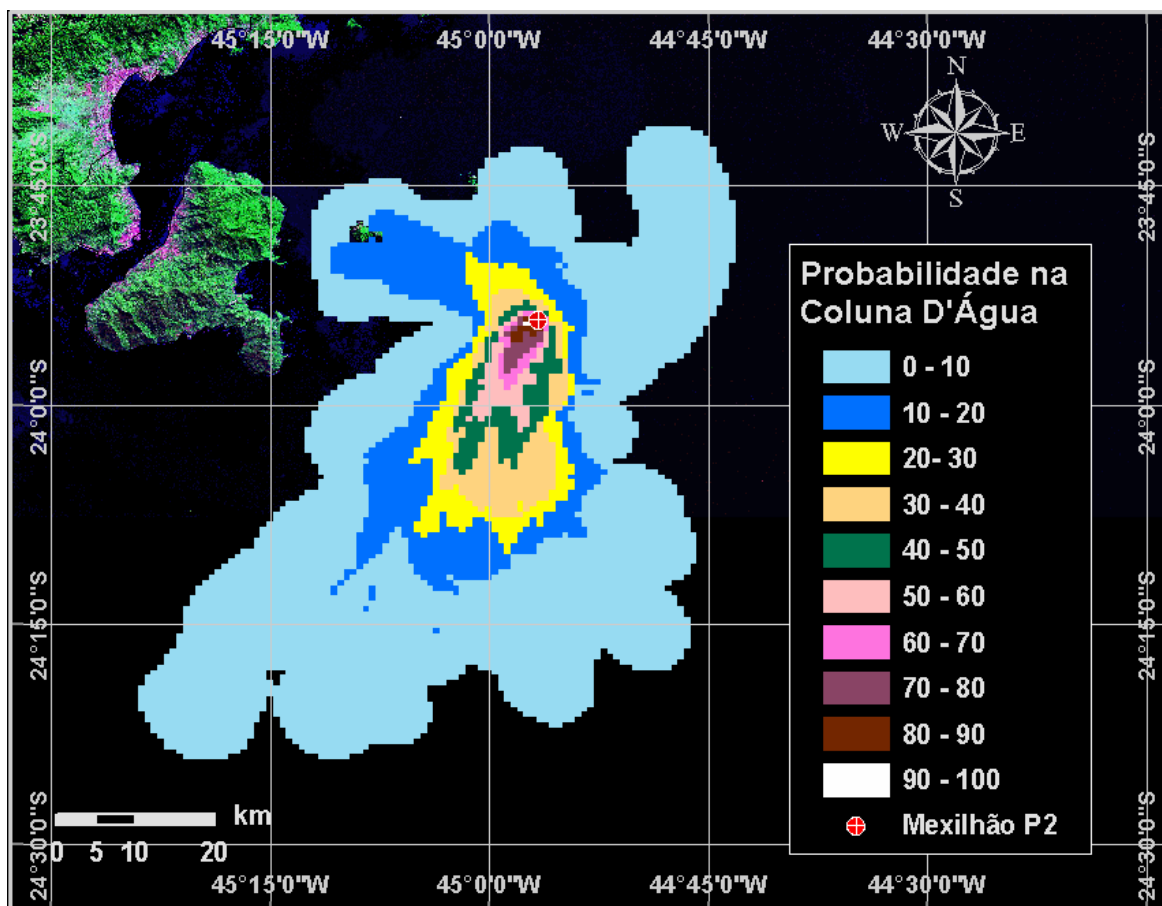




**Figura VI.1-39** - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 36 horas.

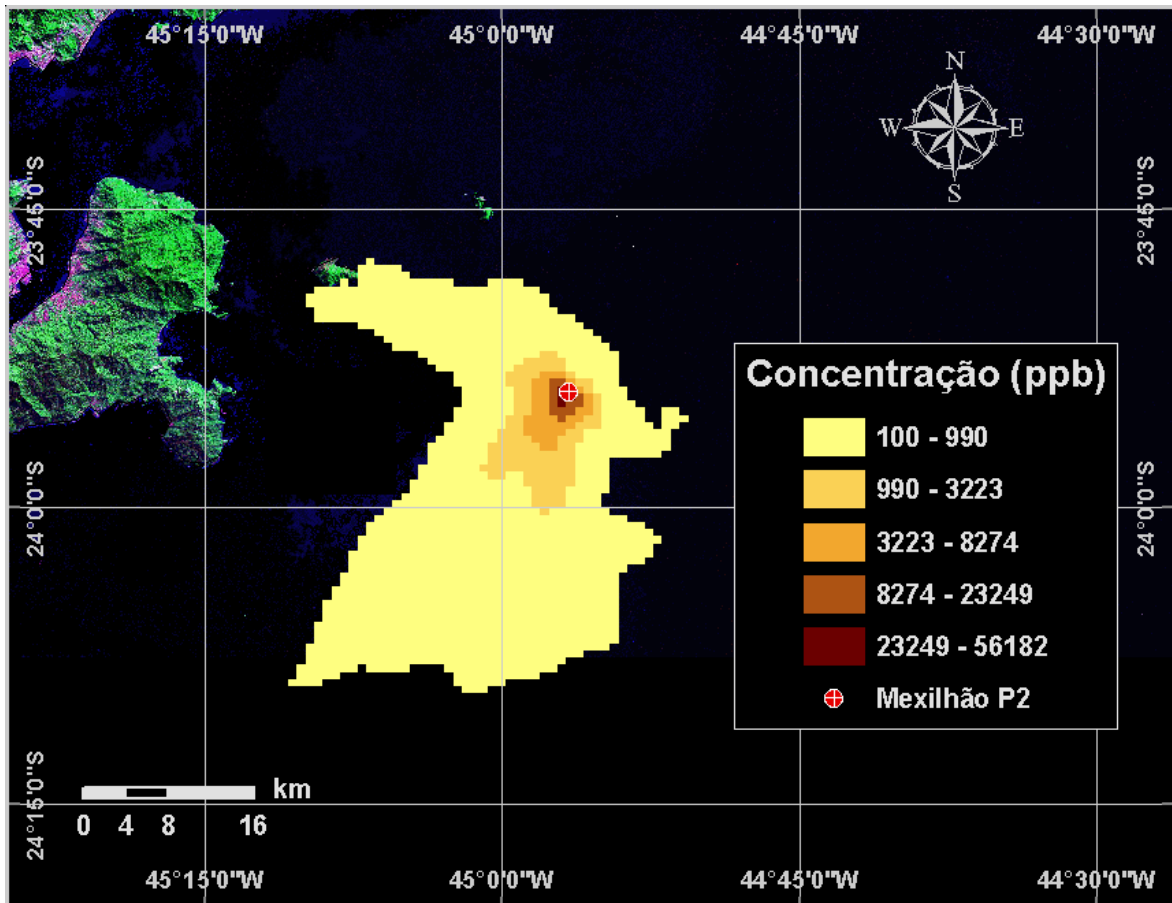


**Figura VI.1-40** - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 36 horas.

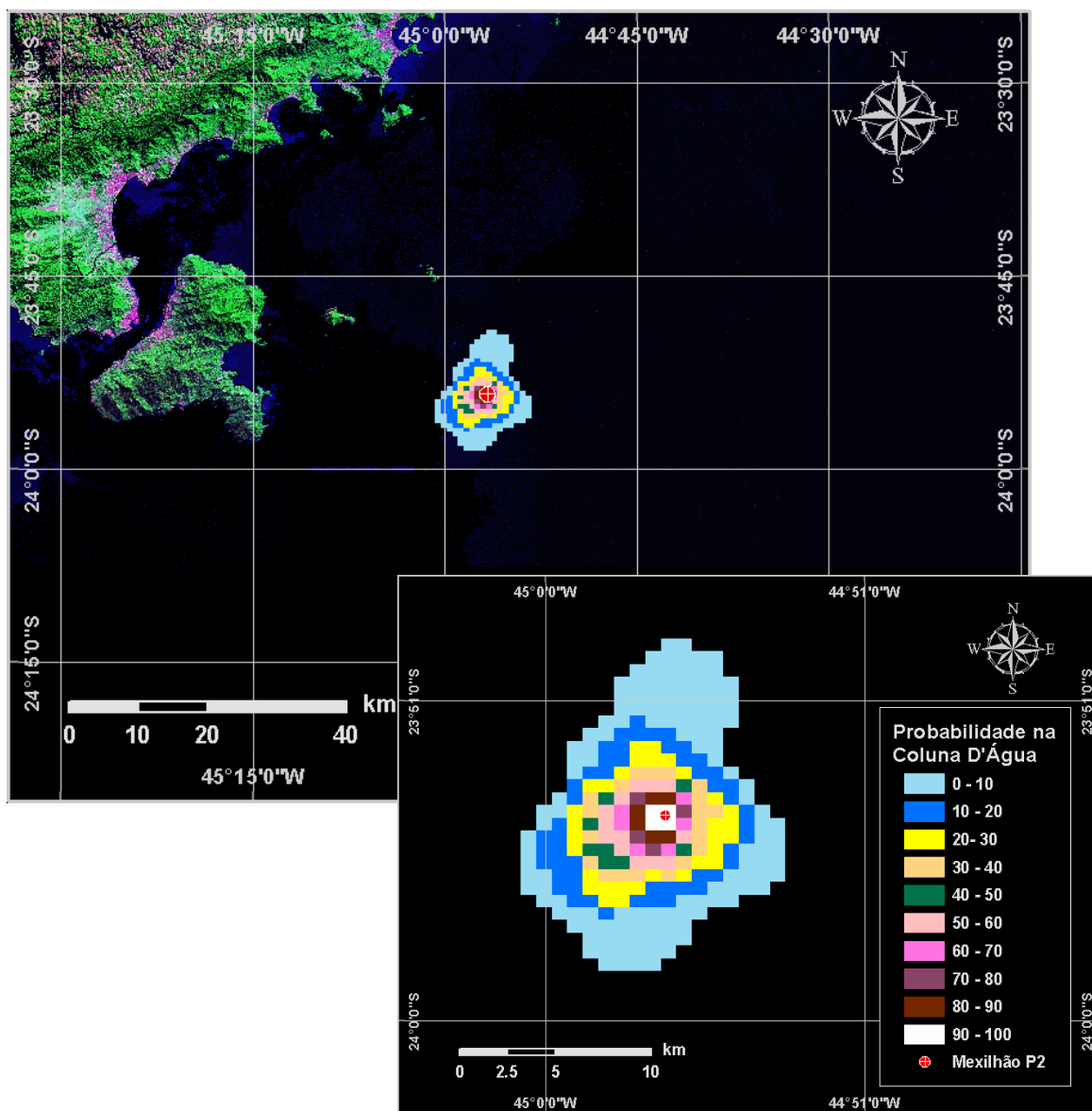


**Figura VI.1-41** - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 60 horas.

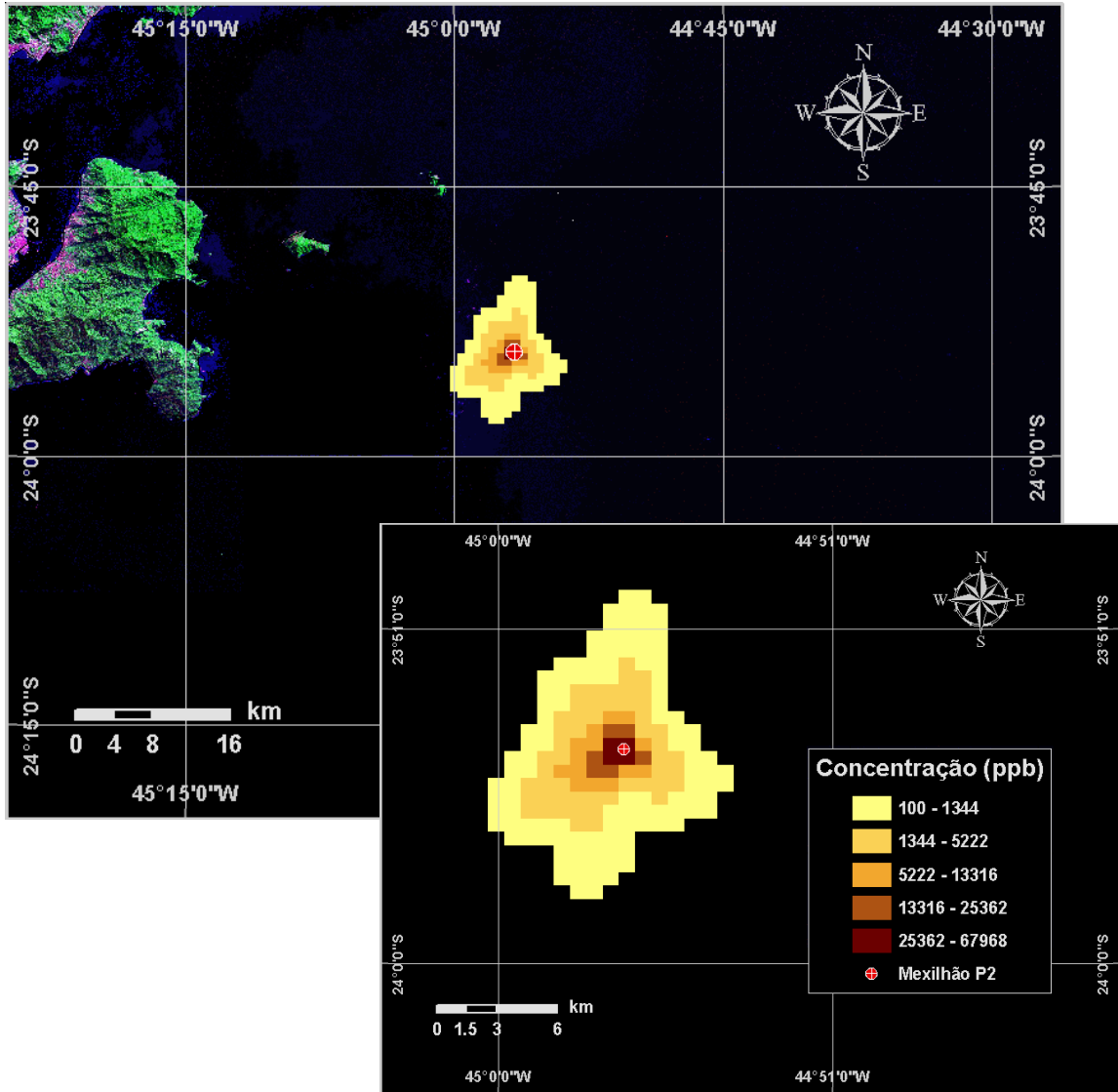




