



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

RAQUEL LOPES BELLOLI

**ESTUDO DA DISPERSÃO DE MANCHAS DE ÓLEO NO RIO
GUAÍBA NA REGIÃO DO PORTO DE PORTO ALEGRE/RS**

Porto Alegre

Outubro 2022

RAQUEL LOPES BELLOLI

**ESTUDO DA DISPERSÃO DE MANCHAS DE ÓLEO NO RIO GUAÍBA NA
REGIÃO DO PORTO DE PORTO ALEGRE/RS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Rafael Manica

Porto Alegre

Outubro 2022

CIP - Catalogação na Publicação

BELLOLI, RAQUEL LOPES
ESTUDO DA DISPERSÃO DE MANCHAS DE ÓLEO NO RIO
GUAÍBA NA REGIÃO DO PORTO DE PORTO ALEGRE/RS / RAQUEL
LOPES BELLOLI. -- 2022.
130 f.
Orientador: RAFAEL MANICA.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Dispersão de óleo. 2. Modelagem computacional.
3. Hidrodinâmica. 4. Transporte de contaminante. I.
Manica, Rafael, orient. II. Título.

RAQUEL LOPES BELLOLI

ESTUDO DA DISPERSÃO DE MANCHAS DE ÓLEO NO RIO GUAÍBA NA REGIÃO DO
PORTO DE PORTO ALEGRE/RS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **14/10/2022** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Rafael Manica (Orientador) – Depto. de Hidromecânica e Hidrologia
(DHH/IPH/UFGRS)

.....
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres – Depto. de Hidromecânica e Hidrologia
(DHH/IPH/UFGRS)

.....
Prof. Substituta Dr. Débora Karine Koller – Depto. de Hidromecânica e Hidrologia
(DHH/IPH/UFGRS)

Conceito: A

Dedico este trabalho ao meu filhote, Zeca, onde quer que tu esteja, espero que tu tenhas sido muito feliz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a mim, por todo o esforço e dedicação ao longo da minha trajetória, sempre procurando ser minha melhor versão e aprender o máximo em todos os lugares que eu passei. Só nós sabemos todas as dificuldades que superamos dentro de nós todos os dias.

Em seguida à minha mãe, Dulce, que é meu maior exemplo de entrega, e ao meu pai, Fernando, que sempre me deu condições e faz o possível para compreender minhas escolhas, e aos meus avós, Jandira e Osvaldo, que me ensinam todos os dias sobre o amor na sua forma mais pura.

Às minhas irmãs, por quem nem as brigas pelo banheiro ou pela louça seriam capazes de mudar o orgulho que eu sinto. Sou melhor por ter crescido junto de vocês. Ao resto da minha família, que sei que sempre poderei contar e que me desejam somente o melhor.

Aos amigos que fiz ao longo da vida, todos de alguma forma me fizeram enxergar as coisas de um ponto de vista diferente. Principalmente os que sei que independente de qualquer distância ou intervalo de tempo, nada vai ser capaz de apagar a relação construída.

Às minhas melhores amigas da faculdade, Elis e Luísa, e ao meu parceiro de sertanejo, João, que estiveram comigo desde o início: obrigada por compartilharem comigo essa jornada, levo vocês sempre junto de mim.

A todos os professores com os quais tive a oportunidade de aprender, principalmente meu orientador, Rafael Manica, pelo qual tenho profunda admiração, assim como todos do NECOD com quem tive oportunidade de interagir e dar boas risadas na sala do café.

Aos membros da banca, Prof. Endres, pela disponibilidade e considerações, e Débora, por todos os conselhos. Ainda, ao Prof. Rosman, por sua vontade genuína de compartilhar informações e conhecimentos que foram muito importantes para a realização do estudo e das simulações.

Por fim, à minha parceira e amor da minha vida, que esteve do meu lado me entendendo, me ajudando e me fazendo companhia, mesmo nos momentos mais difíceis que tivemos que passar. Não existem palavras suficientes para agradecer: minha vida é mais completa porque eu divido ela contigo.

You can tell me when it's over
if the high was worth the pain

Taylor Swift

RESUMO

Este estudo avaliou a dispersão de manchas de óleo no Rio Guaíba utilizando modelagem computacional, a fim de atender a uma necessidade do Porto de Porto Alegre de melhorar seu Índice de Qualidade Ambiental (IQA). Deste modo, foi necessário implementar uma metodologia de simulação a partir da proposição de cenários hidrodinâmicos e hipóteses acidentais de derramamento de óleo, adotando-se uma análise sazonal de pior caso. Foram consideradas diferenças entre os regimes de estiagem, vazão média e cheia do rio, para um volume de 2400 m³ de óleo de elevada persistência derramado a partir da região do Cais Navegantes. Os *softwares* utilizados nas simulações hidrodinâmicas e transporte de contaminantes foram o GUAÍBA e SisBaHiA, em função de suas aplicações em outros estudos e disponibilidade de dados. Foi adotada uma abordagem determinística e probabilística de avaliação da evolução da dispersão da mancha ao longo do Rio Guaíba em diferentes instantes ao longo de 10 dias, servindo como embasamento na elaboração de ações de resposta ao incidente. Para o cenário de estiagem, observou-se que a mancha ficou mais contida à margem oeste, enquanto que para os cenários de vazão média e de cheia ela atingiu Itapuã, sendo que ambas as situações possuem implicações ambientais associadas. Além disso, também foram indicadas as áreas de margem do rio atingidas de maior sensibilidade ao óleo, com base nas Cartas SAO. Destaca-se, por fim, que os resultados gerados neste estudo serão aplicados na parte de Modelagem Hidrossedimentológica e da Qualidade da Água do Programa de Gestão Ambiental Portuária Porto de Porto Alegre.

Palavras-chave: modelagem computacional, hidrodinâmica, transporte de contaminante, dispersão, mancha de óleo, qualidade ambiental, sensibilidade ao óleo, Rio Guaíba, Porto de Porto Alegre

ABSTRACT

This study evaluated oil slick dispersion in Rio Guaíba with computational modelling, aiming at improving the Port of Porto Alegre's Environmental Quality Index (IQA). A simulation methodology based on hydrodynamic scenario propositions and accidental hypothesis on oil spillage was implemented, and a worst-case seasonal analysis was adopted. We considered differences between drought, flood, and average flow regimes of the river for 2,400 m³ of oil in heightened persistency spilled starting from the region in Cais Navegantes. We used software GUAIBA and SisBaHiA (hydrodynamics and pollutant transport through advection-diffusion) due to their use in other studies and availability of data. We took a deterministic and stochastic approach to evaluate the spill dispersion evolution along the riverbed in different moments during 10 days, which was employed in formulating responses to the incident. For the drought regime we observed that the spill was contained mostly to the west bank, while for the other regimes the spill reached Itapuã—in both scenarios, there were environmental implications. Furthermore, areas in the riverbanks reached by the spillage with the most sensitivity to oil, according to the Cartas SAO, were noted. We highlight, finally, that the results in this study will be applied at the Port of Porto Alegre's Environmental Management Program (PGA), in their division of Hydro-sedimentological Modelling and Water Quality.

Keywords: computational modelling, hydrodynamics, pollutant transport, dispersion, advection-diffusion, oil spillage, environmental quality, sensitivity to oil, Guaíba River, Port of Porto Alegre

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resultado do <i>ranking</i> IDA (2020) para os 31 portos analisados pelo SIGA.....	4
Figura 2 – Média do IDA do Porto de Porto Alegre entre os anos de 2012 e 2020.....	4
Figura 3 – Principais processos naturais de intemperismo envolvidos num derramamento de óleo.	9
Figura 4 – Representação esquemática da intensidade relativa dos principais processos de intemperismo que ocorrem ao longo do tempo após um derramamento de óleo.....	10
Figura 5 – Esquema de cores para a classificação do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) conforme utilizado nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO).	19
Figura 6 – Mapa da poligonal da área do Porto Organizado de Porto Alegre.	25
Figura 7 – Mapa de localização dos Cais Mauá, Cais Navegantes e Cais Marcílio Dias do Porto de Porto Alegre.	26
Figura 8 – Histórico de movimentação de cargas no Porto de Porto Alegre (toneladas) entre os anos de 2017 e 2021 (até o mês de outubro).....	27
Figura 9 – Mapa de localização do Rio Guaíba.	28
Figura 10 – Afluentes do Rio Guaíba próximos à região de interesse.	29
Figura 11 – Distribuição da frequência anual dos ventos incidentes em Porto Alegre.....	31
Figura 12 – Velocidades médias anual e mensais em Porto Alegre.....	32
Figura 13 – Variação diária da velocidade do vento em Porto Alegre.	32
Figura 14 – Média mensal do nível entre 1941 e 2008 obtida a partir de dados das réguas Praça da Harmonia e Cais Mauá C6.	33
Figura 15 – Variação histórica da vazão do Rio Guaíba entre 1940 e 1997.....	33
Figura 16 – Registro de ocorrências de encalhes na Hidrovia do Rio Guaíba entre 2007 e 2022. Em destaque, casos em que os motivos reportados foram manobras fora do canal (em vermelho) e saída do traçado do canal devido à forte correnteza (em azul).....	34
Figura 17 – Escala de risco à navegação na hidrovia do Rio Guaíba gerada a partir de análise estatística.	34
Figura 18 – Séries de variação horária de nível em Itapuã para os meses de a) Janeiro de 1988 e b) Julho de 1988.....	47
Figura 19 – Razão (R_L) entre velocidade equivalente do vento sobre a água (U_w) e sobre a terra (U_L).	48
Figura 20 – Série de ventos para Porto Alegre corrigidas para a superfície da água para os meses de a) Janeiro de 1988 e b) Julho de 1988.....	49
Figura 21 – Estações de controle inseridas no <i>software</i> GUAÍBA.....	55
Figura 22 – Estações de controle inseridas no <i>software</i> SisBaHiA.	56
Figura 23 – Curvas de evaporação do óleo geradas no <i>software</i> ADIOS2 para os meses de a) Janeiro e b) Julho.	60
Figura 24 – Capturas de tela do módulo da velocidade no <i>software</i> GUAÍBA para o cenário de estiagem em diferentes instantes de simulação.....	64
Figura 25 – Capturas de tela do módulo da velocidade no <i>software</i> GUAÍBA para o cenário de média em diferentes instantes de simulação.	65
Figura 26 – Capturas de tela do módulo da velocidade no <i>software</i> GUAÍBA para o cenário de cheia em diferentes instantes de simulação.....	66
Figura 27 – Valores médios de nível (esquerda) e módulo de velocidade (direita) calculados para os dados das simulações hidrodinâmicas para os <i>softwares</i> GUAÍBA (em azul) e SisBaHiA (em amarelo).	68
Figura 28 – Comparação entre os valores de nível obtidos para cada estação de controle. O índice S indica resultados do SisBaHiA e o índice G indica resultados do GUAÍBA. O cenário de simulação hidrodinâmica está indicado pela vazão de entrada no Jacuí.....	71

Figura 29 – Comparação entre os valores de módulo de velocidade obtidos para cada estação de controle. O índice S indica resultados do SisBaHiA e o índice G resultados do GUAÍBA. O cenário de simulação hidrodinâmica está indicado pela vazão de entrada no Jacuí.	72
Figura 30 – Comparação entre os valores de nível obtidos para o conjunto de estações, considerados para cada <i>software</i> e cenário de simulação hidrodinâmica.	73
Figura 31 – Comparação entre os valores de módulo de velocidade obtidos para o conjunto de estações, considerados para cada <i>software</i> e cenário de simulação hidrodinâmica.	74
Figura 32 – Variação dos valores níveis registrados no <i>software</i> SisBaHiA para a Estação Navegantes considerando média móvel de 24 h para os três cenários de simulação hidrodinâmica.	75
Figura 33 – Mapa de velocidade da estação Navegantes gerado pelo <i>software</i> SisBaHiA para o cenário de estiagem.	77
Figura 34 – Mapa de velocidade da estação ADCP gerado pelo <i>software</i> SisBaHiA para o cenário de estiagem.	77
Figura 35 – Mapa de velocidade da estação Navegantes gerado pelo <i>software</i> SisBaHiA para o cenário de média.	78
Figura 36 – Mapa de velocidade da estação Navegantes gerado pelo <i>software</i> SisBaHiA para o cenário de cheia.	78
Figura 37 – Mapa de velocidade do Guaíba no 5º dia de simulação (6º dia do mês) às 20 h gerado pelo <i>software</i> SisBaHiA (cenário de estiagem).	79
Figura 38 – Comportamento hidrodinâmico do Guaíba no instante do derramamento da mancha para os exemplos determinísticos referentes aos cenários de estiagem (Ex. A1), média (Ex. B1) e cheia (Ex. C1), considerando a primeira série de simulações de dispersão realizadas.	81
Figura 39 – Evolução da passagem da mancha entre a ocorrência do derramamento (instante 0 h) e o instante 240 h para o exemplo de estiagem (Ex. A1) obtido na primeira série de simulações de dispersão realizadas.	82
Figura 40 – Evolução da passagem da mancha entre a ocorrência do derramamento (instante 0 h) e o instante 240 h para o exemplo de vazão média (Ex. B1) obtido na primeira série de simulações de dispersão realizadas.	83
Figura 41 – Evolução da passagem da mancha entre a ocorrência do derramamento (instante 0 h) e o instante 240 h para o cenário de cheia (Ex. C1) obtido na primeira série de simulações de dispersão realizadas.	84
Figura 42 – Evolução dos flutuadores do GUAÍBA para o cenário de estiagem (GA) nos instantes 6 h, 12 h, 36 h e 48 h.	88
Figura 43 – Comparação entre o exemplo determinístico do SisBaHiA (Ex. A1) e os flutuadores do GUAÍBA (GA) para o cenário de estiagem nos instantes 120 h e 240 h.	89
Figura 44 – Evolução dos flutuadores do GUAÍBA (GB) para o cenário de média nos instantes 3 h, 6 h, 12 h e 24 h.	91
Figura 45 – Comparação entre o exemplo determinístico do SisBaHiA (Ex. B1) e os flutuadores do GUAÍBA (GB) para o cenário de média nos instantes 120 h e 240 h.	92
Figura 46 – Evolução dos flutuadores do GUAÍBA para o cenário de cheia nos instantes 3 h, 6 h, 12 h e 24 h.	93
Figura 47 – Comparação entre o exemplo determinístico do SisBaHiA e os flutuadores do GUAÍBA para o cenário de cheia nos instantes 72 h e 120 h.	94
Figura 48 – Evolução probabilística da passagem da mancha para a simulação A1 (cenário hidrodinâmico de estiagem e elevação de nível do Rio Guaíba).	97
Figura 49 – Evolução probabilística da passagem da mancha para a simulação B1 (cenário hidrodinâmico de média e elevação de nível do Rio Guaíba).	98

Figura 50 – Evolução probabilística da passagem da mancha para a simulação C1 (cenário hidrodinâmico de cheia e elevação de nível do Rio Guaíba).....	99
Figura 51 – Probabilidade de passagem da mancha 3 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	100
Figura 52 – Probabilidade de passagem da mancha 6 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	101
Figura 53 – Probabilidade de passagem da mancha 12 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	101
Figura 54 – Probabilidade de passagem da mancha 24 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	102
Figura 55 – Probabilidade de passagem da mancha 36 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	102
Figura 56 – Probabilidade de passagem da mancha 48 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	103
Figura 57 – Probabilidade de passagem da mancha 60 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	103
Figura 58 – Probabilidade de passagem da mancha 72 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	104
Figura 59 – Probabilidade de passagem da mancha 120 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	104
Figura 60 – Probabilidade de passagem da mancha 240 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).....	104
Figura 61 – Comparação entre as simulações de estiagem para elevação (A1) e descida (A2) gradual dos níveis entre 12 h e 48 h.....	107
Figura 62 – Comparação entre as simulações de estiagem para elevação (A1) e descida (A2) gradual dos níveis entre 60 h e 240 h.....	108
Figura 63 – Comparação entre as simulações de média para elevação (B1) e descida (B2) gradual dos níveis entre 12 h e 48 h.....	110
Figura 64 – Comparação entre as simulações de média para elevação (B1) e descida (B2) gradual dos níveis entre 60 h e 240 h.....	111
Figura 65 – Comparação entre as simulações de cheia para elevação (C1) e descida (C2) gradual dos níveis entre 12 h e 48 h.....	112
Figura 66 – Comparação entre as simulações de cheia para elevação (C1) e descida (C2) gradual dos níveis entre 60 h e 240 h.....	113
Figura 67 – Comparação entre as simulações do cenário de estiagem A1 (reflexão total das margens) e A3 (com coeficiente de absorção) para os instantes 120h e 240h.....	115
Figura 68 – Comparação entre as simulações do cenário de vazão média B1 (reflexão total das margens) e B3 (com coeficiente de absorção) para os instantes 120h e 240h.....	116
Figura 69 – Comparação entre as simulações do cenário de cheia C1 (reflexão total das margens) e C3 (com coeficiente de absorção) para os instantes 120h e 240h.....	117
Figura 70 – Recorte da Carta SAO Tática PEL13 (Porto Alegre).....	119
Figura 71 – Mapa de partículas retidas nas margens (destacadas em azul) para os exemplos determinísticos dos três cenários hidrodinâmicos (Ex. A3, Ex. B3, Ex. C3) considerando coeficiente de absorção (terceira série de simulações, período de elevação dos níveis do Rio Guaíba).....	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais efeitos da poluição por óleo na fauna encontrados na literatura. 15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grupos de óleo classificados pela ITOPF e suas características principais.	8
Tabela 2 – Tipologias de carga e volumes operados pelo Porto de Porto Alegre, de janeiro a outubro de 2021.	27
Tabela 3 – Especificações técnicas dos navios com registro de encalhe na hidrovía do Rio Guaíba.	35
Tabela 4 – Coeficientes calibrados para o <i>software</i> IPH-A.	38
Tabela 5 – Dados de vazões utilizadas em simulações hidrodinâmicas do Rio Guaíba encontrados em estudos anteriores.	46
Tabela 6 – Informações de óleo e derramamento encontradas em outros estudos.	50
Tabela 7 – Informações de tipo de óleo e derramamento encontradas em outros estudos e outros parâmetros de simulação.	51
Tabela 8 – Simulações hidrodinâmicas realizadas com o GUAÍBA e SisBaHiA.	53
Tabela 9 – Dados de velocidade (U_L) e direção do vento das Normais Climatológicas 1981-2010 para janeiro e julho, com a correção para velocidade sobre a água (U_w).	58
Tabela 10 – Simulações de derramamento de óleo realizadas no <i>software</i> SisBaHiA.	62
Tabela 11 – Diferença calculada entre os resultados das simulações dos <i>softwares</i> GUAÍBA e do SisBaHiA.	67
Tabela 12 – Estatísticas calculadas para os valores de nível registrados nos dois <i>softwares</i> nas estações de controle adotadas para as simulações hidrodinâmicas realizadas.	69
Tabela 13 – Estatísticas calculadas para os valores de módulo de velocidade registrados nos dois <i>softwares</i> nas estações de controle adotadas para as simulações hidrodinâmicas realizadas.	70
Tabela 14 – Informações de volume acumulado na margem considerando as simulações com coeficiente de absorção (terceira série de simulações).	121

LISTA DE SIGLAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> (Perfilador de Correntes Marinhas)
ADIOS	<i>Automated Data Inquiry for Oil Spills</i>
ALL	América Latina Logística
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
API	Instituto Americano de Petróleo
Carta SAO	Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgotos
E	Leste
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico
GMRES	<i>Generalized Minimal Residual Method</i>
GNOME	<i>General NOAA Operational Modeling Environment</i>
IDA	Índice de Desempenho Ambiental
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISL	Índice de Sensibilidade do Litoral
ITOPF	<i>International Tanker Owners Pollution Federation Limited</i>
LO	Licença de Operação
N	Norte
NOAA	<i>United States National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NW	Noroeste
PEI	Plano de Emergência Individual
PGA	Programa de Gestão Ambiental
PISA	Projeto Integrado Socioambiental
PNC	Plano Nacional de Contingência
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNRM	Política Nacional para os Recursos do Mar
PR	Paraná
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RJ	Rio de Janeiro
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
S	Sul
SE	Sudeste
SIGA	Sistema Integrado de Gestão Ambiental
SisBaHiA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SOLAS	Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar
SP	São Paulo
SUPRG	Superintendência do Porto de Rio Grande
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
W	Oeste

LISTA DE SÍMBOLOS

ν	Viscosidade [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 10^6 \text{ cSt}$]
ρ	Densidade [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
g	Aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
k	Constante empírica [adimensional]
A_0	Área inicial da mancha [m^2]
t_0	Tempo até atingir modelagem de área inicial da mancha [s]
h_m	Altura média da malha de cálculo [m]
Δt	Intervalo de tempo de cálculo [s]
Δx	Tamanho da malha de cálculo [m]
U, V	Componentes do vetor velocidade nas direções x e y [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
ζ	Nível medido a partir de um plano de referência fixo [m]
h	Profundidade referida ao plano de referência [m]
H	Profundidade total [m]
Ω	Aceleração de Coriolis [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
τ_{sx}, τ_{sy}	Componentes da tensão de cisalhamento na superfície [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]
Ch	Coefficiente de Chèzy [$\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$]
ε	Coefficiente de dissipação turbulenta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
C	Concentração integrada na vertical [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
D_x, D_y	Coefficientes de dispersão nas direções x e y [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
P	Coefficiente de decaimento [s^{-1}]
R	Termo de fonte [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
C_v	Coefficiente de ajuste do vento [$\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]
Q	Vazão [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA TÉCNICA	3
3 OBJETIVOS	5
3.1 OBJETIVO GERAL	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 DEFINIÇÃO DE ÓLEO	6
4.2 COMPORTAMENTO DO ÓLEO NO AMBIENTE AQUÁTICO	6
4.2.1 Propriedades do óleo	7
4.2.2 Processos naturais de intemperismo	8
4.2.3 Consequências ambientais dos derramamentos	14
4.3 EVOLUÇÃO DA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL	16
4.4 PLANO DE EMERGÊNCIA INDIVIDUAL (PEI)	17
4.5 CARTAS SAO	18
4.6 DINÂMICA DOS FLUIDOS	20
4.7 MODELAGEM COMPUTACIONAL	21
4.7.1 Estudos anteriores de modelagem no Rio Guaíba	22
4.7.2 Estudos anteriores de modelagem de dispersão de mancha de óleo	23
5 METODOLOGIA	24
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE	24
5.1.1 Porto de Porto Alegre	24
5.1.2 Rio Guaíba	27
5.1.2.1 Clima	30
5.1.2.2 Vento	31
5.1.2.3 Registros Históricos	32
5.2 <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS	35
5.2.1 IPH-A	36
5.2.2 GUAÍBA	38
5.2.3 SisBaHiA	39
5.2.3.1 Modelagem Hidrodinâmica	40
5.2.3.2 Modelagem de Transportes de Contaminantes	41
5.2.4 ADIOS2	44
5.3 LEVANTAMENTO DE DADOS E INFORMAÇÕES	45
5.3.1 Configuração geométrica do Rio Guaíba	45
5.3.2 Condições hidrodinâmicas e meteorológicas	45
5.3.2.1 Vazão no Rio Jacuí em Triunfo	46
5.3.2.2 Nível em Itapuã	46
5.3.2.3 Velocidade e direção do vento	47
5.3.3 Tipo de óleo e condições do derramamento	50
5.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	52
5.4.1 Simulações hidrodinâmicas realizadas	52
5.4.2 Simulações de dispersão de óleo realizadas	57
5.4.2.1 Óleo utilizado	57
5.4.2.2 Curvas de decaimento e espalhamento inicial de Fay	58
5.4.2.3 Simulações realizadas no SisBaHiA	61
5.4.2.4 Comparação com o <i>software</i> GUAÍBA	62
5.4.2.5 Comparação com Cartas SAO	62
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS	63

6.2 SIMULAÇÕES DE DISPERSÃO DE ÓLEO	79
6.2.1 Exemplos determinísticos de dispersão da mancha de óleo para os três cenários hidrodinâmicos na primeira série de simulações (Ex. A1, Ex. B1 e Ex. C1)	80
6.2.2 Comparação dos exemplos determinísticos do SisBaHiA para a primeira série de simulações (Ex. A1, Ex. B1 e Ex. C1) com flutuadores do GUAÍBA (GA, GB, GB) considerando cenário hidrodinâmico equivalente	86
6.2.3 Análise probabilística das simulações de dispersão de óleo para as três séries de simulações.....	95
6.2.3.1 Comportamento geral da dispersão de óleo para um período de elevação gradual dos níveis do Rio Guaíba – Primeira série de simulações (A1, B1 e C1).....	96
6.2.3.2 Simulações para um período de descida gradual dos níveis do Rio Guaíba – Segunda série de simulações (A2, B2, C2).....	105
6.2.3.3 Simulações utilizando coeficiente médio de absorção – Terceira série de simulações (A3, B3, C3)	114
6.2.4 Análise da interação das manchas de dispersão de óleo (terceira série de simulações – A3, B3 e C3) com as margens do Rio Guaíba.....	117
6.2.5 Considerações finais das simulações de dispersão de óleo realizadas	122
7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	124
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

1 INTRODUÇÃO

A Segunda Revolução Industrial, que teve início na metade do século XIX, incorporou a utilização de óleo como fonte de energia para o processo produtivo, devido ao seu alto poder calorífico, facilidade de transporte (estado líquido), e relativa abundância. Durante a Segunda Guerra, surgiu nos Estados Unidos a indústria petroquímica, a fim de atender a demanda de produtos estratégicos. A partir disto, o setor continuou crescendo e o óleo se tornou matéria-prima fundamental para produção de inúmeros produtos e bens de consumo.

Atualmente vivemos em uma sociedade completamente dependente deste recurso, sendo a poluição gerada pelo seu uso uma consequência praticamente inevitável. A expansão da economia de países industriais, a emergência de países em desenvolvimento, o crescimento da população e a elevação do padrão de vida contribuem para o aumento da demanda de óleo, com a exploração crescendo cada vez mais para atendê-la.

Como qualquer outro recurso natural, existem perdas associadas aos processos, seja na produção, no transporte, no refino ou na utilização. A fim de atender à logística global, os oceanos são muito utilizados para o seu transporte. Deste modo, incidentes como derramamentos de óleo acabam tendo consequências ao meio ambiente aquático, principalmente quando da sua ocorrência em regiões costeiras. Além dos meios físico e biótico, os impactos também afetam o meio socioeconômico.

A indústria do transporte marítimo é essencial para as atividades econômicas, movimentando as cargas do comércio global, sendo os portos parte fundamental desta logística. Com a evolução da preocupação ambiental com a poluição por óleo, destacou-se a necessidade de adotar medidas de proteção ao meio ambiente. Assim, a comunidade internacional se organizou a partir de conferências e códigos, que foram incorporados pela legislação brasileira.

O Porto de Porto Alegre não se encontra na rota direta de transporte de petróleo e seus derivados, entretanto diversos óleos são utilizados como combustíveis das embarcações, não podendo ser descartada a possibilidade de ocorrência de incidentes de derramamentos. O Rio Guaíba, corpo hídrico às margens do qual está localizado o Porto,

possui uma complexa hidrodinâmica e é fundamental para diversas atividades dentro de sua bacia hidrográfica, de modo que possíveis impactos à qualidade de suas águas devem ser devidamente considerados.

Estudar o comportamento e a trajetória do óleo no ambiente aquático é de extrema importância para prever, e assim, minimizar os impactos de um eventual derramamento. O óleo está sujeito a uma série de processos naturais que se relacionam entre si e variam ao longo do tempo, além de dependerem das condições climáticas e ambientais, do tipo de óleo, das suas propriedades como fluido e das condições do derramamento. Os danos causados ainda podem ser diferentes conforme o ecossistema atingido.

Em termos de dinâmica dos fluidos, os fenômenos de hidrodinâmicos e de transporte de contaminantes são descritos por equações baseadas nos princípios de conservação. Estas equações são extremamente complexas, não existindo forma analítica para a resolução de todo o conjunto, de modo que a modelagem computacional surge como uma alternativa, sendo amplamente utilizada pela sua facilidade e baixo custo de aplicação.

Os resultados obtidos são de grande aplicação na análise ambiental, tanto para formulação de diagnósticos quanto de prognósticos, sendo fundamental representar adequadamente as condições físicas do ambiente a ser estudado e utilizar modelos devidamente calibrados e validados. Neste trabalho a modelagem computacional será utilizada para avaliar a dispersão de manchas de óleo no Rio Guaíba na região do Porto de Porto Alegre.

2 JUSTIFICATIVA TÉCNICA

A Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), criada pela Lei nº 10.233, de 05 de junho de 2001, é responsável por regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços de transporte aquaviário e de exploração da infraestrutura portuária, estando vinculada ao Ministério da Infraestrutura. Nesta mesma lei, foi estabelecido no art. 2º, parágrafo único, inciso V que “o gerenciamento da infraestrutura e a operação do transporte aquaviário devem ser regidos pelo princípio da sua compatibilização com a preservação do meio ambiente”.

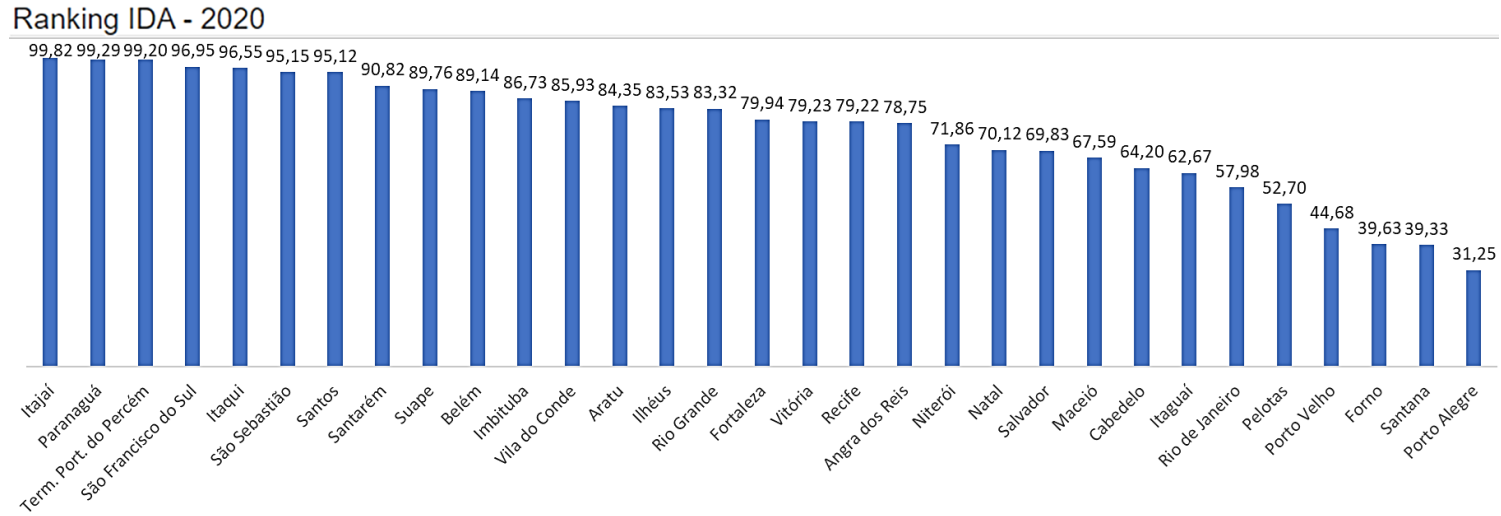
Deste modo, a gerência de Meio Ambiente da ANTAQ desenvolveu um sistema para monitorar a gestão ambiental dos Portos Organizados¹, o Sistema Integrado de Gestão Ambiental (SIGA). Com o decorrer das avaliações do SIGA, foi necessário encontrar uma forma de avaliar a evolução ao longo do tempo, criando-se para este fim o Índice de Desempenho Ambiental (IDA), instituído pela Resolução nº 2.650/2012, que contempla uma série de parâmetros ambientais a serem atendidos pelas instalações portuárias por conta dos impactos causados ao Meio Ambiente por suas atividades.

O último resultado disponível, de 2020, coloca o Porto de Porto Alegre na última colocação do *ranking* entre os 31 portos analisados, com IDA de 31,25 (Figura 1). Na Figura 2 é mostrada a variação do IDA entre os anos de 2012 e 2022. Buscando melhorar este índice, está sendo desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em contrato de prestação de serviços com a Superintendência do Porto de Rio Grande (SUPRG), a atual Portos RS, a atualização, execução e implementação dos programas ambientais, de controle e prevenção, conforme o que consta no Programa de Gestão Ambiental (PGA) do Porto de Porto Alegre.

O Programa de Modelagem Hidrossedimentológica e da Qualidade da Água integra esta iniciativa, estando relacionado ao indicador do IDA de Qualidade Ambiental do Corpo Hídrico. Dentro deste programa, está prevista a elaboração do modelo de qualidade da água e de dispersão de óleo como base para a atualização do Plano de Emergência Individual (PEI), que descreve os procedimentos de resposta da instalação a um incidente de poluição por óleo, em águas sob jurisdição nacional, decorrente de suas atividades, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 398/2008.

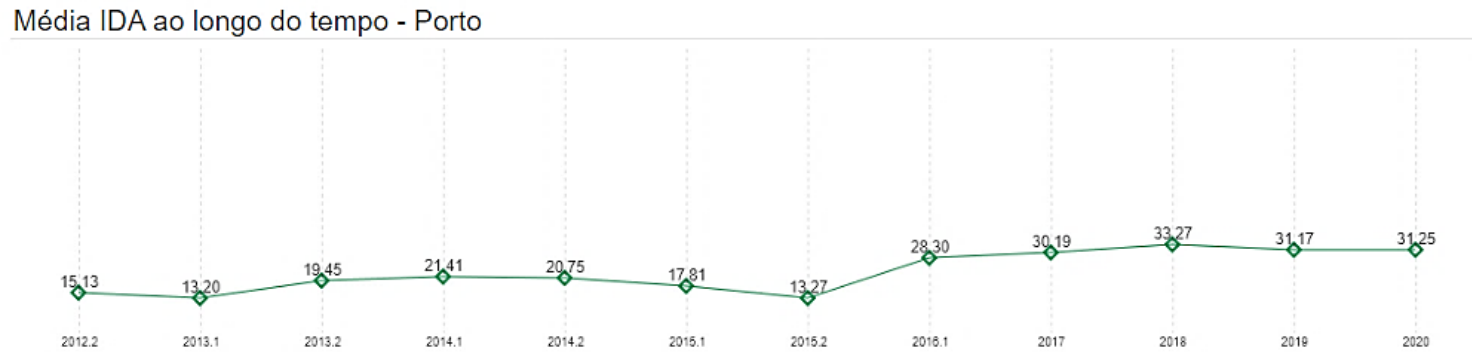
¹ Porto organizado: bem público construído e aparelhado para atender a necessidades de navegação, de movimentação de passageiros ou de movimentação e armazenagem de mercadorias, e cujo tráfego e operações portuárias estejam sob jurisdição de autoridade portuária (art. 2º, § 1º, I da Lei nº 12.815/13).

Figura 1 – Resultado do ranking IDA (2020) para os 31 portos analisados pelo SIGA.



Fonte: Painel do IDA (ANTAQ, c2022 – adaptado).

Figura 2 – Média do IDA do Porto de Porto Alegre entre os anos de 2012 e 2020.



Fonte: Painel do IDA (ANTAQ, c2022).

3 OBJETIVOS

Este item dispõe sobre o que se procura atingir com o estudo realizado. A definição dos objetivos é fundamental para encontrar a melhor forma de alcançá-los.

3.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como principal objetivo avaliar a dispersão de manchas de óleo no Rio Guaíba utilizando modelagem computacional, a fim de fornecer subsídios para a tomada de decisão e melhoria da gestão ambiental do Porto de Porto Alegre.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender os processos envolvidos no comportamento do óleo no ambiente.
- Implementar metodologia de simulação hidrodinâmica e de dispersão (transporte advectivo-difusivo) de óleo através de modelagem computacional.
- Caracterizar a área de interesse, entendendo como as atividades e a localização do porto se encaixam no contexto, e o corpo hídrico a ser modelado (Rio Guaíba).
- Propor hipóteses acidentais de derramamentos de óleos.
- Avaliar a trajetória de manchas de óleo na região do Porto de Porto Alegre sob diferentes condições climáticas (análise sazonal).
- Indicar áreas de maior sensibilidade aos derramamentos de óleo, utilizando como referência as Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Carta SAO).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica é uma etapa imprescindível no desenvolvimento de qualquer estudo, sendo um dos primeiros passos a serem realizados, pois serve como base para todas as definições posteriores. Foi utilizada uma abordagem ampla a fim de entender os principais conceitos e processos envolvidos, a evolução da problemática ambiental e questões ambientais associadas, assim como a forma de estudar o tema e realizar as simulações.

4.1 DEFINIÇÃO DE ÓLEO

O Instituto Americano de Petróleo (API, 1999) define óleo como uma mistura complexa de milhares de compostos diferentes, constituídos principalmente de carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e oxigênio. No processamento do óleo, o refino é feito por destilação, separando as frações de acordo com a temperatura, diminuindo as impurezas.

A Lei Federal nº 9.966/2000 define óleo como “qualquer forma de hidrocarboneto (petróleo e seus derivados), incluindo óleo cru, óleo combustível, borracha, resíduos de petróleo e produtos refinados”. Produtos brutos e refinados possuem diferentes propriedades e comportamentos quando derramados no ambiente.

O estado físico do petróleo, nas condições normais de temperatura e pressão, varia de acordo com o tamanho das moléculas, podendo ser gasoso (moléculas menores) ou líquido (moléculas maiores). Na forma líquida, o petróleo é uma “substância oleosa, inflamável, menos densa do que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho claro” (THOMAS, 2001).

4.2 COMPORTAMENTO DO ÓLEO NO AMBIENTE AQUÁTICO

O comportamento do óleo no ambiente aquático vai depender do tipo de óleo e suas características químicas, das suas propriedades, dos processos naturais aos quais ele está sujeito, e das condições climáticas e ambientais. O óleo derramado causa impactos no meio ambiente que dependem ainda do local atingido.

4.2.1 Propriedades do óleo

Existem algumas propriedades fundamentais para a compreensão do comportamento de derramamentos de óleo no ambiente, assim como seus efeitos à saúde e à segurança. A primeira delas é a viscosidade, que representa uma medida de resistência do fluido ao escoamento. Quanto maior for a viscosidade do óleo, maior será sua dificuldade de se movimentar. Ela sofre grande influência da temperatura (tanto do óleo quanto da água) e tende a aumentar conforme o envelhecimento do óleo, a evaporação das frações mais leves e a formação de emulsão com a água (FERNANDES, 2001).

Outra propriedade importante é a densidade, definida como a massa por unidade de volume de uma substância. A maior parte dos óleos possui densidade menor do que a da água (1.000 kg/m³), ficando na superfície após o derramamento. Com o passar do tempo, ocorre a evaporação das frações mais voláteis (a volatilidade está associada à facilidade de trocar da fase líquida para fase gasosa), além da formação de emulsões entre a água e o óleo, tornando-o mais pesado. Óleos mais densos também são mais viscosos (LOPES, 2007), sendo a influência da temperatura verificada do mesmo modo que ocorre para a viscosidade.

Existe ainda uma forma de expressar a densidade relativa de um óleo ou derivado, medida em relação à água pura, chamada de escala API (Equação 1), desenvolvida pelo Instituto Americano de Petróleo, cuja unidade de medida é graus (°API). Óleos mais leves possuem maior grau de API, e também um maior valor de mercado associado. Eles tendem a conter uma maior proporção de componentes voláteis, associados a maiores taxas de evaporação, além de serem menos viscosos (ITOPF, 2011a). O contrário é válido para óleos mais pesados, com menores valores de API. Os óleos mais transportados por via marítima foram classificados pela ITOPF (*International Tanker Owners Pollution Federation Limited*) em quatro grupos a partir das suas propriedades (Tabela 1).

$$^{\circ} API = \frac{141,5}{\rho_{60/60^{\circ}F}} - 131,5 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\rho_{60/60^{\circ}F}$ = densidade do óleo a 60 °F em relação à densidade da água na mesma temperatura (aproximadamente 15 °C)

Tabela 1 – Grupos de óleo classificados pela ITOPF e suas características principais.

Grupo	Densidade Relativa	°API	Meia Vida	Viscosidade (cSt a 15 °C)
I	< 0,8	> 45	- 24 h	0,5 – 2
II	0,8 < 0,85	35 a 45	- 24 h	4
III	0,85 < 0,95	17,5 a 35	- 48 h	8
IV	> 0,95	< 17,5	- 72 h	1500

Fonte: LOPES, 2007 – adaptado.

Outro conceito interessante é o de persistência, que está relacionado com a degradação do óleo na superfície, dependendo tanto das suas propriedades físicas, quanto das condições climáticas e ambientais. Os produtos refinados tendem a ser menos persistentes, pois os componentes leves são mais voláteis e evaporam até as primeiras 48 horas (entretanto podem gerar nuvens de vapores inflamáveis). Já os óleos mais pesados são mais persistentes, sendo necessária a intervenção de operações de limpeza para sua completa remoção (LOPES, 2007).

4.2.2 Processos naturais de intemperismo

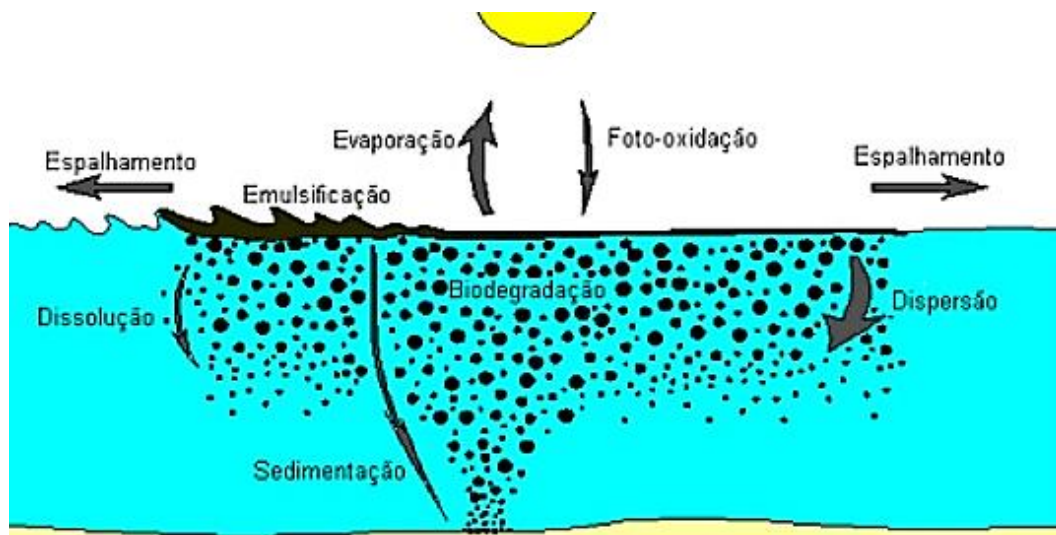
O comportamento do óleo derramado no ambiente aquático depende de diversos fatores. Um dos mais importantes é a sua composição química, uma vez que o óleo é uma mistura complexa de vários componentes, com diferentes pesos e estruturas moleculares, que interferem nas suas propriedades, de acordo com o grau de processamento. Desta forma, existem inúmeros produtos que podem ter comportamentos distintos quando entram contato com a água.