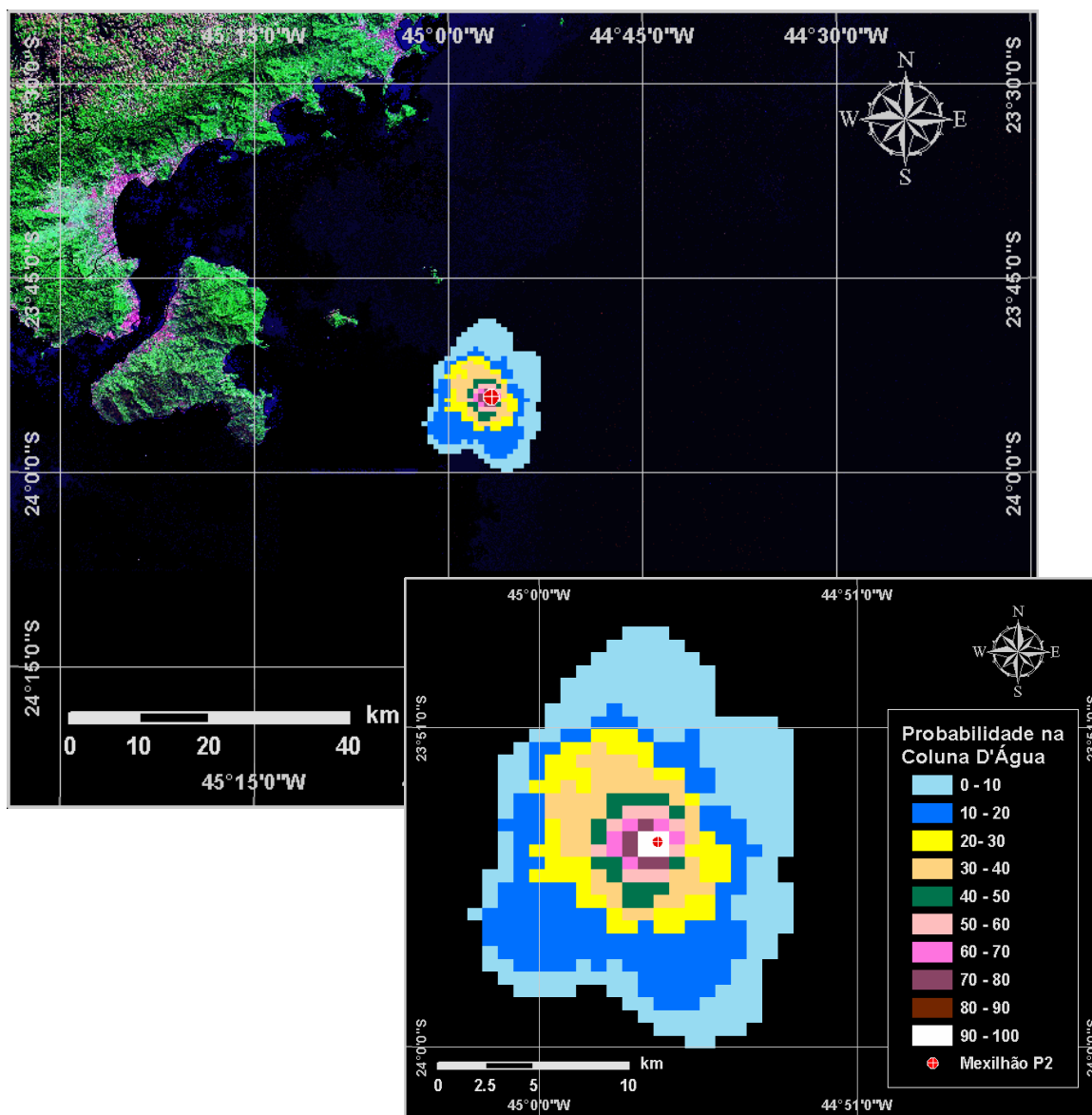
**Figura VI.1-42 - Cenário MEXILHAO\_P2\_VER\_PCASO\_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 60 horas.**



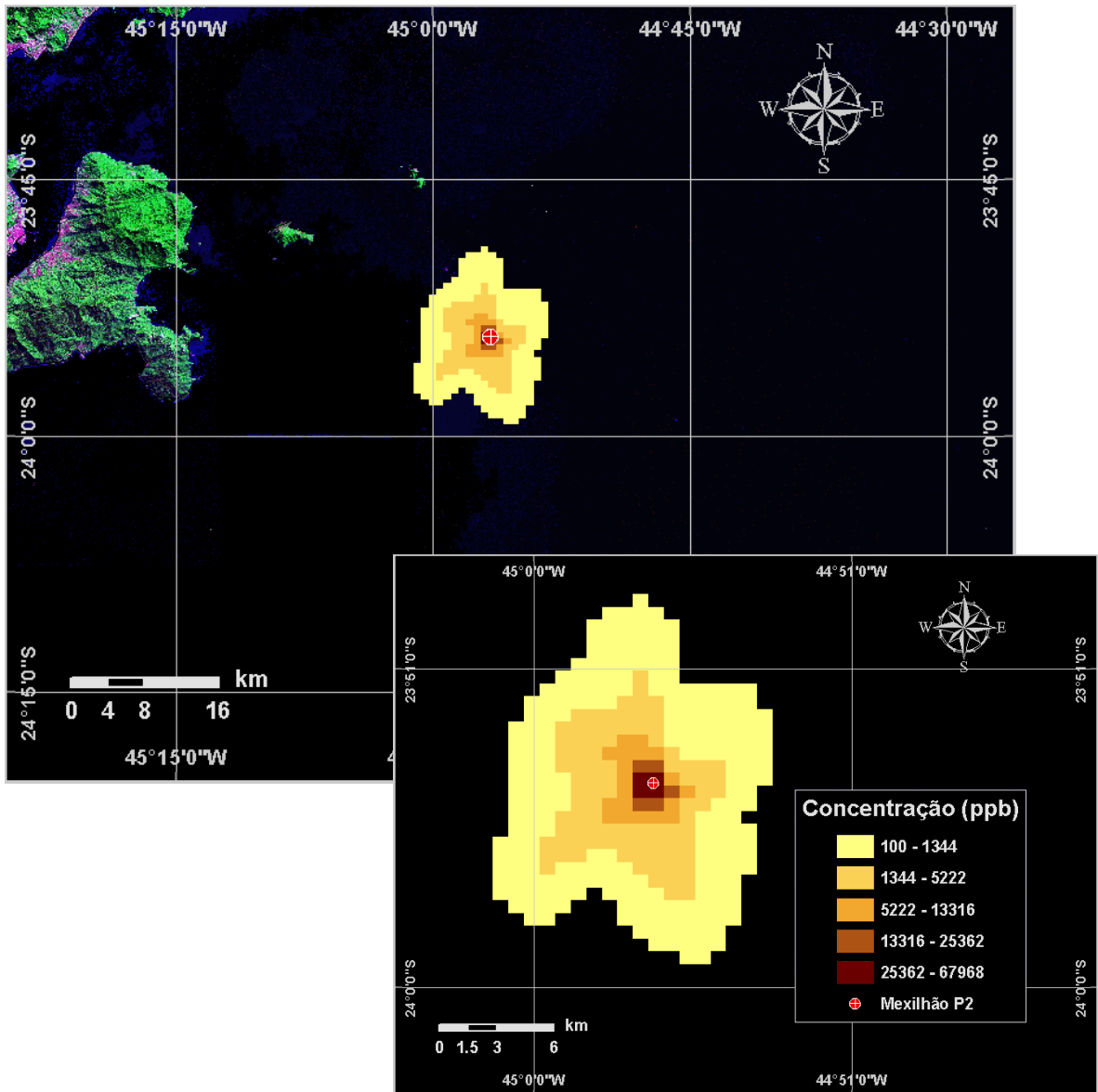
**Figura VI.1-43** - Cenário MEXI\_P2\_INV\_PIORCASO\_6H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um acidente ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 6 horas.



**Figura VI.1-44 - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_6H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 6 horas.**

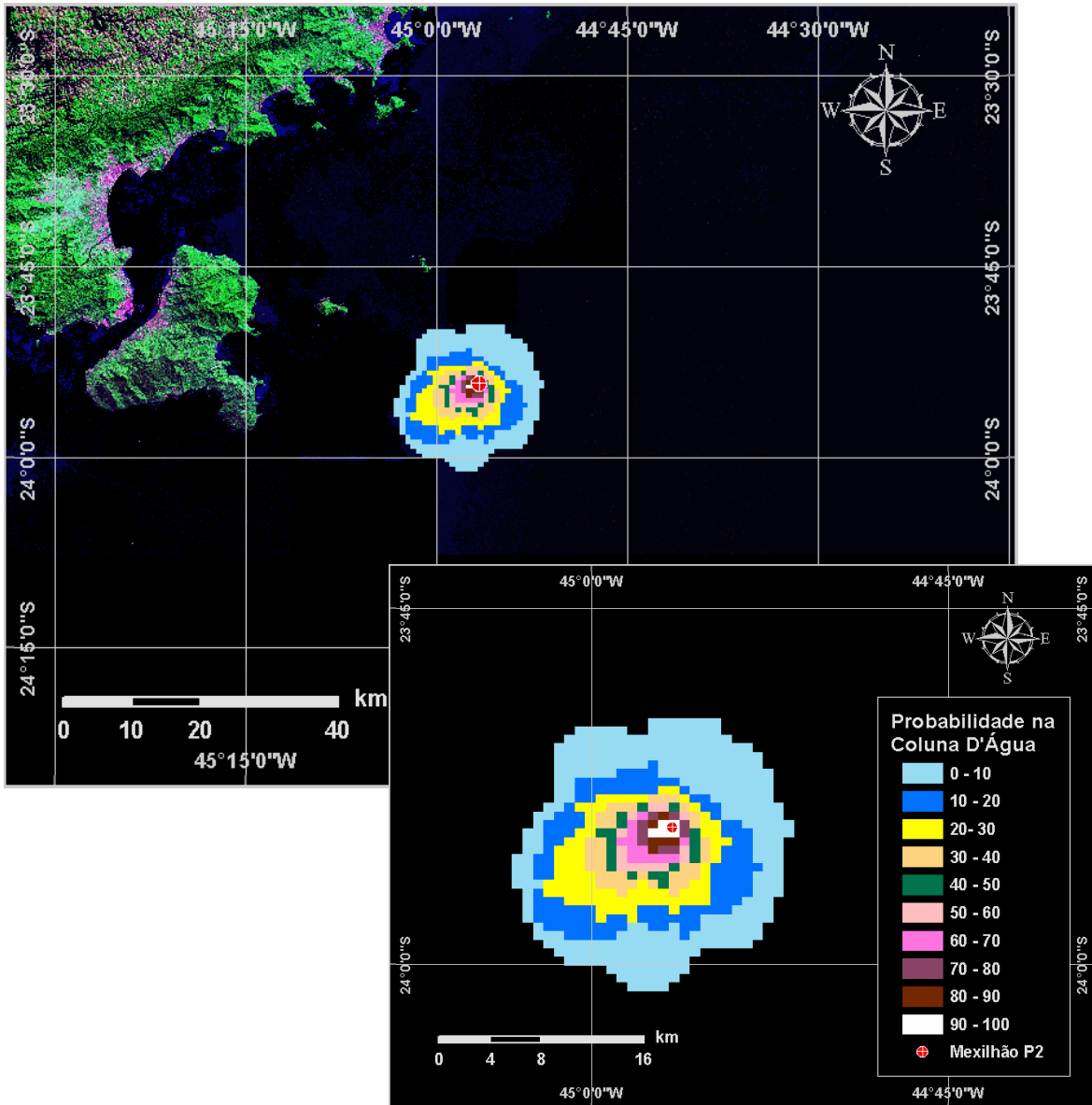


**Figura VI.1-45** - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_9H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 9 horas.

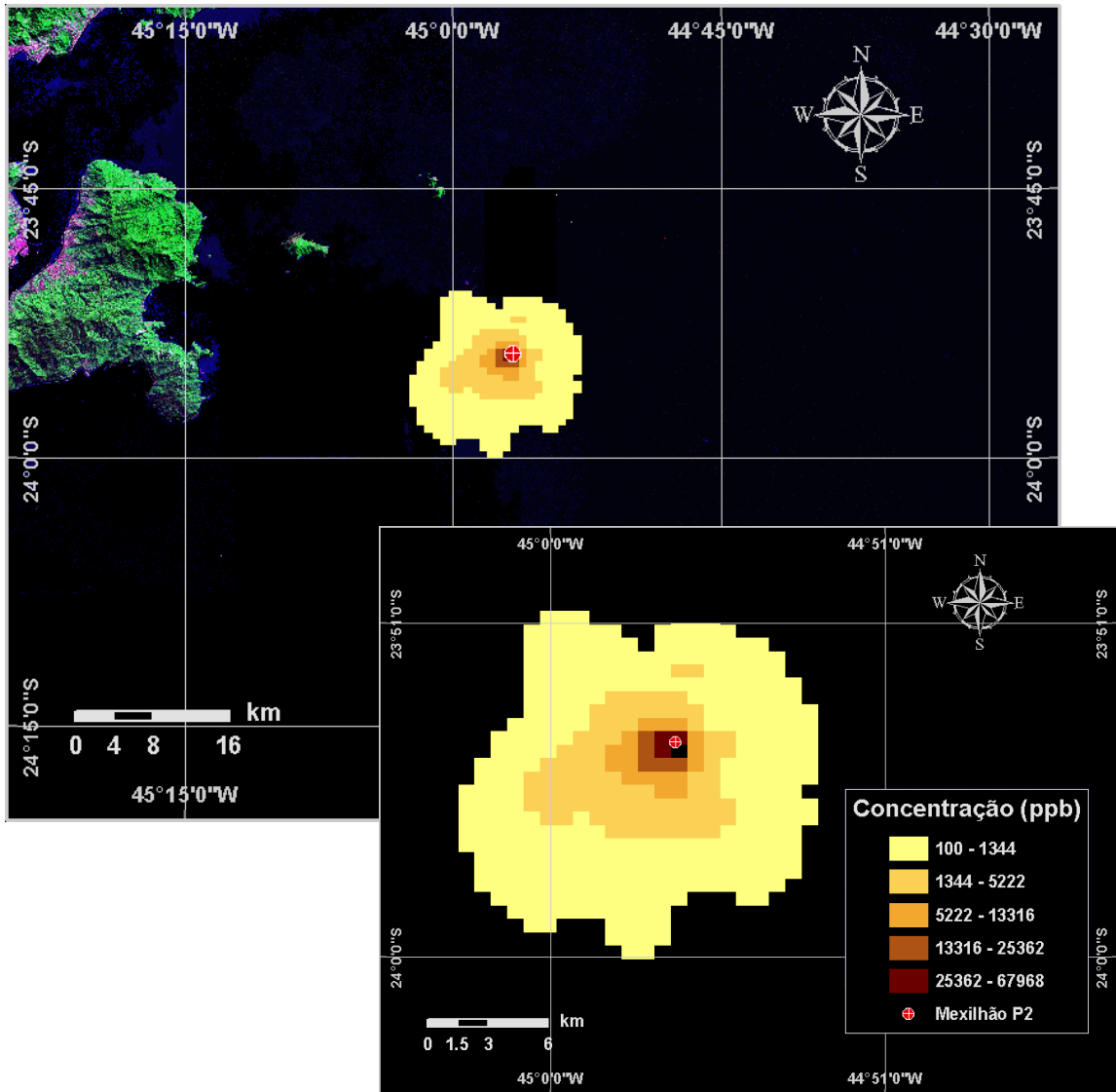


**Figura VI.1-46 - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_9H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 9 horas.**

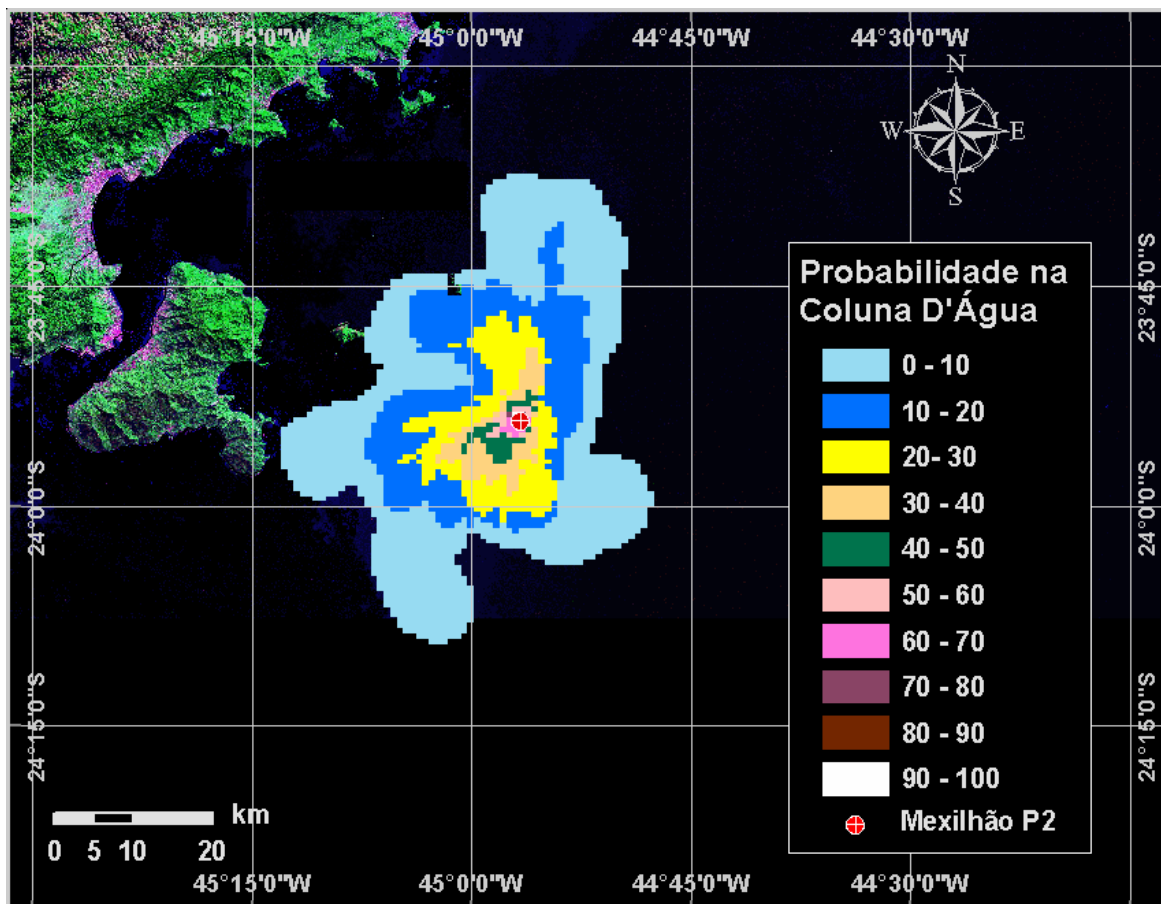




**Figura VI.1-47** - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_12H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 12 horas.