O conjunto dos processos naturais (químicos, físicos e biológicos) aos quais o óleo está sujeito no ambiente é chamado de intemperismo, e eles agem de modo a mudar a composição, o comportamento, as rotas de exposição e a toxicidade do produto derramado (API, 1999). Além destes processos, o óleo ainda está sujeito ao transporte devido à circulação do vento e das correntes de água (advecção). No caso da modelagem computacional, quanto mais fatores forem considerados, mais precisa será a representação do comportamento da dispersão mancha de óleo.

Os principais processos naturais de intemperismo estão indicados na Figura 3: espalhamento, evaporação, dispersão vertical, dissolução, emulsificação, sedimentação, foto-oxidação e biodegradação (FERNANDES, 2001). Muitos destes processos ainda não

são suficientemente conhecidos. Além de dependerem do tipo de óleo derramado, também são influenciados pelas condições climáticas e ambientais. Deste modo, muitas vezes se torna difícil a obtenção de formulações capazes de reproduzi-los, o que implica na utilização de fórmulas empíricas e simplificações.

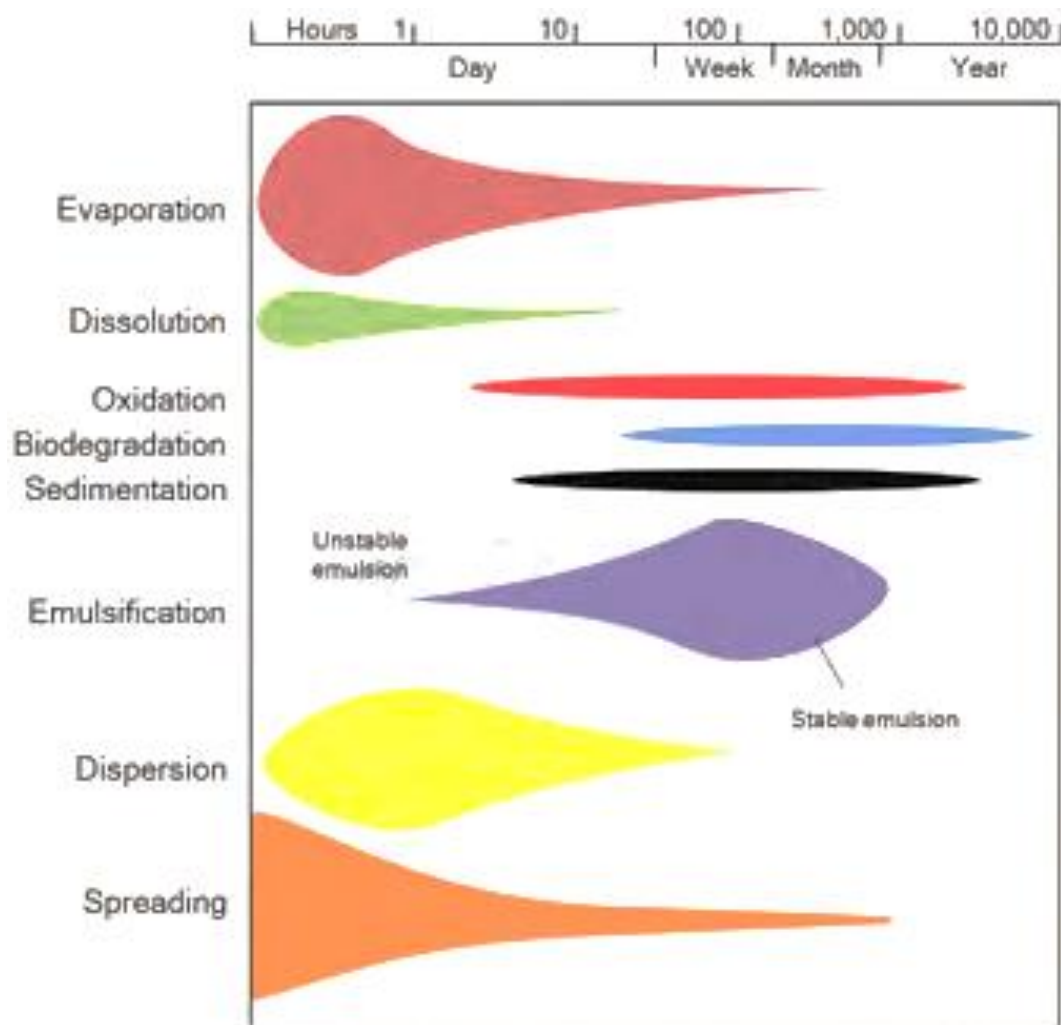
Figura 3 – Principais processos naturais de intemperismo envolvidos num derramamento de óleo.



Fonte: FERNANDES, 2001

Apesar de ocorrerem de forma simultânea, a importância relativa dos processos naturais varia ao longo do tempo decorrido após o incidente (Figura 4). Os processos de espalhamento, evaporação, dispersão e dissolução são os mais relevantes nos períodos iniciais de um derramamento. A emulsificação tende a se tornar mais expressiva após dias/semanas da exposição inicial do poluente ao ambiente, enquanto a oxidação, biodegradação e sedimentação – embora menos expressivas – ocorrem a longo prazo (SIQUEIRA, 2015).

Figura 4 – Representação esquemática da intensidade relativa dos principais processos de intemperismo que ocorrem ao longo do tempo após um derramamento de óleo.



Fonte: ITOPI, 2011a.

Após um derramamento de óleo, a tendência é que haja um espalhamento natural, resultando no aumento da área da mancha, devido à atuação das forças gravitacional e tensão superficial. O balanço de forças foi analisado por FAY (1969), assumindo uma mancha circular de espessura homogênea se espalhando em águas calmas, dividindo o processo em três fases: na fase inicial apenas a gravidade e a inércia são importantes; na fase intermediária, a gravidade e as forças viscosas predominam; e na fase final, a tensão superficial é balanceada pelas forças viscosas.

A fase inicial é muito curta, e muitas vezes não chega sequer a ser modelada diretamente. Entretanto a equação proposta para a área no final desta fase é muito utilizada para estimar a área inicial da mancha em *softwares* de modelagem (Equação 2), e o tempo até atingi-la (Equação 3).

$$A_0 = \pi \frac{k_2^4 (\Delta g V_0^5)^{1/6}}{k_1^2 \nu_W} \quad \text{Equação 2}$$

$$t_0 = \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^4 \left(\frac{V_0}{\Delta g \nu_W}\right)^{1/3} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$\Delta = \frac{\rho_W - \rho_O}{\rho_W}$, sendo ρ_W a densidade da água e ρ_O a densidade do óleo;

g = aceleração da gravidade [m.s^{-2}];

V_0 = volume inicial derramado [m^3];

ν_W = viscosidade cinemática da água [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$];

k_1 e k_2 = constantes empíricas adimensionais que variam conforme o autor (o *software* ADIOS usa os valores 1.53 e 1.21, respectivamente).

O espalhamento vai depender da viscosidade do óleo, que pode sofrer alterações em função da água do mar, e do volume derramado (ITOPF, 2011a), sendo que para óleos menos viscosos ele ocorrerá de forma mais rápida, estando diretamente relacionado com a advecção (API, 1999). Estes processos aumentam a área superficial do óleo, promovendo maior exposição ao ar e à radiação solar, e maior contato com a água, mas não alteram a composição química do produto. Com o passar do tempo e em função das outras variáveis (vento, ondas, turbulência, marés, correntes), a mancha pode ser deformada, fragmentada e dispersa, sofrendo outros intemperismos.

A evaporação é um dos principais processos envolvidos na remoção natural do óleo da superfície da água (API, 1999). Após um derramamento, os componentes mais voláteis, que possuem menor ponto de ebulição, vão rapidamente evaporar da superfície (API, 1999), reduzindo o volume e a massa de óleo que permanece na água (FERNANDES, 2001). A taxa de evaporação depende da radiação solar, da velocidade do vento, da agitação do corpo hídrico e da temperatura da água (API, 1999), sendo influenciada também pelo espelhamento inicial, pois é proporcional a área superficial da mancha (ITOPF, 2011a).

Nas primeiras 24 horas após o incidente, a maioria dos óleos mais densos perde entre 25 e 30% dos seus componentes mais leves. Para óleos menos densos, em poucas horas o volume original pode ser reduzido em 40% apenas devido à evaporação (COSTA, 1999 *apud* FERNANDES, 2001). Conforme o óleo continua a envelhecer e formam-se

emulsões com a água, a evaporação diminui. Este processo altera a composição química da mancha, uma vez que óleo residual tende a ter maior densidade e viscosidade em comparação à substância original (API, 1999).

Outro processo importante é a dispersão vertical, caracterizada pela formação e transporte de gotículas de óleo da superfície do mar para a coluna d'água, principalmente em função do vento e das ondas. Estas gotículas possuem diferentes tamanhos, e as menores não conseguem retornar à superfície devido à turbulência natural da água, difundindo-se na coluna (FERNANDES, 2001). A dispersão reduz o volume da mancha, sendo um dos processos mais importantes depois da evaporação (API, 1999).

A taxa de dispersão vertical depende fortemente da natureza do óleo e do estado de agitação do corpo hídrico (ITOPF, 2011a), da espessura e coesão da mancha, e da interação entre óleo e água (API, 1999). Hidrocarbonetos menos viscosos possuem maior facilidade para se dispersar. Este processo por si só não altera as propriedades do óleo, mas o óleo misturado em grandes volumes de água fica mais sujeito a outros processos de intemperismo, como é o caso da biodegradação, da dissolução e da sedimentação, sendo estes processos associados a diminuição da concentração do poluente.

A emulsificação se dá pela ocorrência de dispersão de pequenas gotículas de um líquido em outro. Deste modo, existem tanto emulsões de óleo na água (processo de dispersão definido anteriormente), quanto de água no óleo, formando o que é chamado de *mousse*. Emulsões estáveis podem conter entre 70 e 80% de água. Este processo pode aumentar o volume de poluente em até cinco vezes, gerando produtos altamente persistentes, e reduzindo a taxa de ocorrência de outros processos de intemperismo (ITOPF, 2011a).

A emulsificação é mais comum em produtos brutos (não refinados), que possuam cerca de 3% de asfaltenos e parafinas (em massa), conforme indicado nos estudos de FINGAS *et al.* (1996). Estudos de ELEY *et al.* (1988) mostraram que, com o decorrer do tempo e da mistura, ocorre a diminuição do tamanho das gotículas, o que aumenta a área de contato entre a água e o óleo, levando a emulsões mais viscosas. Deste modo, é importante considerar, além da quantidade total de água em emulsão (que permanece constante), a área interfacial (contato entre água e óleo).

A dissolução ocorre quando os hidrocarbonetos solúveis se fragmentam em partículas muito pequenas e se misturam com a água, formando uma massa líquida homogênea (FERNANDES, 2001). A taxa e extensão deste processo depende da composição do óleo e sua solubilidade em água, do espalhamento da mancha, da temperatura de água e do grau de dispersão (ITOPF, 2011a). É um processo que ocorre com os componentes do óleo, e não nele como inteiro (API, 1999).

São poucos os hidrocarbonetos que possuem esta capacidade de se solubilizarem em água, normalmente os de menor peso molecular, que acabam sendo evaporados mais rápido do que poderiam ser dissolvidos. Deste modo, este processo ocorre apenas nas primeiras horas, no máximo durante o primeiro dia após o incidente. A concentração de hidrocarbonetos dissolvidos raramente excede 1 ppm, e a dissolução não contribui significativamente para a remoção de óleo da superfície (ITOPF, 2011a).

Ainda, parte do óleo, principalmente quando disperso, pode se associar a sedimentos e matéria orgânica em suspensão, sofrendo sedimentação, que consiste no movimento descendente das partículas na coluna de água até o leito do corpo hídrico. Em áreas costeiras rasas, deltas de rios e estuários, normalmente a quantidade de sólidos suspensos é maior, apresentando condições favoráveis para a ocorrência deste processo (ITOPF, 2011a). O processo real de sedimentação é complicado e sua natureza ainda não é bem compreendida (LEHR *et al.*, 2002).

Os principais processos de degradação ocorrem a partir da exposição à luz solar (fotoquímica) ou da ação biológica (biodegradação). Na oxidação fotoquímica a luz ultravioleta incide sobre a mancha aumentando a presença de oxigênio nos seus componentes (LOPES, 2007). Este processo ocorre de forma lenta e apenas na superfície da mancha, sendo mais significativo em áreas com maior incidência de radiação solar, e tornando-se mais relevante com o envelhecimento do óleo. A oxidação fotoquímica pode ainda afetar o espalhamento e a formação de emulsões (API, 1999).

A biodegradação ocorre em função da ação de microrganismos (algas, bactérias e fungos) na transformação de hidrocarbonetos em compostos mais simples. Cada tipo de microrganismo está envolvido em processos de degradação de hidrocarbonetos específicos (ITOPF, 2011a). Este processo depende da área de contato com a água e seus microrganismos, mas não ocorre apenas na superfície; é lento e ocorre em pequena escala,

sendo facilitado por outros processos (espalhamento, dispersão, dissolução). A biodegradação depende da temperatura da água e da disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e oxigênio (API, 1999).

4.2.3 Consequências ambientais dos derramamentos

Os derramamentos de óleo afetam tanto o meio ambiente, quanto o meio socioeconômico. A extensão dos efeitos pode ser agravada em função do volume e do tipo de óleo, do tipo de descarga (instantânea ou contínua; superficial ou no fundo do mar), das condições meteorológicas, da época do ano, da sensibilidade do local e dos organismos. O comportamento do óleo depois de derramado, os processos de intemperismo predominantes, e as medidas de resposta ao incidente são fundamentais para determinar os impactos e sua extensão.

Ambientes como estuários e deltas, ao mesmo tempo em que são locais fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico, também são extremamente diversos de um ponto de vista ecológico. Em função das suas características (sedimentos, vegetação), acabam sendo bastante sensíveis à interação com o óleo, apresentando facilidade de retenção deste poluente. Deste modo, torna-se ainda maior a necessidade de protegê-los, assim como todo o ecossistema associado a eles, o que é refletido na atribuição dos maiores índices de vulnerabilidade nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO – ver item 4.5).

Os principais mecanismos a partir dos quais o óleo causa danos ao ambiente são sufocamento físico com impacto nas funções fisiológicas, toxicidade química (efeitos letais e subletais, perda das funções celulares), mudanças ecológicas (perda de organismos chaves para comunidades), além de efeitos indiretos (perda de habitats ou abrigos, com conseqüente eliminação de espécies) (ITOPF, 2011b). A camada de óleo espalhada na superfície impede as trocas gasosas (diminuindo a disponibilidade de oxigênio), e interfere na passagem da radiação solar (prejudicando a fotossíntese e causando redução da atividade primária, fonte de alimentação para diversas espécies).

Em relação à fauna, as aves estão entre os seres mais impactados em casos de incidentes com óleo. Os peixes, devido à sua elevada mobilidade, não são tão atingidos (ITOPF, 2011b), sendo os mais vulneráveis justamente aqueles associados a fundos consolidados (corais e rochas), em função do seu comportamento territorial

(LOPES, 2007). Os mamíferos marinhos podem ser afetados quanto sobem à superfície para respirar. O Quadro 1 apresenta os principais efeitos da poluição por óleo aos quais estes grupos estão sujeitos.

Quadro 1 – Principais efeitos da poluição por óleo na fauna encontrados na literatura.

Peixes	Aves	Mamíferos
Dificuldade na respiração e locomoção; lesões hepáticas causadas por ingestão (FERNANDES, 2001). Desorientação causada por frações aromáticas de hidrocarbonetos solubilizados (LOPES, 2007).	Contaminação da plumagem devido ao contato com o óleo (<i>fouling</i>), afetando a capacidade de regulação da temperatura corporal (MONTEIRO, 2003 <i>apud</i> GURGEL, 2016). Lesões nos pulmões, trato gastrointestinal, fígado, rins, glândulas adrenais e glóbulos vermelhos causadas por ingestão (ITOPF, 2011b).	Hipotermia, dermatites, irritação das mucosas (LOPES, 2007). Alteração do odor natural; morte por asfixia; falhas hepáticas, interferência na absorção de nutrientes, e desordens neurológicas causadas por ingestão (FERNANDES, 2001).

Fonte: Adaptado de FERNANDES, 2001; LOPES, 2007; MONTEIRO, 2003 *apud* GURGEL, 2016; ITOPF, 2011b.

Entre as outras consequências do derramamento de óleo estão a liberação de compostos tóxicos para a atmosfera e sua infiltração no solo. Existe ainda um tipo altamente lipofílico de hidrocarbonetos, os aromáticos policíclicos (HPAs). Eles tendem a se associar com sedimentos em suspensão e sedimentar, gerando efeitos persistentes após a ocorrência de um derramamento (LOPES, 2007). A persistência do óleo sedimentado é maior do que na coluna d'água (BÍCEGO, 1988; ZANARDI, 1996), uma vez que ele fica menos exposto aos efeitos da turbulência da radiação solar.

Os impactos econômicos também podem ser grandes, tendo em vista que, dependendo da proporção do incidente, é provável que seja necessário impor restrições temporárias nas áreas atingidas, como a suspensão de atividades de recreação (afetando o turismo), assim como de transporte e navegação (afetando o comércio). Também é possível que haja interferência em atividades que dependam da água, inviabilizando a captação ou aumentando os custos do tratamento.

4.3 EVOLUÇÃO DA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

A preocupação em relação ao óleo como poluente aumentou a partir dos anos 1950, sendo motivo de atenção em conferências internacionais. A OILPOL (Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição do Mar por Petróleo), ocorreu em 1954 e foi a primeira vez em que foram impostos limites de descarga de misturas oleosas por navios petroleiros (PEDROSA, 2012).

A partir das décadas de 1970 e 1980, os problemas ambientais começaram a ser tratados de forma sistemática no Brasil, sendo a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, realizada em junho de 1972, em Estocolmo, um divisor de águas. Tornou-se uma necessidade adotar estratégias para o controle da poluição e para disciplinar as relações entre o homem e o meio ambiente, de modo a proteger ambos dos efeitos associados à crescente exploração irracional de recursos.

A OPRC-90 (Convenção Internacional sobre Mobilização de Recursos, Resposta e Cooperação contra Poluição por Óleo) é uma das conferências internacionais mais relevantes, pois incluiu nos seus objetivos a cooperação internacional em caso de acidentes, a notificação de incidentes, a existência de planos de emergência visando ao controle da poluição por óleo, e um sistema nacional de resposta imediata. No Brasil, foi promulgada pelo Decreto nº 2.870, de 10 de dezembro de 1998.

Em relação à legislação ambiental brasileira, destaca-se, ainda, a Lei nº 9.938/1981, que estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente, marco importante no âmbito nacional com a criação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Na Constituição Federal de 1988, o meio ambiente foi alçado ao status de norma constitucional.

A Lei nº 9.433/1997, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), determina a utilização racional e múltipla dos recursos hídricos com vistas ao desenvolvimento sustentável, incluindo o transporte aquaviário. Conceitos similares compõem a Política Nacional para os Recursos do Mar (PNRM), aprovada pelo Decreto nº 5.377/2005, que tem entre seus objetivos a exploração racional dos oceanos, visando ao desenvolvimento econômico e social do país e à segurança nacional.

A chamada “Lei do Óleo” (Lei nº 9.966, de 28 de abril de 2000), dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional. Associado, o Decreto nº 4.136/2002 define o que constitui infração às regras e inobservância aos preceitos constantes na Lei do Óleo e aos outros instrumentos internacionais ratificados pelo Brasil, especificando as sanções aplicáveis.

O Decreto nº 4.871/2003 dispõe sobre a instituição dos Planos de Áreas para o combate à poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional. Já o Decreto nº 8.127/2013 instituiu o Plano Nacional de Contingência (PNC), no qual foram fixadas responsabilidades e se estabeleceu a estrutura organizacional da atuação coordenada de órgãos da administração pública e entidades públicas e privadas, visando ampliar a capacidade de resposta em incidentes de poluição por óleo ou substâncias perigosas, minimizando danos ambientais e evitando prejuízos para a saúde pública.

O CONAMA estabeleceu na Resolução 398/2008 o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo em águas jurisdicionais brasileiras, caracterizando-se como documento de referência em âmbito nacional. Além disso, as Resoluções CONAMA 472/2005 e CONAMA 482/2017 tratam, respectivamente, do uso de dispersantes químicos e da queima controlada emergencial como ações de resposta a derramamentos de óleo no mar. Ainda, a Portaria nº 53/1997 do Ministério do Trabalho dá providências sobre segurança e saúde no trabalho portuário.

4.4 PLANO DE EMERGÊNCIA INDIVIDUAL (PEI)

O Plano de Emergência Individual (PEI) é um documento obrigatório no processo de licenciamento ambiental de portos organizados. Entre os conteúdos que devem ser abordados no PEI destaca-se a identificação e avaliação dos riscos por fontes, hipóteses acidentais, análise de vulnerabilidade, informações e procedimentos de resposta, e sistemas de alerta (BRASIL, 2021).

O documento de referência para elaboração do PEI – Modo Portuário, disponibilizado pelo Ministério da Infraestrutura (BRASIL, 2021), define cenários acidentais como “o resultado de eventos não desejados, decorrentes de falha humana, de procedimentos ou de equipamentos nas operações do porto, acarretando impactos

negativos ao meio ambiente e à saúde humana”. Para isto, deve-se considerar a totalidade das atividades desenvolvidas, identificando e avaliando os riscos de cada fonte potencial.

Por definição da CONAMA 398/2008, “portos organizados, instalações portuárias, terminais e estaleiros, mesmo aqueles que não operam com carga de óleo, deverão considerar cenários acidentais de poluição de óleo por navios”. Entre os acidentes possíveis na operação estão os decorrentes de manobras de atracação, desatracação e docagem, carga e descarga, abastecimento, transferência de óleo entre tanques, movimentação na bacia de evolução, colisão, encalhe, fissuras de casco, naufrágios.

Também é previsto na elaboração do PEI que seja considerado o óleo proveniente da operação de instalações de combate a incêndio, da geração de energia por equipamentos movidos a motores de combustão interna e da poluição por meio do sistema de drenagem do porto. Devem ser avaliados cenários e respostas para descargas pequenas (até 8 m³), médias (até 200 m³), e de pior caso (definida com base na análise dos riscos e característica de cada empreendimento). Além disso, a análise da vulnerabilidade, quando possível, deve considerar as Cartas SAO disponíveis.

4.5 CARTAS SAO

As Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (Cartas SAO) são documentos que visam à proteção da vida humana e a redução das consequências de um incidente envolvendo o poluente, direcionando esforços de limpeza e contenção. Nas Cartas é possível identificar ambientes prioritários com base na vulnerabilidade, fornecendo informações para o planejamento de contingência e implementação de ações de resposta, de modo que os recursos e as equipes possam ser melhor direcionados (BRASIL, 2007).

Estas Cartas SAO devem atender aos diferentes níveis de derramamentos de óleo, e o mapeamento pode ser feito em diferentes escalas (níveis, estratégico, tático e operacional, o último mais detalhado). Entre as informações principais, devem indicar a sensibilidade ambiental do litoral ao óleo através do índice ISL (Índice de Sensibilidade do Litoral), baseado nas características geomorfológicas da costa (tipo de substrato, declividade do litoral, grau de exposição à energia de ondas e marés). O esquema de cores para a classificação do ISL é mostrado na Figura 5.

Além disso, as Cartas devem indicar os recursos biológicos sensíveis ao óleo que existem na área, com destaque para espécies em risco e locais importantes para o desenvolvimento dos seres vivos. Por fim, também devem abordar as atividades econômicas que podem ser prejudicadas tanto pelo incidente quanto pelas ações de resposta (áreas de recreação, lazer, pesca, maricultura, unidades de conservação, tomadas d'água, etc.).

Figura 5 – Esquema de cores para a classificação do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) conforme utilizado nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO).

COR	ÍNDICE	CÓDIGO			TIPOS DE COSTA
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos ▪ Falésias em rochas sedimentares, expostas ▪ Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas
	ISL 2	174	153	191	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos ▪ Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)
	ISL 3	0	151	212	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias dissipativas de areia média a fina, expostas ▪ Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach") ▪ Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos ▪ Campos de dunas expostas
	ISL 4	146	209	241	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias de areia grossa ▪ Praias intermediárias de areia fina a média, expostas ▪ Praias de areia fina a média, abrigadas
	ISL 5	152	206	201	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais ▪ Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação ▪ Recifes areníticos em franja
	ISL 6	0	149	32	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Praias de cascalho (seixos e calhaus) ▪ Costa de detritos calcários ▪ Depósito de tálus ▪ Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) expostos ▪ Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)
	ISL 7	214	186	0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planície de maré arenosa exposta ▪ Terraço de baixa-mar
	ISL 8	225	232	0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada ▪ Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada ▪ Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados ▪ Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados
	ISL 9	248	163	0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas ▪ Terraço de baixa-mar lamoso abrigado ▪ Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
	ISL 10	214	0	24	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deltas e barras de rio vegetadas ▪ Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas ▪ Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; apicum ▪ Marismas ▪ Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)

Fonte: BRASIL, 2007.

4.6 DINÂMICA DOS FLUIDOS

O movimento de fluidos é determinado por três princípios fundamentais baseados nas leis da física e da termodinâmica: conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia. Na concepção geral de volume de controle isso quer dizer que, em um sistema aberto, a taxa temporal de variação do volume de uma determinada propriedade será igual a diferença entre as entradas e saídas desta grandeza, somada à taxa resultante das variações internas de produção e consumo no interior deste volume.

O estudo do movimento dos fluidos pode ser abordado de forma lagrangeana e euleriana. Na descrição lagrangeana, acompanham-se partículas individuais ou coleções de partículas de fluido, enquanto que, na descrição euleriana, define-se um volume de controle através do qual o fluido escoar para dentro e para fora. As equações do movimento são transformadas entre as duas abordagens utilizando a derivada material para partículas infinitesimais de fluido e o teorema de transporte de Reynolds (TTR) para sistemas com volume finito (ÇENGEL & CIMBALA, 2012).

O escoamento à superfície livre é caracterizado por uma interface entre o ar e a camada superior da água sem limitações a deformações na qual a pressão é constante, sendo normalmente a pressão atmosférica. De acordo com o número de variáveis espaciais das quais depende o vetor velocidade, o escoamento pode ser estudado como uni, bi ou tridimensional (POTTER & WIGGERT, 2009). Além disso, o fluxo pode ser classificado quanto à sua variação no tempo (permanente ou não permanente), à variação das suas grandezas no espaço (uniforme ou não uniforme), ao movimento de suas partículas (laminar ou turbulento), e à razão entre as forças inerciais e gravitacionais às quais está sujeito (subcrítico, crítico ou supercrítico) (CHAUDHRY, 2008).

Em sistemas reais, o mais provável é que as condições do fluxo não sejam constantes, uma vez que podem sofrer variações tanto em função dos processos naturais, quanto de ações humanas, ou ainda devido a acidentes ou incidentes, tornando a análise mais complexa. Como as variáveis do fluxo (velocidade, profundidade) dependem de mais de uma variável independente (tempo e espaço), é necessário a utilização de equações diferenciais parciais para descrever o escoamento (CHAUDHRY, 2008). A resolução analítica destas equações só é possível em casos muito simplificados, tornando-

se inviável na solução de problemas de geometrias, condições iniciais e condições de contorno complexas (SOTO, 2004).

A dinâmica dos fluidos está implicitamente envolvida com as questões ambientais, uma vez que fornece a base física para os processos de transporte de calor, massa e quantidade de movimento no ambiente. Estes processos são relacionados pelas leis de fluxo de gradiente, que combinam uma propriedade do fluido com o gradiente da variável de estado, e, juntamente com os princípios de conservação de calor, massa e quantidade de movimento, fornecem a base para o transporte de advecção-difusão (POTTER & WIGGERT, 2009).

A advecção e a difusão são os principais mecanismos de transporte de massa, estando o primeiro relacionado ao movimento das correntes, e o segundo à diferença de concentração e à turbulência. A soma dos efeitos causados pelos dois mecanismos é chamada de dispersão (BORCHE, [s.d.; a]).

4.7 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Essencialmente o estudo de escoamentos não permanentes (variáveis no tempo) e não uniforme (cujas grandezas são funções do espaço) pode ser desenvolvido com dois tipos de modelagem: física e matemática. A primeira envolve a utilização de modelos físicos, enquanto a segunda requer o uso das leis básicas da física, relações constitutivas, métodos numéricos e equacionamentos complementares (SIMÕES *et al.*, 2017), transformando as equações originais em formas discretas e aplicando condições de contorno adequadas.

Um modelo matemático é composto por um conjunto de equações diferenciais infinitesimais no tempo e espaço contínuos que governam as relações entre as variáveis de interesse, associado a condições iniciais para cada uma (com diferenciais temporais ao longo do espaço), e condições de contorno (com diferenciais espaciais ao longo do tempo) (SISBAHIA, 2021). As condições iniciais e de contorno são o que possibilitam encontrar uma solução única para cada caso, sendo sempre específicas para cada corpo hídrico estudado e cenário de interesse analisado.

Os modelos numéricos traduzem os modelos matemáticos adaptando-os para diferentes métodos de resolução de cálculo. Na modelagem computacional, que é a

aplicação do modelo numérico, é necessário considerar a relação entre a velocidade de propagação da informação no meio físico, e a velocidade de propagação da informação em uma malha de cálculo. Isso é feito através da Condição de Courant. Para modelos bidimensionais de malha regular e quadrada, indica-se a Equação 4, sendo que o intervalo de tempo da simulação deve ser ajustado de modo a não obter um valor de C maior do que 5.

$$C = \sqrt{2gh_m} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

g = aceleração da gravidade [m.s^{-2}];

h_m = altura média da malha de cálculo [m];

Δt = intervalo de tempo de cálculo [s];

Δx = tamanho da malha de cálculo [m].

Na sua aplicação hidrodinâmica, os modelos computacionais possibilitam o entendimento da circulação de um corpo hídrico a partir da avaliação da alteração da taxa de quantidade de movimento (produto da vazão mássica e da velocidade), que gera variações nos níveis e nas correntes. Além disso, também podem ser utilizados na avaliação do transporte de substâncias e processos sedimentológicos. A modelagem computacional pode ser vista como importantes para a gestão e planejamento ambiental.

Por fim, dois conceitos importantes são o de modelo calibrado e validado. Enquanto o primeiro considera a capacidade de representação de uma situação conhecida (diagnóstico), o segundo considera a capacidade de continuar fornecendo resultados coerentes para um conjunto de condicionantes alternativos (prognóstico). O ambiente estudado (modelado) deve ser representado de forma adequada para gerar resultados coerentes.

4.7.1 Estudos anteriores de modelagem no Rio Guaíba

SCHWARZBACH *et al.* (1997) aplicou tanto o modelo de correntologia quanto o de transporte de poluentes do *software* IPH-A à Baía de Ipanema, num estudo que envolveu diversas campanhas de campo para a realização de sua calibração. JOBIM (2012) simulou a dispersão de poluentes no Rio Guaíba com o mesmo *software*.

PIERRAT (2016) estudou a balneabilidade das praias do Lami e Belém Novo – Porto Alegre/RS com o *software* DMAE-Map.

Outro documento relevante envolvendo a modelagem hidrodinâmica e de transporte de contaminantes do Guaíba é o II Relatório Complementar de Avaliação de Impacto do Projeto Socioambiental ETE Serraria (PISA, 2013), no qual foram aplicados os dois *softwares* que serão utilizados neste estudo, o já referido IPH-A e o SisBaHiA. A base de dados utilizada neste estudo foi disponibilizada pelo consultor técnico envolvido no projeto.

4.7.2 Estudos anteriores de modelagem de dispersão de mancha de óleo

Ainda não foi realizado nenhum estudo de modelagem de manchas de óleo na região do Rio Guaíba. Estudo semelhante foi desenvolvido para a área de atuação do Porto do Rio Grande/RS utilizando o *software* MOHID (MARTINHO, 2010). MONTEZUMA (2004) modelou cenários de derramamento de óleo na Baía de Ilha Grande/RJ para elaboração do Plano de Emergência com o *software* SisBaHiA.

O SisBaHiA também foi utilizado para estudos de caso de dispersão de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paraguá/PR (SOTO, 2004), no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte (SOUZA, 2006), na zona costeira entre Macau e Galinhos/RN (GOIS, 2008), no Rio Tietê – Reservatório de Barra Bonita/SP (BENEDITTI, 2015) e na Enseada dos Anjos – Arraial do Cabo/RJ (GURGEL, 2016).

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo foi composta pela caracterização da área de interesse, o Porto de Porto Alegre, e do corpo hídrico associado, o Rio Guaíba, além da definição dos *softwares* utilizados e a compreensão da sua utilização, assim como o levantamento de dados e informações relevantes para sua aplicação. Por fim, foram definidos os cenários hidrodinâmicos e hipóteses acidentais para os quais as simulações hidrodinâmicas e de transporte de contaminante foram realizadas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE

A caracterização da área de interesse é fundamental em qualquer estudo ambiental realizado. Desde modo, foi necessário primeiro entender como o Porto de Porto Alegre se insere no contexto, principalmente em termos de atividades desenvolvidas e localização, a fim de se propor uma hipótese acidental de derramamento de óleo representativa, uma vez que ele não possui um estudo de Análise de Riscos. Na sequência, foi importante caracterizar o corpo hídrico que será efetivamente simulado nos modelos computacionais (Rio Guaíba), aumentando-se as chances de obter resultados coerentes e que possam fornecer subsídios adequados para uma boa gestão ambiental.

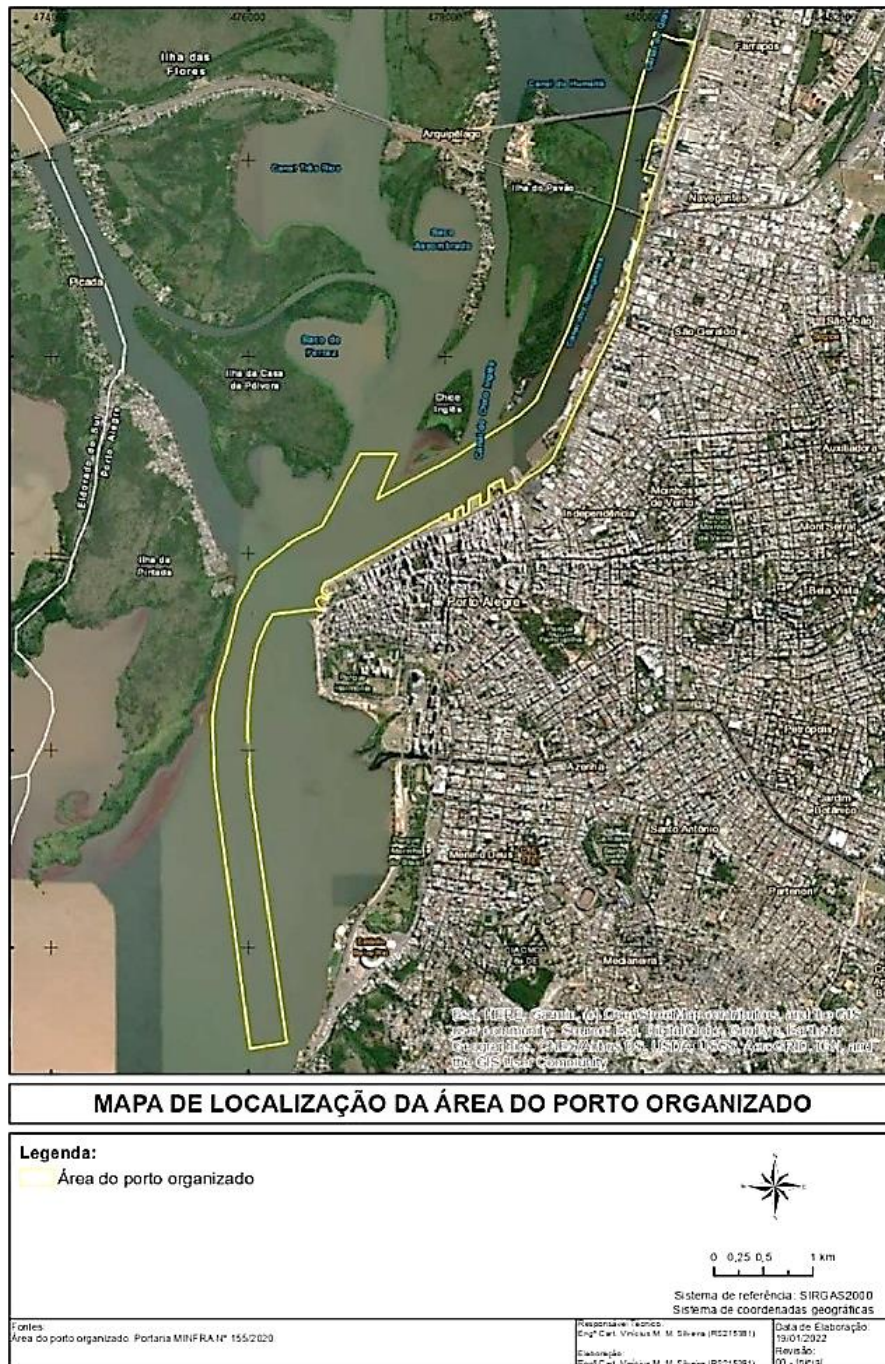
5.1.1 Porto de Porto Alegre

O Porto de Porto Alegre localiza-se na margem leste do Rio Guaíba, próximo ao Delta do Jacuí (entrada dos principais afluentes do Guaíba), no noroeste da cidade de Porto Alegre. Está a uma distância de 4 km do Aeroporto Salgado Filho e possui ligações com diversas rodovias, além de acessos ferroviários (Cais Mauá e Navegantes). O acesso hidroviário entre os Portos de Rio Grande e Porto Alegre tem 310 km de distância (PORTOS RS, c2022).

A Portaria nº 155/2020 do Ministério da Infraestrutura definiu a área do Porto Organizado de Porto Alegre (instalações portuárias e infraestrutura de proteção e de acesso ao porto), indicada na Figura 6. Apesar de possuir características fluviais, o Porto de Porto Alegre é classificado como marítimo pela Resolução nº 2969/2013 da ANTAQ. Integra o sistema hidroportuário do Rio Grande do Sul, sendo gerenciado pela empresa

Portos RS. Neste momento, atua com a Licença de Operação (LO) nº 01602/2020, válida até 23 de março de 2025.

Figura 6 – Mapa da poligonal da área do Porto Organizado de Porto Alegre.



Fonte: PORTOS RS, 2022.

O Porto possui 8 km de cais acostável, divididos entre os cais Mauá, Navegantes e Marcílio Dias (Figura 7), mas desde 2005 as atividades se concentram no Cais Navegantes, com capacidade para operação de até três navios de longo curso de forma simultânea. Existe uma Área de Fundeio na parte frontal ao Cais Mauá, que pode ser

utilizada por navios que transportem carga perigosa, mediante autorização da Delegacia da Capitania dos Portos, por até 6 horas visando a espera para abertura do vão móvel da ponte Getúlio Vargas ou visitas de autoridades portuárias. Para os demais navios, também mediante autorização, o tempo permitido é de até 12 horas (PORTOS RS, c2022).

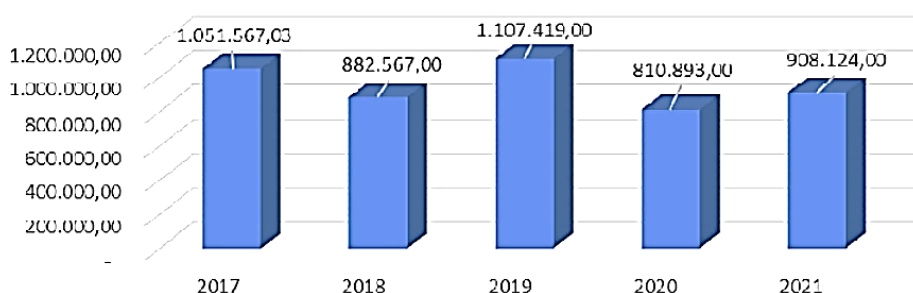
Figura 7 – Mapa de localização dos Cais Mauá, Cais Navegantes e Cais Marcílio Dias do Porto de Porto Alegre.



Fonte: PORTOS RS, 2022.

O Porto tem grande influência no eixo Porto Alegre-Caxias e municípios no entorno, se destacando pela diversidade operacional, movimentando em média um milhão de toneladas por ano (PORTOS RS, c2022). Na Figura 8 está ilustrado o histórico de movimentação de cargas entre 2017 e 2021 (até o mês de outubro) na Tabela 2 podem ser vistos os tipos e os volumes operados entre os meses de janeiro e outubro de 2021. Entre os insumos movimentados estão principalmente fertilizantes, grãos (cevada, milho e trigo) e sal.

Figura 8 – Histórico de movimentação de cargas no Porto de Porto Alegre (toneladas) entre os anos de 2017 e 2021 (até o mês de outubro).



Fonte: PORTOS RS, 2022 – adaptado

Tabela 2 – Tipologias de carga e volumes operados pelo Porto de Porto Alegre, de janeiro a outubro de 2021.

Tipologia de carga	Movimentação (ton)
Aubos (fertilizantes)	630.000
Cevada	130.000
Milho	70.000
Sal	40.000
Trigo	40.000
Transformador Elétrico	1.000
Soja em Grão	4.000
Bobina de Ferro ou Aço	10.000
Produtos Laminados Planos, Ferro/Aço	Não disponível

Fonte: PORTOS RS, 2022 – adaptado

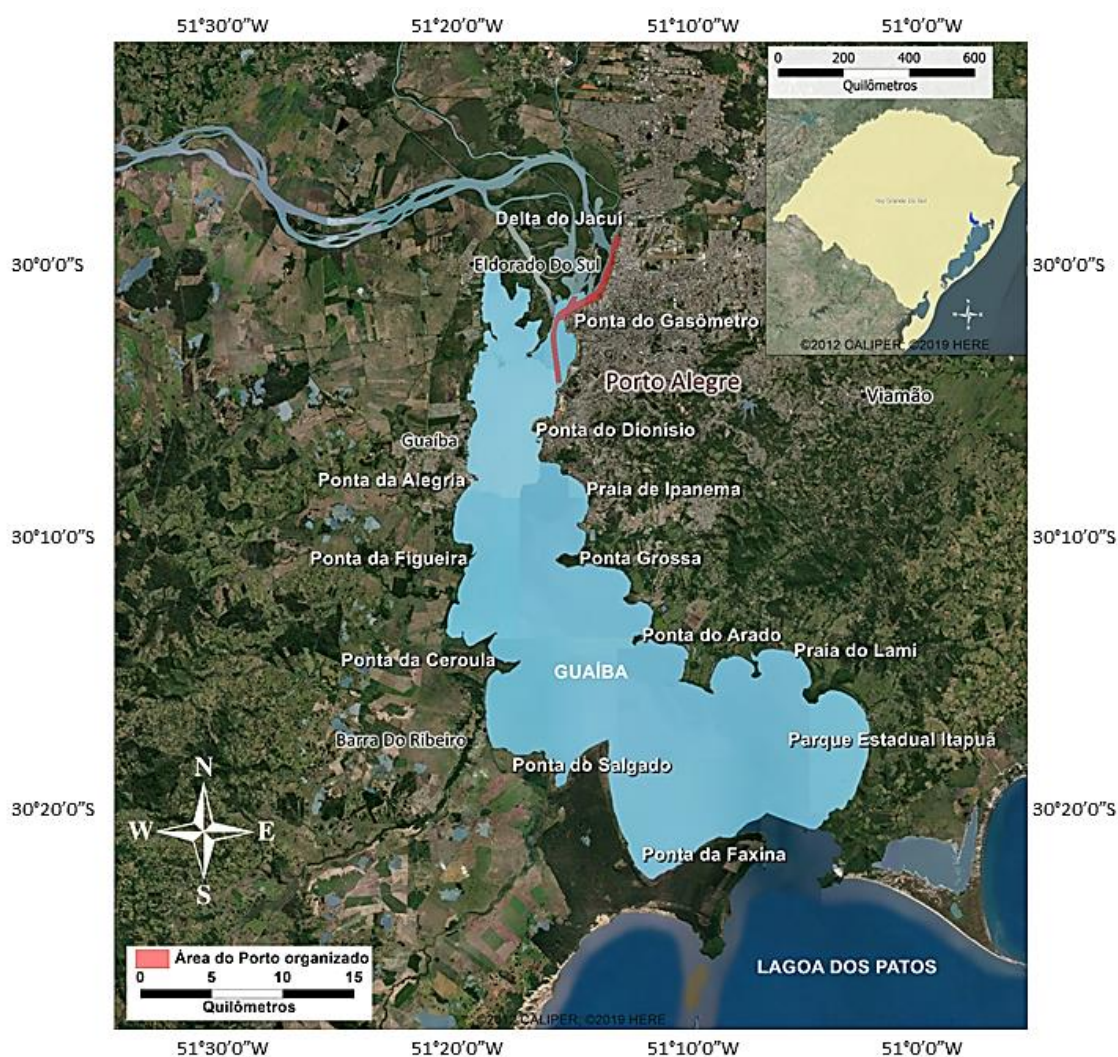
5.1.2 Rio Guaíba

O Rio Guaíba está inserido na Região Hidrográfica de mesmo nome, que corresponde a 30% da área do estado, abrangendo 251 municípios no centro e nordeste do RS, entre eles Porto Alegre, e concentrando 61% da população (FEPAM, c2022). O Guaíba possui 496 km² de área superficial, cerca de 50 km de comprimento e largura máxima de 20 km, com profundidade média de 2 m, podendo chegar a 12 m no canal de

navegação. Na margem leste são 85 km de terra (70 km no município de Porto Alegre), e na margem oeste são 100 km (DMAE, c2022).