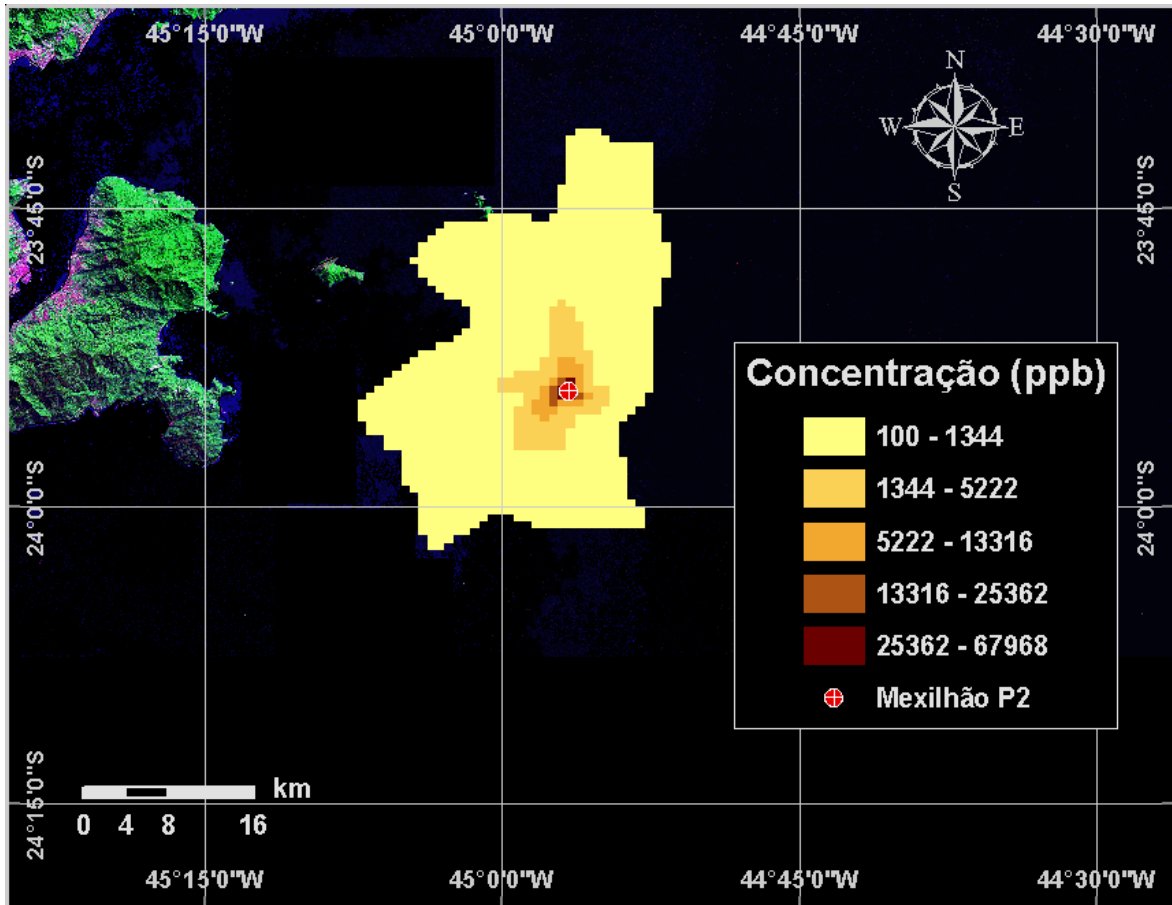


**Figura VI.1-48 - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_12H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 12 horas.**

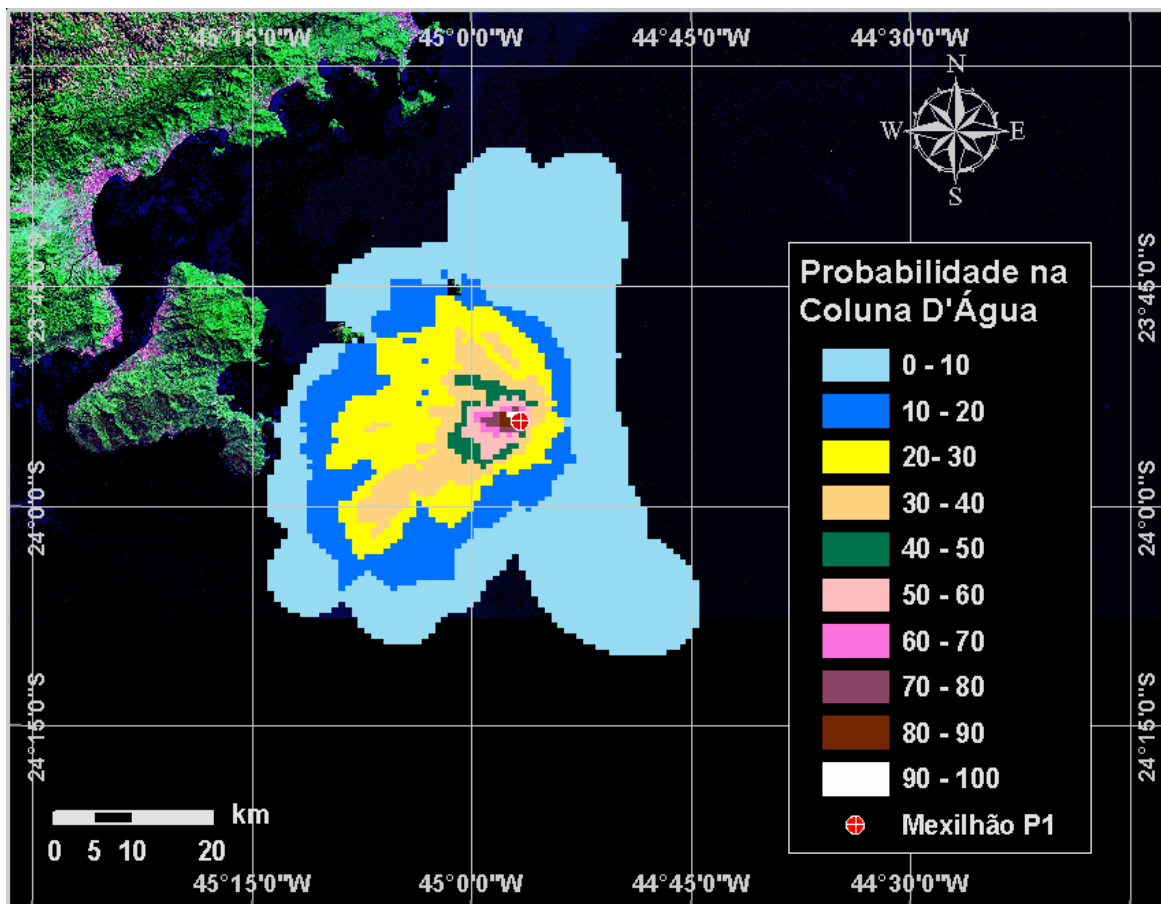


**Figura VI.1-49** - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_36H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 36 horas.

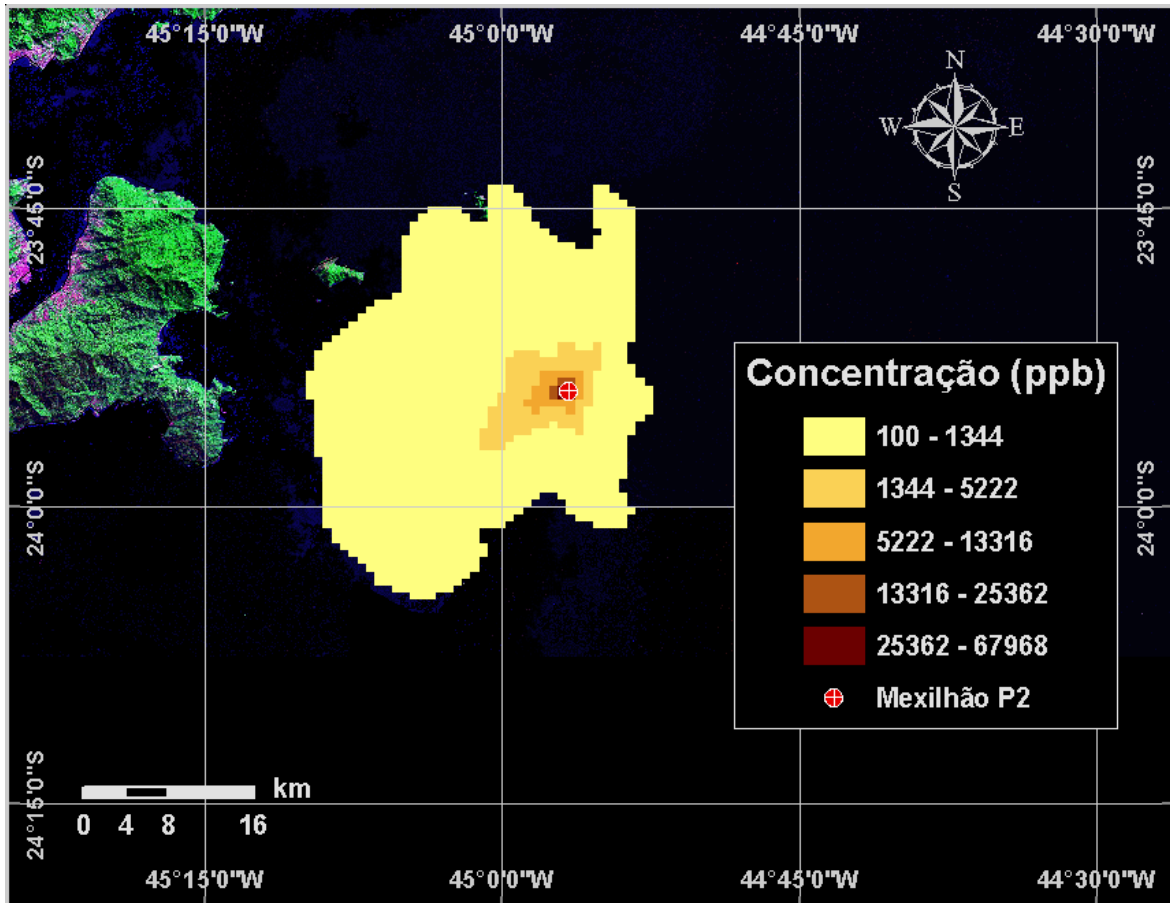




**Figura VI.1-50** - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_36H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 36 horas



**Figura VI.1-51** - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_60H. Contornos de probabilidade de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 60 horas.



**Figura VI.1-52** - Cenário MEXILHAO\_P2\_INV\_PCASO\_60H. Concentração de condensado na coluna d'água para um vazamento ocorrendo no ponto P2, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 3.202 m<sup>3</sup> após 60 horas.

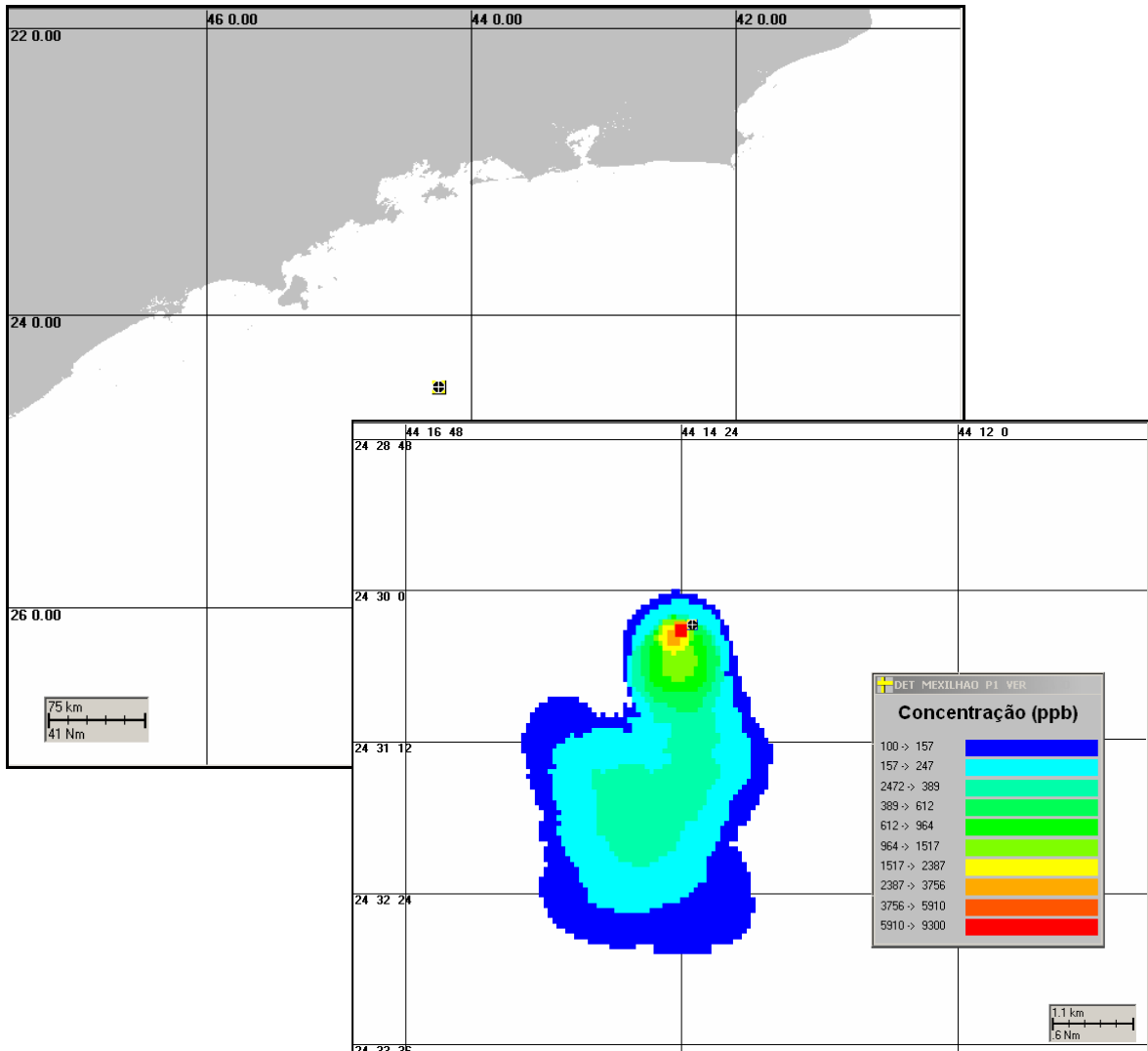
## VI.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS

A análise dos resultados das simulações probabilísticas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos de verão e inverno para os pontos P1 e P2. Para essas simulações foram considerados como mais críticos os cenários que apresentaram as maiores concentrações de condensado (dissolvido) na coluna d'água. Para o ponto P1 foram considerados vazamentos de 12.508,9 m<sup>3</sup> (17,37 m<sup>3</sup>/h), com derrame contínuo ao longo de 30 dias, e para o ponto P2 o vazamento instantâneo de 3.202 m<sup>3</sup> de condensado. A tabela VI.2-1 apresenta um resumo dos cenários críticos de verão e inverno obtidos para o condensado.

**Tabela VI.2-1 - Resumo dos cenários determinísticos críticos para os pontos P1 e P2, nos períodos de verão e de inverno para o campo de Mexilhão.**

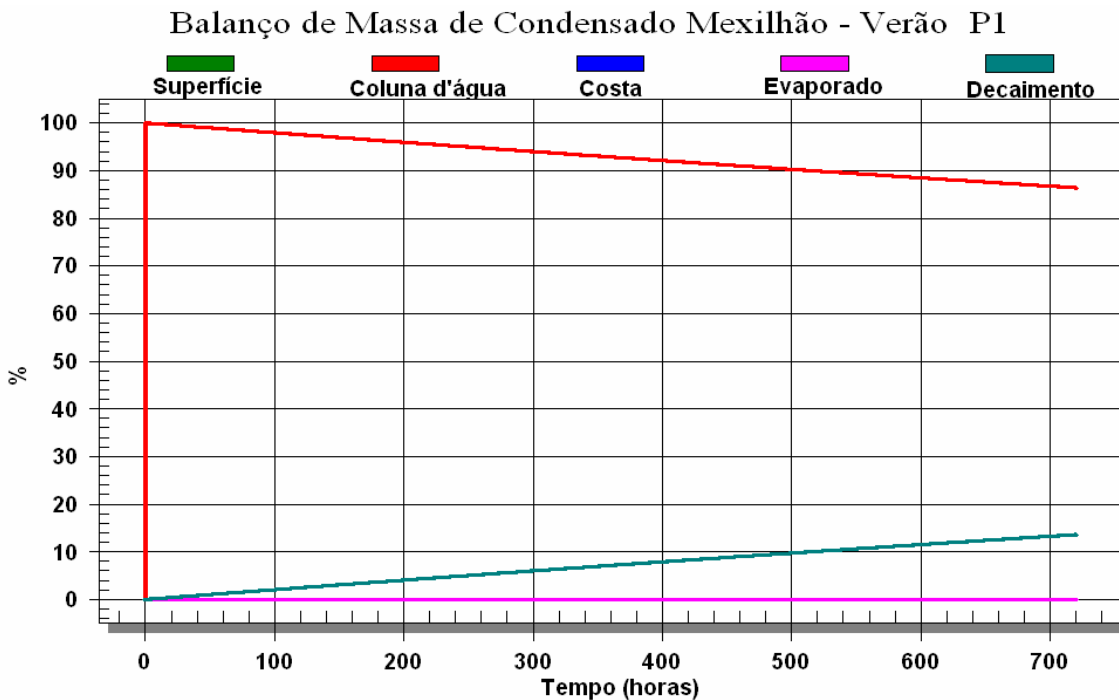
CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	CONCENTRAÇÃO MÁXIMA (ppb)
MEXILHAO_COND_P1_VER_12.508_30DIAS	03/01/1992 as 03:00 h	9.300
MEXILHAO_COND_P1_INV_12.508_30DIAS	25/06/1992 as 06:00 h	11.300
MEXILHAO_COND_P2_VER_60H	24/01/1992 as 03:00 h	200.000
MEXILHAO_COND_P2_INV_60H	07/08/1992 as 12:00 h	200.000

A figura VI.2-1 apresenta os contornos de concentração na simulação determinística de verão para o condensado derramado a partir do *blowout* no ponto P1 (Campo de Mexilhão) no instante de maior concentração na coluna d'água (9 horas após o início da simulação).



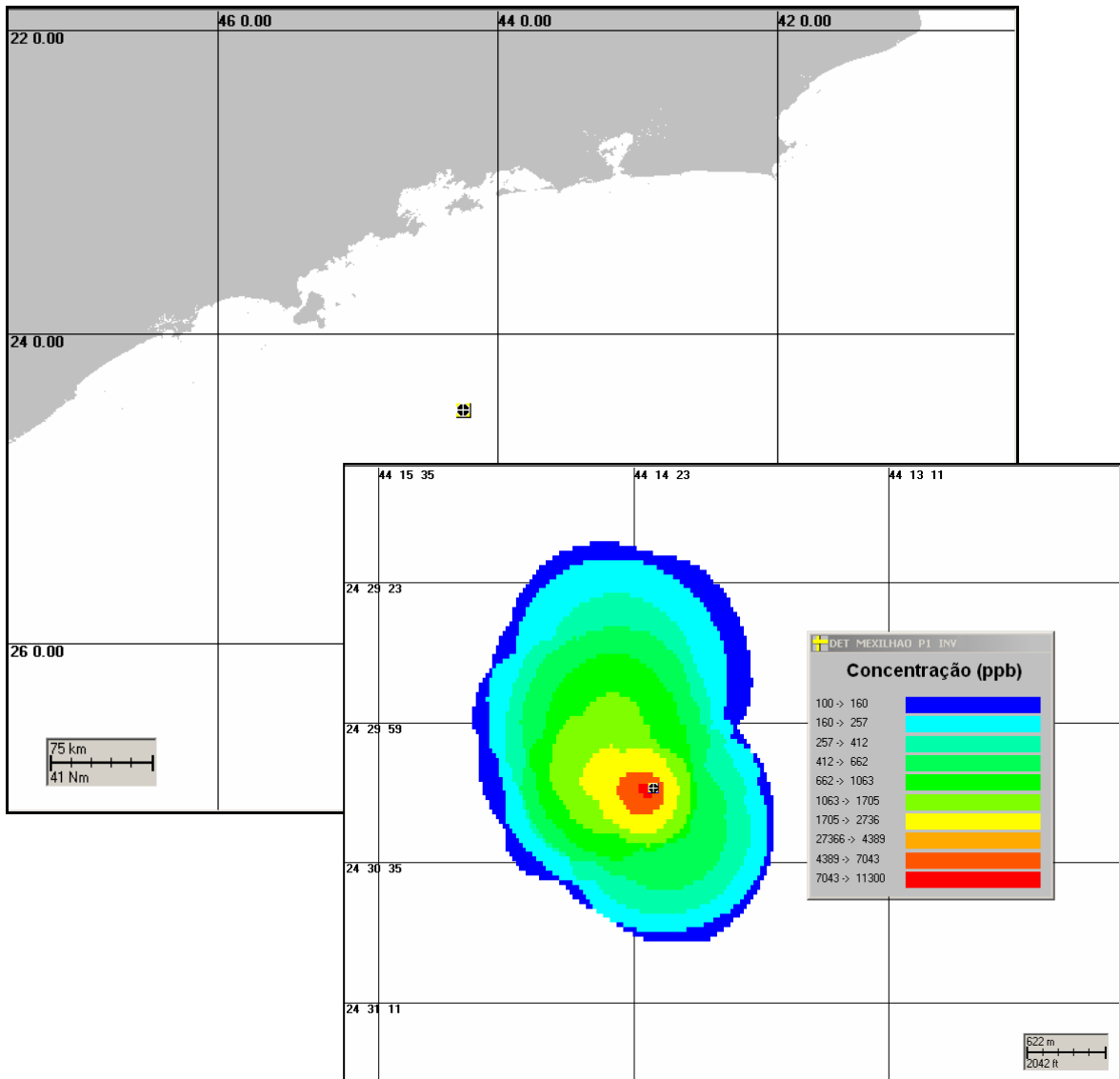
**Figura VI.2-1** - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P1 no período de verão (janeiro a março), com derrame de 17,37 m<sup>3</sup>/h, após 9 horas.

A figura VI.2-2 apresenta um gráfico com o balanço de massa (condensado na superfície, na costa, evaporado, na coluna d'água e o decaimento) para a simulação determinística crítica do período de verão. Observa-se que todo o condensado permanece dissolvido na coluna d'água, sendo que apenas cerca de 15% da massa de condensado é reduzida pelos processos de decaimento.



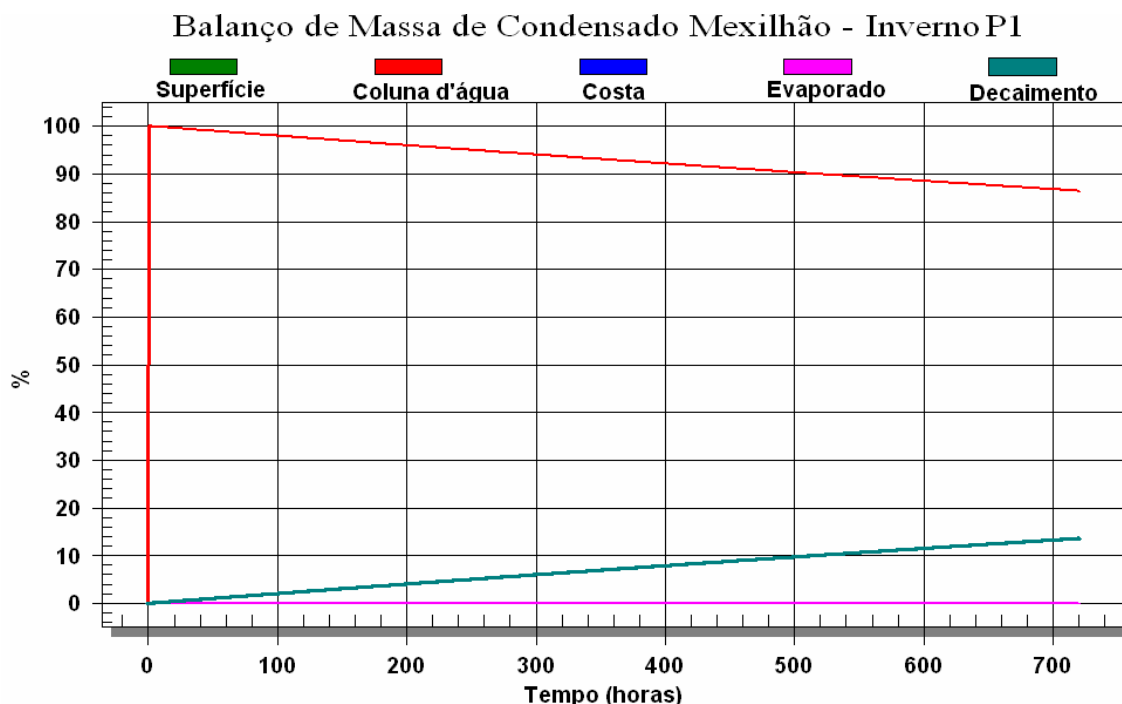
**Figura VI.2-2 - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P1, no verão (janeiro a março).**

A figura VI.2-3 apresenta os contornos de concentração na simulação determinística de inverno para o condensado derramado a partir do *blowout* no ponto P1 (Campo de Mexilhão) no instante de maior concentração na coluna d'água (5 horas após o início da simulação).