Este corpo hídrico é utilizado para diversos fins, dos quais se destacam navegação, recreação, extração de areia, além de captação de água para abastecimento da capital e da sua região metropolitana. Em função da sua extensão, em alguns momentos fica mais claro descrever o Rio Guaíba considerando alguns pontos que recebem uma denominação específica. Assim, é apresentado na Figura 9 o mapa de localização, ideia adaptada de SCOTTA (2018), o qual será bastante utilizado na análise dos resultados.

Figura 9 – Mapa de localização do Rio Guaíba.

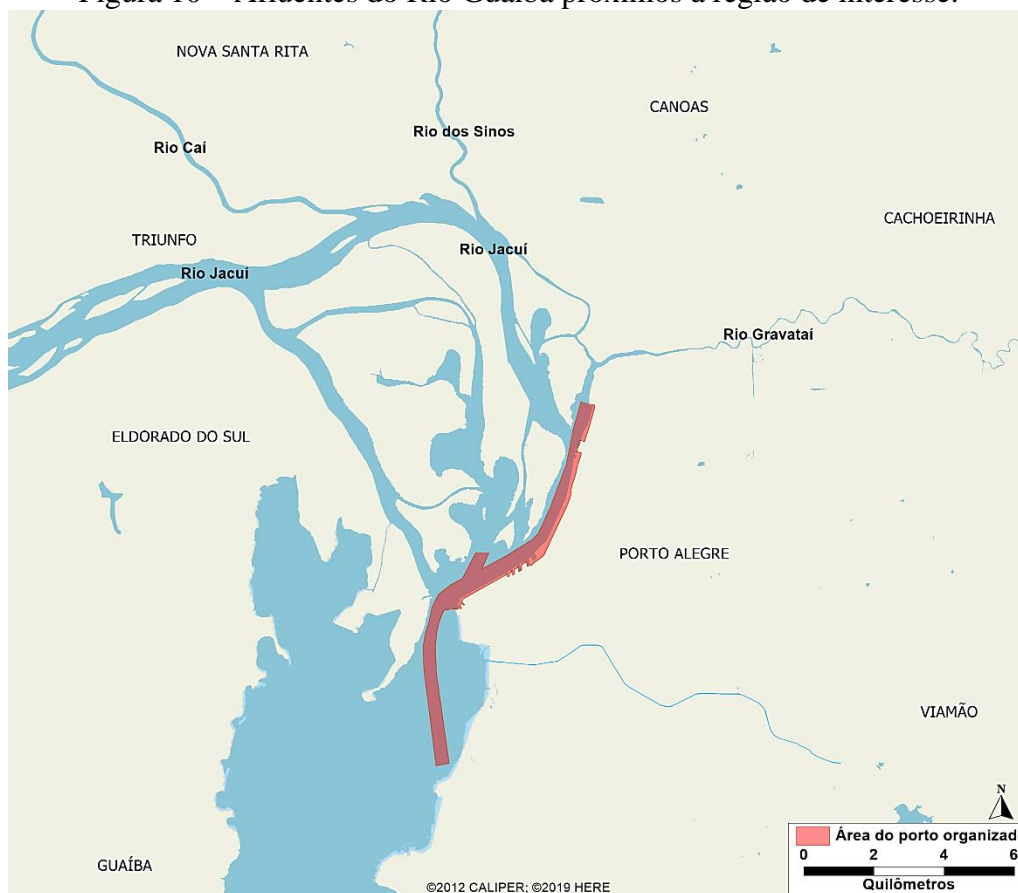


Fonte: CALIPER, 2019 – adaptado.

Nas proximidades da região de interesse deste estudo (área do Porto de Porto Alegre), existem quatro afluentes importantes do Guaíba (Figura 10). O Rio Jacuí é o principal deles, uma vez que é o maior contribuinte para a vazão de entrada, sendo

responsável por aproximadamente de 85% da descarga. Já os Rios Caí, Sinos e Gravataí contribuem com cerca de 5%, 7% e 2,5%, respectivamente (JOBIM, 2012).

Figura 10 – Afluentes do Rio Guaíba próximos à região de interesse.



Fonte: CALIPER, 2019 – adaptado.

O Rio Guaíba conta com um regime hidrodinâmico complexo, tanto no período de cheias, quanto durante a época de estiagem. SCHWARZBACH *et al.* (1997) o classificou como “um estuário cujo fluxo apresenta características predominantemente lacustres, exceto no canal de navegação que atravessa sua extensão longitudinal, cujo escoamento é fluvial”.

NICOLODI (2007), com base nos múltiplos fatores que intervêm no seu escoamento (dando destaque para a influência do vento), indicou que o Guaíba “não é só um canal de extensão dos seus tributários, mas um tipo de reservatório, intimamente ligado à Laguna dos Patos”. Dentre as condicionantes que determinam a sua dinâmica (e as variáveis associadas), estão: geometria (batimetria, comprimento, largura), correntes (velocidade, direção), ondas (altura, direção, frequência), sedimentos (granulometria, distribuição, ressuspensão) e nível d’água (variações).

Existem poucos estudos da descarga líquida no Rio Guaíba e a maioria deles considera dados de rios afluentes (VAZ *et al.*, 2006, ANDRADE NETO *et al.*, 2012), porém sem medições *in situ*. SCOTTÁ *et al.* (2020) fez uma análise três seções (Ponta do Gasômetro, Ponta do Dionísio e Ponta Grossa – ver Figura 9), a partir da realização de 22 campanhas de medições com o uso de um Perfilador de Correntes Marinhas (ADCP) entre junho de 2014 e janeiro de 2017. Os resultados obtidos foram comparados com a estimativa de vazão nos principais afluentes (rios Jacuí, Taquari – que é na verdade um tributário do Jacuí, Cai e Sinos; não foi considerado o Gravataí), encontrando-se uma boa correlação ($R^2 = 0,93$) para os valores medidos na Ponta do Gasômetro.

SCOTTA *et al.* (2020) observou ainda um comportamento tridimensional do escoamento, indicou que as descargas líquidas recebidas pelo Guaíba apresentam escoamento preferencial em direção à Lagoa dos Patos (orientado pelo canal longitudinal, que possui maiores profundidades e menor resistência ao fluxo). Além disso, verificou que a seção do Gasômetro, mais estreita, apresenta as maiores velocidades. Foram, ainda, registradas neste estudo duas situações de inversão nos perfis de corrente medidos, relacionados com a ocorrência de ventos dos quadrantes S e SE.

BORCHE & CYBIS (1985) *apud* NICOLODI (2007) indica que “apesar de predominar o sentido natural de escoamento (Guaíba – Lagoa dos Patos) as águas do rio podem sofrer forte influência eólica, o que causa represamento e inversão dos fluxos, no caso de ventos do quadrante Sul. As variações na velocidade do vento causam oscilações diárias no nível do Guaíba, e as variação dos níveis, por sua vez, seriam a principal força para a geração de correntes no rio. NICOLODI (2007) destaca que pouco se conhece sobre esta complexa dinâmica, e indica que a força de Coriolis e a maré em Rio Grande também atuam como fatores secundários. As oscilações acabam apresentando comportamento de certa forma regular, e durante o período de estiagem ficam mais sensíveis à velocidade eólica do que no período de cheia.

5.1.2.1 Clima

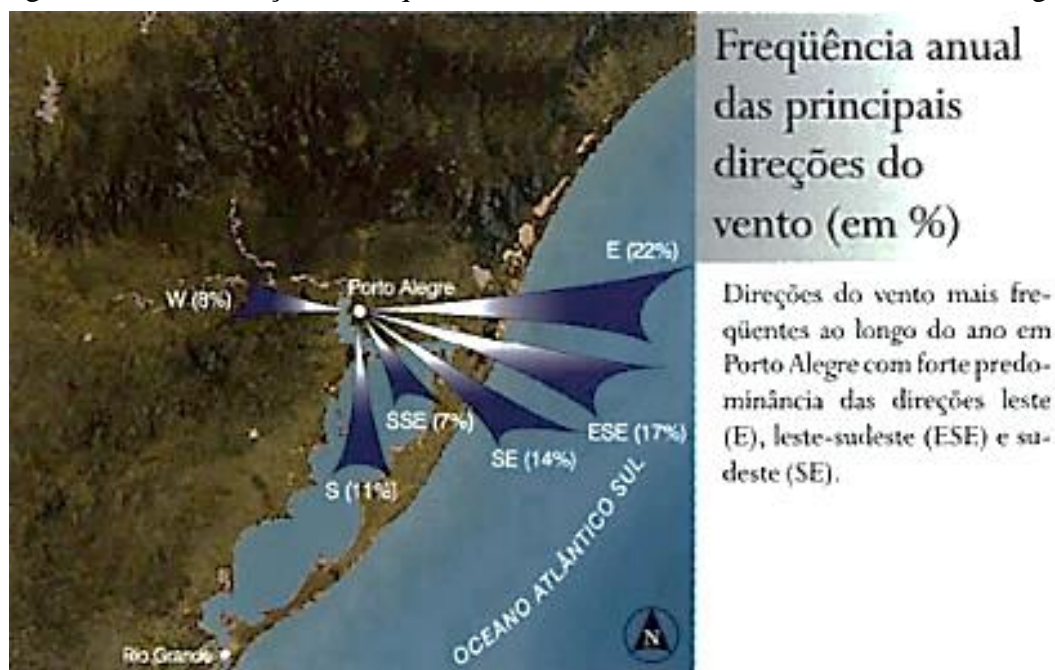
Conforme a classificação de KOEPPEN (1948), o clima da região de Porto Alegre possui características de subtropical úmido (tipo Cfa), com chuvas bem distribuídas durante o ano e as temperaturas médias do mês mais quente maiores do que 22 °C. A temperatura média do ar é 19,4 °C e, para o período entre 1912 e 1997, a precipitação anual média determinada por LIVI (1998, *apud* NICOLODI, 2007) foi de 1.324 mm.

5.1.2.2 Vento

Um dos primeiros estudos que envolveu a sistematização de dados climatológicos foi o realizado por COUSSIRAT DE ARAÚJO (1930, *apud* PISA, 2013), analisando uma série de dados eólicos de 1918 a 1925. Em relação à direção, para Porto Alegre, foi observado predominância de ventos vindos do Sudeste (SE) no ano como um todo, no verão, no outono e na primavera, sendo que apenas no inverno houve um aumento de ventos vindos do Sul (S). A média anual das velocidades foi de 1,8 m/s, maiores na primavera e no verão (2 m/s) e mais baixas no outono e no inverno (1,5 m/s). Os meses com maiores médias de velocidade foram setembro e outubro, e os menores abril e maio.

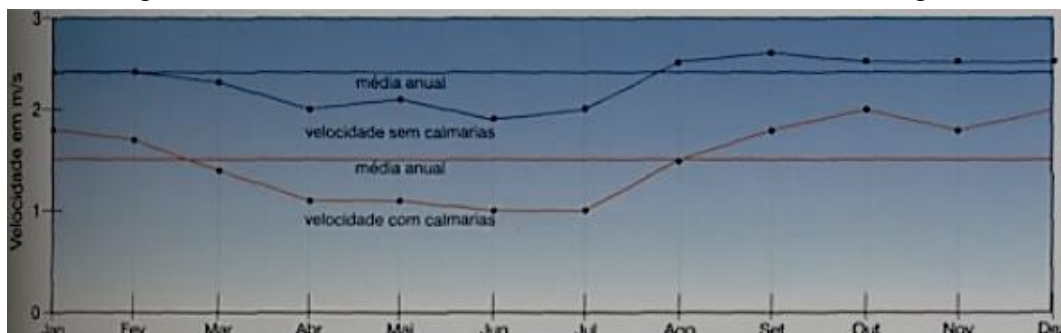
Ainda, em 1998, a análise do conjunto de dados entre 1912 e 1997 realizada por LIVI (1998, *apud* NICOLODI, 2007; PISA, 2013) mostrou tendências semelhantes às encontradas em 1930. Na Figura 11 está indicada a distribuição da frequência anual das principais direções do vento encontradas neste estudo para Porto Alegre, enquanto a Figura 12 indica as velocidades médias anual e mensais obtidas e a Figura 13, a variação diária da velocidade do vento.

Figura 11 – Distribuição da frequência anual dos ventos incidentes em Porto Alegre.



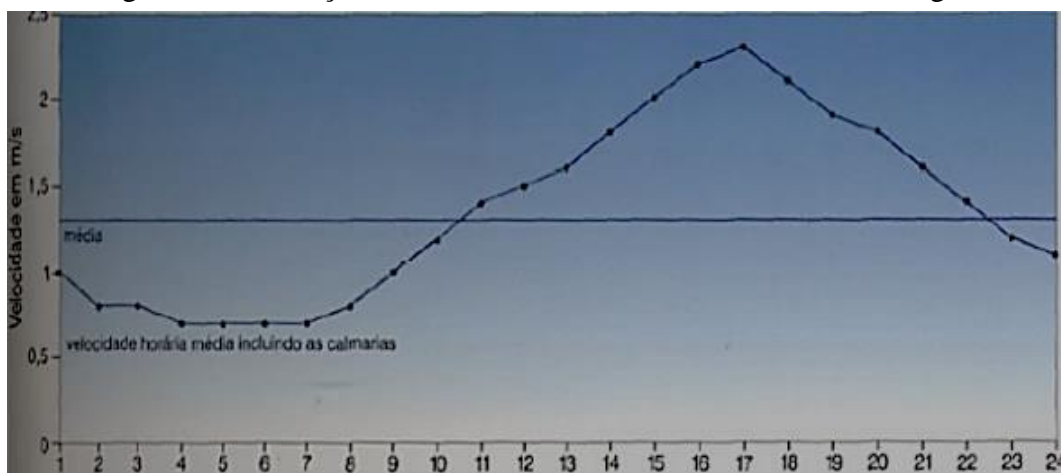
Fonte: LIVI (1998) *apud* NICOLODI (2007).

Figura 12 – Velocidades médias anual e mensais em Porto Alegre.



Fonte: LIVI (1998) *apud* NICOLODI (2007).

Figura 13 – Variação diária da velocidade do vento em Porto Alegre.



Fonte: LIVI (1998) *apud* PISA (2013).

As variações sazonais são explicadas por NICOLODI (2007) com base nos sistemas de alta pressão atuantes. O autor destaca que no verão os ventos sopram com maior regularidade, no outono há uma diminuição da movimentação das massas de ar, no inverno aumenta a tendência de ventos vindos do Oeste (W) e Noroeste (NW) e a primavera, que é a estação mais ventosa (principalmente setembro e outubro), conta com um regime misto de ventos dos quadrantes W e E, sendo os últimos predominantes (foram considerados na análise apenas os quatro quadrantes principais).

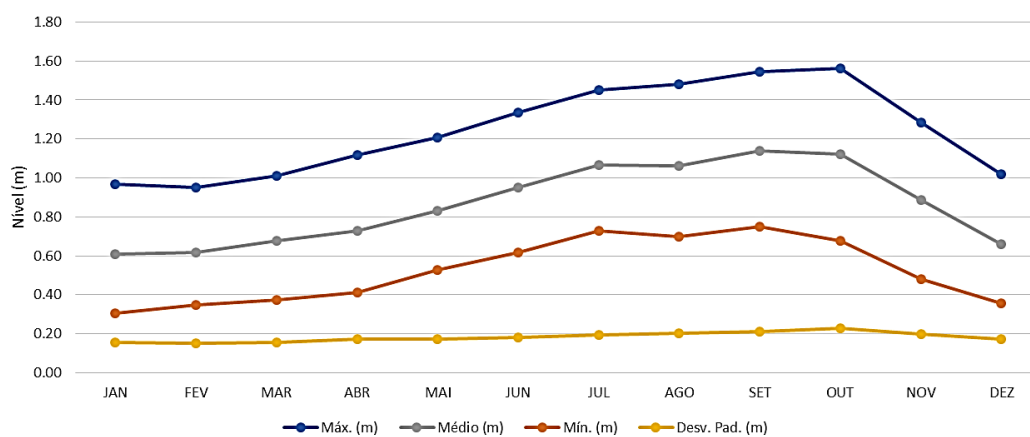
5.1.2.3 Registros Históricos

No primeiro Relatório de Atividades do Subprograma de Monitoramento e Modelagem Hidrossedimentológica e da Qualidade da Água (FICK *et al.*, 2022), foram apresentados os resultados preliminares do estudo da influência do nível d'água e das correntes do Guaíba para a navegação cargueira na hidrovia do Porto de Porto Alegre. Foi realizada análise estatística das séries históricas de nível (Figura 14) e vazão do

Guaíba (Figura 15), relacionando com registro histórico de encalhes de embarcações na hidrovia de acesso ao porto (Figura 16).

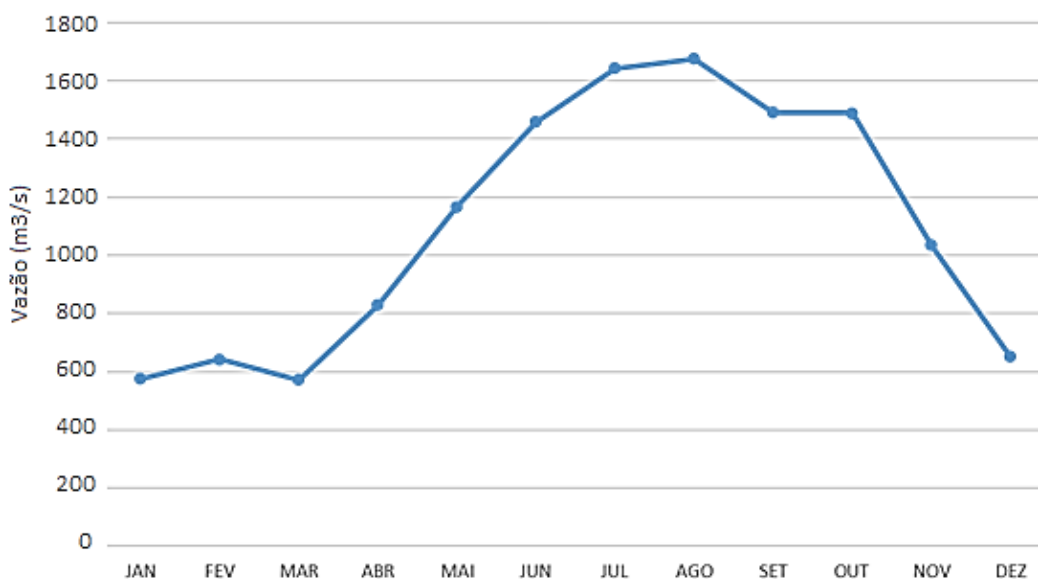
A média mensal dos níveis foi obtida a partir dos registros da régua da Praça da Harmonia (período entre 1941 e 2006) e da régua do Cais Mauá C6 (entre 2014 e 2022), extraídos do HIDROWEB. O estudo aplicou uma correção de -1 cm aos valores diários da estação do Cais Mauá, a fim de estabelecer a correlação entre as duas régua. A variação mensal histórica da vazão no Guaíba foi analisada com base nos dados de VAZ *et al.* (2006), assumindo-se certa subestimação dos valores em função da determinação de forma indireta (soma das vazões dos Rios Jacuí e Taquari).

Figura 14 – Média mensal do nível entre 1941 e 2008 obtida a partir de dados das régua Praça da Harmonia e Cais Mauá C6.



Fonte: FICK *et al.* 2022.

Figura 15 – Variação histórica da vazão do Rio Guaíba entre 1940 e 1997.



Fonte: FICK *et al.* 2022 – adaptado.

Figura 16 – Registro de ocorrências de encalhes na Hidrovia do Rio Guaíba entre 2007 e 2022. Em destaque, casos em que os motivos reportados foram manobras fora do canal (em vermelho) e saída do traçado do canal devido à forte correnteza (em azul).

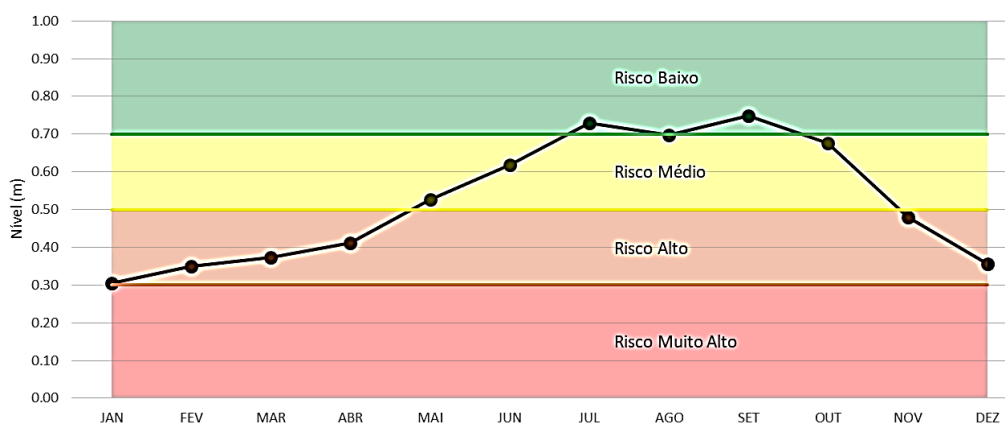
Data	Navio	Bandeira	Carga	Local	Motivo Reportado	Risco Ambiental
20/01/2022	nd	Brasil	Soja	Guaíba	Manobra evasiva fora do canal	Não
22/01/2021	Arietta	Malta	Fertilizantes	Cais Mauá	Manobra evasiva fora do canal	Não
21/10/2016	Syn Antares	Itália	Gás natural	Guaíba (ZS)	Erro de navegação	Não
26/08/2015	Pebble Beach	Malta	Grãos	Guaíba (Farol)	Erro de navegação	Não
31/08/2013	Commodore	Libéria	Cevada	Guaíba (Parque MB)	Pane Mecânica	Não
12/08/2011	Santa Katarina	Panamá	Cloreto de K	Cais Navegantes	Correnteza	Não
19/06/2008	nd	nd	Nd	Guaíba (ZS)	Erro de Navegação / Neblina	Não
08/10/2007	Kalia	Chipre	Nafta	Guaíba	Pane Mecânica	Não

*nd – Sem informação de dados

Fonte: FICK *et al.* 2022.

FICK *et al.* (2022) indicou a relação entre a variação mensal histórica dos níveis do Rio Guaíba e as condições climáticas. A estação menos chuvosa, entre dezembro e março, apresenta os valores médios mais baixos (janeiro sendo o menor), e a estação com maior volume de chuvas (entre abril e novembro), os níveis mais elevados (maior média em setembro) e as maiores vazões (pico em agosto). Ainda, propôs uma escala de risco com base na variação média do nível mínimo mensal, traçando uma correlação com a ocorrência de encalhes por desvio de rota (manobras fora do canal). Segundo esta classificação (Figura 17), os meses de novembro a abril possuem risco alto para encalhes.

Figura 17 – Escala de risco à navegação na hidrovia do Rio Guaíba gerada a partir de análise estatística.



Fonte: FICK *et al.* 2022.

O estudo indicou que em 2021 e 2022 foram reportados dois encalhes na hidrovia do Guaíba devido a manobras fora do canal, invadindo áreas de baixios, ambos no mês de janeiro (níveis eram 50 e 40 cm, respectivamente). Este foi o mês classificado como de mais alto risco, apresentando as piores condições para a navegação quando é necessário ser feito um desvio de rota. Foi relatado ainda um caso atípico, o do navio Santa Katarina (Panamá), que em 2011, durante uma manobra no Canal de Navegantes, foi deslocado para fora do canal devido à forte correnteza. Por fim, destacou-se que não houve ocorrência de vazamento de cargas ou de combustível das embarcações envolvidas em nenhum dos encalhes encontrados pela pesquisa.

Na Tabela 3 encontram-se informações técnicas obtidas dos navios que constam no registro de encalhes do Porto de Porto Alegre, retiradas de diversas fontes. Em destaque, o Santa Katarina, por ser o maior deles, e também para o qual foi encontrada a ficha completa, incluindo a capacidade do tanque de combustível, dado que será importante na determinação dos cenários de simulação.

Tabela 3 – Especificações técnicas dos navios com registro de encalhe na hidrovia do Rio Guaíba.

Navio	Tipo	Comprimento (m)	Largura (m)	Peso bruto (ton)	Capacidade de carga	Volume do tanque
Arietta	Graneleiro	180,40	30,04	22400	35083 ton	ND
Commodore	Graneleiro	171,45	27,00	18675	ND	ND
Kalia	Tanque	109,10	16,00	ND	ND	ND
Pebble Beach	Graneleiro	189,90	28,36	ND	ND	ND
Santa Katarina	Graneleiro	189,99	32,26	32287	72689 ton	2389 m ³
Syn Antares	Gaseiro	122,87	19,00	7610	9000 m ³	ND

ND – ausência de dados disponíveis

Fonte: Elaboração própria

5.2 SOFTWARES UTILIZADOS

Neste item serão destacadas as principais considerações e funcionalidades dos *softwares* utilizados neste trabalho, com base nos manuais e referências técnicas. Ressalta-se que a escolha destes considerou sua aplicação em estudos anteriores referentes ao tema e no corpo hídrico de estudo, assim como a disponibilidade de dados e de consulta técnica. Tanto o IPH-A (GUAÍBA) e o SisBaHiA são *softwares* de modelagem hidrodinâmica e de transporte de contaminantes por advecção-difusão já

aplicados no Rio Guaíba. Já o ADIOS2 é um *software* de intemperismo de óleo, cujos resultados serão utilizados como entrada no SisBaHiA.

5.2.1 IPH-A

O IPH-A é um *software* de modelagem hidrodinâmica e de transporte de massa desenvolvido pelo professor Alejandro Borche do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), tendo sido a modelagem do estuário do Rio Guaíba o ponto de partida para sua criação. Ele foi pensado para aplicação em corpos de água cujas dimensões horizontais são fortemente predominantes sobre as verticais, de modo que componentes horizontais da velocidade podem ser descritas por valores médios na vertical (BORCHE, 1996), como é o caso de rios de grande largura, estuários e lagoas.

As equações foram simplificadas considerando uma abordagem bidimensional horizontal, descrevendo tanto o escoamento, quanto o transporte (advecção) e difusão de contaminantes no meio para águas pouco profundas. O *software* utiliza uma malha quadrada e equações desenvolvidas na forma cartesiana, sendo elas: equações dinâmicas em relação à velocidade U na direção longitudinal x (Equação 5) e V na direção transversal y (Equação 6), equação da continuidade (Equação 7), e equação do transporte de massa (Equação 8). As equações da continuidade e dinâmica, previamente integradas na vertical, consideram a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície, a força de Coriolis e a difusão turbulenta (BORCHE, 1996).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h H} - \frac{\tau_{sx}}{H} - \varepsilon \Delta U = 0 \quad \text{Equação 5}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - \Omega U + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h H} - \frac{\tau_{sy}}{H} - \varepsilon \Delta V = 0 \quad \text{Equação 6}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad \text{Equação 7}$$

$$\frac{\partial(CH)}{\partial t} + \frac{\partial(CHU)}{\partial x} + \frac{\partial(CHV)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + PCH + RH \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

U, V = componentes do vetor velocidade nas direções x e y [$m.s^{-1}$];

ζ = nível medido a partir de um plano de referência fixo [m];

h = profundidade referida a este plano [m];

H = profundidade total ($H = h + \zeta$) [m];

Ω = aceleração de Coriolis [$m.s^{-2}$];

τ_{sx}, τ_{sy} = componentes da tensão de cisalhamento na superfície [$N.m^{-2}$];

Ch = Coeficiente de Chèzy [$m^{1/2}.s^{-1}$];

ε = coeficiente de dissipação turbulenta [$m^2.s^{-1}$];

C = concentração integrada na vertical [$kg.m^{-3}$];

D_x, D_y = coeficientes de dispersão nas direções x e y [$m^2.s^{-1}$];

P = coeficiente de decaimento [s^{-1}];

R = termo de fonte [$kg.m^{-3}.s^{-1}$].

O modelo de circulação requer como dados de entrada a configuração geométrica do corpo hídrico (contorno e batimetria) e as condições de contorno nas fronteiras abertas (na forma de nível, velocidade ou vazão; constantes ou variáveis). Também é necessário informar o intervalo de tempo de cálculo, o tamanho da malha, a rugosidade do fundo, a constante de atrito do vento, o coeficiente de viscosidade turbulenta, o nível inicial e a latitude. É possível, ainda, inserir a velocidade e direção do vento (constante ou variável).

Para a simulação da dispersão de contaminante, é necessário fornecer a concentração inicial no corpo hídrico e o tipo de condição de contorno em cada elemento da fronteira aberta (e o valor da concentração ao longo do tempo de simulação, se necessário), o valor dos coeficientes de difusão longitudinal, difusão transversal e decaimento, além da localização das fontes, quantidade e concentração do poluente. Durante a simulação, é possível pausar a qualquer momento para examinar os valores calculados, e ainda visualizar, durante as interações, os gráficos de níveis, trajetórias e concentrações solicitados, o gráfico de velocidades como setas e gráficos por faixas.

Em função dos trabalhos do professor Alejandro Borche, a malha, o contorno e a batimetria para o Rio Guaíba, no formato aceito pelo *software*, já foi disponibilizada. Em BORCHE (1985), o autor dispõe sobre a implementação do modelo matemático de correntologia do estuário do Rio Guaíba. As configurações *default* dos coeficientes e parâmetros de ajuste também foram calibradas para o Guaíba em uma série de estudos.

SCHWARZBACH *et al.* (1997) avaliou a aplicação do modelo IPH-A de Correntologia e Transporte de Poluentes na Baía de Ipanema, adotando um método de tentativas para ajuste dos parâmetros. Os resultados computacionais obtidos foram comparados com dados de campanhas de monitoramento realizadas para caracterização hidrodinâmica e de qualidade das águas no local, sendo que os níveis determinados pelo *software* estiveram de acordo com a situação real.

Foi observado neste estudo, entretanto, que trajetórias dos flutuadores reais monitorados foram mais extensas do que as dos flutuadores simulados, uma explicação possível sendo o fato da velocidade superficial do fluxo ser superior à média. Isto pode representar uma limitação da utilização deste *software* para modelagem de óleo, já que a densidade faz com que o contaminante flutue e fique mais sujeito ao escoamento superficial.

Para a calibração dos coeficientes de dispersão longitudinal (transporte de contaminantes) foi considerada a concentração de coliformes fecais, tendo sido obtidos resultados compatíveis para as simulações de vazões altas e médias, e valores computacionais de concentração superiores aos observados na situação real para o caso de vazão mais baixa (estiagem), o que estaria em favor da segurança (SCHWARZBACH *et al.*, 1997). Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes propostos.

Tabela 4 – Coeficientes calibrados para o *software* IPH-A.

Coeficiente de ajuste do vento (Cv)	$1,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Dissipação Turbulenta (ϵ)	$10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Chézy (Ch)	$40 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ (águas altas e médias) $60 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ (águas baixas)
Difusão Longitudinal (DI)	$10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Difusão Transversal (Dt)	$5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Fonte: SCHWARZBACH *et al.* 1997.

5.2.2 GUAÍBA

O *software* GUAÍBA é uma adaptação do IPH-A aplicado ao Rio Guaíba, considerando os três fatores principais que determinam sua hidrodinâmica: o vento atuando sobre as águas, a vazão do Rio Jacuí e o efeito de jusante provocado pela Lagoa dos Patos (BORCHE, [s.d.; b]). Ele permite realizar a simulação da circulação e dispersão

no Guaíba utilizando malhas de cálculo de 100 m ou 200 m, sendo que a primeira, mais detalhada, possui uma melhor representação, o que aumenta o tempo de cálculo.

Nesta adaptação, para minimizar os efeitos de jusante percebidos muito acima da foz, foi acoplado à malha do modelo um canal retangular que simula o comportamento do Rio Jacuí, de modo que deve ser informada sua vazão em Triunfo como condição de contorno (BORCHE, [s.d.; b]). Ainda, a outra condição de contorno é referente aos dados de nível em Itapuã, com o objetivo de representar o efeito das oscilações da Lagoa dos Patos. Assim como no *software* original, também é possível trabalhar com dados de entrada (incluindo o vento) como sendo constantes ou variáveis ao longo da simulação.

Entre as limitações deste *software* está o fato de ele não incluir os formadores Sinos, Gravataí e Caí. JOBIM (2012) observou, em testes iniciais realizados, que “o modelo não trabalha corretamente quando utilizados valores médios de vazão para os afluentes menos relevantes, uma vez que os efeitos de remanso gerados pelo Rio Jacuí bloqueiam as águas destes rios menores”. Deste modo, a simplificação é necessária para o seu correto funcionamento.

Neste estudo será utilizada apenas esta adaptação, tendo em vista algumas correções que precisam ser feitas na malha do modelo original. Não se tem informação da versão do *software* GUAÍBA, apenas o registro de que a última modificação ocorreu em 2011. O manual, também sem data, foi disponibilizado de forma interna.

5.2.3 SisBaHiA

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA) é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente está na versão 11b-SG (64-bits), que foi utilizada neste estudo.

O *software* está disponível gratuitamente para usos pessoais, acadêmicos e profissionais, possuindo uma interface amigável e um detalhado manual de uso, de consulta direta na internet (SISBAHIA, 2017), e já foi adotado em dezenas de estudos envolvendo modelagem de corpos de água naturais. A última revisão da referência técnica foi realizada em 2021 (SISBAHIA, 2021).

Os modelos são baseados em esquemas numéricos bem estabelecidos, garantindo sua validade e aceitação. No geral, o *software* pode ser aplicado em simulações realizadas em águas costeiras, baías, estuários, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, possibilitando compreender a dinâmica dos processos que ocorrem nesses ecossistemas, sendo utilizado tanto na previsão do escoamento e movimento das águas, quanto na avaliação do transporte de grandezas escalares de interesse (PISA, 2013).

O SisBaHiA é composto pelos módulos: Modelagem Digital do Terreno; Modelo Hidrodinâmico; Modelos de Transporte de Sedimentos; Modelos de Qualidade da Água; Modelos de Transporte Euleriano; Modelo de Transporte Lagrangeano Determinístico e Probabilístico; Modelo de Campo Próximo e Decaimento Bacteriano para Emissários e Fontes Pontuais; Modelo de Geração de Ondas; Modelo de Propagação de Ondas; Módulo de Análise e Previsão de Marés; e Ferramentas Diversas.

O sistema possui alguns atributos com objetivo de minimizar o processo de calibração e maximizar a confiabilidade dos resultados: adoção de estratégias de discretização espacial otimizadas para corpos de água naturais (detalhamento de contornos e batimetria complexos); modelagem de tensões e difusividades turbulentas (calibragem diretamente relacionada a variáveis naturais); especificação pontual do tipo de material de fundo e utilização de interpolação biquadrática para obter profundidades e rugosidades equivalentes (acurácia na representação do leito); e possibilidade de variar a ação do vento na superfície e o atrito no fundo, no tempo e no espaço. (SISBAHIA, 2007; SISBAHIA, 2021).

5.2.3.1 Modelagem Hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico é a base fundamental para o uso do sistema, com seus resultados servindo como dados de entrada para os modelos de transporte. O SisBaHiA utiliza o modelo FIST3D (*filtered in space and time 3D*), que baseia a modelagem da turbulência em técnicas de filtragem, sendo composto por dois módulos (2DH e 3H).

Primeiramente os valores da elevação da superfície livre são calculados através de um modelamento bidimensional integrado na vertical, e na sequência é determinado o campo de velocidades tridimensional. Os modelos são acoplados, com as saídas do modelo 2DH sendo utilizadas na resolução do modelo 3D, sendo a execução independente possível apenas para o módulo bidimensional.

No módulo tridimensional, o conjunto de equações governantes inclui a equação da continuidade, as equações da quantidade de movimento horizontais com aproximação hidrostática nas direções x e y, e a equação da continuidade integrada ao longo da coluna de água. Assim, é possível resolver um sistema com quatro equações e quatro incógnitas (componentes x, y e z da velocidade 3D e elevação da superfície livre).

Já o módulo bidimensional considera as equações da quantidade de movimento (direções x e y) e a equação da continuidade (do volume), todas integradas ao longo da vertical, num sistema com três equações e três incógnitas (componentes x e y da velocidade 2DH e elevação). O detalhamento das equações é encontrado na referência técnica do *software* (SISBAHIA, 2021).

A discretização espacial é feita preferencialmente via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas também podem ser utilizados elementos finitos triangulares quadráticos ou uma combinação de ambos. São consideradas como condição de contorno de fronteiras abertas os valores de elevação da superfície livre (nível de água). Os contornos abertos representam os limites do domínio, por onde o fluxo de água calculado pelo modelo pode cruzar.

Por sua vez, os contornos fechados ou terrestres representam as margens e seções de rios e canais, sendo necessário informar valores de vazões específicas ou velocidades (nulas no caso das margens e negativas para afluxos). Para a resolução do escoamento tridimensional também são condições de contorno a imposição de velocidade nula do fundo e a tensão do vento na superfície.

5.2.3.2 Modelagem de Transportes de Contaminantes

Na modelagem de transporte de contaminantes como manchas de óleo e plumas de emissários, é comum que haja conflito entre as escalas espaciais das manchas e as escalas de discretização usadas no modelo hidrodinâmico. Para resolver isto, é recomendada a utilização de um modelo de transporte lagrangeano, em que a mancha é representada por uma nuvem composta por partículas individuais (SISBAHIA, 2021).

Deste modo, o modelo pode utilizar o campo de velocidades hidrodinâmico sem se limitar à escala imposta pela grade de discretização, sendo gerada, na determinação da concentração, uma malha dedicada e suficientemente refinada no entorno da nuvem de

partículas, o que possibilita o cálculo com grande acurácia (SISBAHIA, 2021). As fontes de contaminantes são representadas por um número de partículas lançadas de um par de coordenadas específico, em intervalos de tempo regulares.

Estas partículas sofrem advecção pelas correntes determinadas no modelo hidrodinâmico, sendo possível determinar sua posição em qualquer instante através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida (SISBAHIA, 2021). Após a determinação da nova posição de cada partícula, pode ser incluído um desvio aleatório, causado pelos movimentos em escalas não resolvíveis que geram “velocidades difusivas”, função da variação espacial da difusividade turbulenta.

Dependendo de como o contaminante de interesse se mistura no corpo hídrico receptor, pode ser relevante fazer a análise considerando o campo de velocidades em uma profundidade específica. Para o óleo, que normalmente possui densidade menor do que a da água, recomenda-se a geração de modelo hidrodinâmico 3D entre 0,1 e 0,2 m abaixo da superfície livre, onde pode se obter uma velocidade de transporte mais realista, já que a profundidade zero é idealizada e a superfície teórica resulta em valores um pouco exagerados (ROSMAN, comunicação pessoal, 2022).

O SisBaHiA permite ainda especificar as reações cinéticas temporais às quais as partículas estão sujeitas a partir da possibilidade de fornecer uma tabela com valores de fração remanescente no tempo (ou um coeficiente de decaimento). Em simulações de mancha de óleo, isso torna possível a consideração das perdas por evaporação, por exemplo, sendo recomendada a utilização de curvas de balanço de massa do *software* ADIOS2 (SISBAHIA, 2021).

É importante destacar que os pares de valores desta tabela de decaimento não precisam seguir intervalos de tempo constante, mas o primeiro deve ser (0,1), e o último deve corresponder a uma fração remanescente menor do que 0,001 (se houver), ou simplesmente um valor de tempo superior ao previsto para o total da simulação. Isto porque o *software* entende que a partícula deixa de existir quando a partícula perde mais do que 99,9% da sua massa (SISBAHIA, 2021).

Além disso, é possível incluir os efeitos da dinâmica de FAY (1969) na fase inicial do derramamento, utilizando a Equação 2 (item 4.2.2) para a determinação da área inicial da mancha e adotando o valor de diâmetro encontrado como diâmetro da fonte

(ROSMAN, comunicação pessoal, 2022). Isto porque a primeira fase, de duração muito curta, normalmente não é modelada.

Em relação às condições de contorno, o modelo de transporte lagrangeano considera que a partícula que atravessa uma fronteira aberta sai do domínio modelado e é perdida. Já em relação aos contornos de terra, ou ela sofrerá reflexão total, isto é, retornará sem sofrer perda de massa, ou terá parte de sua massa absorvida. Essa fração absorvida dependerá do coeficiente de absorção ($CA = [0, 1]$) atribuído para cada nó da malha (SISBAHIA, 2021).

O modelo de transporte lagrangeano pode ser utilizado de forma determinística ou probabilística. Nos dois casos podem ser inseridas múltiplas fontes (cada fonte representa um derramamento), mas enquanto o primeiro considera a interação entre os derramamentos, o segundo considera cada um de maneira independente, permitindo obter resultados computados a partir de múltiplos eventos ou ao longo de um determinado período.

O *software* SisBaHia possui várias maneiras de representar os resultados obtidos a partir das simulações utilizando o modelo lagrangeano de transporte de contaminantes. Na abordagem determinística, é possível obter para cada derramamento mapas para a nuvem de partículas e para a concentração do contaminante em instantes escolhidos. Em simulações que consideram coeficiente de absorção, é possível representar as partículas retidas na margem.

Na abordagem probabilística, é possível representar a probabilidade de passagem do contaminante (na forma de isolinhas) para uma concentração limite ou instante definido. Também é indicado, em relação à absorção, o volume total acumulado na margem para cada derramamento individual. Ainda, mesmo nesta abordagem, é possível registrar os resultados independentes de cada derramamento na forma de exemplos individuais (exemplos determinísticos). Existem outras possibilidades, entretanto não serão utilizadas neste estudo.