**Figura VI.2-3 - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P1, no período de inverno (junho a agosto), após 5 horas.**

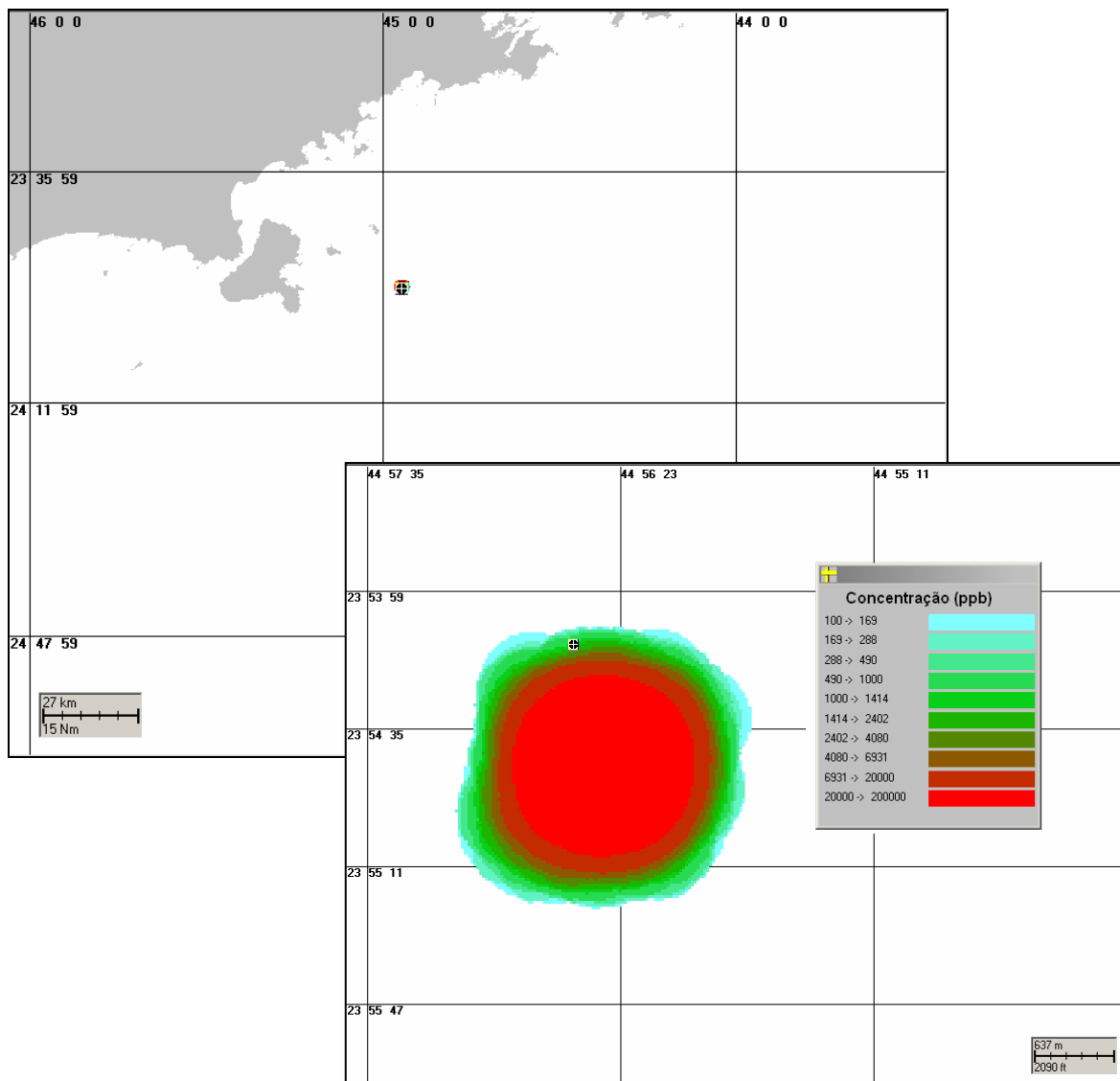
A figura VI.2-4 apresenta um gráfico com o balanço de massa (condensado na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação determinística crítica no período de inverno. De forma similar ao observado no cenário de verão, todo o condensado permanece dissolvido na coluna d'água, sendo apenas 15% da massa de condensado reduzida pelos processos de decaimento.



**Figura VI.2-4 - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P1, no inverno (junho a agosto).**

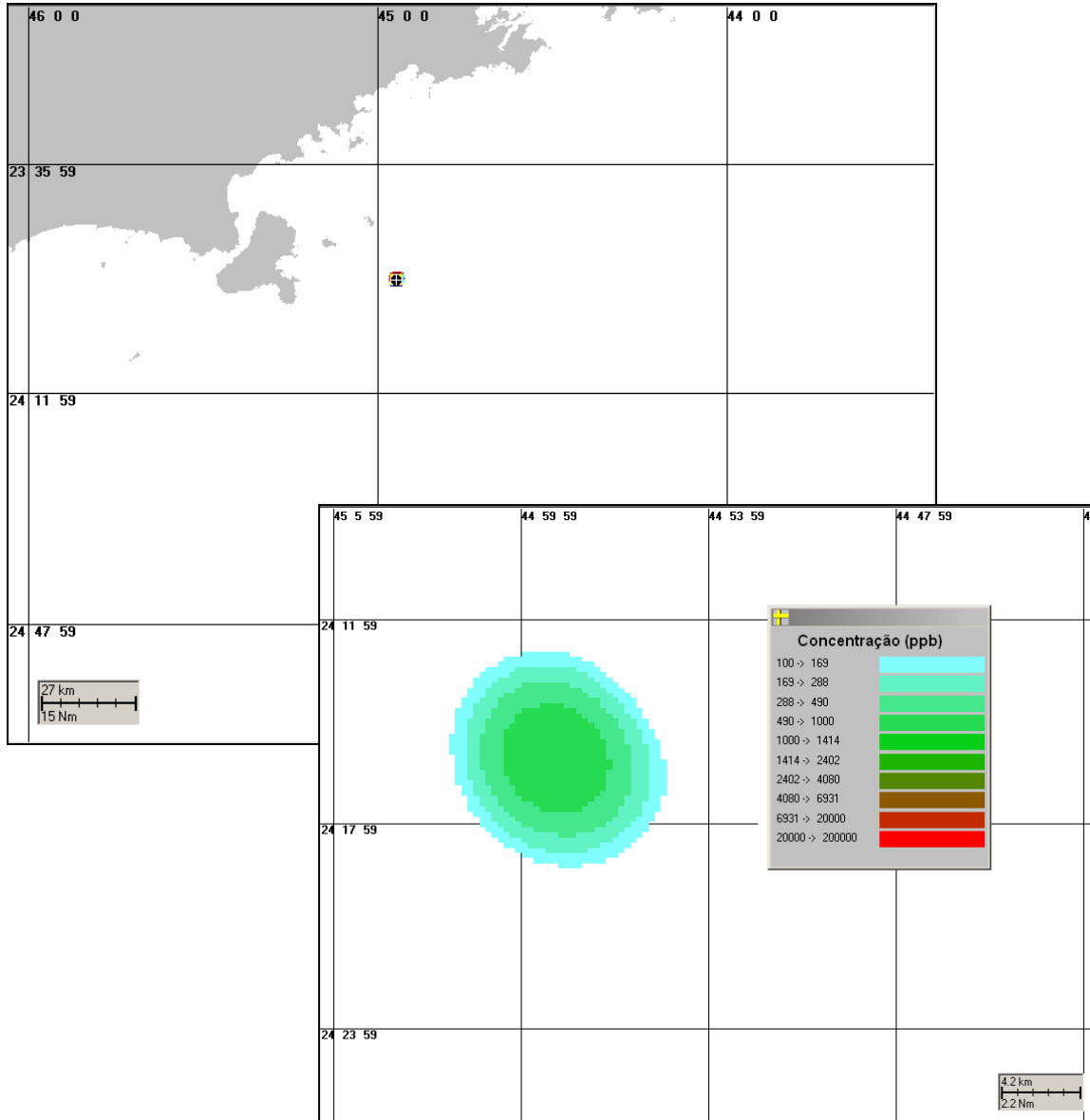
A figura VI.2-5 apresenta os contornos de concentração na simulação determinística de verão para o condensado derramado a partir do rompimento do duto no ponto P2 (Campo de Mexilhão) no instante de maior concentração na coluna d'água, 1 hora após o início da simulação.





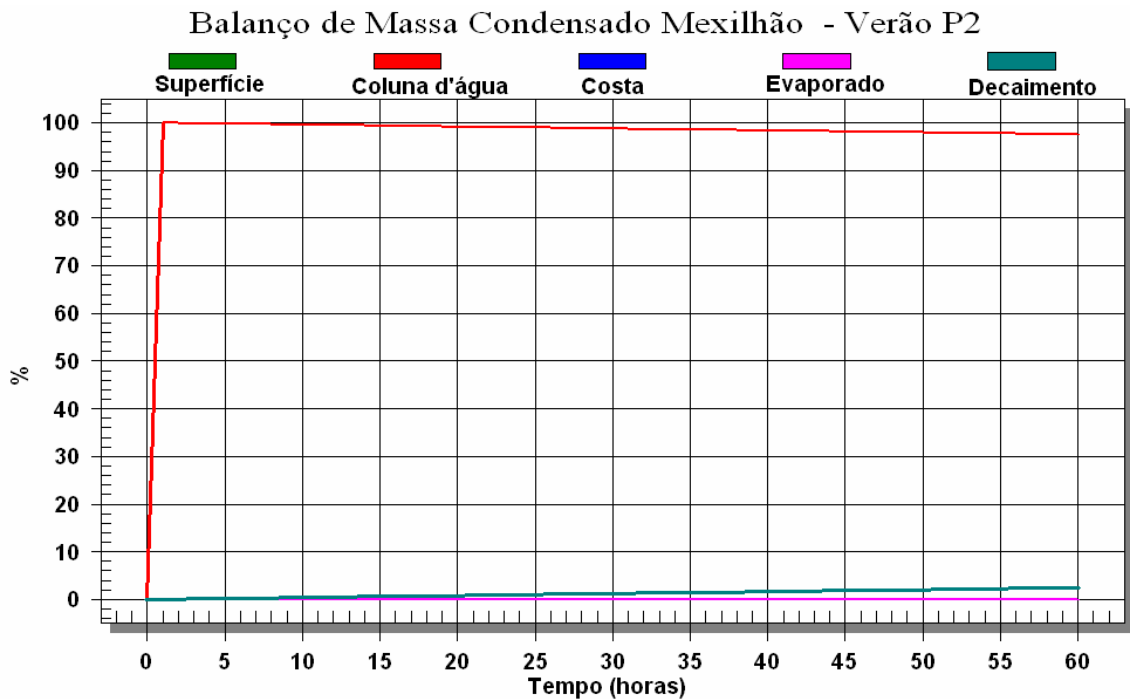
**Figura VI.2-5** - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2 no período de verão (janeiro a março), com derrame de  $3.202 \text{ m}^3$ , após 1 hora.

A figura VI.2-6 apresenta os contornos de concentração na simulação determinística de verão para o condensado derramado a partir do rompimento do duto no ponto P2 (Campo de Mexilhão) no instante final da simulação após 60h.



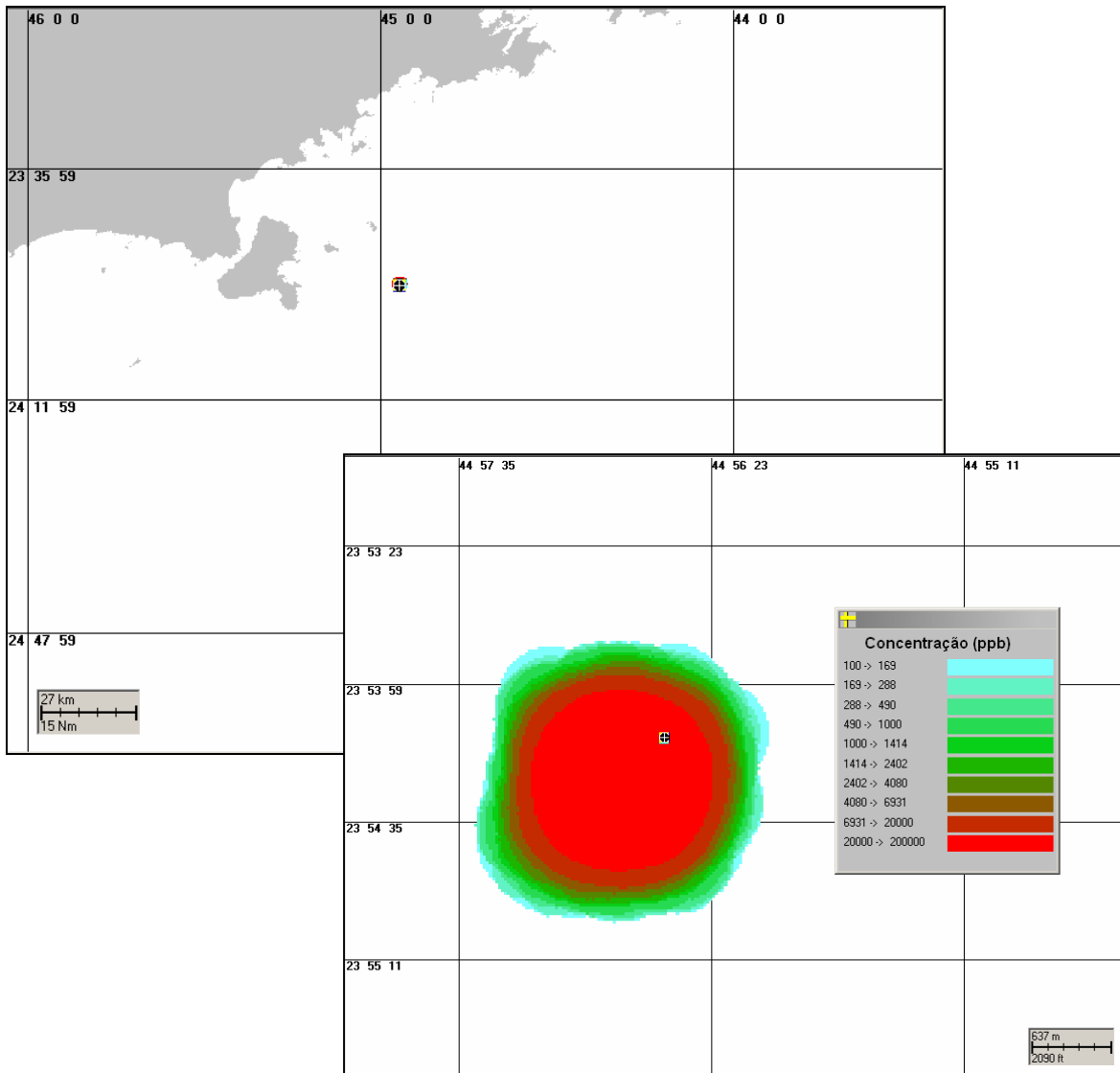
**Figura VI.2-6 - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2 no período de verão (janeiro a março), com derrame de  $3.202 \text{ m}^3$ , ao final da simulação após 60 horas.**

A figura VI.2-7 apresenta um gráfico com o balanço de massa (condensado na superfície, na costa, evaporado, na coluna d'água e o decaimento) para a simulação determinística crítica no período de verão. Observa-se que todo o condensado permanece dissolvido na coluna d'água, sendo que apenas cerca de 3% da massa de condensado é reduzida pelos processos de decaimento.



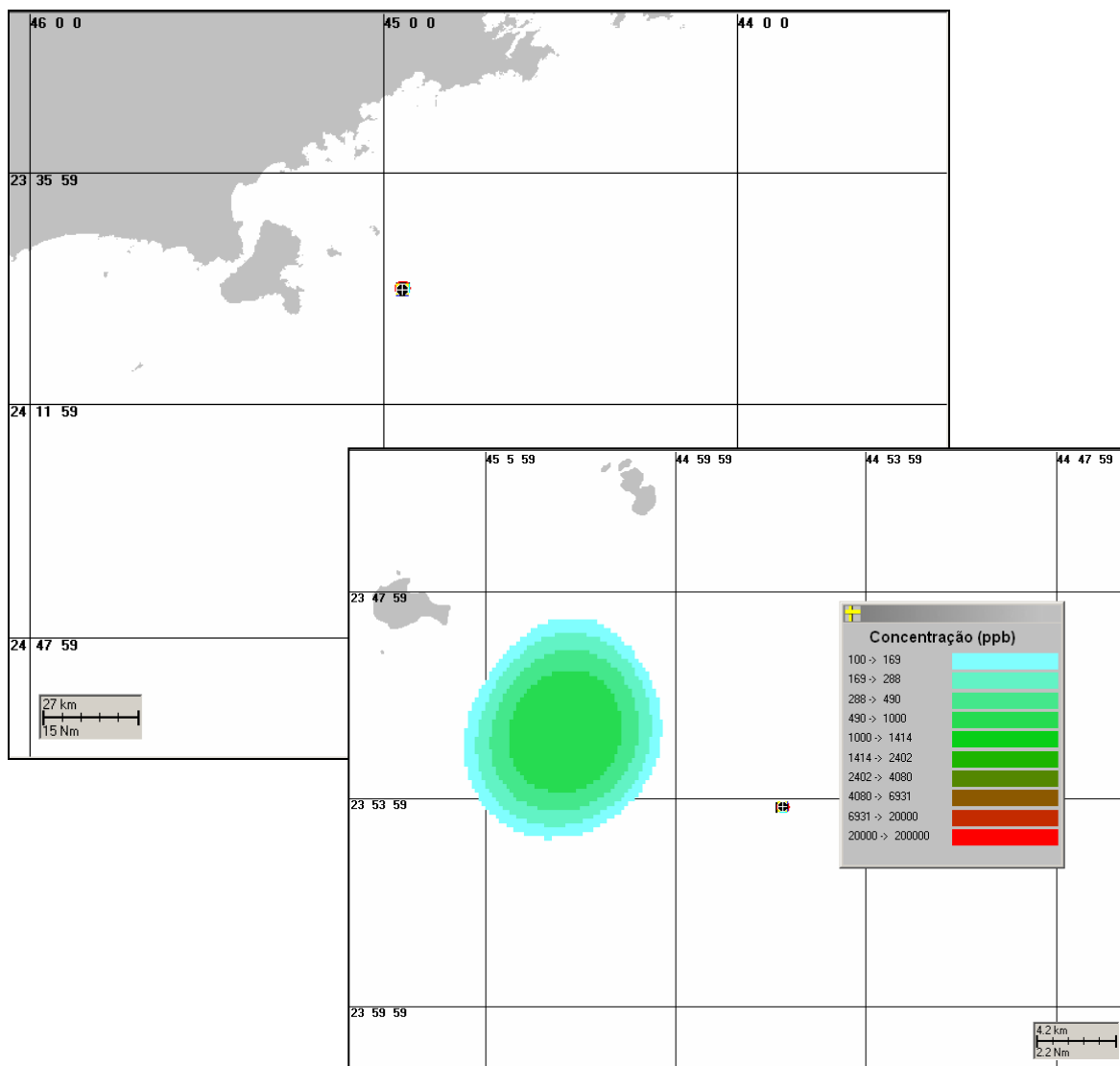
**Figura VI.2-7** - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P2, no verão (janeiro a março).

A figura VI.2-8 apresenta os contornos de concentração na simulação determinística de inverno para o condensado derramado a partir do rompimento do duto no ponto P2 (Campo de Mexilhão) no instante de maior concentração na coluna d'água (1 hora após o início da simulação).



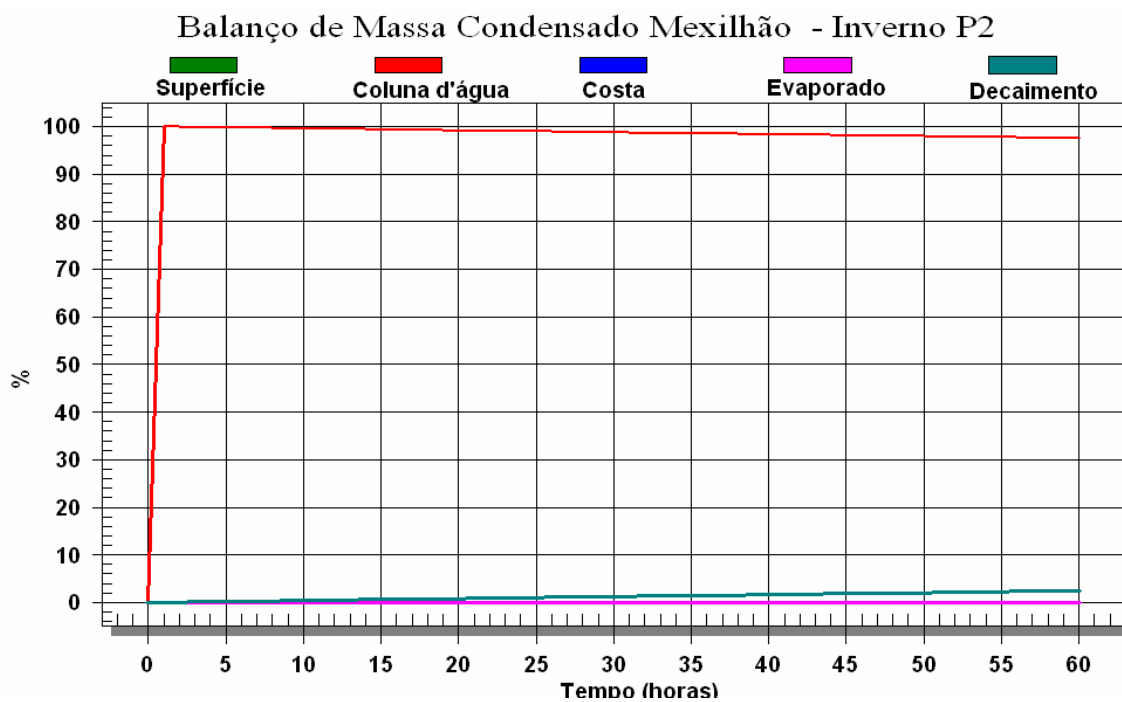
**Figura VI.2-8** - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2, no período de inverno (junho a agosto), após 1 hora.

A figura VI.2-9 apresenta os contornos de concentração na simulação determinística de inverno para o condensado derramado a partir do rompimento do duto no ponto P2 (Campo de Mexilhão) no instante final da simulação após 60 horas.