Na análise de toque de um trecho de litoral pela nuvem de partículas, que determina tanto o instante do primeiro contato, quanto a quantidade de massa e volume absorvida por nó, é necessário especificar um valor de coeficiente de absorção maior do que zero, podendo ser utilizado um valor insignificante (como $CA = 0,0001$) a fim de não

causar perda de massa significativa e analisar uma situação de pior caso de dispersão (reflexão total), um coeficiente médio (como $CA = 0,2$) para avaliar os efeitos de forma geral, ou ainda especificar valores para cada trecho de litoral (conforme, por exemplo, os Índices de Sensibilidade do Litoral – ver item 4.8).

5.2.4 ADIOS2

O *Automated Data Inquiry for Oil Spills* (ADIOS) é um *software* de intemperismo de óleo desenvolvido pela *United States National Oceanic and Atmospheric Administration Hazmat Division* (NOAA/HAZMAT). Lançado em 1994, é um dos mais amplamente utilizados para este fim. O ADIOS foi desenvolvido para lidar apenas com a parte físico-química. Destaca-se que o manual está disponível dentro do próprio *software*.

Atualmente está na versão 2.0.12, que foi utilizada neste estudo. Entre as versões 1 e 2, o ADIOS passou por um processo de reformulação para a seleção de equações mais adequadas, no qual foram considerados, em ordem de importância, critérios de comparação com casos reais, solidez teórica e aceitação pela comunidade científica (LEHR *et al.*, 2002). Os processos de intemperismo incluídos são: espalhamento, evaporação, dispersão vertical, sedimentação e emulsificação, além da variação da densidade e da viscosidade.

No ADIOS2 é necessário fornecer informações da origem do derramamento, e das condições ambientais existentes e previstas. Os parâmetros ambientais básicos de entrada são velocidade e direção do vento, temperatura da água, salinidade da água e altura da onda (que pode ser calculada a partir do vento). Em relação ao derramamento de óleo, é necessário *inserir* o tempo de início, o tipo de óleo, a quantidade derramada (ou taxa) e a duração.

O *software* conta com uma base de dados com diferentes tipos de óleo, sendo possível também especificar opções de limpeza. Os resultados são gerados na forma de curvas (gráficos e tabelas), indicando a variação dos processos e propriedades ao longo de 5 dias (120h). Os dados podem ser inseridos, por exemplo, como entrada em outros *softwares* de modelagem computacional hidrodinâmica e de transporte de contaminantes, como é o caso do SisBaHiA, conforme adotado neste estudo.

5.3 LEVANTAMENTO DE DADOS E INFORMAÇÕES

A base de qualquer modelo computacional para estudo de um corpo hídrico é a representação da sua configuração geométrica. Em seguida, é necessário definir as condições hidrodinâmicas e variáveis meteorológicas que serão analisadas. O estudo de dispersão de óleo requer, ainda, a definição do tipo de óleo derramado (densidade, viscosidade) e das condições do derramamento (regime, que pode ser instantâneo ou contínuo, duração, volume total, vazão).

5.3.1 Configuração geométrica do Rio Guaíba

Os arquivos de contorno e batimetria do Rio Guaíba (que compõem a malha de cálculo) inseridos no IPH-A e na sua adaptação GUAÍBA foram disponibilizados juntamente com os modelos. De acordo com BORCHE (1985), a conformação geométrica do Guaíba foi determinada utilizando-se as cartas de navegação obtidas a partir de levantamentos efetuados pela Marinha do Brasil em 1964, sendo efetuadas correções.

A malha utilizada no SisBaHiA durante a elaboração do II Relatório Complementar de Avaliação de Impacto do Projeto Socioambiental ETE Serraria (PISA, 2013) foi disponibilizada pelo professor Paulo Cesar Colonna Rosman², que atuou como consultor técnico do projeto. Na sua elaboração foram utilizados dados das Cartas Náuticas 2113 e 2111, e adotada amplitude equivalente do fundo (ϵ) como sendo 0,025 m em todo o domínio modelado.

5.3.2 Condições hidrodinâmicas e meteorológicas

As simulações hidrodinâmicas requerem que sejam informados os dados de vazão do Rio Jacuí em Triunfo e nível em Itapuã. Além disso, tendo em vista a complexidade da dinâmica do Guaíba (ver item 5.1.2), a utilização de dados de vento contribui para obter uma análise mais representativa da realidade, também sendo possível inserir estas informações nos *softwares* de modelagem escolhidos.

² Departamento de Recursos Hídricos & Meio Ambiente da Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

5.3.2.1 Vazão no Rio Jacuí em Triunfo

A vazão do Rio Jacuí em Triunfo é uma condição de contorno para o IPH-A (GUAÍBA) e também um parâmetro de entrada do SisBaHiA, entretanto os dados da estação fluviométrica que mediria a vazão do Rio Jacuí em Triunfo estão indisponíveis no HIDROWEB. Assim, foi realizado um levantamento de vazões adotadas em estudos anteriores envolvendo simulações hidrodinâmicas do Rio Guaíba no geral.

A síntese das informações encontradas, contendo algumas observações importantes, pode ser vista na Tabela 5. É possível perceber que é comum a utilização de um valor constante de vazão na realização das simulações. Além disso, normalmente busca-se estudar cenários que caracterizem o regime em épocas sazonais distintas do ano (estiagem, média e cheia).

Tabela 5 – Dados de vazões utilizadas em simulações hidrodinâmicas do Rio Guaíba encontrados em estudos anteriores.

	PISA (2013)		SCHWARZBACH <i>et al</i> (1997)		JOBIM (2012)		PIERRAT (2016)	
Cenário	Estiagem Crítica (jan)	Média Anual (jul)	Águas Altas (jul)	Águas Baixas (nov/dez)	Águas Médias (abr)	Vazão Média (anual)	Vazão Estiagem (nov/fev)	Altas Vazões (jun/set)
Q (m³/s)	355	1159	1580 a 1890	438 a 634	1100 a 1500	1889	600	2400
Fonte	Relatório Complementar de Avaliação de Impacto - Modelo Matemático DMAEMAP: Cenários PISA 2012.		Campanhas de monitoramento realizadas pelo DMAE com medição de vazão no Rio Jacuí (duração de 48h cada).		Relatório Síntese da Fase A: Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul (2007).		Vazões de referência medidas na Ponta do Gasômetro pelo DMAE em 2013	
Observações	Nas simulações com IPH-A considerou-se apenas entrada na seção do Rio Jacuí; no SisBaHiA fez-se o ajuste para todos os aportes ao lago; em ambas utilizou-se vazão constante.		Nas simulações com IPH-A foi utilizado acréscimo gradual de vazões; estudo visou à calibração do modelo.		Utilizou vazão constante nas simulações com IPH-A; descargas dos outros afluentes foram acrescidas à vazão do Rio Jacuí.		Objetivo do estudo foi representar as variações sazonais do regime de vazão do Guaíba	

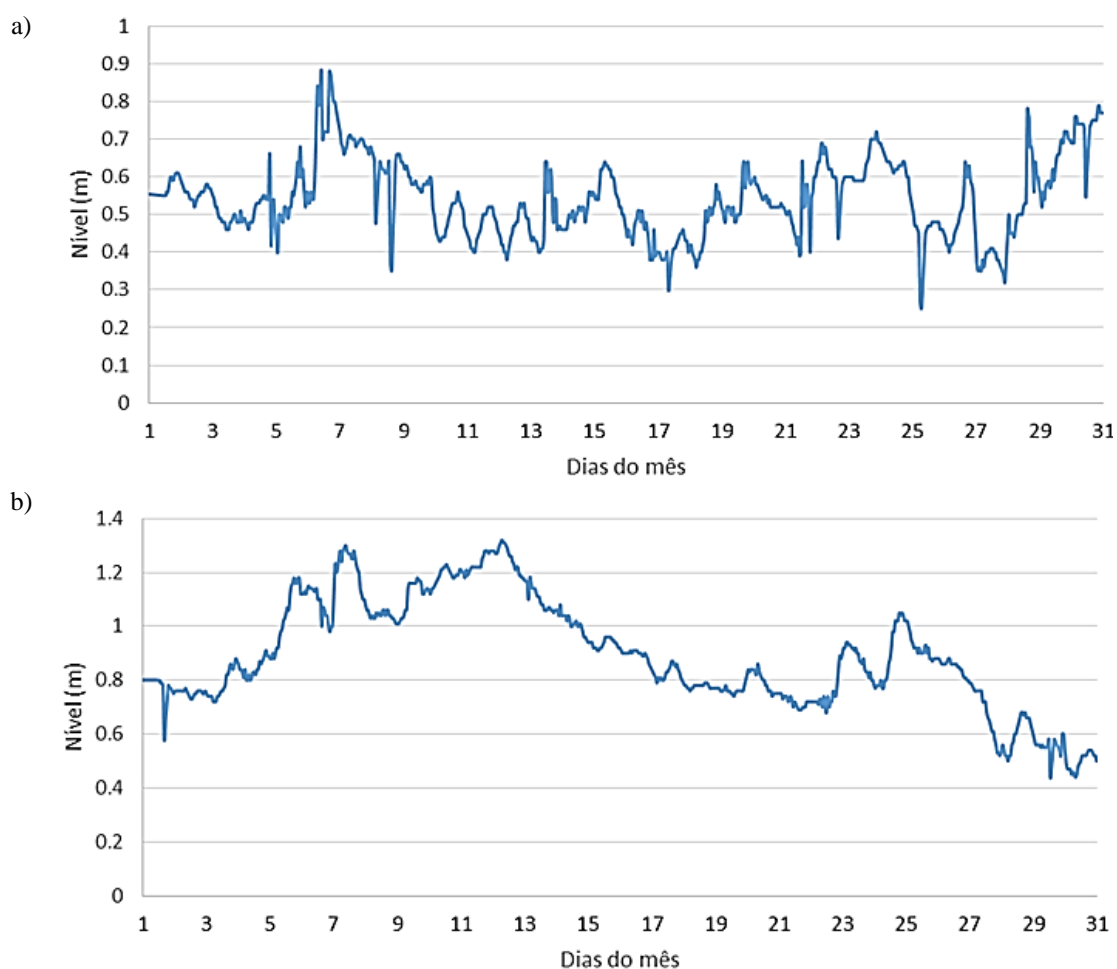
5.3.2.2 Nível em Itapuã

O nível em Itapuã também é condição de contorno para o IPH-A (GUAÍBA) e SisBaHiA, entretanto lida-se com a escassez de medições atualizadas. O professor

Alejandro Borche obteve em seus estudos dados variáveis de nível em Itapuã no período entre 11/12/1987 e 14/09/1988 a partir de um linígrafo instalado no local.

Os arquivos foram tratados produzindo séries consistentes e representativas dos meses de janeiro e julho de 1988 (PISA, 2013), disponibilizadas junto com a malha do SisBaHiA. Na Figura 18 estão representadas as variações horárias de nível para os meses mencionados (valores médios de 0,54 m e 0,89 m, respectivamente). Foi adaptado um arquivo para ser utilizado no IPH-A (GUAÍBA) conforme indicado nos manuais.

Figura 18 – Séries de variação horária de nível em Itapuã para os meses de a) Janeiro de 1988 e b) Julho de 1988.



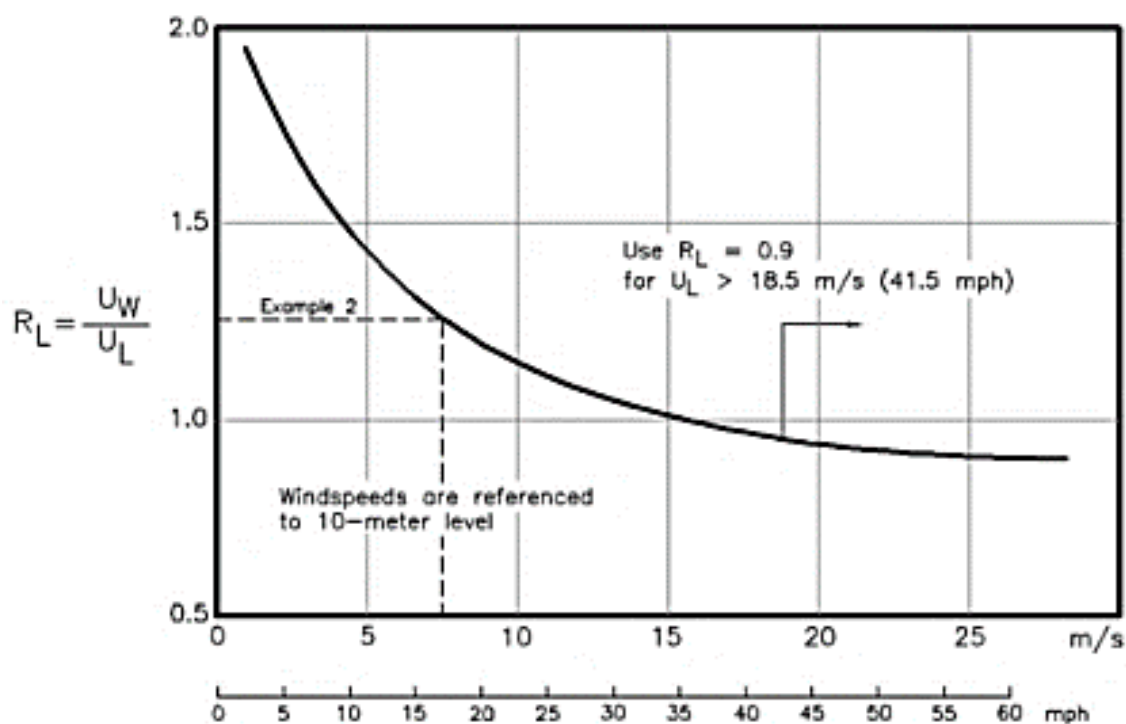
5.3.2.3 Velocidade e direção do vento

Os softwares IPH-A e SisBaHiA permitem a utilização de dados variáveis de vento (velocidade e direção). Na base de dados do estudo realizado para ETE Serraria foram disponibilizadas séries de frequência horária também para os meses de janeiro de julho

de 1988, obtidas a partir o processamento dos dados do INMET compilados pelo DMAE (PISA, 2013).

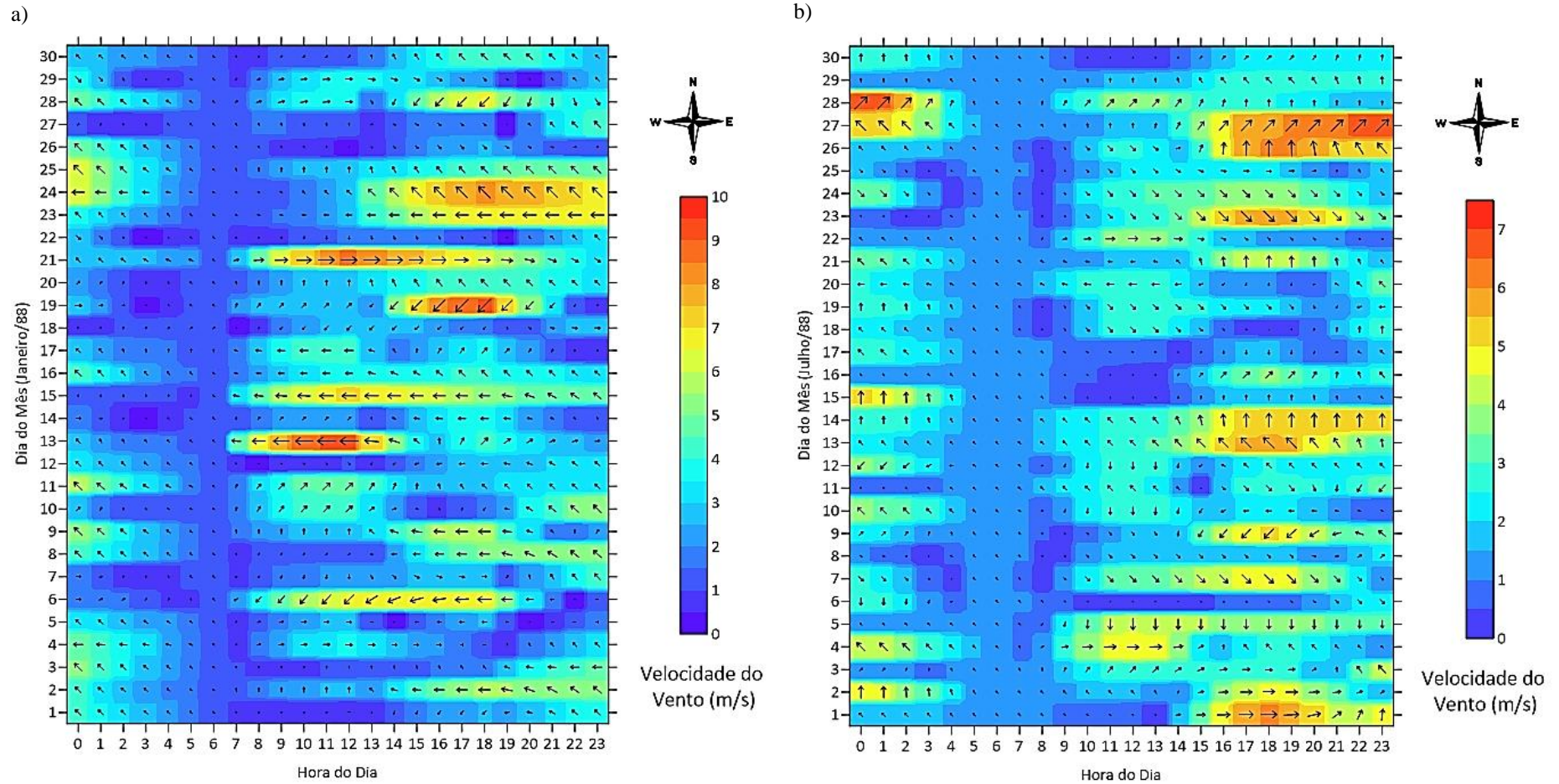
A equipe realizou a conversão para a cota da superfície da água conforme metodologia proposta pelo Corpo dos Engenheiros dos Estados Unidos (U.S. ARMY, 2005, *apud* PISA, 2013), que considera a razão entre a velocidade equivalente do vento sobre a água e sobre a terra (Figura 19). O resultado das séries obtidas está ilustrado na Figura 20. Os arquivos para utilização no IPH-A (GUAÍBA) também foram adaptados conforme o manual.

Figura 19 – Razão (R_L) entre velocidade equivalente do vento sobre a água (U_W) e sobre a terra (U_L).



Fonte: U.S. ARMY (2005) *apud* PISA (2013)

Figura 20 – Série de ventos para Porto Alegre corrigidas para a superfície da água para os meses de a) Janeiro de 1988 e b) Julho de 1988.



5.3.3 Tipo de óleo e condições do derramamento

Entre as cargas movimentadas no Porto de Porto Alegre, não consta nenhum tipo de óleo ou derivados. Deste modo, para determinação do contaminante adotado nas simulações de dispersão, foi realizado um levantamento de informações disponíveis em outros estudos. Também foram identificadas informações referentes aos derramamentos simulados, assim como alguns parâmetros mais específicos que devem ser inseridos no SisBaHiA. A síntese dos resultados é apresentada na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6 – Informações de óleo e derramamento encontradas em outros estudos.

Informações relevantes	SOTO (2004)	GOIS (2008)		BENEDITTI (2015)
Software utilizado	SisBaHiA	SisBaHiA		SisBaHiA
Tipo de óleo	Bachaquero 17 (EXXON)	Bachequeiro Heavy (Pesado)	Diesel Fuel Oil (Leve)	Diesel B S500 (Automotive Diesel Fuel)
Densidade inicial do óleo (kg/m³)	963 (20 °C)	972 (temp. não mencionada)	826 (temp. não mencionada)	Não mencionada
Viscosidade inicial do óleo (m²/s)	1,079.10 ⁻³ (20 °C)	1,676.10 ⁻³ (temp. não mencionada)	2,7.10 ⁻⁵ (temp. não mencionada)	Não mencionado
Vazão do derramamento (m³/s)	1,67.10 ⁻¹	1,67.10 ⁻¹ (instantâneo) 7,72.10 ⁻⁴ (contínuo)		1.10 ⁻²
Duração do derramamento (s)	1200	1200 (instantâneo) 259200 (contínuo)		3600
Volume total derramado (m³)	200	200		36
Fonte	Descarga média de acordo a Resolução n° 293 do CONAMA (secção 2.2 do Anexo III).	Cenários hipotéticos		Informações de volume máximo que um empurrador utiliza e tipo de óleo obtidas junto a uma empresa que transporta produtos na hidrovia.

Tabela 7 – Informações de tipo de óleo e derramamento encontradas em outros estudos e outros parâmetros de simulação.

Informações relevantes	MONTEZUMA (2004)		MARTINHO (2010)	GURGEL (2016)
Software utilizado	SisBaHiA		MOHID	SisBaHiA
Tipo de óleo	IF-30 Fuel Oil	Diesel Fuel Oil	Marine Fuel 380 (MF-380)	Não mencionado
Densidade inicial do óleo (kg/m³)	936 (25 °C)	826 (25 °C)	980 (temp. não mencionada)	851 (22°C)
Viscosidade inicial do óleo (m²/s)	4,536.10 ⁻⁴ (25°C)	2,7.10 ⁻⁶ (25°C)	3,8.10 ⁻⁴ (50 °C)	4.10 ⁻⁵ (22°C)
Vazão do derramamento (m³/s)	1,67.10 ⁻¹		1	2,78.10 ⁻²
Duração do derramamento (s)	1200		2000 (instantâneo)	1800
Volume total derramado (m³)	200		2000	50
Número total de partículas	Não mencionado		1800	40000
Volume de cada partícula (m³)	Não mencionado		2,78.10 ⁻²	5.10 ⁻²
Número total de lançamentos	Não mencionado		12	Não mencionado
Intervalo de tempo de lançamento (s)	Não mencionado		150	Não mencionado
Partículas lançadas por intervalo de tempo	100		150	Não mencionado
Fonte	Caracterização do Terminal da Baía da Ilha Grande. Hipótese acidental: ruptura do casco de um navio petroleiro.		Superintendência do Porto de Rio Grande (SUPRG): tipo de óleo mais transportado e dados pretéritos de ocorrência de derramamentos.	Baseado nas características do combustível usado pela Marinha do Brasil. Situação de pior caso: vazamento do conteúdo total dos tanques de combustível para o meio marinho.

Outra referência é o Plano de Emergência Individual (PEI) do Porto de Rio Grande (2019), que analisou 52 cenários acidentais para a determinação da descarga de pior caso. Foi considerado que o maior volume derramado estaria associado à colisão e ao vazamento total dos tanques de combustível do navio Medea (maior tancagem dentre os navios que atracam na área administrada pela SUPRG). Neste caso seriam derramados de forma instantânea 5.531 m³ de Óleo *Bunker*.

5.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Aqui serão descritos os cenários hidrodinâmicos e as hipóteses acidentais analisadas, associadas as suas respectivas simulações hidrodinâmicas e de transporte de contaminantes, realizadas utilizando os *softwares* de modelagem computacional GUAÍBA e SisBaHiA. O computador utilizado é do tipo *Desktop* com processador AMD Ryzen 9 3950X 16-Core Processor 3,49 GHz e RAM instalada de 64,0 GB.

5.4.1 Simulações hidrodinâmicas realizadas

As simulações hidrodinâmicas são a base de qualquer estudo de modelagem envolvendo corpos hídricos. As considerações para sua execução tomaram como base outros estudos desenvolvidos e a disponibilidade de dados. Deste modo, para a avaliação da dispersão de manchas de óleo no Rio Guaíba na região do Porto de Porto Alegre, optou-se por trabalhar com a representação de três cenários hidrodinâmicos diferentes, a fim de considerar as complexidades da dinâmica deste corpo hídrico. São eles:

- Estiagem: cenário de vazão baixa, associado à estação menos chuvosa (verão), com predomínio de ventos vindos de Sudeste, adotando-se o mês de janeiro como representativo, considerando ainda que neste mês foram encontrados dois registros de encalhe de navios.
- Média: cenário de vazão média, associado à estação com maiores volumes de chuva (inverno), e influência dos ventos vindos da direção Sul, adotando-se o mês de julho como representativo.
- Cheia: cenário de vazão alta, a fim de representar possíveis incidentes devido ao aumento da velocidade das correntes (como foi o caso do navio Santa Katarina), para o qual também foi escolhido o mês de julho como representativo.

Em relação às condições de contorno, foram utilizados valores constantes para as vazões do Rio Jacuí em Triunfo, tendo em vista a falta de disponibilidade de dados variáveis. Para os cenários de estiagem e cheia optou-se por utilizar os mesmos valores de PISA (2013), por já terem sido aplicados no SisBaHiA, e para o cenário de cheia o valor mais alto encontrado na literatura (ver Tabela 5). Ainda, para o *software* SisBaHiA

foi realizado o ajuste de modo a considerar os aportes dos Rios Caí, Sinos e Gravataí, conforme proporções indicadas em JOBIM (2012).

Os dados de nível em Itapuã, disponíveis para os meses de janeiro e julho de 1988, foram inseridos de forma variável. Da mesma forma foi feito para os dados de ventos sobre as águas, sendo usados os mesmos meses a fim de manter a coerência entre as informações. A Tabela 8 indica as simulações hidrodinâmicas realizadas com os *softwares* GUAÍBA e SisBaHiA.

Tabela 8 – Simulações hidrodinâmicas realizadas com o GUAÍBA e SisBaHiA.

Simulação	Vazão Jacuí (m³/s)	Nível Itapuã (m)	Ventos (m/s)	Período Simulado
Estiagem	355	Janeiro de 1988 Figura 18a	Janeiro de 1988 Figura 19a	
Média	1159	Julho de 1988 Figura 18b	Julho de 1988 Figura 19b	720 horas
Cheia	2400	Julho de 1988 Figura 18b	Julho de 1988 Figura 19b	
Observações	Constante; ajuste de aportes para o SiSBaHiA		Variável ($\Delta t = 3600$ s)	Mês inteiro

Para *software* GUAÍBA foi utilizada a malha de cálculo com $\Delta x = 100$ m. O nível inicial foi considerado como sendo a média dos níveis em Itapuã (0,54 m para estiagem e 0,89 m para média e cheia). O intervalo de tempo de cálculo adotado foi $\Delta t = 20$ s, que permitiu que as simulações rodassem de forma estável, atendendo à Condição de Courant. Outros parâmetros foram considerados de acordo com a calibração proposta por SCHWARZBACH *et al.* (1997) (ver Tabela 4).

Ao contrário do GUAÍBA, a malha do SisBaHiA não é regular e as informações de condição inicial devem ser fornecidas para cada nó. Ao todo, são 5.787 nós, dos quais 7 representam a fronteira aberta em Itapuã e 1.186 as margens, incluindo os afluentes, sendo os outros, nós internos.

Considerando a complexidade e a fim de não comprometer o modelo já aplicado, foram aproveitadas a maioria das configurações das simulações realizadas em PISA (2013) para as mesmas vazões (estiagem e média), tendo sido feito apenas os ajustes necessários. Para a simulação de cheia, tomou-se como base a simulação de média, e incrementou-se a entrada da vazão proporcionalmente.

Em relação ao intervalo de tempo de simulação, foi adotado 60 s, e elas rodaram também de forma estável. Conforme indicado para utilização no modelo lagrangeano do SisBaHiA na dispersão de óleo, foram configuradas simulações tridimensionais para profundidade de 0,1 m.

Ainda, para a posterior análise dos resultados, foram determinadas sete estações de controle no *software* GUAÍBA (Figura 21) e seis no SisBaHiA (Figura 22), nas quais foram registrados dados de nível e velocidade. A estação adicional foi justificada em função da diferença observada entre as duas malhas, na tentativa de se obter locais equivalentes (estação seis do GUAÍBA igual a estação seis do SisBaHiA).

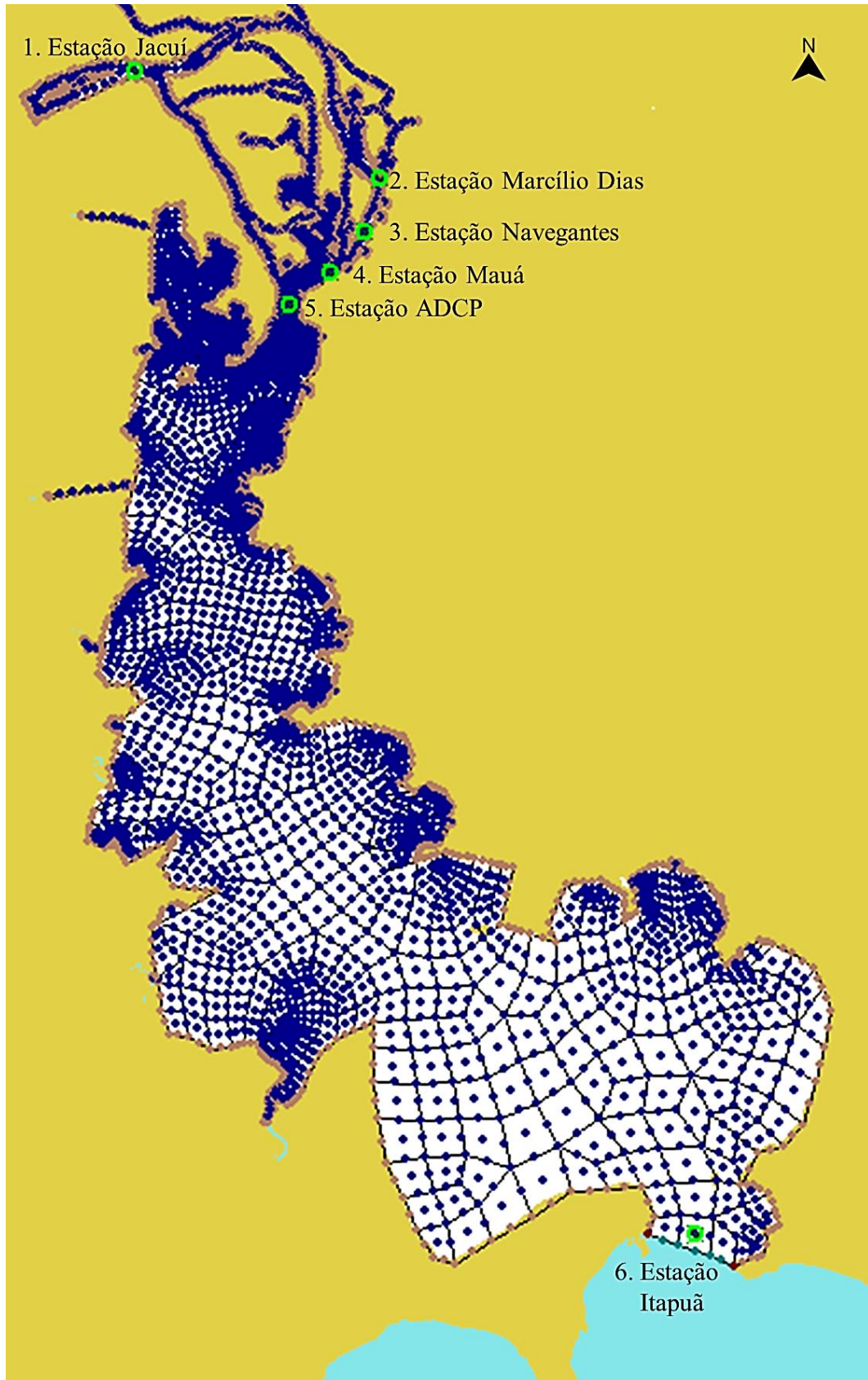
No geral, as simulações realizadas no GUAÍBA demoraram em torno de 40 minutos. Entretanto, elas tiveram que ser realizadas múltiplas vezes até que fossem capturados todos os resultados, uma vez que o *software*, por ser bastante antigo, possui diversas limitações operacionais. Para cada cenário, primeiro era feito o registro apenas dos arquivos de nível e velocidade, depois as capturas de tela de cada variável de interesse, sendo que a configuração dos parâmetros tinha que ser refeita todas as vezes.

As simulações realizadas no SisBaHiA levaram cerca de 3 horas cada. Os parâmetros de execução utilizados foram os *defaults* (resolução utilizando GMRES otimizado, com método de solução de resíduos ponderados e método de integração de 5°). Também foram feitos alguns testes até que fossem devidamente ajustadas, entretanto os registros de resultados eram muito mais diretos.

Figura 21 – Estações de controle inseridas no *software* GUAÍBA.



Figura 22 – Estações de controle inseridas no *software* SisBaHiA.



5.4.2 Simulações de dispersão de óleo realizadas

As simulações de dispersão da mancha de óleo no Rio Guaíba constituem o foco principal deste estudo, considerando uma abordagem de transporte hidrodinâmico do contaminante. O principal objetivo era entender o comportamento de um derramamento acidental de óleo em diferentes condições climáticas na região do Porto de Porto Alegre.

Deste modo, acreditou-se que seria mais interessante realizar as simulações considerando a hipótese de pior caso. Como ainda não foi realizada a análise de risco para o Porto de Porto Alegre, o pior caso foi considerado como sendo o vazamento de forma instantânea do volume total do tanque do maior navio com registro de ocorrência de encalhe na hidrovia do Guaíba, o Santa Katarina (ver Figura 16 e Tabela 3).

Assim, foi simulado um derramamento de 2.400 m³ de óleo em 40 min (2400 s), com uma vazão de 1 m³/s. Para as coordenadas da fonte do derramamento, considerou-se as mesmas da estação Navegantes (ver Figura 22), em função deste ser o cais no qual se concentram a maior parte das atividades do Porto. Foi utilizado o *software* de modelagem hidrodinâmica e de transporte de contaminantes SisBaHiA, que permite considerar os resultados de curvas do *software* ADIOS2 (processos de intemperismo).

5.4.2.1 Óleo utilizado

Existem dois tipos de óleo utilizados como combustível de navios, o *Bunker* ou *Intermediate Fuel Oil* (Óleo Combustível Marítimo), utilizado por navios de grande porte, e o *Marine Gasoil* (Diesel Marítimo), utilizado em embarcações de médio e pequeno porte (EPE, 2019). Com base nas especificações do Santa Karatina, na literatura e na lista de óleos disponíveis no *software* ADIOS2, o contaminante adotado nas simulações foi o óleo *bunker* MF-380.

Entre as características do óleo, destaca-se a densidade máxima de 991 kg/m³ e viscosidade cinemática de 3,80.10⁻⁴ m²/s a 50 °C, conforme indicado na Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ), disponibilizada pela PETROBRAS (2019). A FISPQ é interessante pois além da identificação de perigos e da caracterização do produto (composição, propriedades), também informa sobre medidas de segurança (combate a incêndio, primeiros-socorros, derramamentos e vazamentos, manuseio e armazenamento), e informações toxicológicas e ecológicas.

Este contaminante é de baixa degradação e de alta persistência, com potencial bioacumulativo em organismos aquáticos, sendo perigoso para o meio ambiente, pois pode formar uma película na água diminuindo os níveis de oxigênio dissolvido (PETROBRAS, 2019). Além disso, possui baixa taxa de evaporação, o que torna mais interessante a avaliação da sua dispersão na água em uma análise de pior caso.

5.4.2.2 Curvas de decaimento e espalhamento inicial de Fay

O *software* ADIOS2, utilizado na consideração dos processos de intemperismo, permite apenas inserir como informações de vento valores inteiros e de forma manual. Assim, foram obtidos os dados de velocidade e direção apresentados nas Normais Climatológicas do Brasil para o período entre 1981 e 2010 (INMET, c2022), também para os meses de janeiro e julho, realizando-se a correção para velocidade sobre a água (ver Figura 19). Os valores são indicados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados de velocidade (U_L) e direção do vento das Normais Climatológicas 1981-2010 para janeiro e julho, com a correção para velocidade sobre a água (U_W).

Mês	Razão RL	U_L (m/s)	U_W (m/s)	Direção ($^{\circ}$ Az)
Janeiro	1,60	2,50	4,00	134,00
Julho	1,70	2,00	3,00	164,00

Fonte: Dados de INMET (c2022) adaptados conforme U.S. ARMY (2005) *apud* PISA (2013)

As temperaturas médias da água do Rio Guaíba foram retiradas da página da internet *Sea Temperature*: 25 °C para o mês de janeiro e 18 °C para o mês de julho (SEA TEMPERATURE, 2022). Uma vez que não foi possível encontrar valores de salinidade e sedimento para o Guaíba, optou-se por utilizar a média para estuários indicada no *software*.

As curvas de evaporação geradas para os cinco primeiros dias de cada mês (120 h) são mostradas na Figura 23. Os dados foram utilizados para criar a tabela de fração remanescente conforme utilizada no SisBaHiA. Foi considerado um ajuste exponencial e extrapolação para obter o tempo referente a fração 0,001, encontrando um valor maior do que o tempo previsto para a simulação (6 vezes para janeiro e 8 vezes para julho). Isso já era esperado em função das características do contaminante (altamente persistente).

Destaca-se, ainda, a densidade inicial indicada para janeiro (977 kg/m³) e julho (971 kg/m³). Para estes valores e considerando ainda a viscosidade cinemática da água

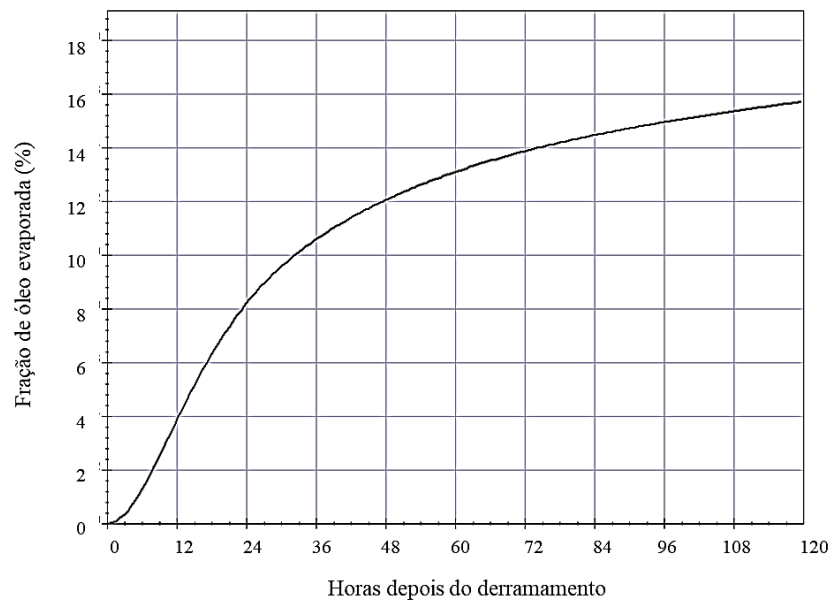
como sendo $0,898 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (25°C) e $1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (20°C), os valores obtidos para área inicial pela equação de Fay foram de 182.706 m^2 após 622 s para janeiro e 174.144 m^2 após 569 s para julho, o que representaria diâmetros iniciais de 482 m e 474 m.

Apesar de terem sido calculados, não foi possível inserir estes valores no SisBaHiA no ponto de interesse escolhido para o derramamento, nem como diâmetro de fonte circular, nem tentando considerar a mesma área para um formato retangular, em função de uma indicação de que a fonte estaria fora da malha. Deste modo, apesar de considerar o valor relevante de um ponto de vista ambiental, ele não foi utilizado nas simulações.

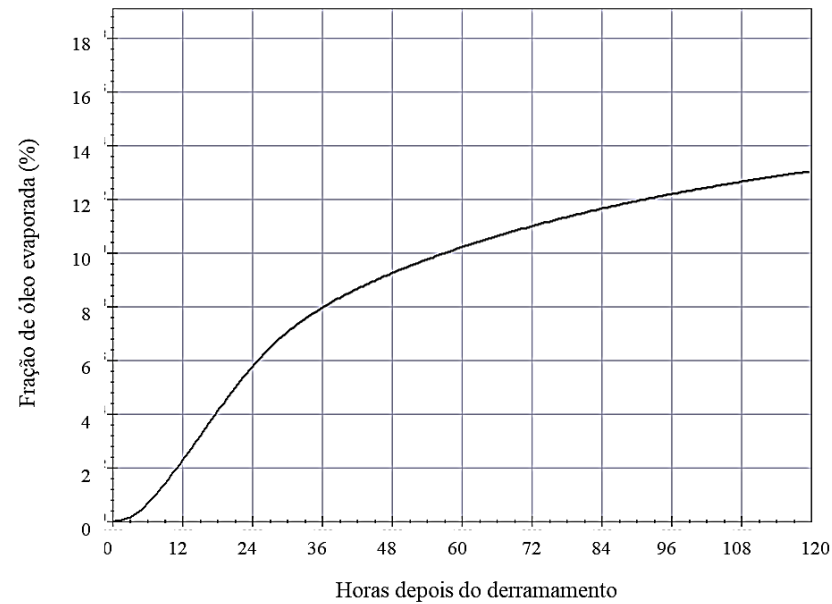
SISBAHIA (2021) indica que “dependendo da escala do problema, e respeitando a escala relativa da fonte no contexto do domínio de interesse, o tamanho exato e a forma da região fonte tem muito pouca relevância se o interesse está em buscar respostas em pontos afastados dela”. Assim, procurou-se adotar um diâmetro que fosse permitido executar as simulações, para o qual foi definido 120 m (1/3 da largura do canal no ponto escolhido).

Figura 23 – Curvas de evaporação do óleo geradas no *software* ADIOS2 para os meses de a) Janeiro e b) Julho.

a)



b)



5.4.2.3 Simulações realizadas no SisBaHiA

Optando-se por realizar uma primeira série de simulações probabilísticas (uma para cada cenário de vazão), foram inseridos um conjunto de 30 derramamentos independentes com instantes iniciais entre o 2º e o 7º dia de simulação hidrodinâmica (a cada 4 h a partir de 48 h de simulação), a fim de representar a ocorrência de incidentes em diferentes condições de nível, correntes e vento, e considerando que o Porto de Porto Alegre atua num regime de funcionamento contínuo (24/7).

A partir dos resultados das simulações hidrodinâmicas, conforme será comentado no item 6.1, percebeu-se que, num contexto geral o período acabou coincidindo com um momento de tendência geral de elevação dos níveis no Guaíba. Deste modo rodou-se uma segunda série de simulações para cada cenário hidrodinâmico, a fim de se considerar um período de diminuição geral dos níveis. Para o cenário de estiagem, isso foi observado entre o 7º e o 12º dia de simulação hidrodinâmica (primeiro derramamento = 168 h). Já para os cenários de média e cheia, isso ocorreu no período entre o 10º e o 15º dia (primeiro derramamento = 240 h). Novamente foi considerado um derramamento a cada 4 horas.

Inicialmente tinha sido adotado coeficiente de absorção de 0,0001, que indica reflexão total, a fim de representar o pior caso de dispersão possível. Entretanto, ROSMAN (comunicação pessoal, 2022) sugeriu que as simulações fossem realizadas adotando um coeficiente médio de 0,2, o que também foi feito para cada cenário hidrodinâmico (terceira série de simulações, considerando o mesmo período da primeira série – entre o 2º e o 7º dia de simulação hidrodinâmica). As series de simulações realizadas estão indicadas na Tabela 10.

Ainda, o modelo lagrangeano de transporte de contaminantes do *software* SisBaHia requer a definição de alguns parâmetros para a execução das simulações. A espessura da fonte foi definida conforme o critério para uniformizar os limites de apresentação de resultados de modelos de derramamento de óleo proposto por ROSMAN (comunicação pessoal, 2022), que a considera como função da densidade/concentração.

O passo de tempo adotado foi de 40 s, sendo que a cada intervalo de tempo eram lançadas 40 partículas na água para representar a mancha, até completar os 2400 s (tempo total de derramamento – 40 min). O tempo inicial de cada simulação variava de acordo

com o instante do primeiro lançamento, entretanto todas foram rodadas até o fim da simulação hidrodinâmica. Cada uma levou em torno de 30 minutos para ser executada.