**Figura VI.2-9 - Cenário determinístico crítico para um vazamento de condensado ocorrido no ponto P2, no período de inverno (junho a agosto), ao final da simulação após 60 horas.**

A figura VI.2-10 apresenta um gráfico com o balanço de massa (condensado na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação determinística crítica no período de inverno. De forma similar ao observado no cenário de verão, todo o condensado permanece dissolvido na coluna d'água, sendo apenas 3% da massa de condensado reduzida pelos processos de decaimento.



**Figura VI.2-10** - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de vazamento de condensado no ponto P2, no inverno (junho a agosto).

## VII BIBLIOGRAFIA

ASA (Applied Science Associates, Inc.), 2004. SIMAP User Manual, Version 5.0, Narragansett, RI.

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

BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Ed.), **Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models**. American Geophysical Union, pp. 1-16.

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

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

CLIMANÁLISE, 1996. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Edição comemorativa de 10 anos. Outubro.

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

DELVIGNE, G.A.L. & L.J.M. HULSEN, 1994. Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient – Application in computations of natural oil dispersion. **Proceedings of the Seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar**, June 8-10, 1994, Vancouver, BC Canada, pp.173-187.



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

FAY, J.A., 1971. Physical processes in the spread of oil on a water surface. p. 463-467 In: **Proceedings at Joint Conference and Control of Oil Spills**, Washington, D.C., June 15-17, 1971.

FISCHER, H.B., 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, Inc. New York.

FRENCH, D., M. REED, K. JAYKO, S. FENG, H. RINES, S. PAVIGNANO, T. ISAJI, S. PUCKETT, A. KELLER, F. W. FRENCH III, D. GIFFORD, J. MCCUE, G. BROWN, E. MACDONALD, J. QUIRK, S. NATZKE, R. BISHOP, M. WELSH, M. PHILLIPS & B.S. INGRAM, 1996. The CERCLA Type A Natural Resource Damage Assessment Model for Coastal and Marine Environments (NRDAM/CME), Technical Documentation, Vol. I -VI, Final Report, submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S. Dept. of the Interior, Washington, D.C., Contract No. 14-0001-91-C-11.

FRENCH, D., H. SCHUTTENBERG, & T. ISAJI, 1999. Probabilities of oil exceeding thresholds of concern: examples from an evaluation for Florida Power and Light. In Proceedings of the 22nd Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, June 2-4, 1999, **Environment Canada**, pp.243-270.

GARFIELD III, N., 1990. The Brazil Current at subtropical latitudes. Tese de Doutorado, University of Rhode Island. 121pp.

GUNDLACH, E.R., 1987. Oil holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters. In: Proceedings of the 1987 Oil Spill conference, pp. 451-457.

HARPER, J. R. & HARVEY-KELLY, F., 1994. Subsurface oil retention in coarse sediments beaches. Ottawa, Ontario: Environmental Technology Centre, **Environment Canada**; Jan 1994; Report Series No. EE-147.

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

HINES, A.L. & MADDOX, R.N., 1985. Mass transfer fundamentals and application, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 542p.

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

HUMPHREY, B., 1994. Stranded oil in coarse sediments (SOCS) model. Ottawa, Ontario: Environmental Technology Centre, **Environment Canada**; Jan 1994; Report Series No. EE-146. 27p.

JONES, R.K., 1997. A Simplified Pseudo-Component of Oil Evaporation Model, in Proceedings of the 20th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Environment Canada, pp. 43-61.

KIRSTEIN, B.E., CLAYTON, J.R., CLARY, C., PAYNE, J.R., MCNABB, D., FAUNA, G., REDDING, R., 1985. Integration of suspended particulate matter and oil transportation study. **Minerals Management Service**, Anchorage, Alaska.

KOLLURU, V.S., 1992. Influence of number of spillets on spill model predictions. Applied Science Associates internal report, Narragansett, RI.

KOLLURU, V., SPAULDING, M.L., ANDERSON, E., 1994. A three dimensional subsurface oil dispersion model using a particle based approach, In: 1994 Annual Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, Edmonton, Alberta,

LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978. Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. **Journal of Physical Oceanography**, v. 8, p. 142-150.

LEHR, W.J., OVERSTREET R, JONES R., WATABAYASHI G., 1992. ADIOS-Automatic Data Inquire for Oil Spill, in Proceedings of the 15th Arctic Marine Oilspill Program, Technical Seminar, **Environment Canada**, Ottawa, Ontario, p. 31-45.

LEHR, W.J., WESLEY, D., SIMECEK-BEATTY, D., JONES, R., KACHOOK, G. & LANKFORD J., 2000. Algorithm and interface modifications of the NOAA oil spill behavior model. Proceedings of the 23rd Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Vancouver, BC, Environmental Protection Service, **Environment Canada**, pp. 525-539.

LIMA, J.A.M., 1997. Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Break and Continental Slope at 22°S. Tese de doutorado. University of New South Wales, Austrália.

LYMAN, C.J., REEHL, W.F. & ROSENBLATT, D.H., 1982. Handbook of Chemical Property Estimation Methods. McGraw-Hill Book Co., New York, 960p.

MACKAY, D. & R.S. MATSUGU, 1973. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 51, pp. 434-439.

MACKAY, D. & P.J. LEINONEN, 1977. Mathematical model of the behavior of oil spills on water with natural and chemical dispersion. Prepared for Fisheries and Environment Canada. Economic and Technical Review Report EPS-3-EC-77-19, 39p.

MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980a. Oil spill processes and models Report EE-8, **Environmental Protection Service**, Canada.

MACKAY, D., S. PATERSON. & K. TRUDEL, 1980b. A mathematical model of oil spill behavior, Department of Chemical Engineering, University of Toronto, Canada, 39pp.

MACKAY, D., W. SHUI, K. HOUSSAIN, W. STIVER, D. McCURDY & S. PATERSON, 1982. Development and calibration of an oil spill behavior model, Report No. CG-D027-83, **US Coast Guard Research and Development Center**, Groton, CT.

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

MCAULIFFE, C.D., 1989. The weathering of volatile hydrocarbons from crude oil slicks on water. In: Proceedings of the 1989 Oil Spill conference. San Antonio, TX. pp. 357-364.

MELLOR, G.L. & T. YAMADA, 1982. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys. Space Phys.**, 20, n. 4, 851-875.

OKUBO, A. & R.V. OZMIDOV, 1970. Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion on the ocean in the scale of the phenomenon in question. **Atmospheric and Ocean Physics**, 6(5): p. 534-536.

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

OLIVEIRA, A.S., 1986. **Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia**. INPE-4008-TDL/239.

PAYNE, J.R., KIRSTEIN, B.E, MCNABB, G.D., LAMBACH, J.L., REDDING, R., JORDON, R.E., HORN, W., OLIVEIRA, C., SMITH, G.S., BAXTER, D.M. & GEAGEL, R., 1984. Multivariate analysis of petroleum weathering in the marine environment--subarctic. Vol I and II. In: Environmental Assessment of the Alaskan Continental Shelf, Final report to Principal Investigators, **US Dept of Commerce, NOAA/OCSEAP** Final Report 21 and 22.

PAYNE, J.R., B.E. KIRSTEIN, J.R. CLAYTON, JR., C. CLARY, R. REDDING, G.D. MCNABB, JR. & FARMER, G., 1987. Integration of suspended particulate matter and oil transportation study. Final Report. Minerals Management Service, Environmental Studies Branch, Anchorage, AK. Contract No. 14-12-0001-30146. 216pp.

PETROBRAS, 2002. Considerações sobre a concentração de óleo no mar para modelos de simulação de derrames. In: Projeto 600625 – Parâmetros Meteo-Oceanográficos para Projetos de Engenharia. Relatório Técnico. Rio de Janeiro, 28pp.

REED, M., SPAULDING, M.L., GUNDLACH, E.R., KANA, T.W. & SIAH, S.J., 1986. Formulation of a shoreline/oil spill interaction model. In: Proceedings 1986 Arctic Marine Oil Program (AMOP), Edmonton, Canada, Ottawa, Ontario, p. 77-101.

REED, M., KANA, T. & GUNDLACH, E., 1988. Development, testing and verification of an oil spill surf-zone mass-transport model. Final Report to: Mineral Management Service, Alaska OCS Region, Contract No. 14-12-0001-30130; by Applied Science Associates, Inc. (ASA), Coastal Science & Engineering, Inc. (CSE), and E-Tech, Inc., June 1988, 343pp.

REED, M. & E. GUNDLACH, & T. KANA, 1989. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, **Oil and Chemical Pollution**, Vol. 5, p. 411-449.

REED, M. & GUNDLACH, E., 1989. Hindcast of the Amoco Cadiz event with a coastal zone oil spill model. **Oil and Chemical Pollution**, Vol. 5, p. 451-476.

REED, M.; P.S. DALING, O.G. BRAKSTAD, I. SINGSAAS, L.-G. FAKSNESS, B. HETLAND & N. EFROL, 2000. OSCAR 2000: A multi-component 3-dimensional oil spill contingency and response model. In: **Proceedings of the 23rd Arctic**

**Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar**, Environment Canada, Ottawa, Ontario, p.663-952.

SAMUELS, W. B., HUANG, N. E. & AMSTUTZ, D. E., 1982. An oil spill trajectory analysis model with a variable wind deflection angle. **Ocean Engineering**, Vol. 9, p. 347-360.

SATYAMURTI, P. & L.F. MATTOS, 1989. Climatological lower trophospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Mon. Wea. Rev.**, 108:410-520.

SIGNORINI, S.S., 1978. On the Circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of São Tomé and Guanabara Bay. **Deep Sea Res.**, 25, p. 481-490.3.

SPAULDING, M. L., HOWLETT, E., ANDERSON, E. & JAYKO, K., 1992. OILMAP a global approach to spill modeling. **15th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar**, June 9-11, 1992, Edmonton, Alberta, Canada, p. 15-21.

STIVER, W. & D. MACKAY, 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. **Environmental Science and Technology**, 18:834-840.

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

THORPE S. A., 1984. On the determination of  $K_v$  in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. **American Meteorological Society**, pp. 861-863.

TOKMAKIAN. R.T. & P.G CHALLENGOR, 1999. On the joint estimation of model and satellite sea surface height anomalies. **Ocean Modelling**, 1, 39-52.

---

WU, J., 1980. Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions - a revisit. **Journal of Physical Oceanography**, Vol. 10, pp. 727-740.

YOUSSEF, M., 1993. The behavior of the near ocean surface under the combined action of waves and currents in shallow water. PhD Dissertation, Department of Ocean Engineering, University of Rhode Island, Narragansett, RI.

YOUSSEF, M. & M. L. SPAULDING, 1993. Drift current under the action of wind waves. In: **Proceedings of the 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar**, Calgary, Alberta, Canada, pp. 587-615.

YOUSSEF, M. & M.L. SPAULDING, 1994. Drift Current Under the Combined Action of Wind and Waves in Shallow Water. In: **Proceedings of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar**, Vancouver, British Columbia, June 8-10, pp. 767-784.

**VIII EQUIPE TÉCNICA****Equipe da Empresa Consultora Applied Science Consultoria Ltda.**

<b>Profissional</b>	Ana Carolina da Rocha
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	325047
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	IV, V, VI e VII
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Andrea Gallo Xavier
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	58617
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	TODAS
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Carlos Eduardo Simão
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434226
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	IV, V, VI e VII
<b>Assinatura</b>	



<b>Profissional</b>	Daniel Constantino Zacharias
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	638533
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	

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

<b>Profissional</b>	Érika Naomi de Souza Tominaga
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	980855
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	VI
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	José Edson Pereira
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	326336
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Maria Regina Fonseca Guimarães
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434231
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Marco Antônio Corrêa
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda.
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434236
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Maurício Person Lammardo
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda.
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	272165
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	II e VI
<b>Assinatura</b>	