Tabela 10 – Simulações de derramamento de óleo realizadas no *software* SisBaHiA.

Cenário de vazão	Tendência geral de elevação de nível no Guaíba	Tendência geral de descida de nível no Guaíba	Consideração de coeficiente de absorção
Estiagem	A1	A2	A3
Média	B1	B2	B3
Cheia	C1	C2	C3
Observações	Sem coeficiente de absorção	Sem coeficiente de absorção	Tendência de geral de elevação do nível

5.4.2.4 Comparação com o *software* GUAÍBA

O módulo de transporte de contaminantes do *software* GUAÍBA não foi utilizado porque não foi possível inserir derramamentos com uma duração de lançamento determinada (neste caso, 2.400 s). O *software* permitia apenas inserir fontes permanentes até o fim da simulação, de modo que ou os volumes não seriam representativos, ou teria que ser adotada uma vazão muito pequena de derramamento. Entretanto, a fim de utilizar o *software* para gerar resultados comparáveis aos do SisBaHiA, utilizou-se a função de flutuadores (traçadores) do *software*.

Assim, procurou-se lançar alguns flutuadores nos mesmos instantes em que a mancha tinha sido analisada no modelo de transporte lagrangeano do SisBaHiA para os exemplos determinísticos escolhidos. Isso foi possível porque os flutuadores no GUAÍBA também são abordados como partículas. Aqui se ressalta novamente uma diferença importante entre os *softwares*, já que o primeiro utiliza a velocidade tridimensional a 0,1 m de profundidade, enquanto o último faz os cálculos baseados na velocidade média bidimensional.

5.4.2.5 Comparação com Cartas SAO

Os resultados obtidos com o *software* SisBaHiA para as simulações utilizando coeficiente de absorção foram comparados de forma qualitativa com as Cartas Ambientais de Sensibilidade ao Óleo (Cartas SAO), a fim de fornecer uma ideia da problemática ambiental associada ao derramamento de óleo simulado (a partir da sua interação com as margens do corpo hídrico). Além disso, a ferramenta de toque no litoral foi utilizada para realização de uma análise quantitativa de volume absorvido.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados os resultados que mais se destacaram na análise das simulações hidrodinâmicas e de dispersão de manchas de óleo no Rio Guaíba realizadas tendo como interesse a região do Porto de Porto Alegre.

6.1 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS

Apesar das diversas abordagens possíveis de análise dos resultados obtidos tanto no programa GUAÍBA, quanto no SisBaHiA, entende-se que este não é o foco principal deste estudo. Deste modo, serão destacados apenas os pontos mais relevantes tendo em vista a utilização destas simulações como base para os modelos de transporte de contaminantes.

Para indicar o comportamento geral da hidrodinâmica do Rio Guaíba, optou-se por fazer capturas de tela do módulo da velocidade no *software* GUAÍBA aos 5, 10, 20 e 30 dias de simulação para as três simulações hidrodinâmicas realizadas (Figura 24, Figura 25 e Figura 26), com a escala fixada entre 0 e 1,3 m/s. Todas as imagens estão orientadas para o Norte.

Como era esperado, os menores valores de velocidade são observados no cenário de estiagem, e os maiores no cenário de cheia. Além disso, no geral, a velocidade é maior na entrada (Delta do Jacuí – ver Figura 9), na região central do Rio Guaíba, próximo da saída em Itapuã e em outros estreitamentos ao longo da extensão do rio (destaque para a Ponta do Gasômetro, onde foi colocada a estação ADCP – ver Figura 21 e Figura 22).

Isto está de acordo com a caracterização do Rio Guaíba (ver item 5.1.2), com a existência de um canal longitudinal de navegação tendo sido indicada por SCHWARZBACH *et al.* (1997). Ainda, destaca-se que nestes instantes capturados o nível em Itapuã era sempre menor do que na Foz do Jacuí.

Figura 24 – Capturas de tela do módulo da velocidade no *software* GUAÍBA para o cenário de estiagem em diferentes instantes de simulação.

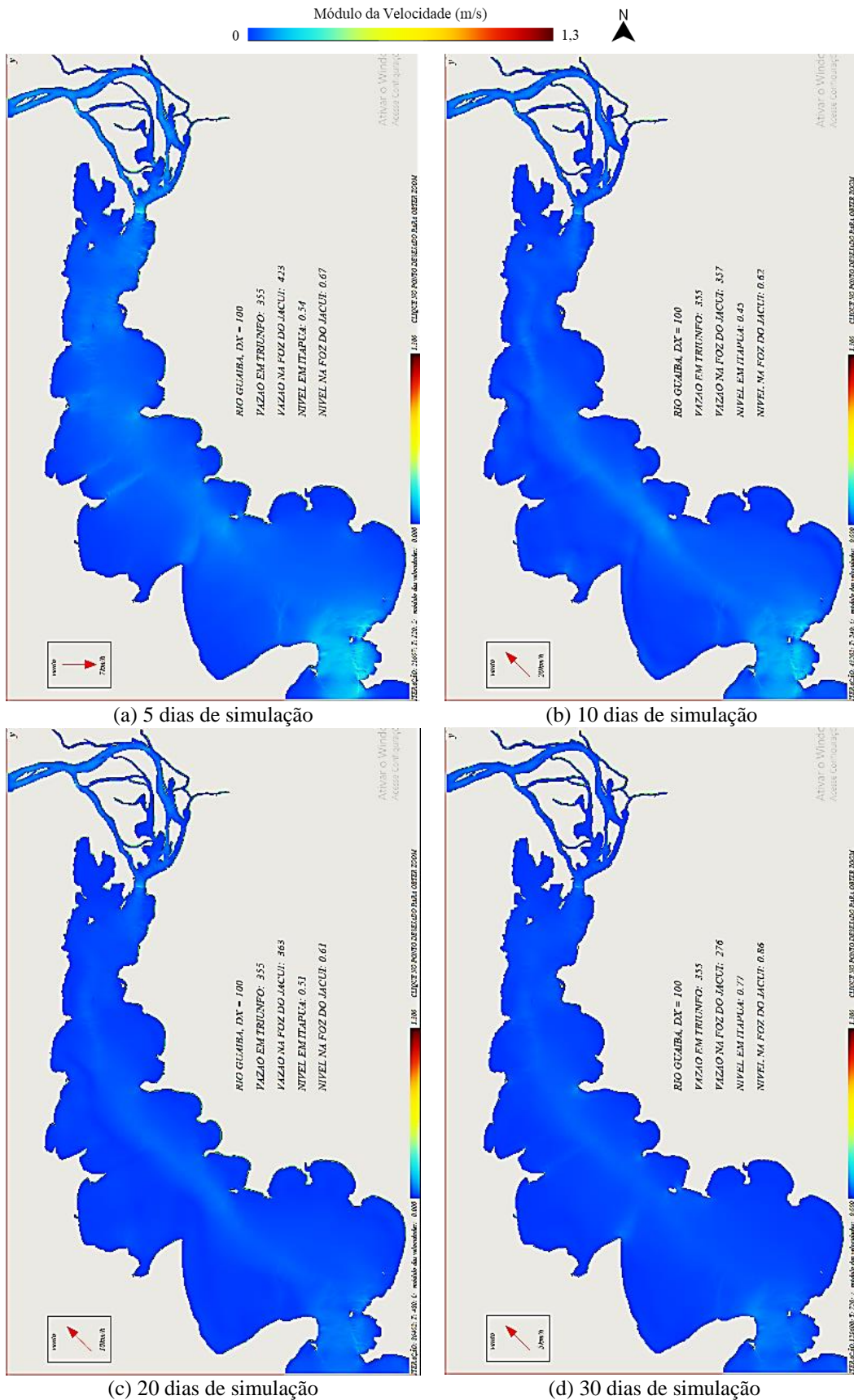


Figura 25 – Capturas de tela do módulo da velocidade no *software* GUAÍBA para o cenário de média em diferentes instantes de simulação.

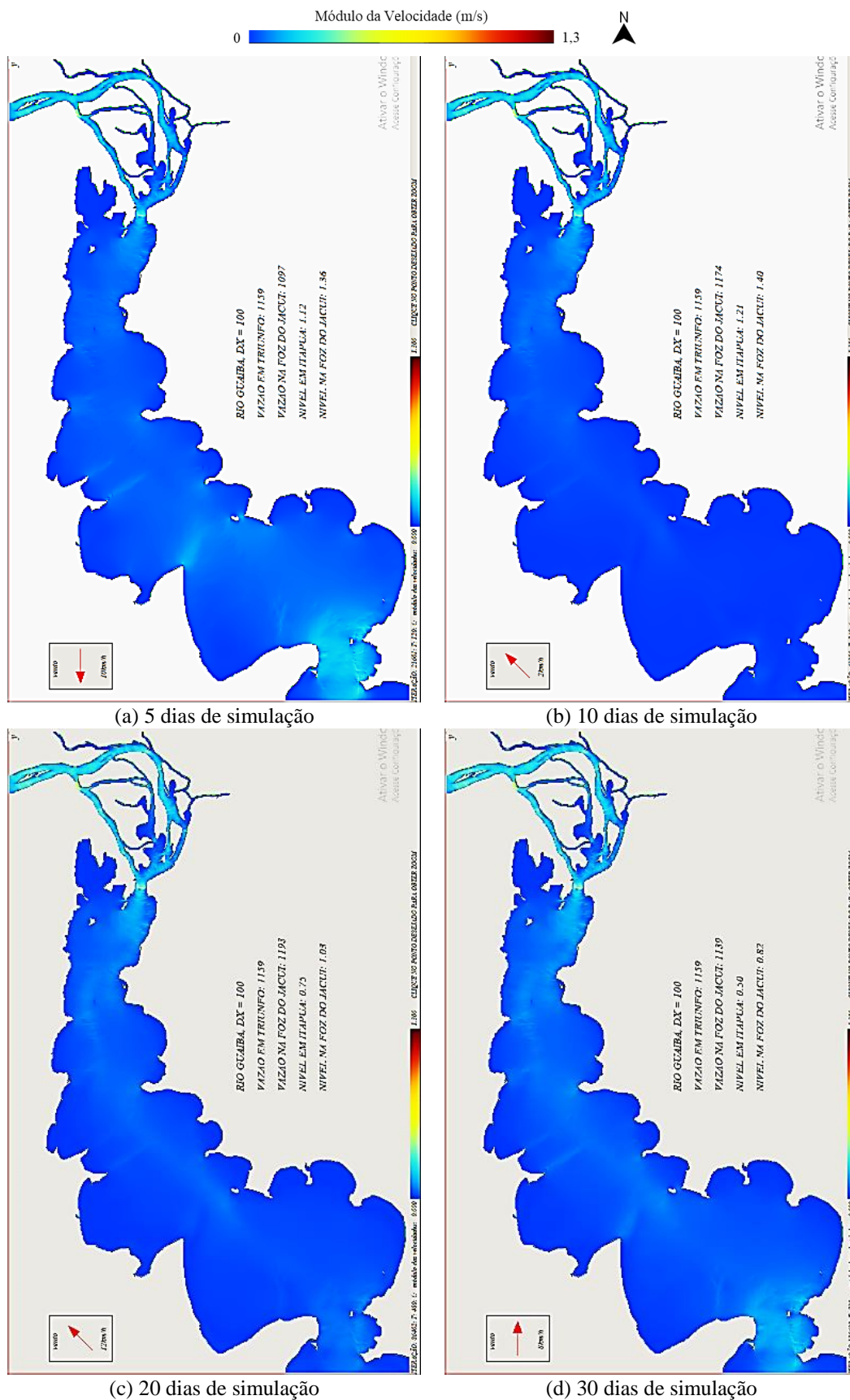
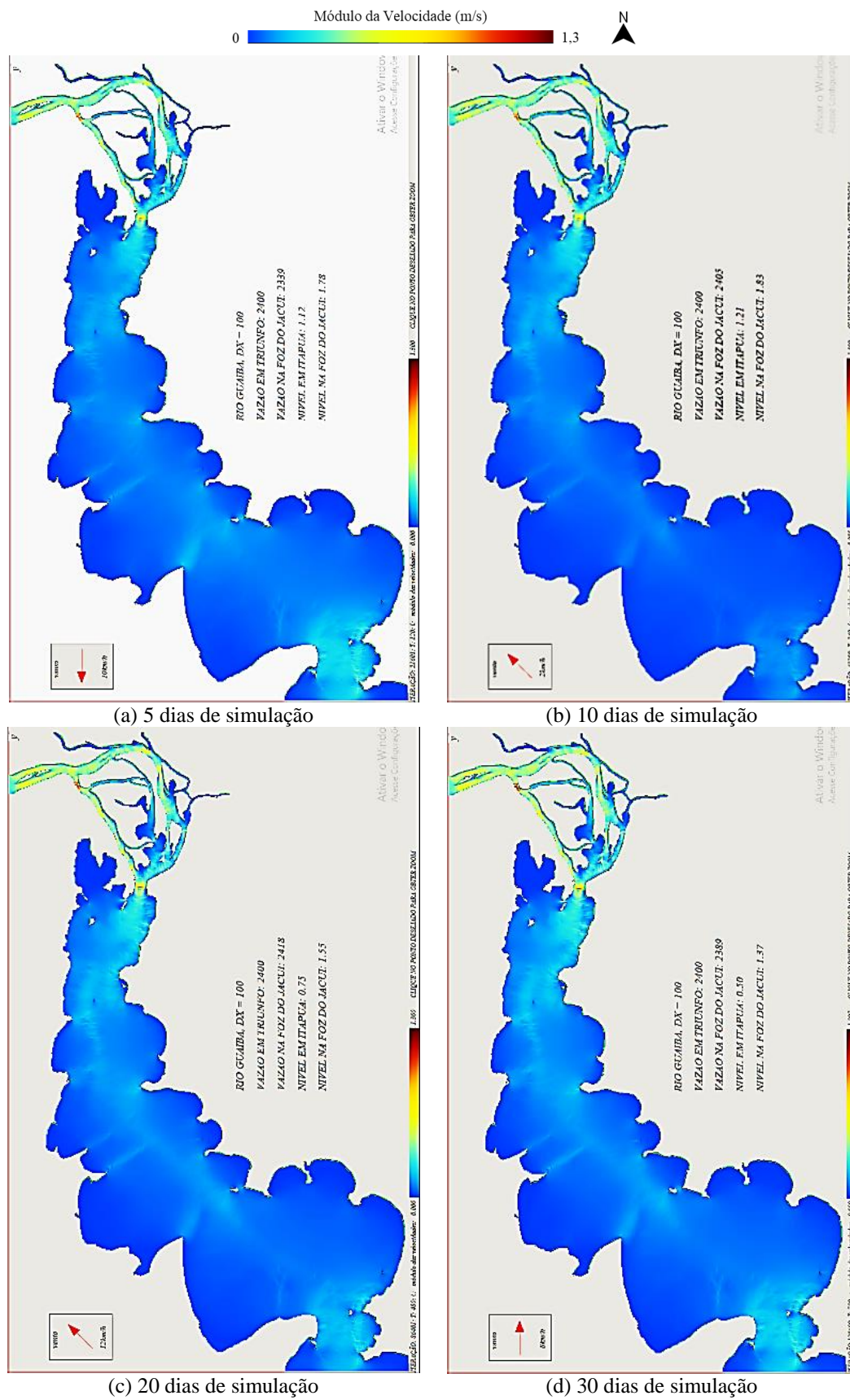


Figura 26 – Capturas de tela do módulo da velocidade no *software* GUAÍBA para o cenário de cheia em diferentes instantes de simulação.



A maior parte da análise das simulações hidrodinâmicas foi feita com base nos dados de nível e módulo da velocidade adquiridos com as estações de controle (ver Figura 21 e Figura 22). Primeiramente, buscou-se determinar a diferença entre os valores encontrados nos dois *softwares*. Isso foi feito calculando os valores médios para cada estação e considerando a Equação 9, sendo o resultado indicado na

Tabela 11.

$$Diferença (\%) = \frac{Valor\ SisBaHiA - Valor\ GUAÍBA}{Valor\ SisBaHiA} \quad \text{Equação 9}$$

Tabela 11 – Diferença calculada entre os resultados das simulações dos *softwares* GUAÍBA e do SisBaHiA.

	Estiagem		Média		Cheia	
	Nível	Mod. Vel.	Nível	Mod. Vel.	Nível	Mod. Vel.
Jacuí	10%	-15%	26%	-6%	32%	-5%
Mar. Dias	5%	10%	14%	26%	24%	16%
Naveg.	4%	15%	9%	35%	17%	26%
Mauá	3%	25%	6%	43%	12%	37%
ADCP	2%	-21%	5%	14%	11%	16%
Itapuã 1	0%	-34%	-1%	17%	-1%	22%

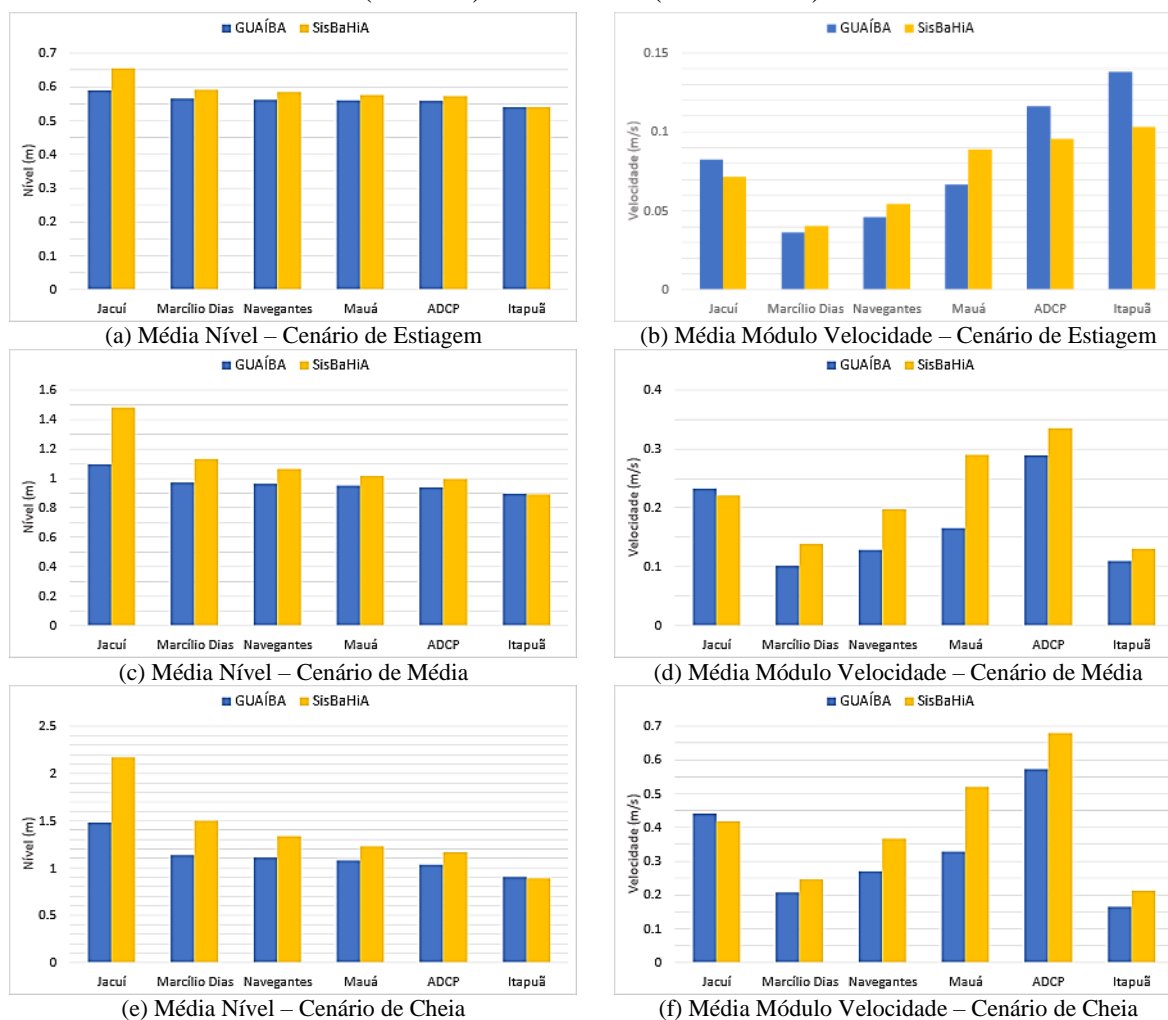
Pelo menos para os valores médios, a diferença dos níveis aumentou para os cenários de maior vazão em todas as estações. As diferenças foram mais significativas para a estação Jacuí (chegando a 32%), o que pode ter relação com o remanso gerado no Jacuí pelos rios contribuintes, uma vez que quanto maior a vazão, mais para jusante se posicionaria o ressalto, gerando maiores variações de nível na estação Jacuí. (%). Para a estação de Itapuã, os valores ficaram muito próximos (no máximo 1% de diferença), em função da utilização das mesmas condições de contorno.

Para os módulos de velocidade, não é possível visualizar nenhuma tendência em relação as diferenças calculadas pelos valores médios dos dois *softwares* considerando os três cenários hidrodinâmicos. Destaca-se que elas variaram bastante: entre -34% (simulação de estiagem, estação de Itapuã) a 43% (simulação de média, estação Mauá). Diferenças maiores para os resultados de velocidade do que para os níveis são comuns em simulações computacionais.

Na Tabela 12 e Tabela 13 estão registrados os outros resultados estatísticos calculados para os dados de nível e módulo da velocidade (respectivamente). Na Figura 27 são apresentados os gráficos para os valores médios. Qualitativamente, é possível

observar que apesar da diferença observada nos valores, a tendência entre as estações é semelhante para ambos os *softwares*.

Figura 27 – Valores médios de nível (esquerda) e módulo de velocidade (direita) calculados para os dados das simulações hidrodinâmicas para os *softwares* GUAÍBA (em azul) e SisBaHiA (em amarelo).



Para os três cenários hidrodinâmicos, os valores médios de nível da estação Jacuí são superiores. Na sequência, as estações Marclício Dias, Navegantes, Mauá e ADCP, com menores valores para Itapuã. Além disso, entre um mesmo cenário, os valores de nível médio encontrado para o SisBaHiA são maiores. Ainda, entre os cenários, o de estiagem apresentou valores menores e o de cheia, valores maiores.

Em relação às médias dos módulos de velocidade, os valores encontrados para a estação de Marclício Dias são sempre menores do que os das estações Navegantes, Mauá e ADCP, crescendo de montante para jusante. Para o cenário de estiagem, observam-se maiores valores médios em Itapuã, mas isso não acontece para as simulações de vazão média e de cheia, para as quais os maiores valores médios registrados foram para a estação ADCP.

Tabela 12 – Estatísticas calculadas para os valores de nível registrados nos dois *softwares* nas estações de controle adotadas para as simulações hidrodinâmicas realizadas.

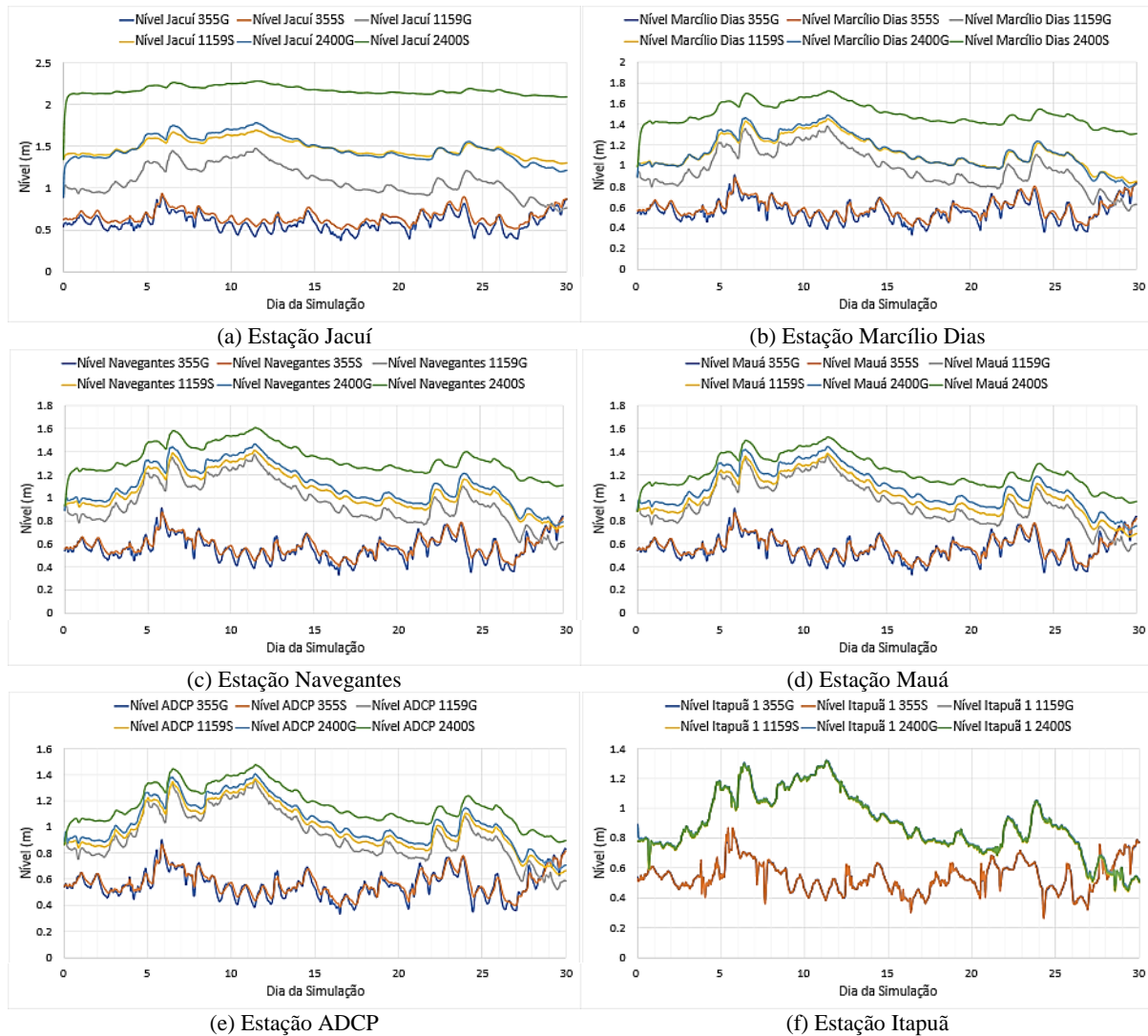
	GUAÍBA							SISBAHIA					
	Jacuí	Mar. Dias	Naveg.	Mauá	ADCP	Itapuã 1	Itapuã 2	Jacuí	Mar. Dias	Naveg.	Mauá	ADCP	Itapuã 1
355													
Média	0,59	0,56	0,56	0,56	0,56	0,54	0,54	0,66	0,59	0,58	0,58	0,57	0,54
Desv. Pad.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
Mín.	0,38	0,33	0,33	0,33	0,33	0,10	0,25	0,51	0,42	0,40	0,39	0,39	0,26
Máx.	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,10	0,88	0,93	0,89	0,88	0,87	0,86	0,87
1159													
Média	1,10	0,97	0,96	0,95	0,94	0,90	0,89	1,48	1,13	1,07	1,02	1,00	0,89
Desv. Pad.	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,10	0,15	0,17	0,17	0,18	0,20
Mín.	0,72	0,56	0,55	0,54	0,52	0,45	0,44	1,30	0,83	0,73	0,66	0,64	0,44
Máx.	1,48	1,38	1,38	1,37	1,36	1,32	1,32	1,69	1,45	1,41	1,38	1,37	1,32
2400													
Média	1,48	1,14	1,11	1,08	1,04	0,90	0,89	2,17	1,50	1,34	1,23	1,16	0,90
Desv. Pad.	0,15	0,17	0,17	0,17	0,18	0,20	0,20	0,06	0,11	0,13	0,14	0,15	0,20
Mín.	0,89	0,79	0,76	0,72	0,67	0,46	0,44	1,34	0,99	0,93	0,88	0,86	0,45
Máx.	1,78	1,49	1,47	1,44	1,41	1,32	1,32	2,28	1,72	1,61	1,53	1,47	1,32

Tabela 13 – Estatísticas calculadas para os valores de módulo de velocidade registrados nos dois *softwares* nas estações de controle adotadas para as simulações hidrodinâmicas realizadas.

	GUAÍBA							SISBAHIA					
	Jacuí	Mar. Dias	Naveg.	Mauá	ADCP	Itapuã 1	Itapuã 2	Jacuí	Mar. Dias	Naveg.	Mauá	ADCP	Itapuã 1
355													
Média	0,08	0,04	0,05	0,07	0,12	0,14	0,17	0,07	0,04	0,05	0,09	0,10	0,10
Desv. Pad.	0,04	0,02	0,03	0,04	0,07	0,10	0,11	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,07
Mín.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máx.	0,17	0,10	0,13	0,19	0,34	0,58	0,72	0,08	0,06	0,09	0,16	0,17	0,42
1159													
Média	0,23	0,10	0,13	0,17	0,29	0,11	0,12	0,22	0,14	0,20	0,29	0,34	0,13
Desv. Pad.	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,06	0,06	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,06
Mín.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,10	0,14	0,19	0,21	0,00
Máx.	0,26	0,13	0,17	0,23	0,39	0,36	0,39	0,23	0,16	0,24	0,35	0,39	0,37
2400													
Média	0,44	0,21	0,27	0,33	0,57	0,17	0,17	0,42	0,25	0,37	0,52	0,68	0,21
Desv. Pad.	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06
Mín.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,13	0,19	0,27	0,30	0,00
Máx.	0,46	0,23	0,30	0,37	0,65	0,39	0,42	0,42	0,27	0,40	0,59	0,75	0,42

Entretanto acredita-se que seja melhor visualizar os dados considerando sua variação ao longo do tempo de simulação. Deste modo, na Figura 28 são mostrados de forma gráfica os resultados dos níveis gerados para cada estação, na forma de comparação entre os dois *softwares* (considerando as três simulações hidrodinâmicas realizadas).

Figura 28 – Comparação entre os valores de nível obtidos para cada estação de controle. O índice S indica resultados do SisBaHiA e o índice G indica resultados do GUAÍBA. O cenário de simulação hidrodinâmica está indicado pela vazão de entrada no Jacuí.

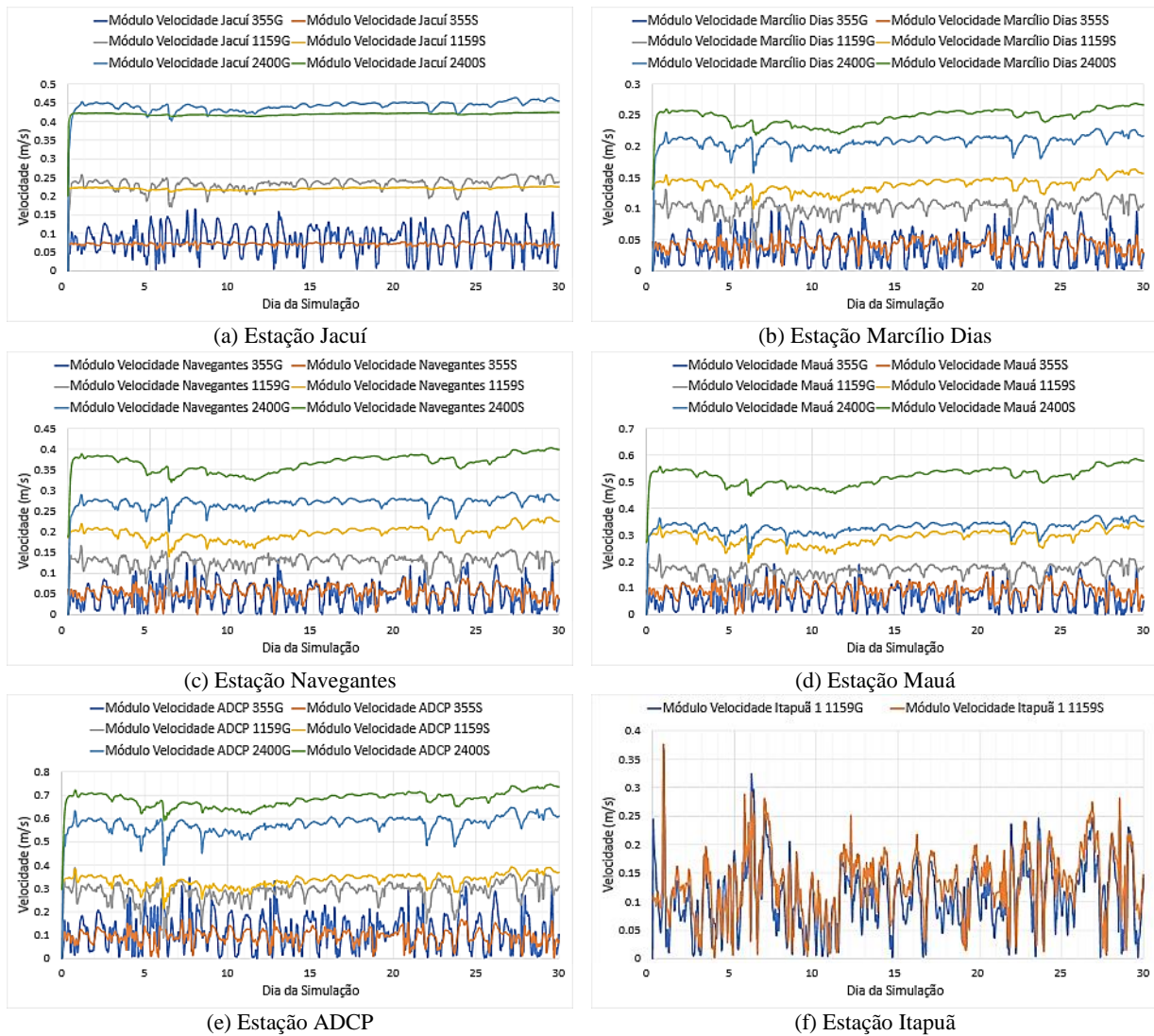


Fazendo uma análise qualitativa, para uma mesma estação foram observadas tendências semelhantes de variação de nível entre os dois *softwares*. Destaca-se também que, para mesma vazão os valores observados para as curvas do SisBaHiA são maiores do que os observados para as curvas do GUAÍBA, o que também já tinha sido indicado pelos valores médios calculados.

Além disso, é possível observar que o comportamento das curvas referentes aos cenários de vazão média e cheia é mais próximo entre si do que em relação às do cenário de estiagem. Tendo em vista a coincidência das curvas de Itapuã, isso provavelmente ocorreu em função de ter sido utilizado o mesmo arquivo como condição de contorno.

Na Figura 29, a mesma comparação é apresentada para os resultados de módulo de velocidade. Também foi possível observar tendências semelhantes de comportamento. No geral, é possível concluir que a utilização das mesmas condições de contorno gerou resultados satisfatórios na comparação entre os dois *softwares*.

Figura 29 – Comparação entre os valores de módulo de velocidade obtidos para cada estação de controle. O índice S indica resultados do SisBaHiA e o índice G resultados do GUAÍBA. O cenário de simulação hidrodinâmica está indicado pela vazão de entrada no Jacuí.



Já na Figura 30 e Figura 31 os gráficos de nível e módulo da velocidade (respectivamente) são mostrados na forma de comparação dos valores obtidos para o conjunto de estações para cada cenário de vazão. Na esquerda, os resultados para o GUAÍBA, e na direita, para o SisBaHiA. Destaca-se uma semelhança entre o comportamento dos níveis entre as estações, o que não é observado para os módulos na velocidade.

Figura 30 – Comparação entre os valores de nível obtidos para o conjunto de estações, considerados para cada *software* e cenário de simulação hidrodinâmica.

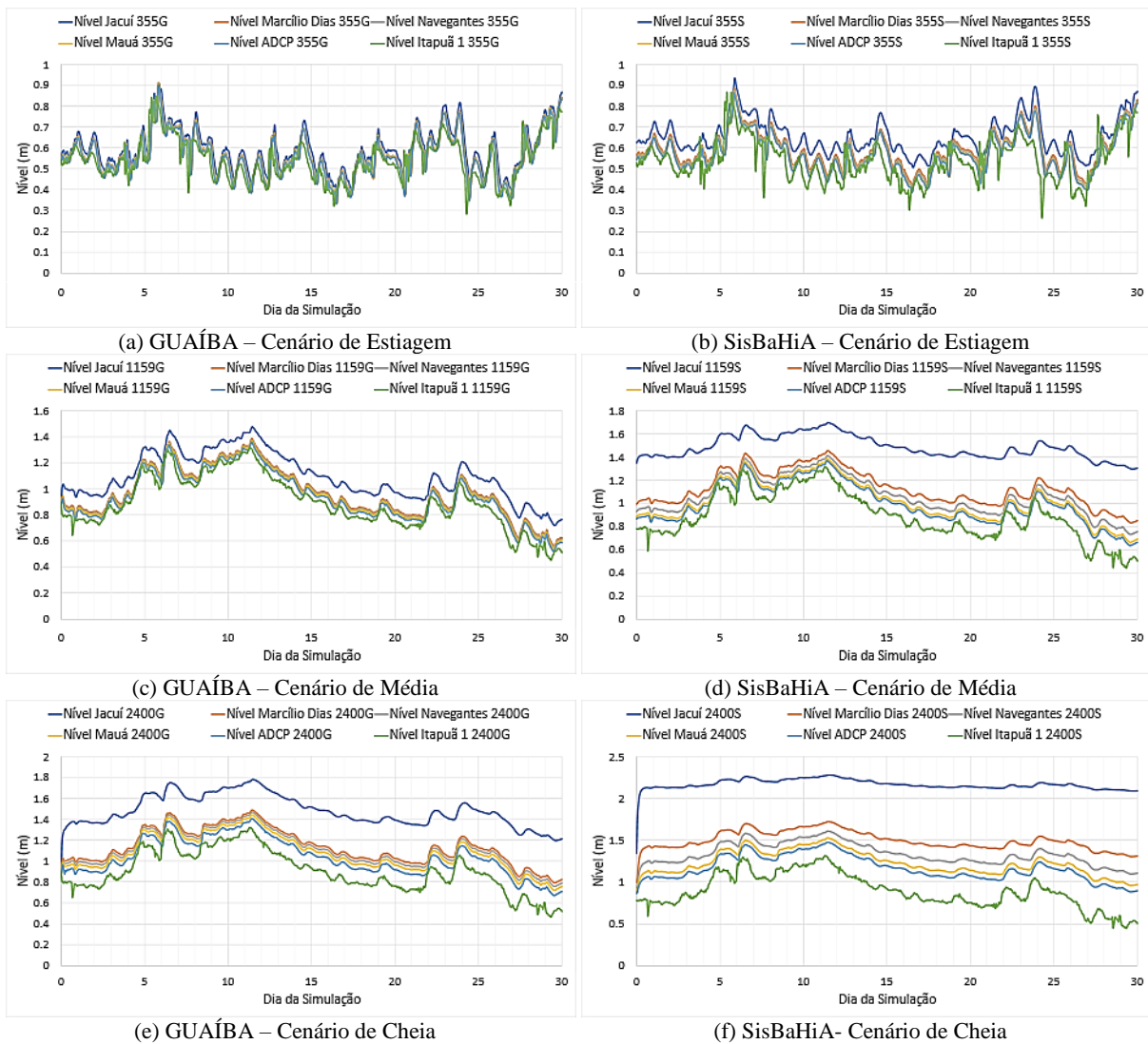
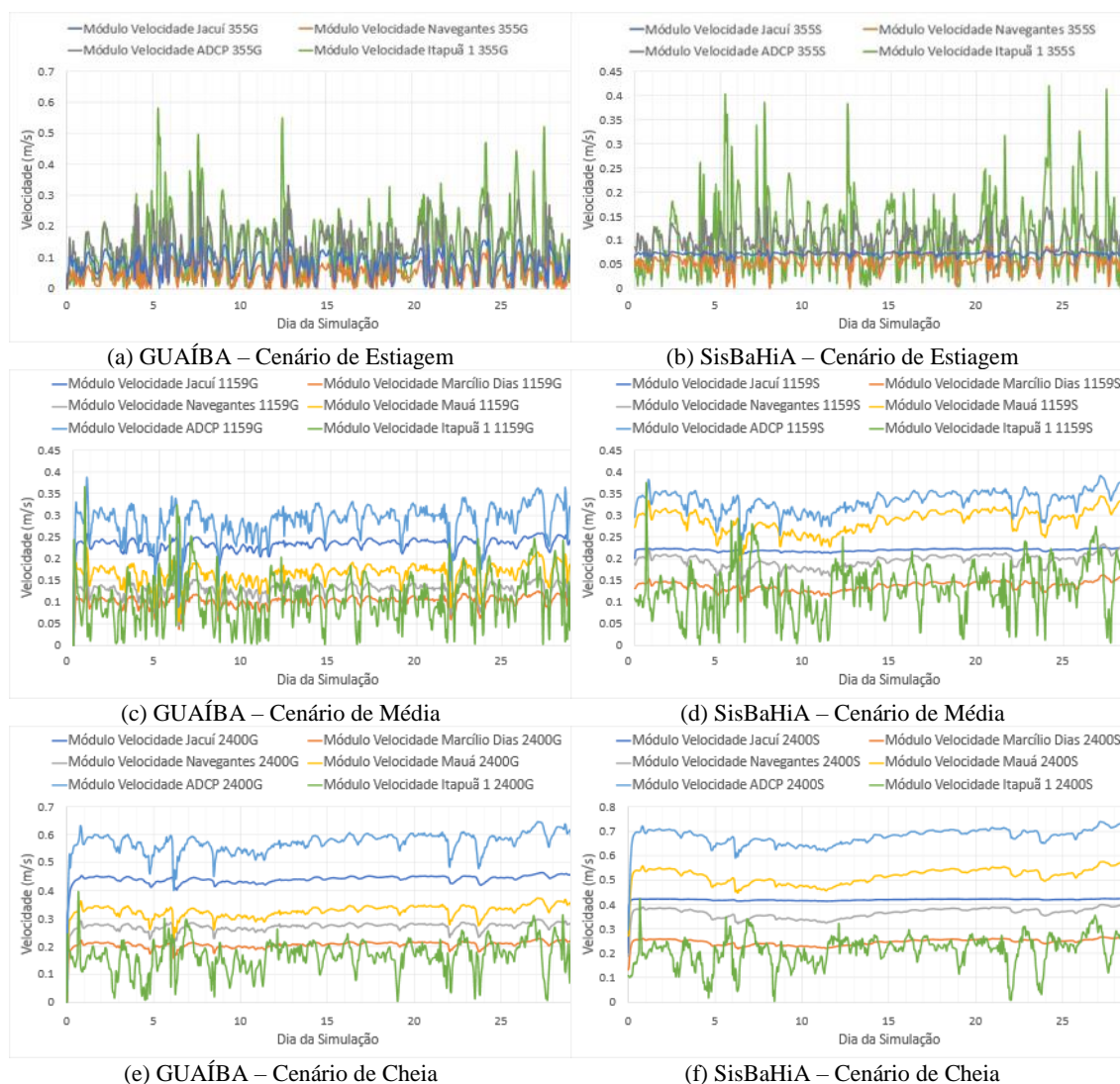


Figura 31 – Comparação entre os valores de módulo de velocidade obtidos para o conjunto de estações, considerados para cada *software* e cenário de simulação hidrodinâmica.

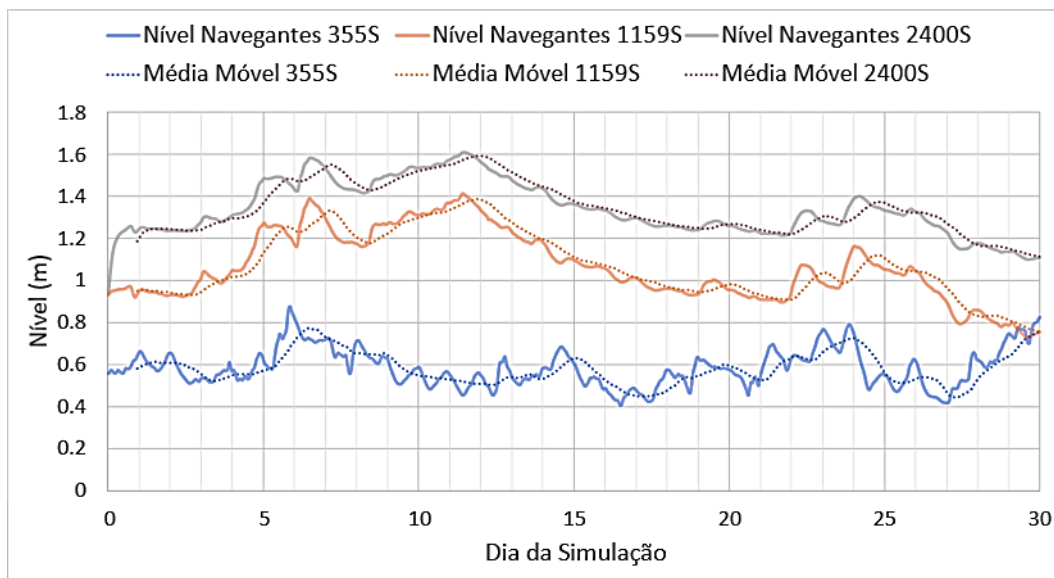


Finalizando a parte gráfica da análise hidrodinâmica, destaca-se que tanto para os níveis, quanto para os módulos de velocidade, é possível observar variações. Entretanto ao passo em que as velocidades oscilam quase que em torno de uma média e em uma frequência maior, podendo estar relacionadas, por exemplo, com as variações dos ventos, para os níveis notam-se momentos característicos de elevação e diminuição.

Para representar estes momentos, foi obtido para os valores de nível da Estação Navegantes do SisBaHiA um gráfico com as médias móveis para o período de 24 h (Figura 32). Observou-se, entre os dias 2 e 7 da simulação para os três cenários hidrodinâmicos simulados uma tendência geral de subida dos níveis, que coincidiu com o intervalo da primeira série de simulações de dispersão de óleo (resultados apresentados no item 6.2.3.1).

Com base nisso, considerou-se importante realizar uma segunda série de simulações de dispersão de óleo para cada cenário de vazão, já que não se sabia se isto interferiria nos resultados obtidos. Esta segunda série foi comparada com a primeira, conforme apresentado no item 6.2.3.2.

Figura 32 – Variação dos valores níveis registrados no *software* SisBaHiA para a Estação Navegantes considerando média móvel de 24 h para os três cenários de simulação hidrodinâmica.



Ainda se considerou interessante apresentar o mapa de velocidade gerado no *software* Surfer a partir dos resultados do SisBaHiA para a estação Navegantes, já que este ponto foi adotado como fonte das simulações de dispersão de óleo. Assim, é possível ter uma ideia do sentido e o módulo do vetor velocidade, indicados pela escala de cores e pela proporcionalidade das setas, ao longo do tempo de simulação para os três cenários hidrodinâmicos. Destaca-se que em função das configurações do *software*, no eixo y está indicado em função dos dias do mês, e não do dia da simulação (que tem início no zero).

Na simulação de estiagem (Figura 33), em alguns momentos em que a velocidade era praticamente nula, chegou a se observar uma breve inversão de sentido do vetor, que não durou mais do que um par de horas. Para ficar mais claro, foi apresentado também o mapa da estação ADCP (Figura 34), alterando-se a configuração das setas para tamanho fixo (módulo indicado apenas na escala de cores). Nas simulações de média (Figura 35) e cheia (Figura 36), o vetor velocidade não variou em direção, apenas em módulo.

A Figura 37 mostra o mapa de velocidade obtido para o Guaíba no 5º dia de simulação às 20 h no cenário de estiagem. As setas, no geral, realmente apontam no sentido contrário ao normalmente observado, entretanto não foi feita uma análise

detalhada o suficiente para determinar se isso caracterizaria uma inversão do escoamento do rio, uma vez que as velocidades estavam muito próximas de zero.

Essa tendência também foi observada em outros momentos, porém não foram gerados mapas de velocidade para todos em função de não ser uma prioridade de análise neste momento. O mais provável é que isto esteja associado à influência do vento, que é mais significativo nos momentos em que a vazão do rio é mais baixa, principalmente quando em que ele sopra com maior velocidade em um sentido contrário ao escoamento, conforme indicado no item 5.1.2 de caracterização do Rio Guaíba.

Figura 33 – Mapa de velocidade da estação Navegantes gerado pelo software SisBaHiA para o cenário de estiagem.

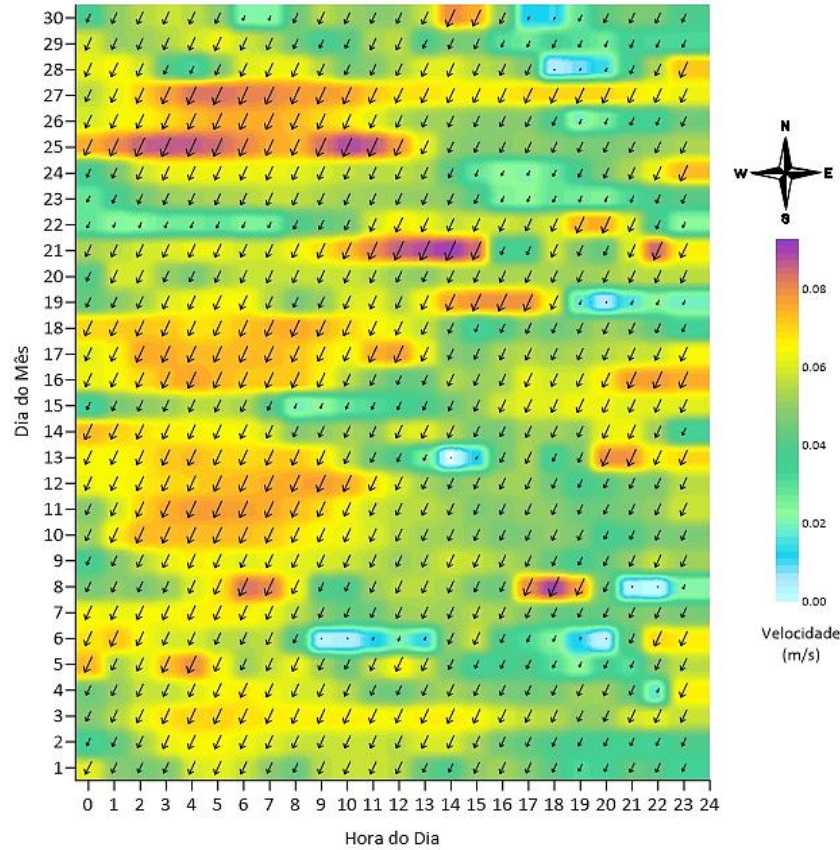


Figura 34 – Mapa de velocidade da estação ADCP gerado pelo software SisBaHiA para o cenário de estiagem.

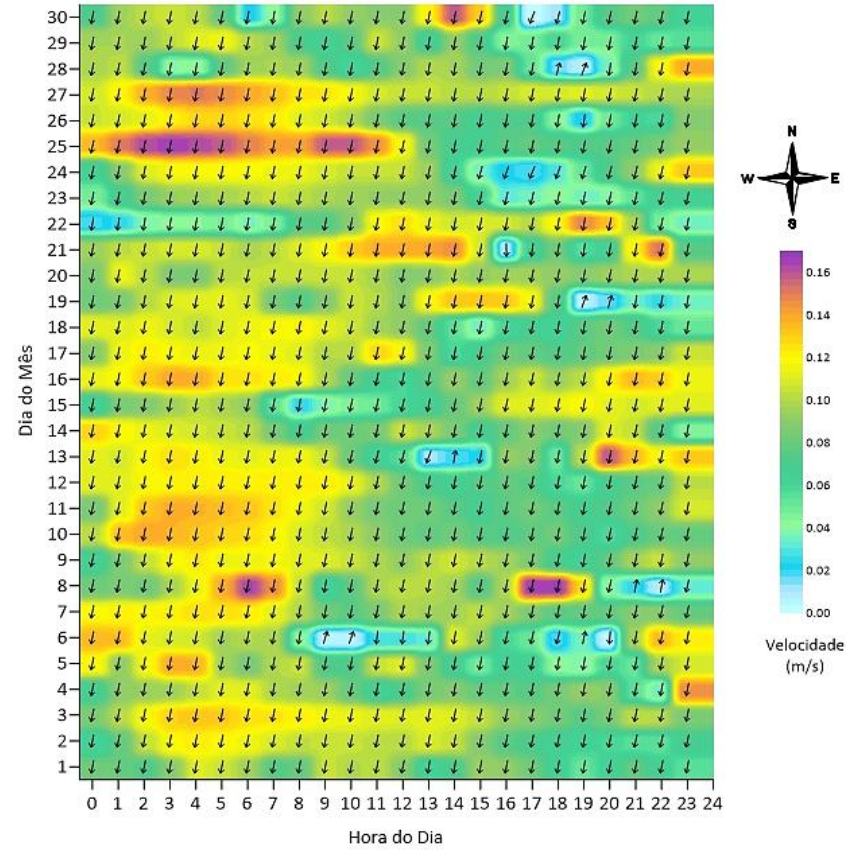


Figura 35 – Mapa de velocidade da estação Navegantes gerado pelo software SisBaHiA para o cenário de média.

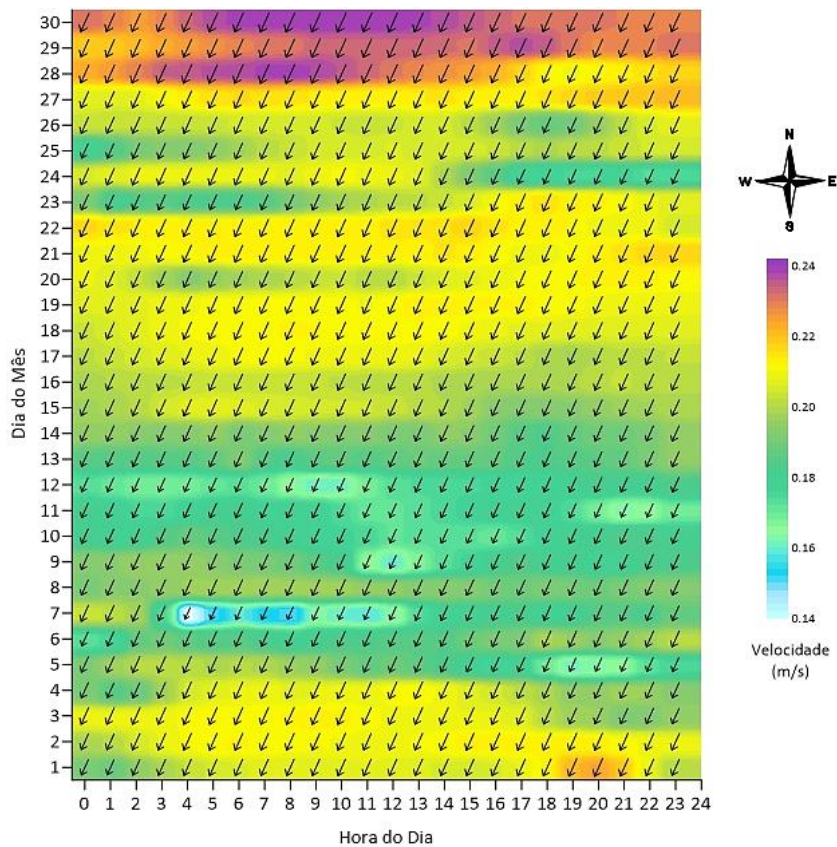


Figura 36 – Mapa de velocidade da estação Navegantes gerado pelo software SisBaHiA para o cenário de cheia.

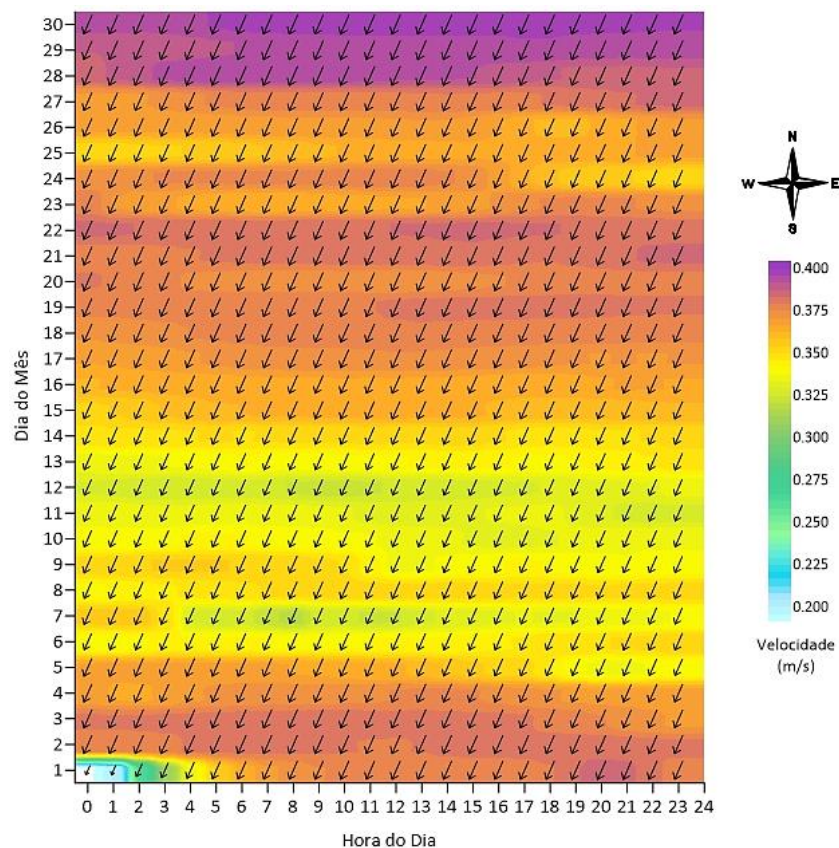
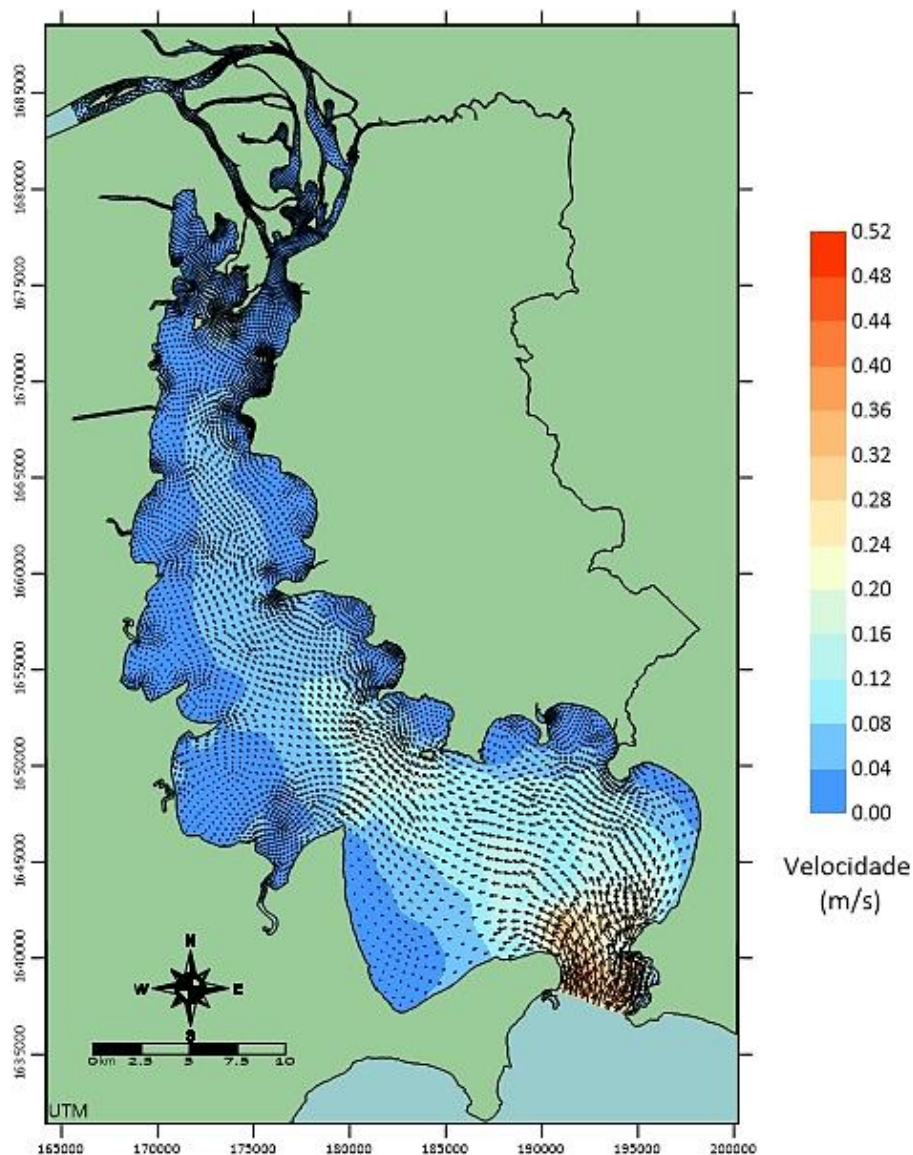


Figura 37 – Mapa de velocidade do Guaíba no 5º dia de simulação (6º dia do mês) às 20 h gerado pelo *software* SisBaHiA (cenário de estiagem).



6.2 SIMULAÇÕES DE DISPERSÃO DE ÓLEO

A Resolução CONAMA 398/2008 indica que a resposta à descarga de pior caso seja escalonada nos tempos 12, 36 e 60 h. Com base nisto e em estudos anteriores, optou-se por analisar os resultados nos instantes 3, 6, 12, 24, 36, 60, 72, 120 e 240 horas depois do derramamento. Os intervalos menores foram adotados de modo a compreender o comportamento da mancha após o derramamento e fornecer subsídios para resposta rápida a um acidente.

Para os momentos finais, foram adotados intervalos maiores de modo a se ter uma ideia de até onde a mancha poderia ser transportada em uma análise de pior caso do ponto

de vista ambiental. Foi padronizado o limite como sendo 10 dias depois do derramamento, conforme indicado por ROSMAN (comunicação pessoal, 2022). Além disso, fica mais difícil prever o comportamento do óleo no ambiente em função dos outros processos naturais aos quais ele está sujeito.

6.2.1 Exemplos determinísticos de dispersão da mancha de óleo para os três cenários hidrodinâmicos na primeira série de simulações (Ex. A1, Ex. B1 e Ex. C1)

A seguir serão apresentados os mapas de nuvem de partículas para três exemplos (abordagem determinística) escolhidos dentre os derramamentos da primeira série de simulações de dispersão de óleo realizada, considerando um período gradual de elevação dos níveis no Rio Guaíba (ver Tabela 10). Assim, é possível ter uma primeira ideia de como ocorreu a dispersão de óleo para os três cenários hidrodinâmicos.

Para o cenário de estiagem foi escolhido como exemplo (Ex. A1) o derramamento que ocorreu no 5º dia de simulação às 20 h (Figura 38a), em função da particularidade destacada nos resultados das simulações hidrodinâmicas (inversão do sentido do vetor velocidade). Neste momento, os ventos sopravam na vindos do Leste com uma velocidade de cerca de 3 m/s (12 km/h). A passagem da mancha está representada na Figura 39.

Para o cenário de vazão média, o exemplo escolhido (Ex. B1) foi o derramamento ocorrido no 3º dia de simulação às 4 h (Figura 38b), com o objetivo de representar o regime natural do Guaíba. Neste instante inicial, a velocidade do vento não era tão alta, cerca de 2 m/s (8 km/h), e eles sopravam de Sudeste, com o escoamento do rio no sentido predominante (em direção à Lagoa dos Patos). A passagem da mancha está representada na Figura 40.

Para o cenário de cheia (Ex. C1) adotou-se como exemplo o derramamento que ocorreu no 6º dia de simulação às 12 h (Figura 38c), por ser um instante de velocidade do vento elevada (3 m/s; 12 km/h) e soprando em direção à Lagoa dos Patos (vindo do Noroeste), favorecendo o deslocamento do óleo neste sentido (para ver até onde a mancha poderia chegar). A passagem da mancha está representada na Figura 41.

Figura 38 – Comportamento hidrodinâmico do Guaíba no instante do derramamento da mancha para os exemplos determinísticos referentes aos cenários de estiagem (Ex. A1), média (Ex. B1) e cheia (Ex. C1), considerando a primeira série de simulações de dispersão realizadas.

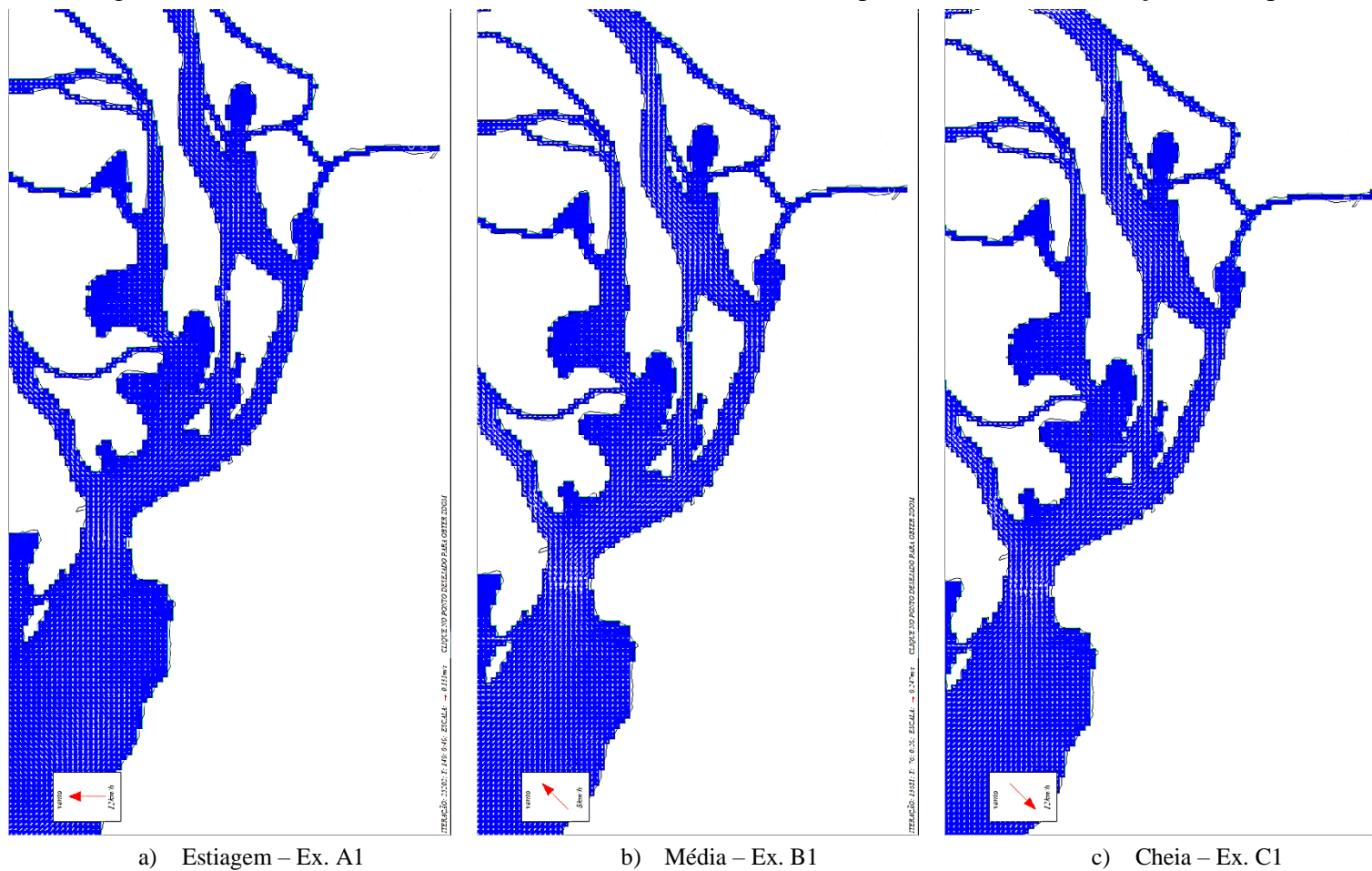


Figura 39 – Evolução da passagem da mancha entre a ocorrência do derramamento (instante 0 h) e o instante 240 h para o exemplo de estiagem (Ex. A1) obtido na primeira série de simulações de dispersão realizadas.

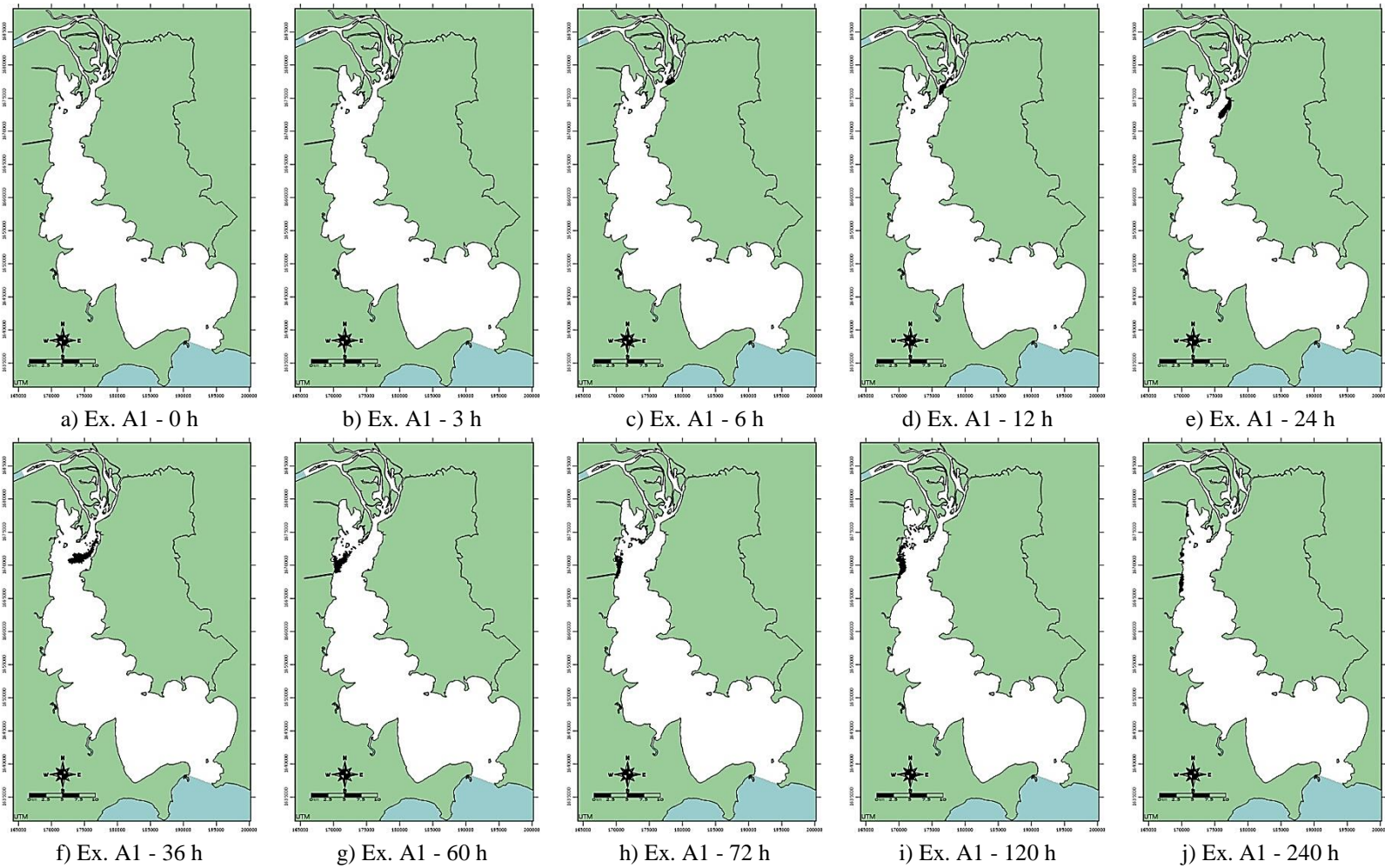


Figura 40 – Evolução da passagem da mancha entre a ocorrência do derramamento (instante 0 h) e o instante 240 h para o exemplo de vazão média (Ex. B1) obtido na primeira série de simulações de dispersão realizadas.

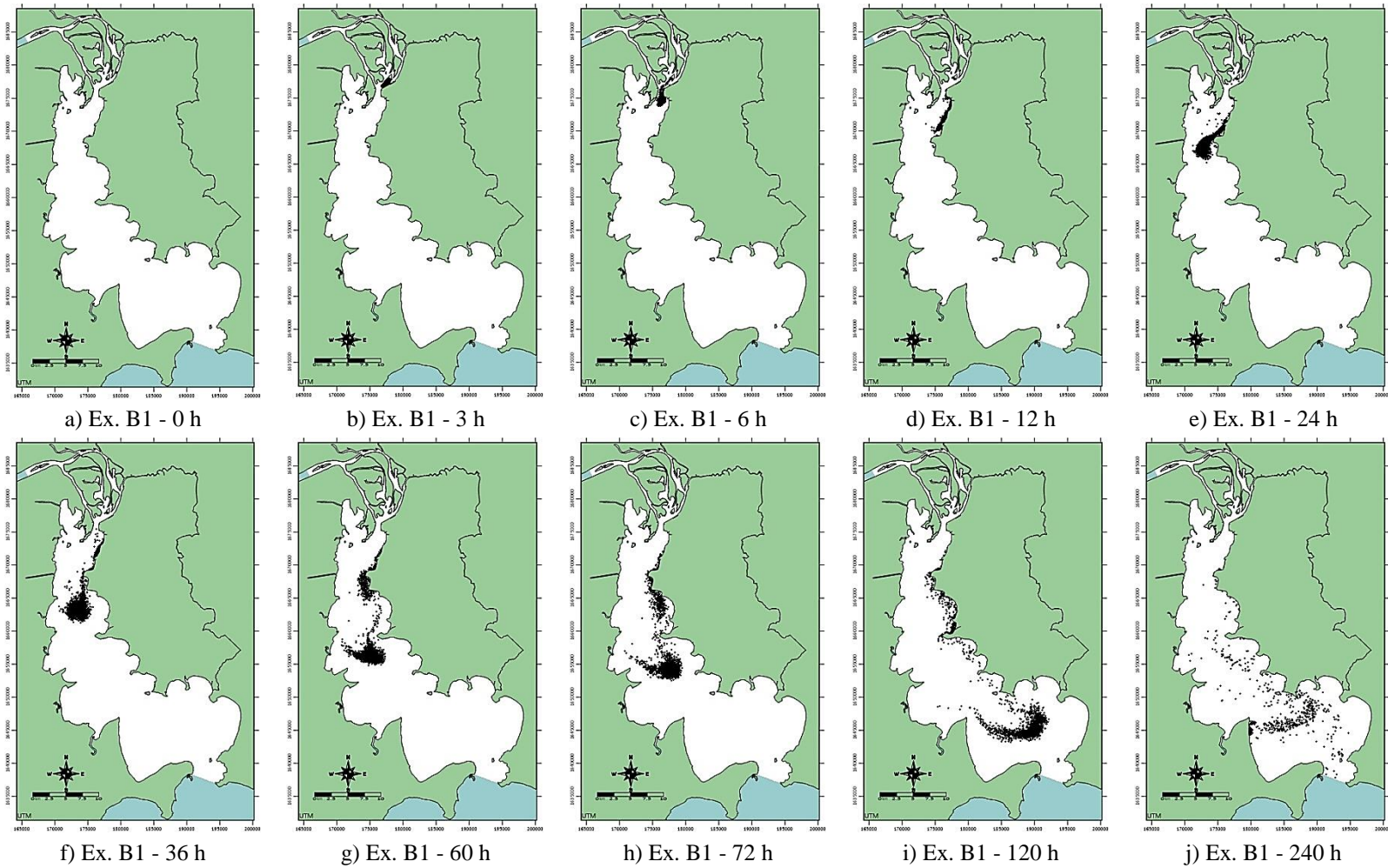
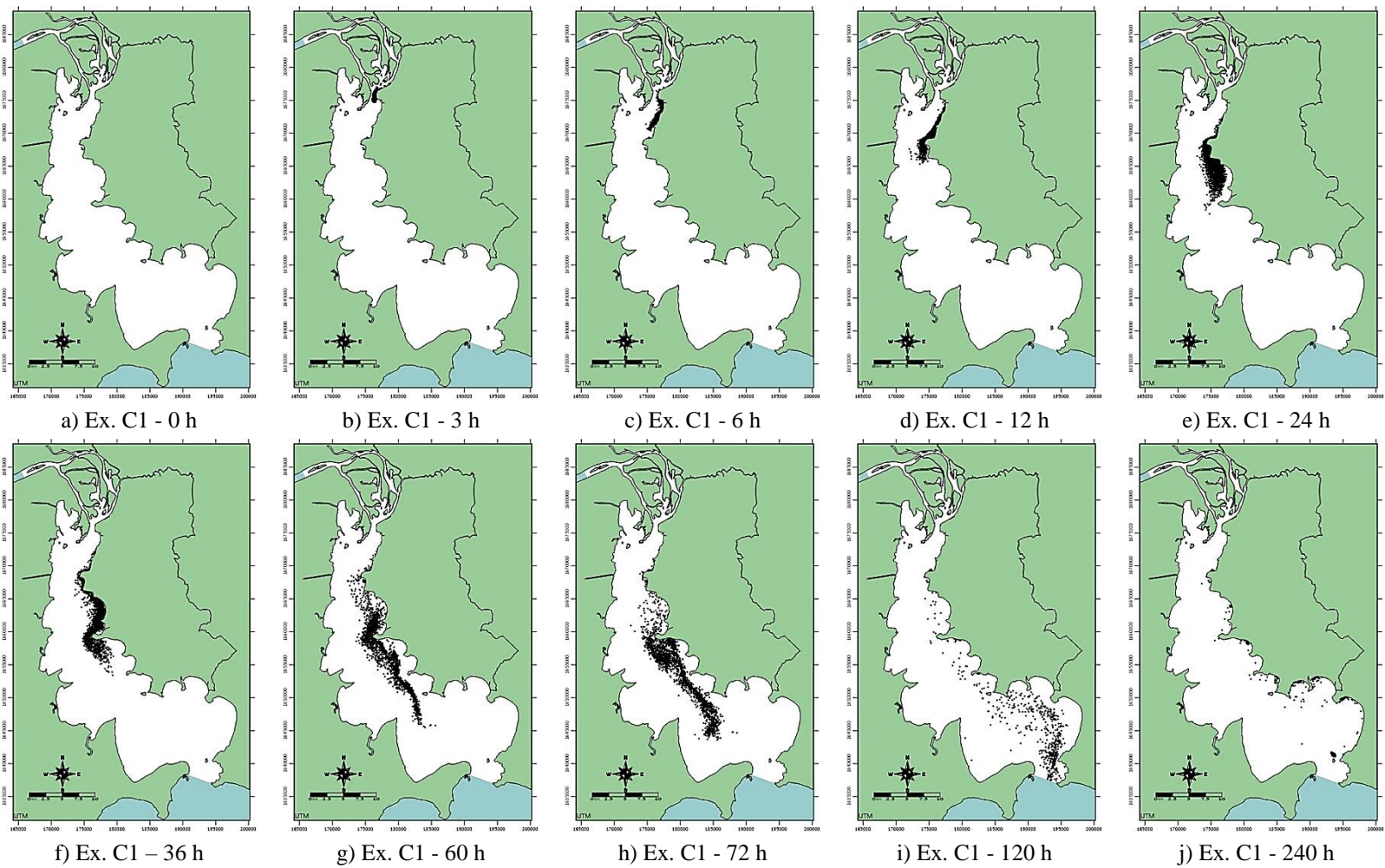


Figura 41 – Evolução da passagem da mancha entre a ocorrência do derramamento (instante 0 h) e o instante 240 h para o cenário de cheia (Ex. C1) obtido na primeira série de simulações de dispersão realizadas.



É interessante destacar que, para o cenário de estiagem, nas primeiras 6 horas (Figura 39c) a mancha ainda estava contida à região do Porto de Porto Alegre, tendo se deslocado na direção do Cais Mauá (Figura 7). Em torno de 12 horas (Figura 39d) depois do derramamento, ela alcançou a Ponta do Gasômetro (ver Figura 9), seguindo pela margem leste do rio.

A partir de 36 horas (Figura 39f), entretanto, a mancha começou a se deslocar em direção à margem oeste, atingindo o município de Guaíba (ver Figura 10) cerca de 60 horas (Figura 39g) depois do incidente. Entre 72 e 240 horas (Figura 39h e Figura 39j, respectivamente) não foi observada evolução significativa na direção da Lagoa dos Patos, sendo possível ver, inclusive, algumas partículas se dispersando no sentido contrário.

A mancha referente ao cenário de vazão média, por sua vez, em 3 horas (Figura 40b) já está atingindo a Ponta do Gasômetro (ver Figura 9), e segue costeando a margem leste. A partir de 24 horas (Figura 40e) depois do incidente, ela se concentra no centro do rio, caracterizado por ser um canal no qual se observam maiores valores de velocidade, na altura da Ponta do Dionísio (ver Figura 9).

Com 60 horas (Figura 40g) é possível observar um espalhamento da mancha transversal ao escoamento, que pode estar associado com o represamento em função de variação nos níveis ou ventos vindos do Sul, além de um aumento na dispersão. Em torno de 120 horas (Figura 40i) depois do derramamento a mancha já está muito próxima de atingir Itapuã. Com 240 horas (Figura 40j), restam algumas partículas dispersas no centro do rio (algumas mais na direção da margem oeste e outras da margem leste).

Para o cenário de cheia, verifica-se que a mancha se desloca por grandes distâncias em pouco tempo, sendo observada a maior velocidade de deslocamento entre as três. Em 3 horas (Figura 41b) ela já passou pela Ponta do Gasômetro, e se desloca costeando a margem leste até cerca de 36 horas (Figura 41f) depois do derramamento.

Nos instantes 60 (Figura 41g) e 72 horas (Figura 41h) é possível observar a mancha ocupando uma grande extensão longitudinal, também associada à dispersão de partículas, provavelmente em função da alta velocidade das correntes. Ela atinge Itapuã em algum momento entre 72 h e 120 h (Figura 41h e Figura 41i, respectivamente).

As principais considerações que são feitas com base nos exemplos observados, é que após passar da Ponta do Gasômetro (ver Figura 9) as manchas inicialmente se deslocam pela margem leste do rio. O comportamento de deslocamento em direção à margem oeste para a mancha do cenário de estiagem foi bastante diferente dos exemplos para os outros dois cenários hidrodinâmicos, que se deslocaram em direção à Lagoa dos Patos (a mancha do cenário de cheia mais rápido do que a do cenário de vazão média).

Conforme mencionado na caracterização física do Rio Guaíba (ver item 5.1.2), é possível que a diferença observada para estiagem seja explicada pelo fato da influência do vento ser mais considerável durante os períodos de menor vazão, enquanto para as maiores vazões predomina a influência as velocidades das correntes. Além disso, também foi possível observar a influência dos ventos para o cenário de vazão média (espalhamento transversal) e das correntes (espalhamento longitudinal) para o cenário de cheia.

6.2.2 Comparação dos exemplos determinísticos do SisBaHiA para a primeira série de simulações (Ex. A1, Ex. B1 e Ex. C1) com flutuadores do GUAÍBA (GA, GB, GC) considerando cenário hidrodinâmico equivalente

Para os mesmos exemplos determinísticos apresentados no item anterior foi realizada a comparação dos resultados obtidos pelo SisBaHiA para a primeira série de simulações de dispersão (Figura 39 – Ex. A1, Figura 40 – Ex. B1 e Figura 41 – Ex. C1), com os flutuadores do GUAÍBA (GA, GB, e GC), considerando o cenário hidrodinâmico equivalente (estiagem, média e cheia, respectivamente).

Foi adotado o mesmo instante inicial de derramamento. Ainda, procurou-se imitar o comportamento da mancha dos exemplos equivalentes no SisBaHiA em alguns pontos estratégicos, uma vez que o GUAÍBA não considera a reflexão das partículas que atingem as margens, sendo esta a forma encontrada de poder avaliar os resultados de ambos os *softwares*. As imagens estão orientadas para o Norte.

A evolução dos flutuadores para cenário de estiagem é indicada na Figura 42 para alguns instantes de interesse. Destaca-se que eles deveriam atingir o ponto 2 com 3 h, o ponto 3 com 6 h, o ponto 4 com 12 h, o ponto 5 com 24 h, o ponto 6 com 48 h e o ponto 7 com 72 h (em ordem crescente em direção à Lagoa dos Patos). É possível observar que

saindo da Ponta do Gasômetro (ver Figura 9), eles também se deslocam mais pela margem direita, porém sempre com uma velocidade menor do que a do exemplo do SisBaHiA (aqui se destaca que a velocidade é representada em função dos pontos inseridos, considerando o mesmo intervalo de tempo).

Com 48 horas (Figura 42b) é possível ver que os flutuadores começam a fazer uma curva, mas na Figura 43, que mostra a comparação com o SisBaHiA para os instantes finais, é possível ver que eles não chegam a atingir a margem oeste, seguindo na direção da Lagoa dos Patos, num comportamento diferente do observado no exemplo determinístico. Ainda, neste cenário principalmente (Figura 43c e Figura 43d), mas também no de vazão média (Figura 45c e Figura 45d), são observados alguns “redemoinhos, que representam momentos em que os flutuadores mudaram de direção, o que é bastante interessante para a análise da dinâmica do escoamento.

Figura 42 – Evolução dos flutuadores do GUAÍBA para o cenário de estiagem (GA) nos instantes 6 h, 12 h, 36 h e 48 h.



a) GA – 6 h

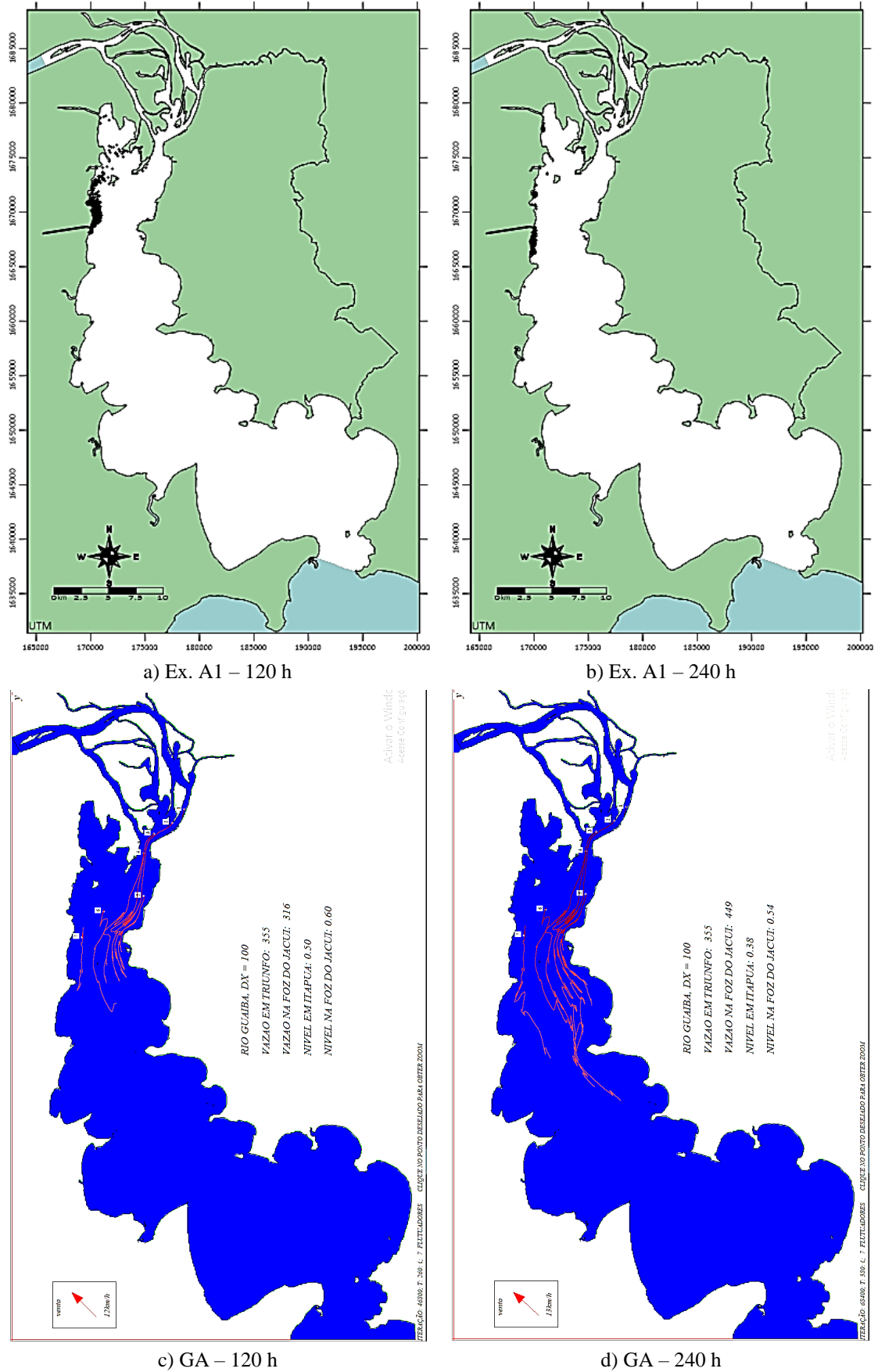
b) GA – 12 h



c) GA – 36 h

d) GA – 48 h

Figura 43 – Comparação entre o exemplo determinístico do SisBaHiA (Ex. A1) e os flutuadores do GUAÍBA (GA) para o cenário de estiagem nos instantes 120 h e 240 h.



Para o cenário de vazão média, os flutuadores deveriam atingir o ponto 2 com 3 h de simulação, o ponto 3 com 6 h, o ponto 4 com 12 h (em ordem crescente em direção à Lagoa dos Patos), e os pontos 5, 6 e 7 com 24 h (são os últimos na sequência e representam o mesmo instante), estando sua evolução indicada na Figura 44.

Assim como para o cenário anterior, as velocidades de deslocamento também são menores no GUAÍBA, entretanto, conforme fica mais claro na Figura 45 de comparação direta com o SisBaHiA, é possível ver uma tendência semelhante de escoamento pelo centro do rio. Ainda, é possível observar nesta mesma figura que o ponto atingido pela mancha do SisBaHiA com 120 horas (Figura 45a) só é atingido pelos flutuadores do GUAÍBA com cerca de 240 horas (Figura 45d).

Para o cenário de cheia, os flutuadores deveriam alcançar (em ordem crescente na direção à Lagoa dos Patos) o ponto 2 com 3 h, o ponto 3 com 6 h, o ponto 4 com 12 h e o ponto 5 com 24 h. A sua evolução inicial é indicada na Figura 46, e na Figura 47 é feita a comparação com instantes finais do SisBaHiA.

Com 72 horas (Figura 47c) os flutuadores do GUAÍBA estão próximos de atingir a Ponta do Arado (ver Figura 9), enquanto a mancha do SisBaHiA passou por este ponto em torno de 60 horas (ver Figura 41g). Cerca de 120 horas depois do instante inicial (Figura 47d), os flutuadores estão quase atingindo Itapuã. Percebe-se que as diferenças na velocidade representada pelo deslocamento são menores para este cenário.

Figura 44 – Evolução dos flutuadores do GUAÍBA (GB) para o cenário de média nos instantes 3 h, 6 h, 12 h e 24 h.



a) GB – 3 h

b) GB – 6 h



c) GB – 12 h

d) GB – 24 h

Figura 45 – Comparação entre o exemplo determinístico do SisBaHiA (Ex. B1) e os flutuadores do GUAÍBA (GB) para o cenário de média nos instantes 120 h e 240 h.

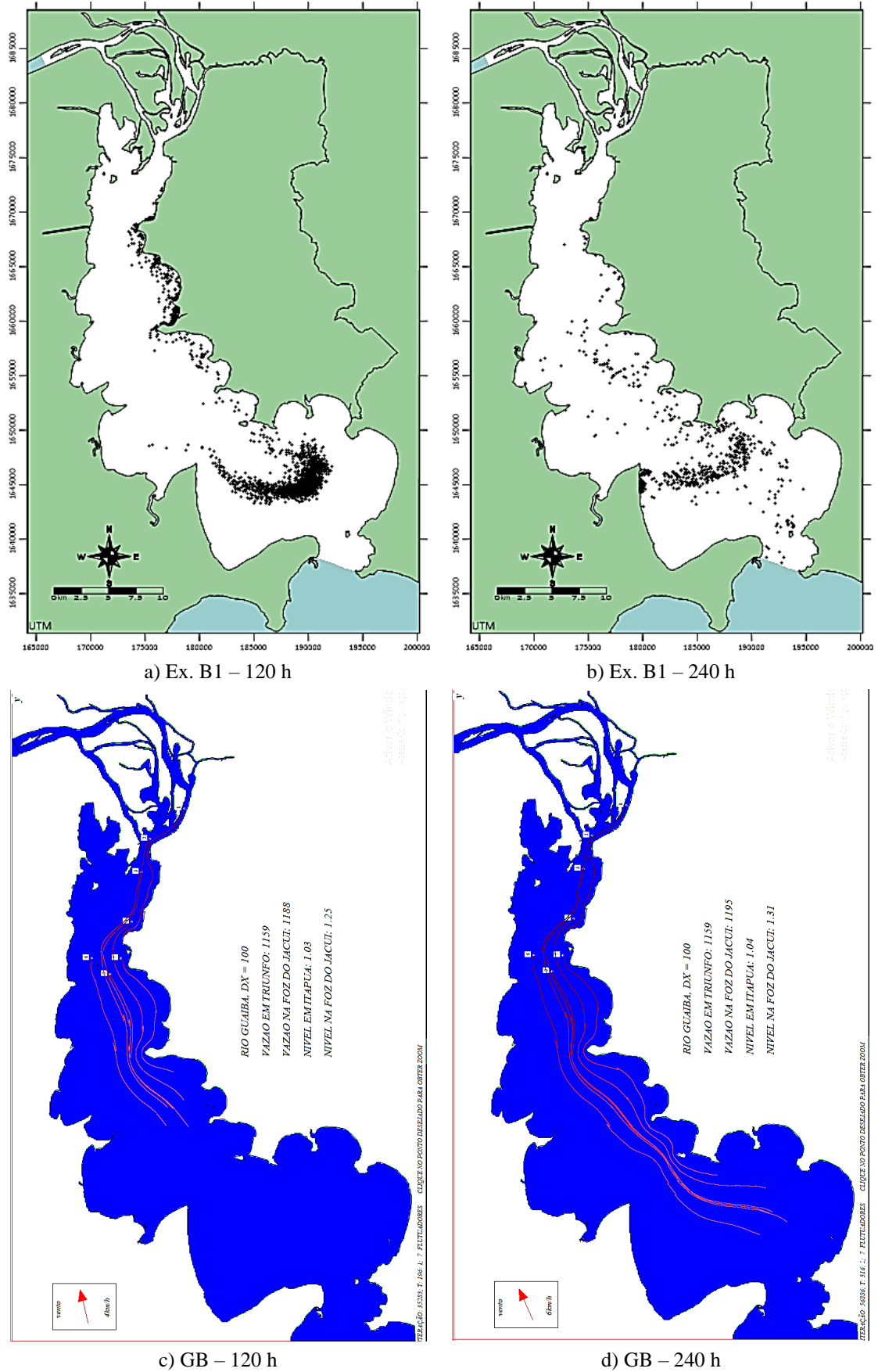


Figura 46 – Evolução dos flutuadores do GUAÍBA para o cenário de cheia nos instantes 3 h, 6 h, 12 h e 24 h.



a) GC – 3 h

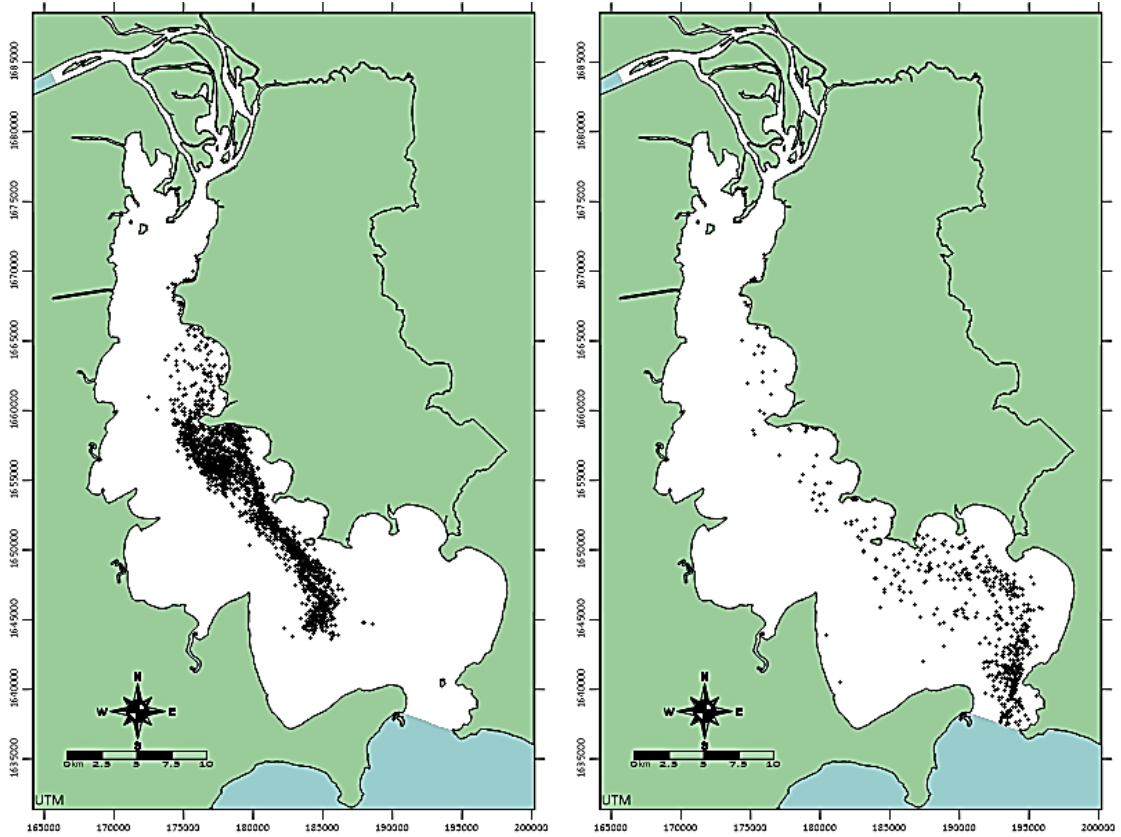
b) GC – 6 h



c) GC – 12 h

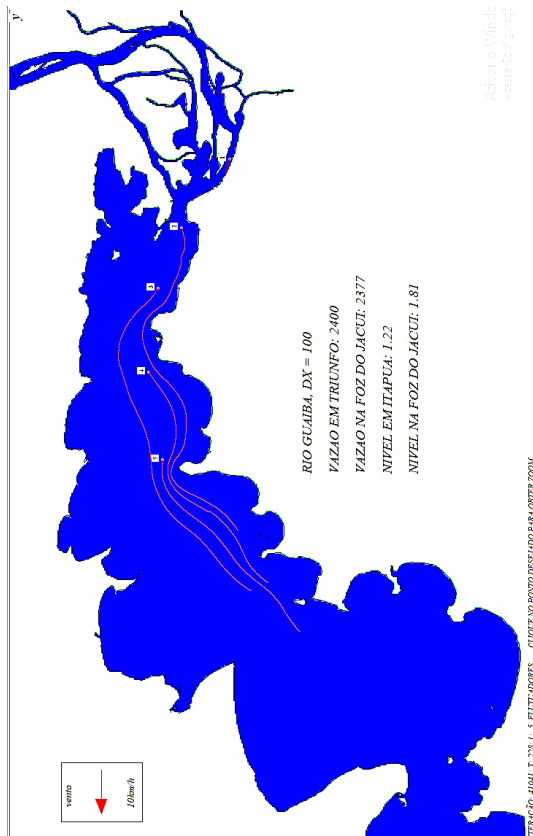
d) GC – 24 h

Figura 47 – Comparação entre o exemplo determinístico do SisBaHiA e os flutuadores do GUAÍBA para o cenário de cheia nos instantes 72 h e 120 h.

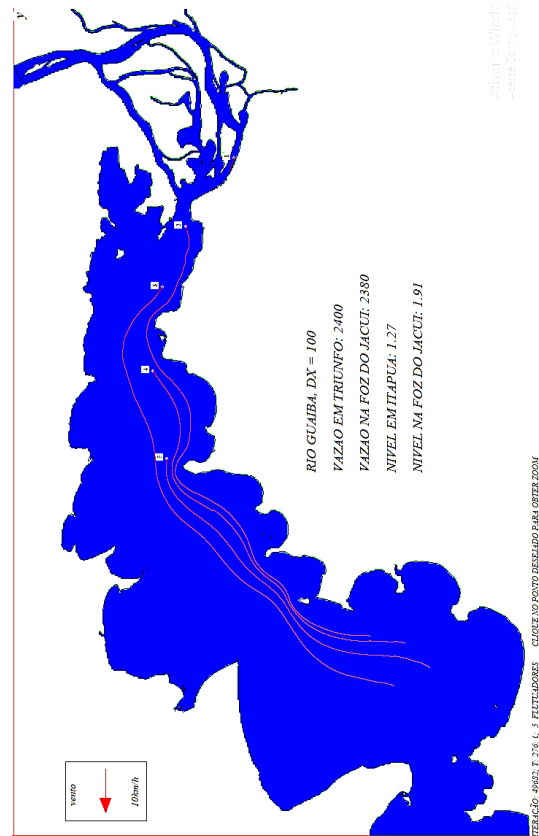


a) Ex. C1 – 72 h

b) Ex. C1 – 120 h



c) GC – 72 h



d) GC – 120 h

No geral o fato de os flutuadores do GUAÍBA demorarem mais para atingir os mesmos pontos que as manchas de exemplos equivalentes do SisBaHiA já era esperado, uma vez que o primeiro considera a velocidade média na vertical, enquanto o outro faz o cálculo considerando a velocidade superficial (até 0,1 m de profundidade). A similaridade observada para o cenário de cheia provavelmente é um indicativo da influência das correntes em relação ao vento para vazões maiores, conforme destacado no item 5.1.2, de caracterização física do Rio Guaíba.

Ainda, a presença de redemoinhos nas simulações de estiagem e cheia também pode estar relacionada com a influência do vento, sendo maior para o cenário de menor vazão. É importante ressaltar que, enquanto o SisBaHiA utiliza uma nuvem de partículas, no *software* GUAÍBA cada flutuador representa uma partícula individual. Destaca-se, ainda, que o objetivo desta comparação foi de validar os resultados obtidos pelo SisBaHiA, que é mais adequado para representar a dispersão de óleo, em função das suas características apresentadas anteriormente.

6.2.3 Análise probabilística das simulações de dispersão de óleo para as três séries de simulações

A abordagem determinística, apesar de fornecer uma ideia inicial da evolução da dispersão da mancha de óleo, foi feita com base em um derramamento específico. Para uma análise mais aprofundada de tempo de resposta e previsão do comportamento de um derramamento acidental, é importante considerar as inúmeras possibilidades em termos de instante e condições iniciais em que ele ocorre (assim como está sujeito ao longo do seu deslocamento), o que é feito a partir da abordagem probabilística.

Assim, serão feitas considerações a respeito do comportamento geral da primeira série de simulações realizadas (período de elevação gradual dos níveis do Rio Guaíba, A1, B1 e C1 – ver Tabela 10). Em seguida serão expostas as comparações tanto entre os três cenários hidrodinâmicos da primeira série (respectivamente, estiagem, média e cheia), quanto entre cenários equivalentes das outras duas séries de simulações realizadas (considerando um período de diminuição gradual dos níveis, A2, B2 e C2, e utilização de coeficiente de absorção, A3, B3 e C3).

6.2.3.1 Comportamento geral da dispersão de óleo para um período de elevação gradual dos níveis do Rio Guaíba – Primeira série de simulações (A1, B1 e C1)

A evolução da passagem das manchas ao longo do tempo, representada pelos mapas de probabilidade na forma de isolinhas para os instantes de análise selecionados, é apresentada na Figura 48, na Figura 49 e na Figura 50 para a primeira série de simulações realizadas, considerando um cenário de vazão de estiagem, média e cheia, em um período de elevação gradual dos níveis do Rio Guaíba. (A1, B1 e C1, respectivamente – ver Tabela 10).

Figura 48 – Evolução probabilística da passagem da mancha para a simulação A1 (cenário hidrodinâmico de estiagem e elevação de nível do Rio Guaíba).

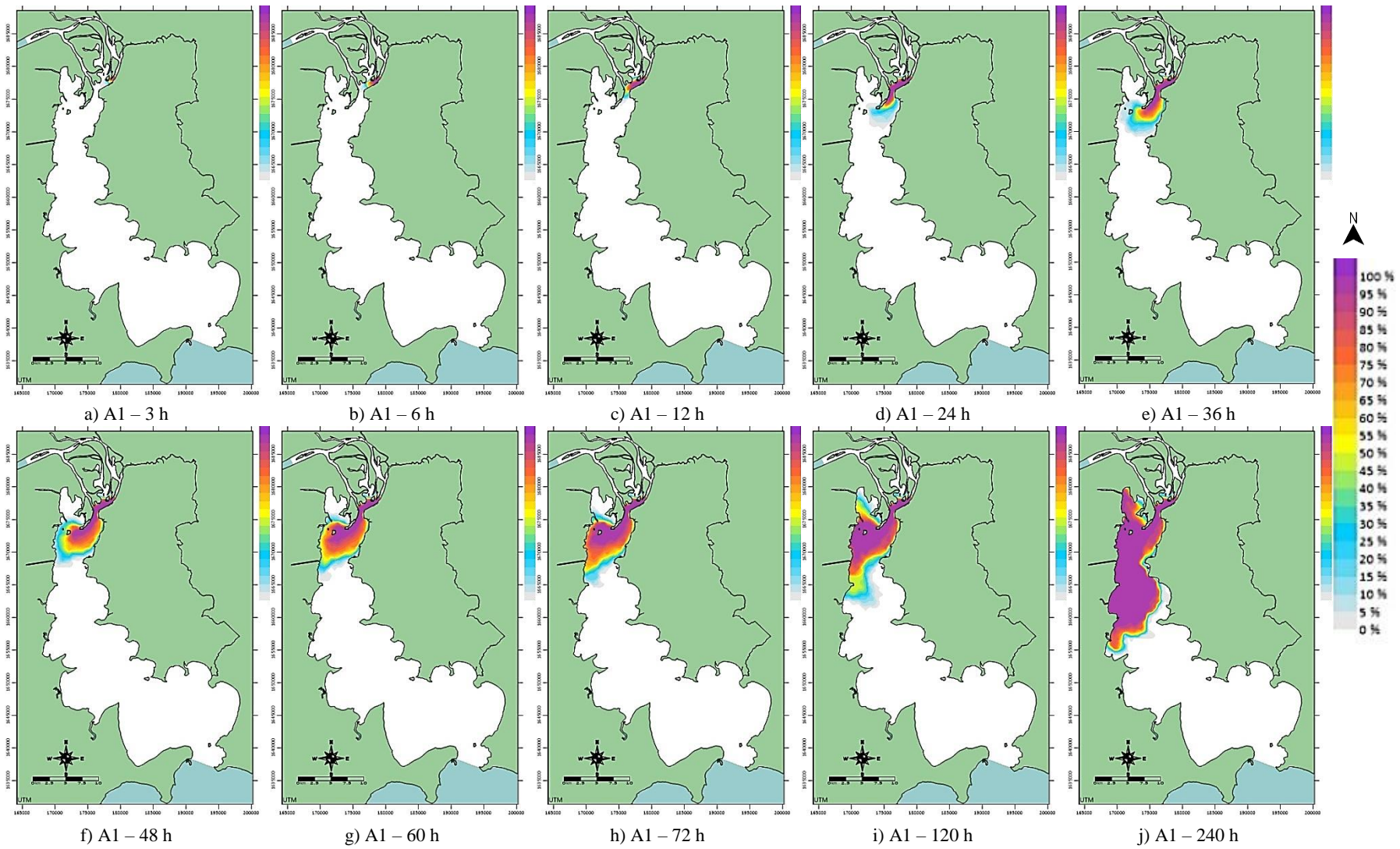


Figura 49 – Evolução probabilística da passagem da mancha para a simulação B1 (cenário hidrodinâmico de média e elevação de nível do Rio Guaíba).

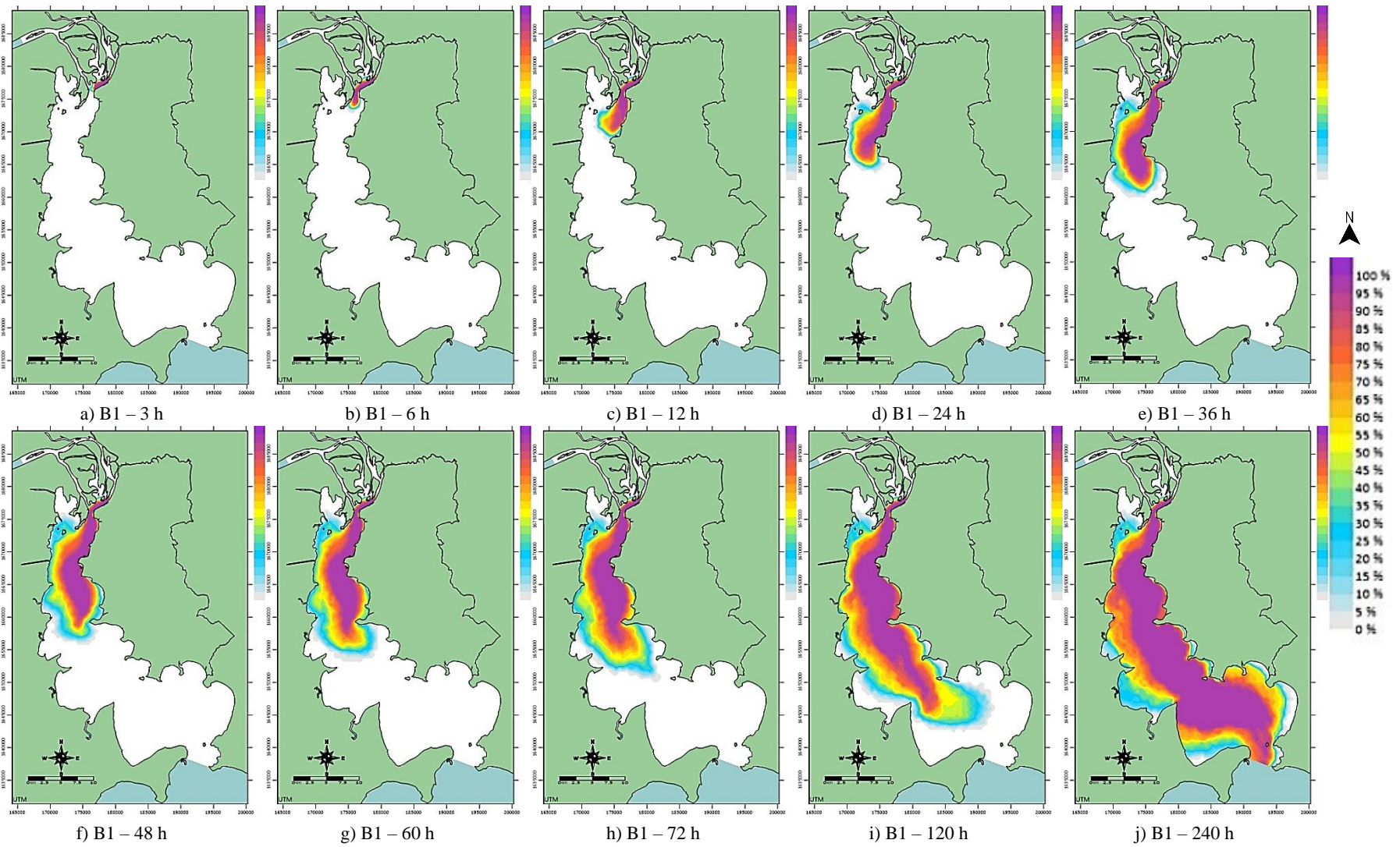
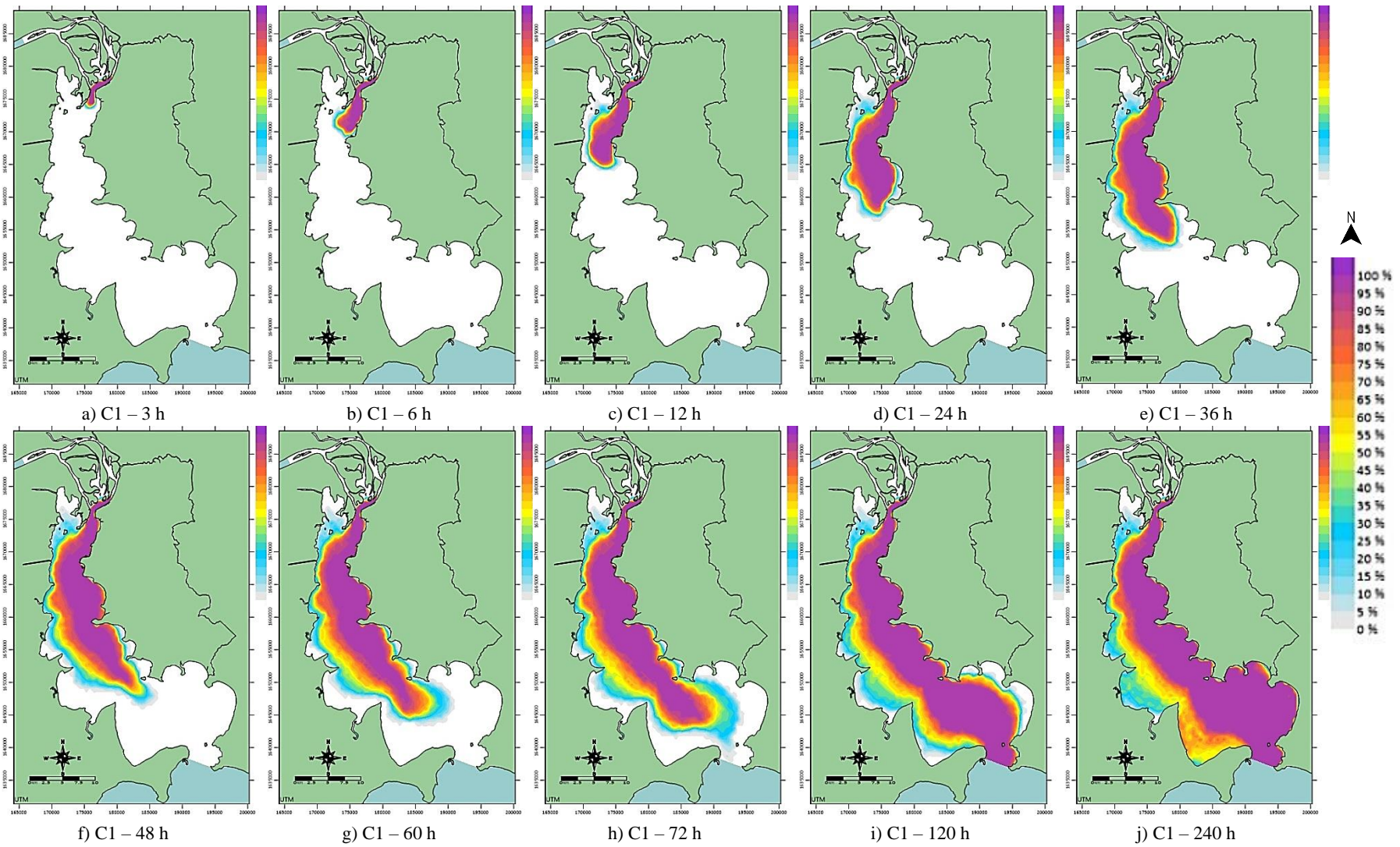


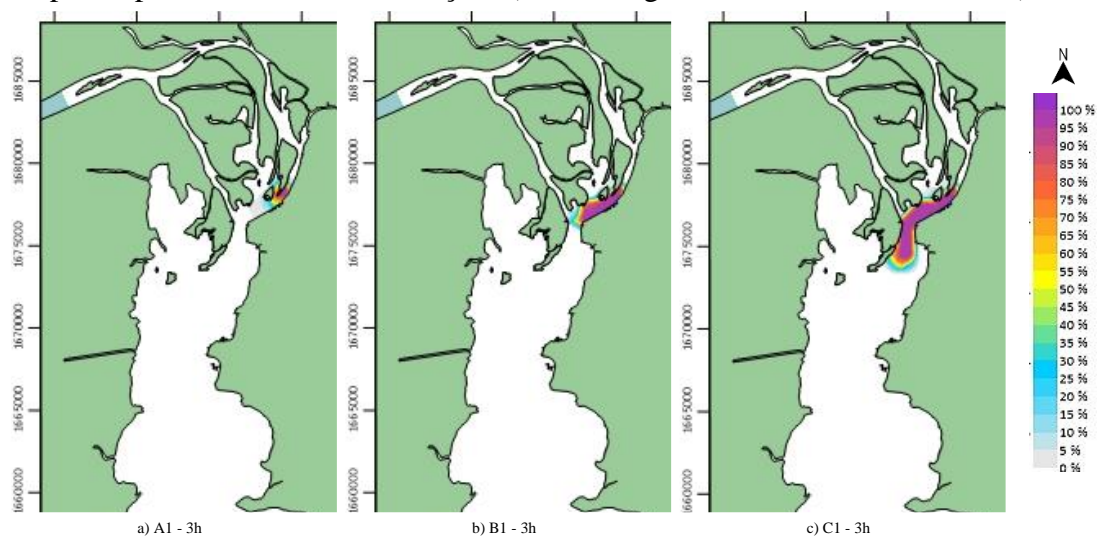
Figura 50 – Evolução probabilística da passagem da mancha para a simulação C1 (cenário hidrodinâmico de cheia e elevação de nível do Rio Guaíba).



Já foram destacados alguns pontos a respeito do deslocamento das manchas de óleo no item 6.2.1, referente aos exemplos determinísticos analisados. Desde modo, serão apresentados a seguir, na forma de comparação entre as simulações para os três cenários hidrodinâmicos, os mapas de probabilidade de passagem para os instantes 3 h (Figura 51), 6 h (Figura 52), 12 h (Figura 53), 24 h (Figura 54), 36 h (Figura 55), 48 h (Figura 56), 60 h (Figura 57), 72 h (Figura 58), 120 h (Figura 59) e 240 h (Figura 60) depois do derramamento.

Algumas imagens foram aproximadas para facilitar a visualização, se perdendo a escala do mapa. Entretanto foi sempre mantida a proporção, de modo a não comprometer a comparação. Ainda, ressalta-se que considerações sobre o deslocamento da mancha em direção à Lagoa dos Patos serão feitas principalmente considerando isolinha de 100% de probabilidade, sendo as outras mais utilizadas para avaliar os momentos em que a mancha atingiu as margens.

Figura 51 – Probabilidade de passagem da mancha 3 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).



Nas primeiras 3 horas, para um cenário de estiagem (Figura 51a), a maior probabilidade é que a mancha esteja contida à região do Porto. Entretanto para um cenário de vazão média (Figura 51b), ela já teria se deslocado pela margem leste até o início Ponta do Gasômetro (ver Figura 9), e para vazão mais alta (Figura 51c) teria ido ainda além.

É importante lembrar que neste estreitamento são observados os maiores valores de velocidade no Guaíba, conforme indicado no item 5.1.2 de caracterização do rio e corroborado pelos resultados das simulações hidrodinâmicas (item 6.1). Deste modo, ele

acaba sendo relevante tanto para o estudo hidrodinâmico, quanto para o de dispersão de contaminantes.

Figura 52 – Probabilidade de passagem da mancha 6 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).

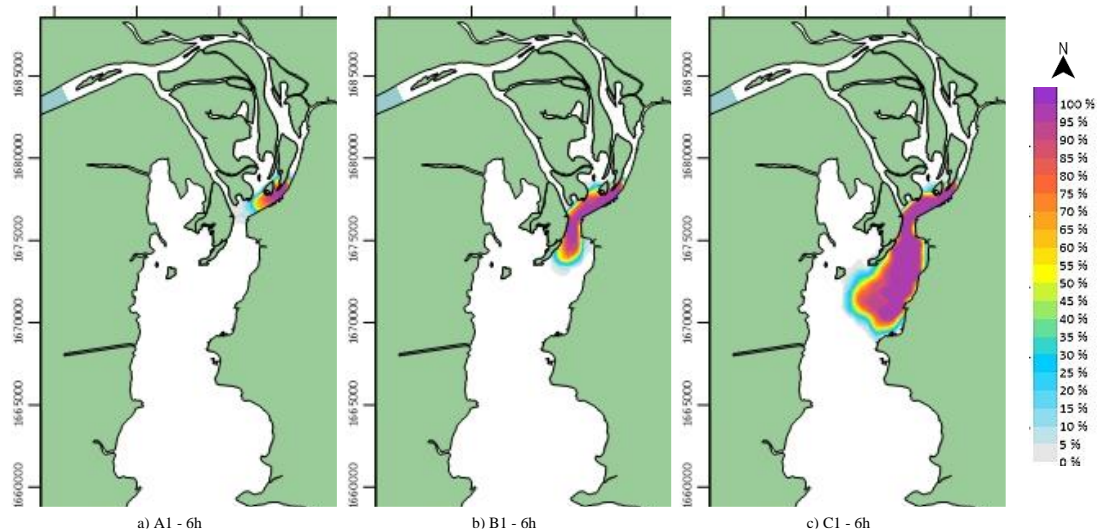
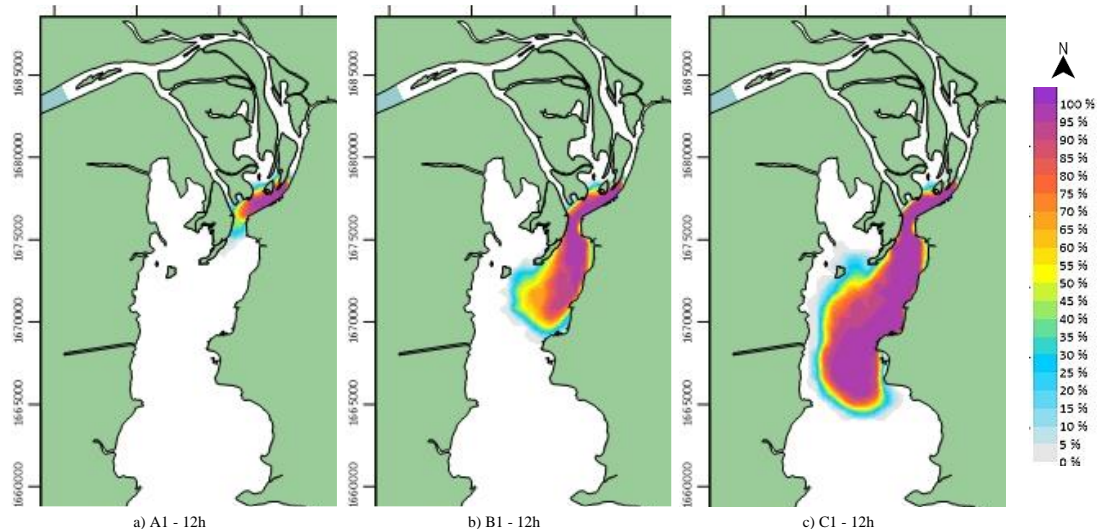


Figura 53 – Probabilidade de passagem da mancha 12 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).



Passadas 6 horas, para o cenário de cheia (Figura 52c), a mancha já estaria chegando próximo da Ponta do Dionísio (ver Figura 9). Destaca-se uma probabilidade de pelo menos 20% em alguns pontos, e de cerca de 60% em outros dela atingir a margem leste do rio. Seguindo um comportamento semelhante, a mancha referente ao cenário de vazão média atingiria o mesmo ponto por volta de 12 horas depois do derramamento (Figura 53b). Neste tempo, a mancha do cenário de estiagem (Figura 53a) estaria

chegando na Ponta do Gasômetro (ver Figura 9). Ainda, a mancha de vazão alta apresenta probabilidade de 100% de atingir a margem leste (Figura 53c).

Figura 54 – Probabilidade de passagem da mancha 24 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).

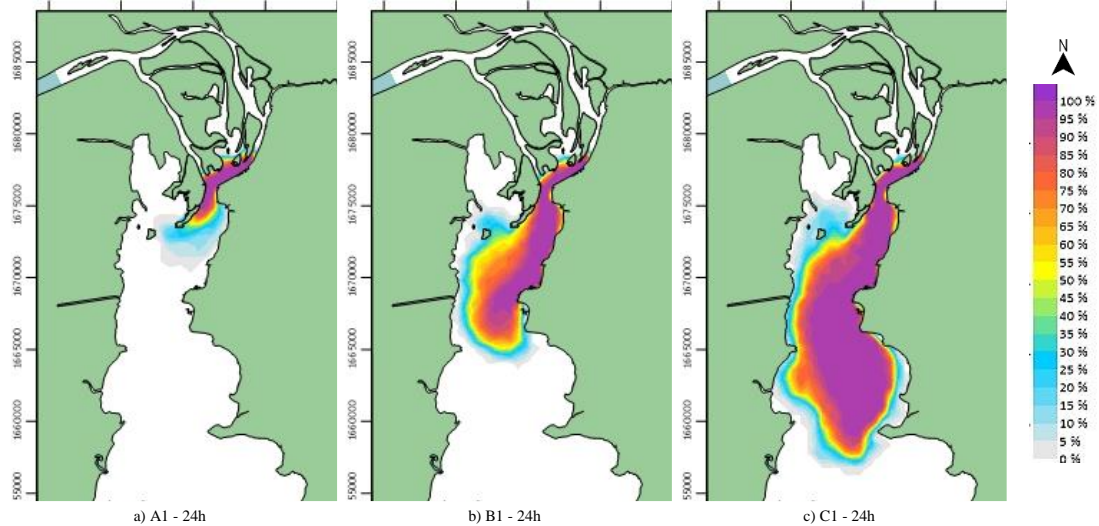
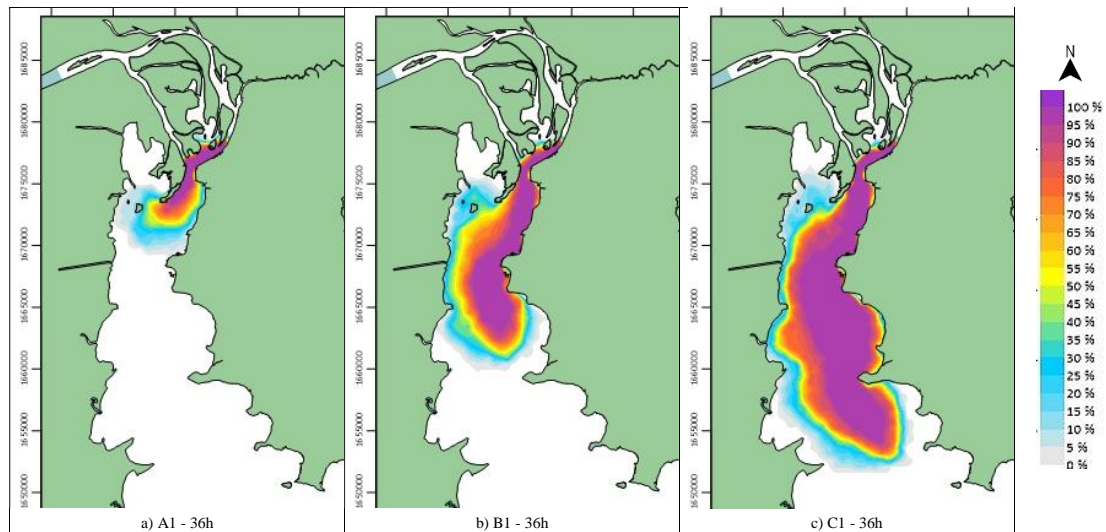


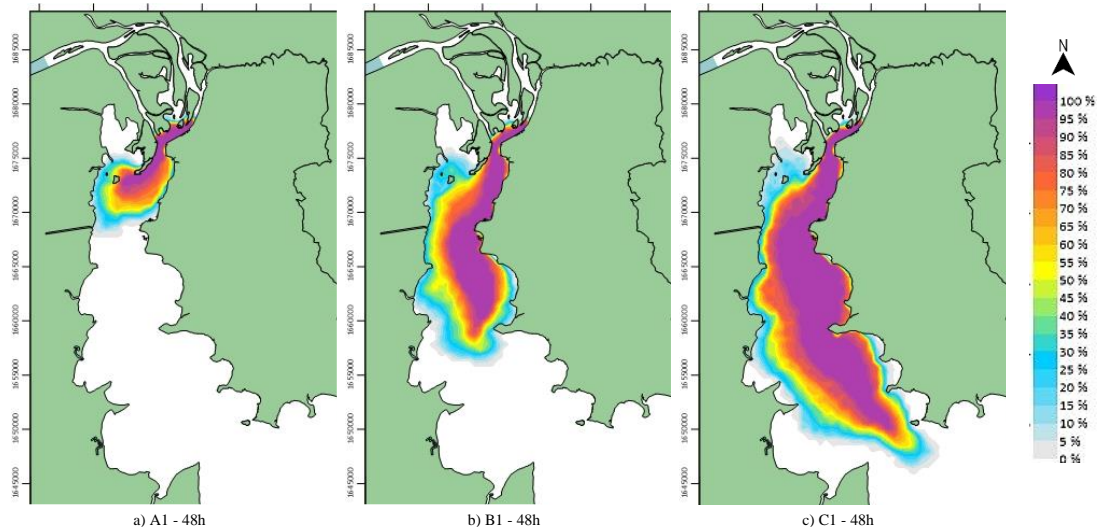
Figura 55 – Probabilidade de passagem da mancha 36 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).



Passadas 24 horas do derramamento, existe uma probabilidade de cerca de 25% da mancha para o cenário de cheia (Figura 54c) atingir a margem oeste (mais próximo do município de Guaíba – ver Figura 10), e a mancha de vazão média (Figura 54b) já atingiu a margem leste. Por volta de 36 horas depois do derramamento, já é possível perceber para as simulações de dispersão durante a estiagem (Figura 55a), uma tendência de deslocamento da mancha diferente dos outros dois cenários, apesar de possuir uma chance de 25% de atingir a margem direita. A mancha do cenário de média (Figura 55b) ainda

não atingiu a Ponta Grossa (ver Figura 9) e a de cheia (Figura 55c) está próxima de atingir a Ponta do Arado (ver Figura 9).

Figura 56 – Probabilidade de passagem da mancha 48 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).



Já as chances de 25% de atingir a margem oeste são observadas para os cenários de vazão média (tanto na direção do município de Eldorado do Sul, quanto de Guaíba – ver Figura 10) e de estiagem (mais na direção de Eldorado do Sul) no instante 48 h (Figura 56b e Figura 56a, respectivamente). Em relação ao deslocamento em direção à Lagoa dos Patos, a mancha de vazão média (Figura 56b) já estaria ultrapassando a Ponta Grossa (ver Figura 9) e a de cheia (Figura 56c), a Ponta do Salgado (ver Figura 9).

Figura 57 – Probabilidade de passagem da mancha 60 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).

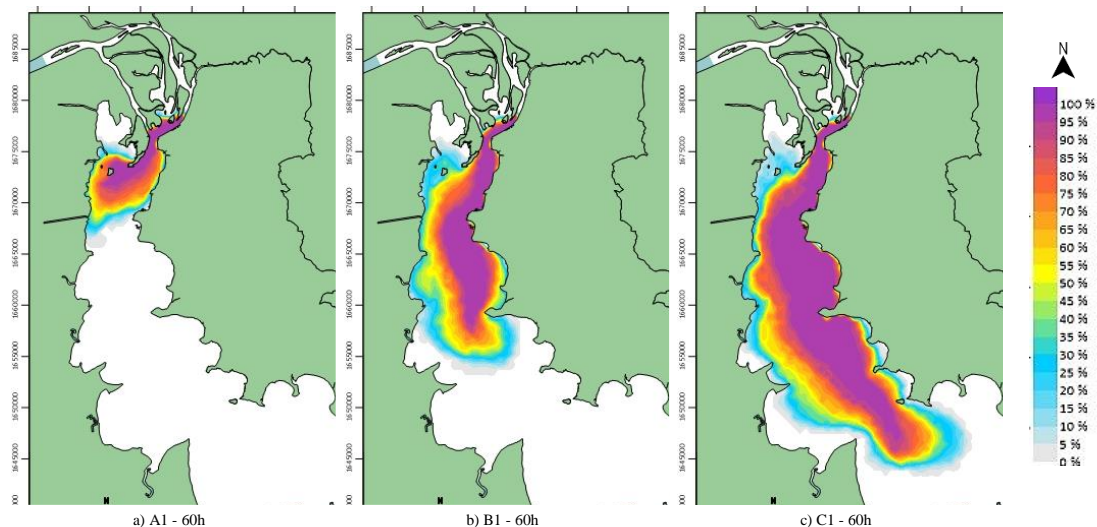


Figura 58 – Probabilidade de passagem da mancha 72 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).

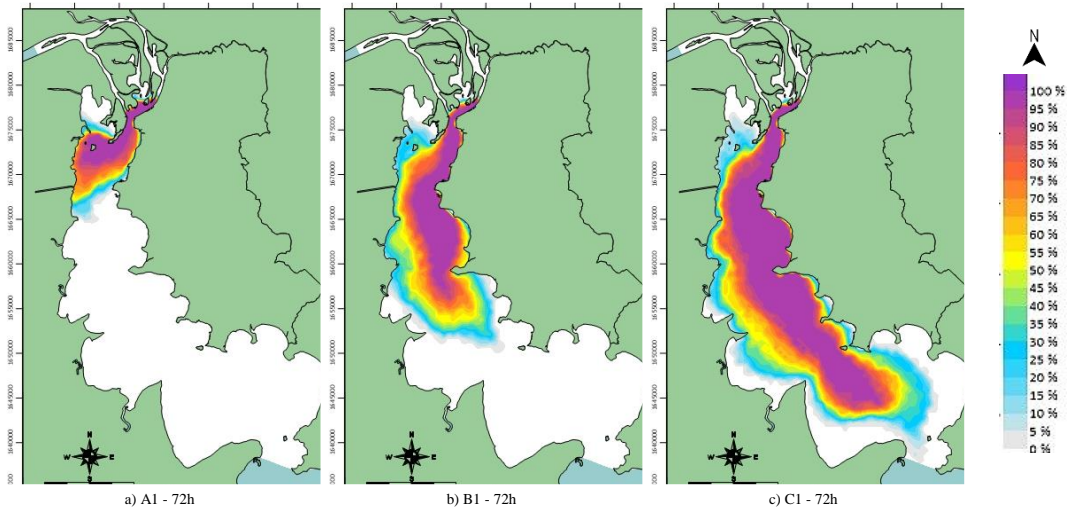


Figura 59 – Probabilidade de passagem da mancha 120 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).

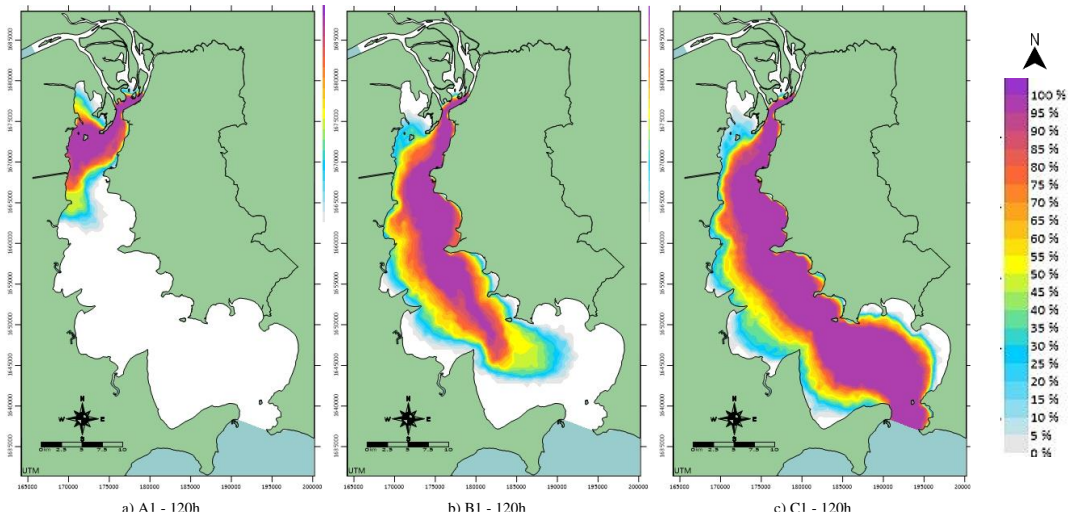
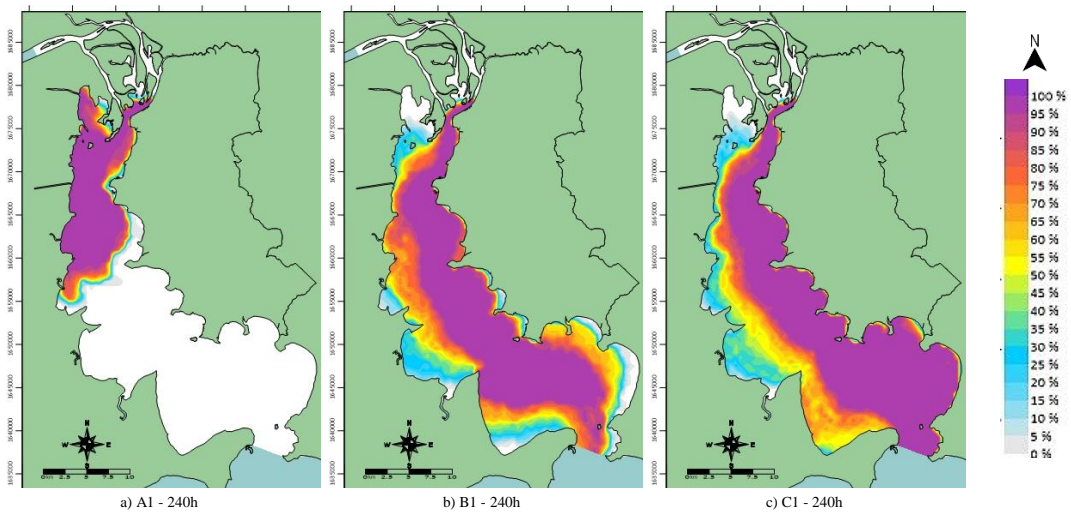


Figura 60 – Probabilidade de passagem da mancha 240 horas depois do derramamento para a primeira série de simulações (A1 - estiagem, B1 - média e C1 - cheia).



No 5º dia (120 horas) depois do derramamento, a mancha referente ao cenário de estiagem (Figura 59a) já teria atingido a margem oeste, no município de Guaíba (ver Figura 10), sendo 60% a probabilidade para 60 horas (Figura 57a) e 80% para 72 horas (Figura 58ª) depois do derramamento. Para o cenário de vazão mais alta (Figura 59c), ela teria entrado na Lagoa dos Patos, já se observando uma probabilidade baixa disso ocorrer (< 5%) no instante 72 horas (Figura 58c).

Já a mancha de vazão média (Figura 59b) estaria ultrapassando a Ponta do Salgado (ver Figura 9), deslocando-se mais pelo centro do rio, atingindo Itapuã por volta do 10º dia (240 horas – Figura 60b). Para o cenário de estiagem, entre 120 e 240 horas (Figura 59c e Figura 60c, respectivamente) a mancha teria avançado pela mesma margem, atingindo a Ponta da Ceroula (ver Figura 9)

No geral, para as simulações de vazão média existe uma tendência um pouco maior de se deslocar mais pelo centro, apesar apresentarem comportamento bastante semelhante às simulações de vazão de cheia (que foram mais costeando a margem leste). Ainda se destaca que, para o cenário de vazão média, em comparação ao de vazão alta, existe uma chance maior da mancha atingir a margem oeste (80 % ao invés de 25%). Para o cenário de estiagem, as diferenças observadas foram mais significativas, pois a mancha se deslocou totalmente em direção ao lado oeste.

O fato de a isolinha referente a probabilidade de passagem igual a 100% ocupar uma extensão tão grande dos mapas para os tempos maiores pode estar associada tanto aos diferentes caminhos que a mancha segue dependendo da condição inicial de derramamento, como também relação ao desprendimento de partículas da nuvem principal (observado nos exemplos determinísticos). Além disso, a consideração é feita independentemente da concentração, já que não foi arbitrado um valor mínimo (para analisar o caso mais desfavorável).

6.2.3.2 Simulações para um período de descida gradual dos níveis do Rio Guaíba – Segunda série de simulações (A2, B2, C2)

Durante a análise dos resultados hidrodinâmicos, percebeu-se que o período escolhido para os derramamentos da primeira série de simulações de dispersão de óleo, em uma tendência geral, estava associado a uma elevação dos níveis do Rio Guaíba, surgindo a possibilidade de que isto tivesse interferência direta nos resultados gerados.

Desde modo, optou-se por rodar uma segunda série de simulações para cada cenário de vazão, considerando um período de descida dos níveis do rio (ver Figura 32), a fim de determinar se seriam encontradas diferenças significativas entre os dois casos (ver Tabela 10). Os resultados serão apresentados na forma de comparação entre as simulações (A1 e A2, B1 e B2 e C1 e C2), considerando os intervalos entre 12 h - 48 h e 60 h – 240 h.

Para o cenário de estiagem (Figura 61 e Figura 62), observa-se um espalhamento maior das isolinhas de A1 (elevação dos níveis) em relação a A2 (descida dos níveis). No instante 24 horas, por exemplo, existe uma probabilidade, por mais que baixa (< 10%) de A1 atingir a margem leste (Figura 61b), não observada para A2 (Figura 61h); no instante 48 horas, a probabilidade de A1 (Figura 61d) atingir a margem oeste chega a quase 30%, enquanto para A2 (Figura 61h) as chances são de no máximo 10%.

No instante 60 horas depois do derramamento, a probabilidade de A1 (Figura 62a) atingir a margem oeste é de 60%, comparado com 30% de A2 (Figura 62e). No instante 120 horas observa-se uma probabilidade de 50% de A1 (Figura 62c) ter passado da Ponta da Figueira (ver Figura 9) que não é observada em A2 (Figura 62g). No instante 240 horas, a área ocupada pela isolinha de 100% de concentração é maior para A1 (Figura 62d) em comparação com A2 (Figura 62h). Destaca-se, porém, que apesar das diferenças, nas duas simulações a tendência foi a mesma (probabilidade de se concentrar na margem oeste).

Figura 61 – Comparação entre as simulações de estiagem para elevação (A1) e descida (A2) gradual dos níveis entre 12 h e 48 h.

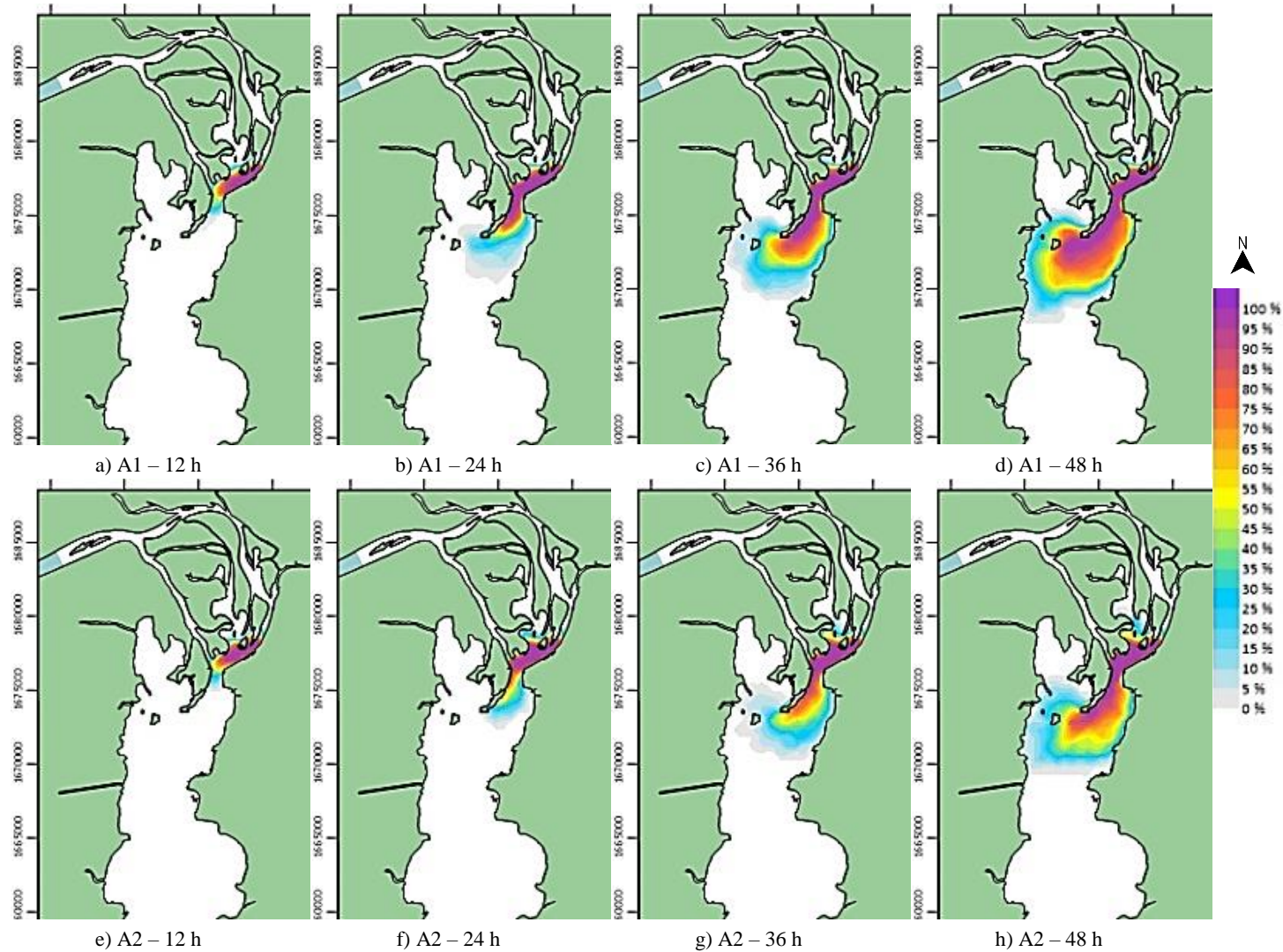
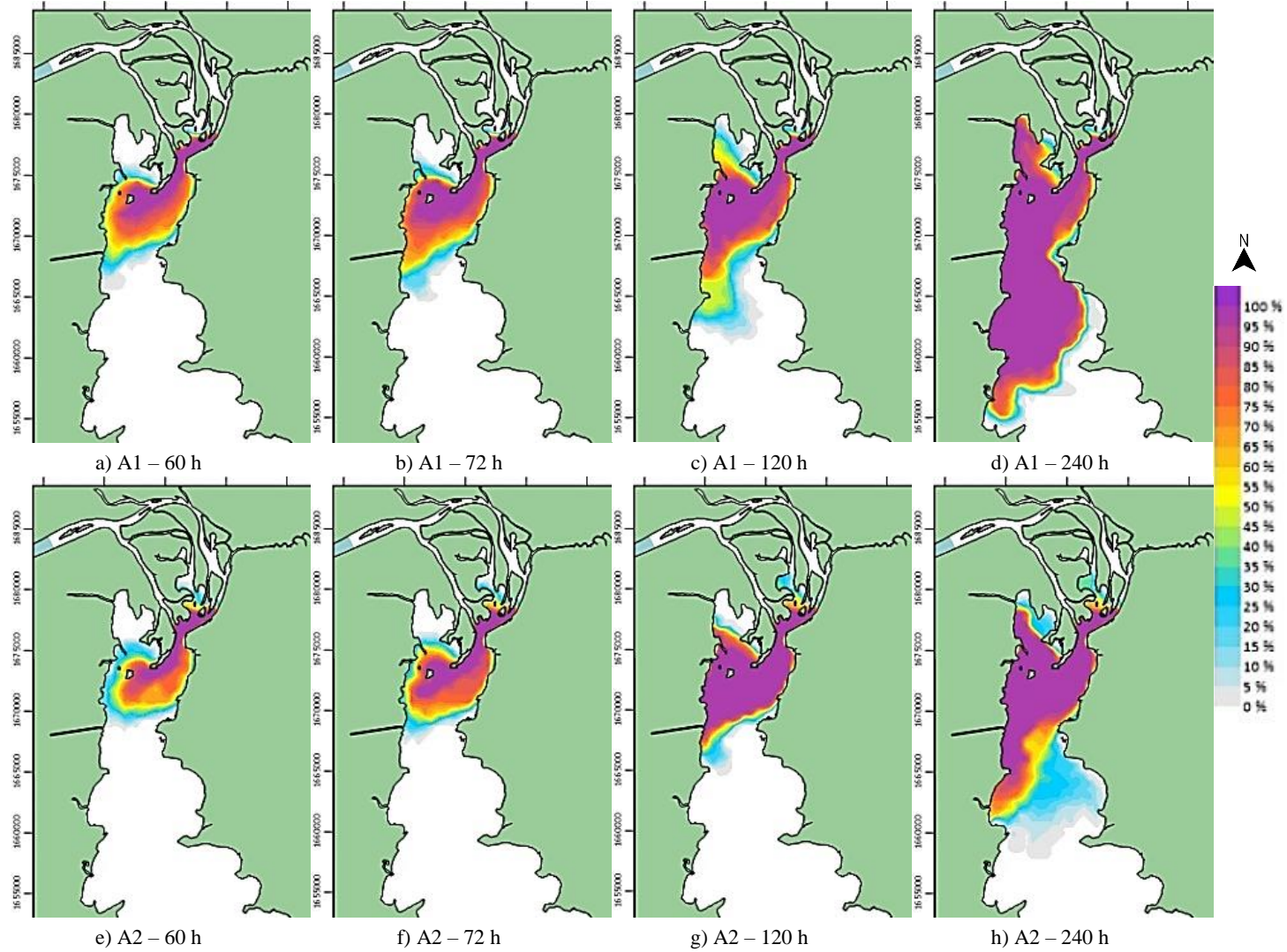


Figura 62 – Comparação entre as simulações de estiagem para elevação (A1) e descida (A2) gradual dos níveis entre 60 h e 240 h.



Para o cenário de vazão média (Figura 63 e Figura 64), as maiores probabilidades nos instantes iniciais estão mais na direção da margem leste para B1 (elevação), enquanto para B2 (descida) elas se dirigem mais para a margem oeste. Em 36 horas, por exemplo, existe uma probabilidade de pelo menos 75% em B2 (Figura 63h) de atingir a margem oeste (100% para 48 horas – Figura 63h), comparados com cerca de 25% da simulação B1 em ambos os instantes (Figura 63c e Figura 63d).

Já entre os instantes 60 e 120 horas, não são observadas diferenças tão significativas para a passagem da mancha, que se direciona pelo centro do canal, como já tinha sido destacado no item 6.2.1 para B1. As diferenças observadas entre C2 e C1 (Figura 65 e Figura 66) são bastante similares às descritas para B2 e B1, o que corrobora a análise do item anterior que considerou os comportamentos das manchas de B1 e C1 como sendo bastante semelhantes entre si, e indica que isto se repete entre B2 e C2.

Destaca-se, entretanto, que num contexto de definição de ações de resposta, a diferença de tendência de comportamento, principalmente para os instantes iniciais (B1 e C1 mais costeando a margem leste, e B2 e C2 com maior probabilidade de atingir a margem oeste), pode ser relevante. Já considerando o comportamento geral, as simulações para o cenário de estiagem (A1 e A2) diferiram menos entre elas. Por fim, ressalta-se a importância de conter o avanço da mancha o quanto antes no tempo, de modo a limitar as incertezas posteriores.

Figura 63 – Comparação entre as simulações de média para elevação (B1) e descida (B2) gradual dos níveis entre 12 h e 48 h.

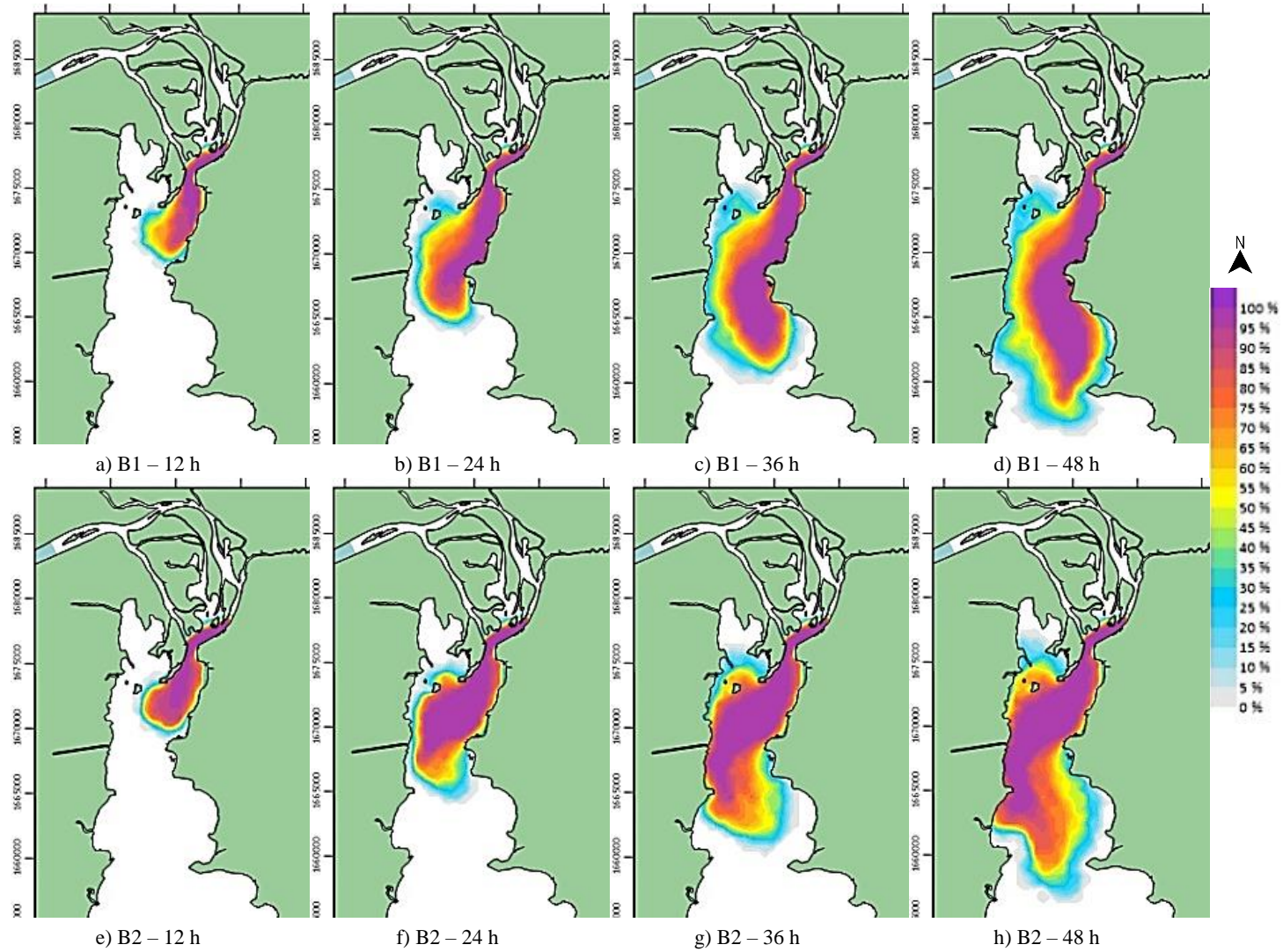


Figura 64 – Comparação entre as simulações de média para elevação (B1) e descida (B2) gradual dos níveis entre 60 h e 240 h.

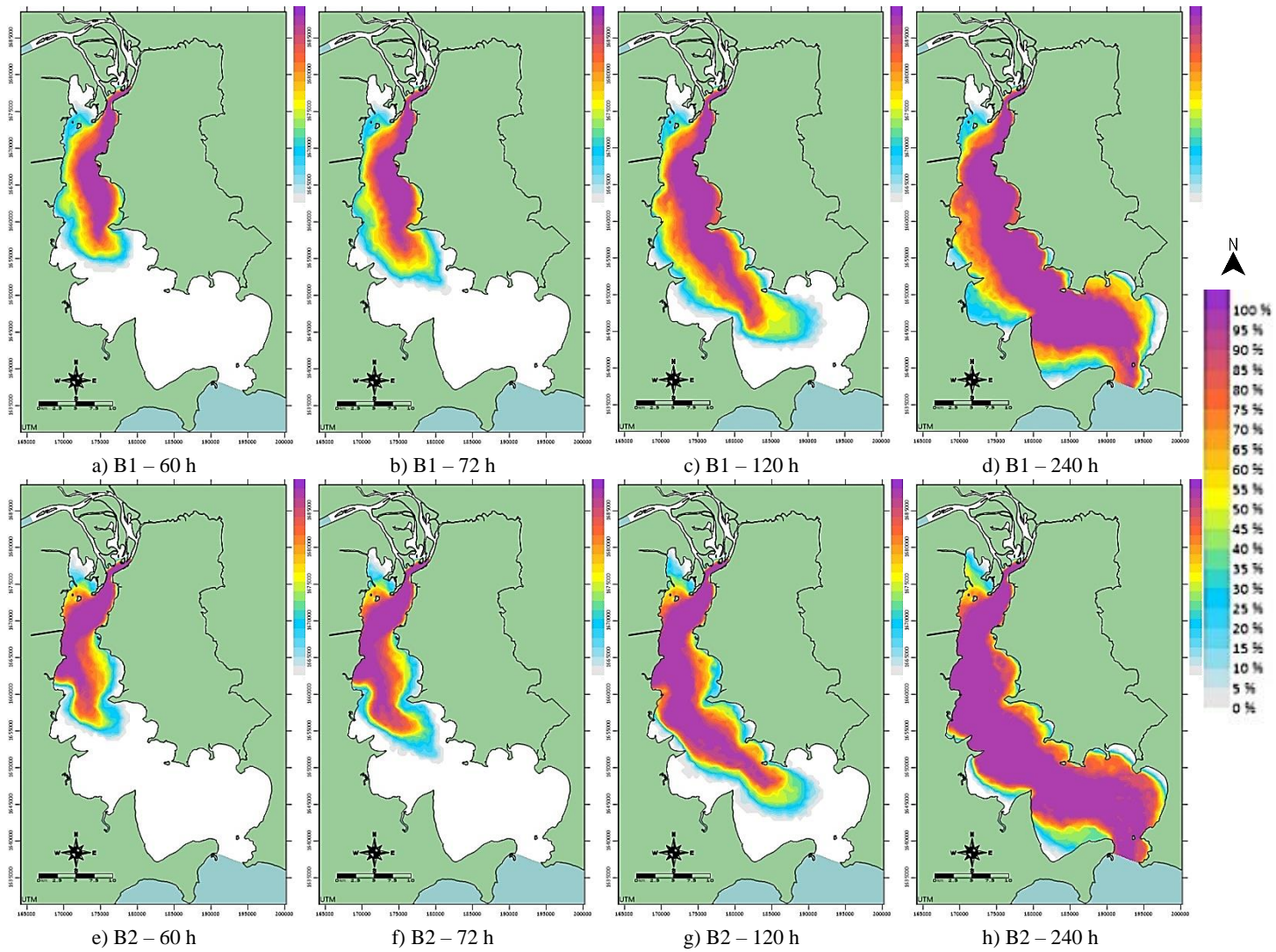


Figura 65 – Comparação entre as simulações de cheia para elevação (C1) e descida (C2) gradual dos níveis entre 12 h e 48 h.

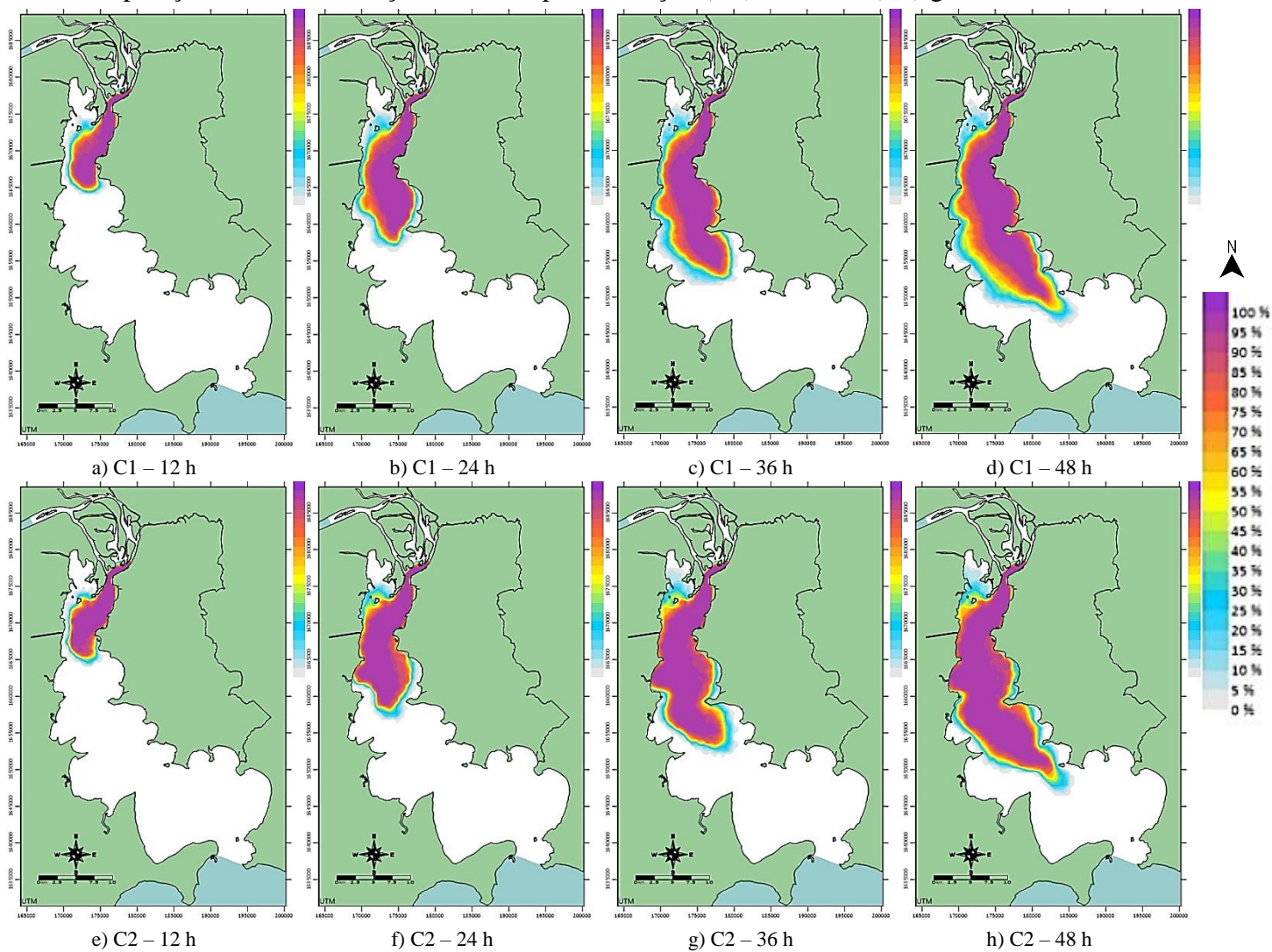
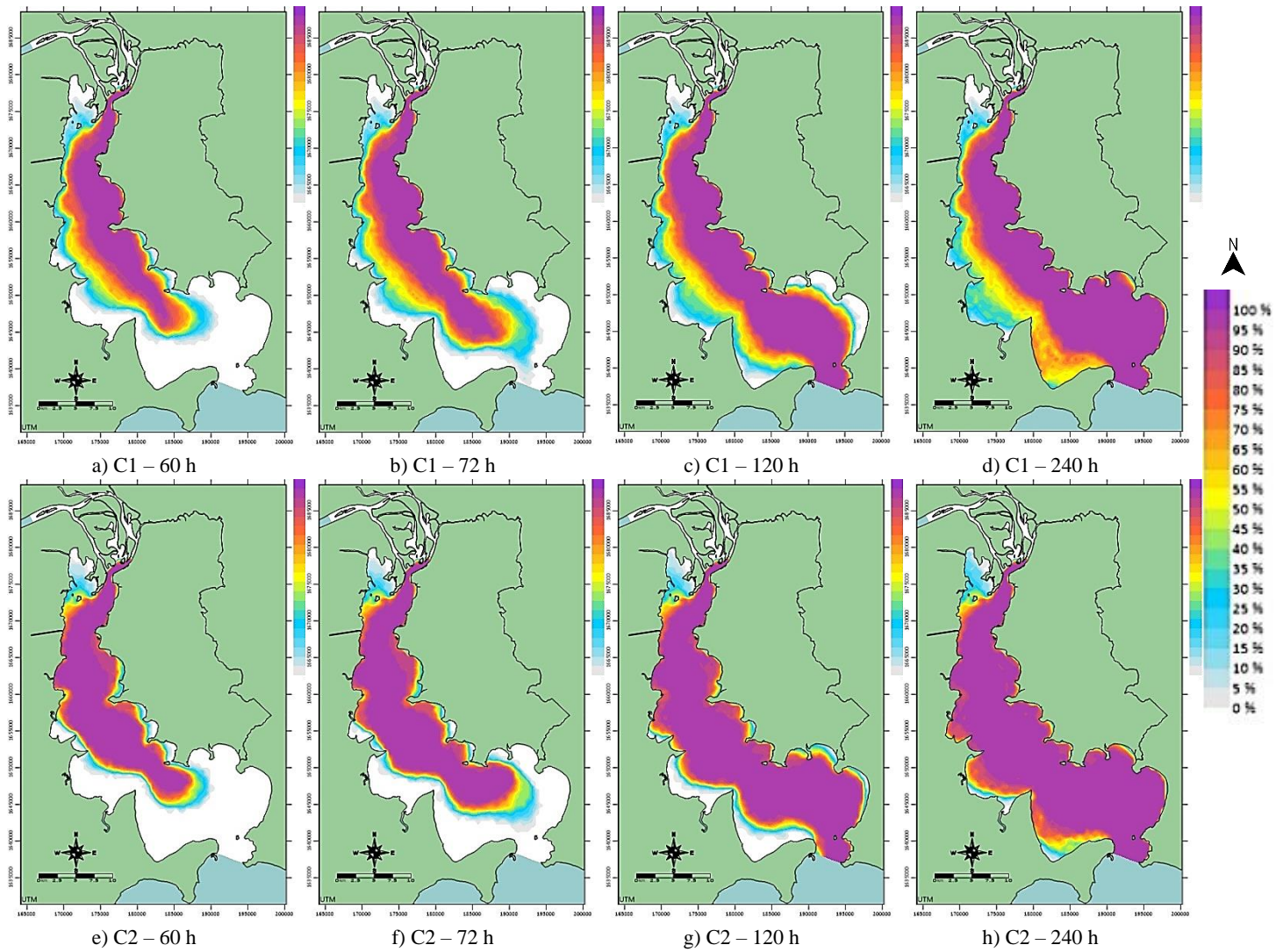


Figura 66 – Comparação entre as simulações de cheia para elevação (C1) e descida (C2) gradual dos níveis entre 60 h e 240 h.



6.2.3.3 Simulações utilizando coeficiente médio de absorção – Terceira série de simulações (A3, B3, C3)

Foi realizada uma terceira série de simulações (A3, B3, C3) para cada cenário hidrodinâmico proposto (estiagem, média e de cheia) utilizando coeficiente médio de absorção igual a 0,2. Os resultados probabilísticos obtidos foram comparados a primeira série de simulações (A1, B1, C1 – reflexão total), as duas tendo sido realizadas considerando o mesmo período de elevação geral dos níveis do Rio Guaíba (ver Tabela 10). Os instantes mais relevantes são mostrados na Figura 67 (comparação A1 e A3), na Figura 68 (comparação B1 e B3) e na Figura 69 (comparação C1 e C3).

Para o cenário hidrodinâmico de estiagem (comparação entre A1 e A3 – Figura 67) foram observadas as diferenças mais significativas entre os três, e mesmo assim elas só puderam ser percebidas no instante 240 horas. Provavelmente ocorreram em função da interação com a margem oeste, que aumentou a retenção de partículas para a simulação considerando a absorção em algum momento a partir do instante 120 horas.

Deste modo, isso acabou contendo o avanço da mancha, que tinha atingido a Ponta da Ceroula (ver Figura 9) sem considerar a absorção (A1 – Figura 67b), e ficou com sua probabilidade de passagem igual a 100% restrita à Ponta da Alegria (ver Figura 9) ao fim desta nova simulação (A3 – Figura 67d). A probabilidade de atingir o município de Eldorado do Sul também diminuiu de 100% para 75%.

Comparando as simulações para o cenário de vazão média (Figura 68), é possível observar que as maiores probabilidades (de 75% a 100%) ficam mais restritas às margens leste e ao centro do rio, o que também pode ser explicado pela interação com a margem, mas ainda existe a probabilidade de a margem oeste ser atingida (em torno de 25% na maior parte da sua extensão).

Já para a comparação considerando um cenário de vazão cheia (Figura 69), não foram observadas diferenças significativas, o que pode estar associado com o fato deste ser o cenário em que há menos interação da mancha com a margem, em função da alta velocidade de deslocamento. Os resultados são bastante coerentes, pois é importante lembrar que o coeficiente de absorção é atribuído a cada nó da margem, dependendo assim da interação da mancha com ela.

Figura 67 – Comparação entre as simulações do cenário de estiagem A1 (reflexão total das margens) e A3 (com coeficiente de absorção) para os instantes 120h e 240h.

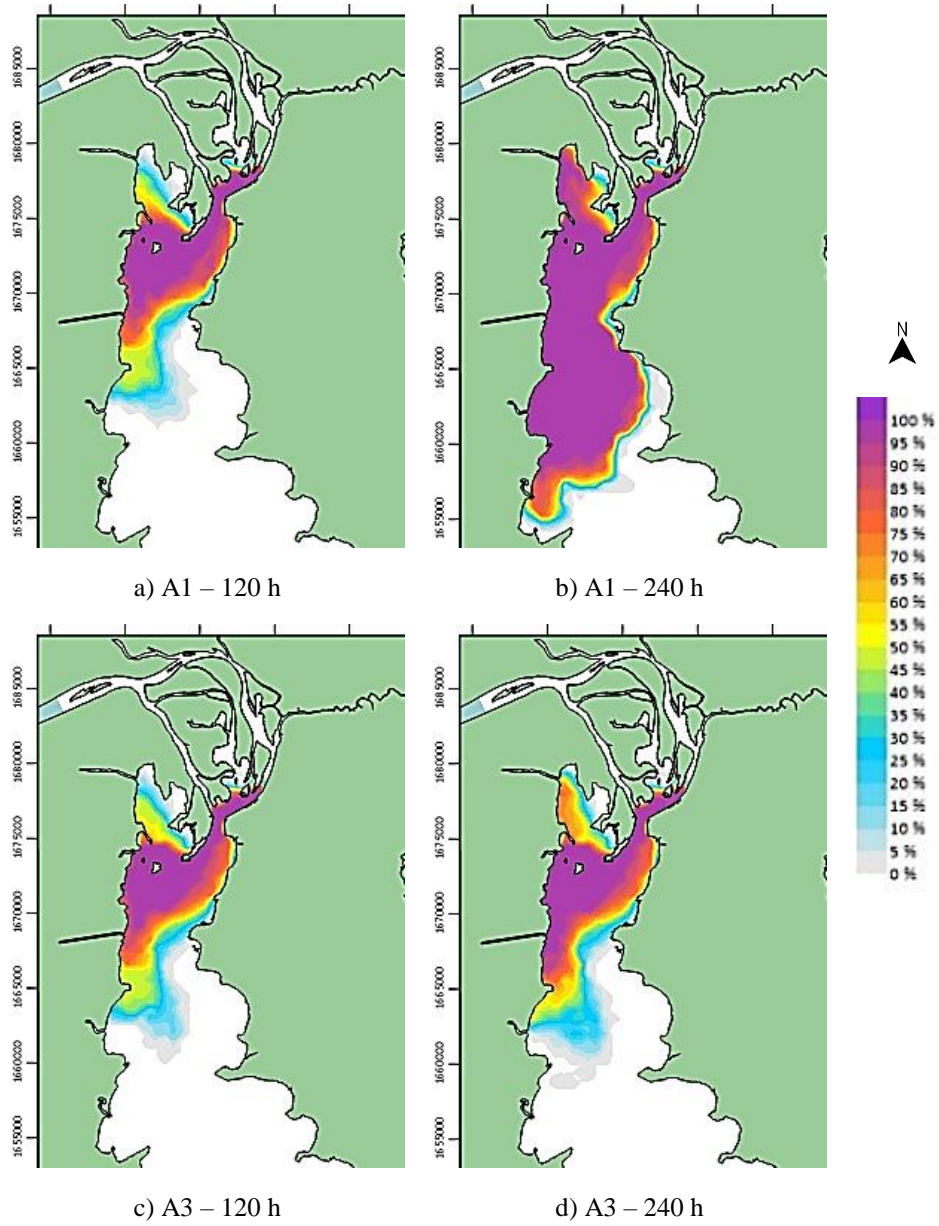


Figura 68 – Comparação entre as simulações do cenário de vazão média B1 (reflexão total das margens) e B3 (com coeficiente de absorção) para os instantes 120h e 240h.

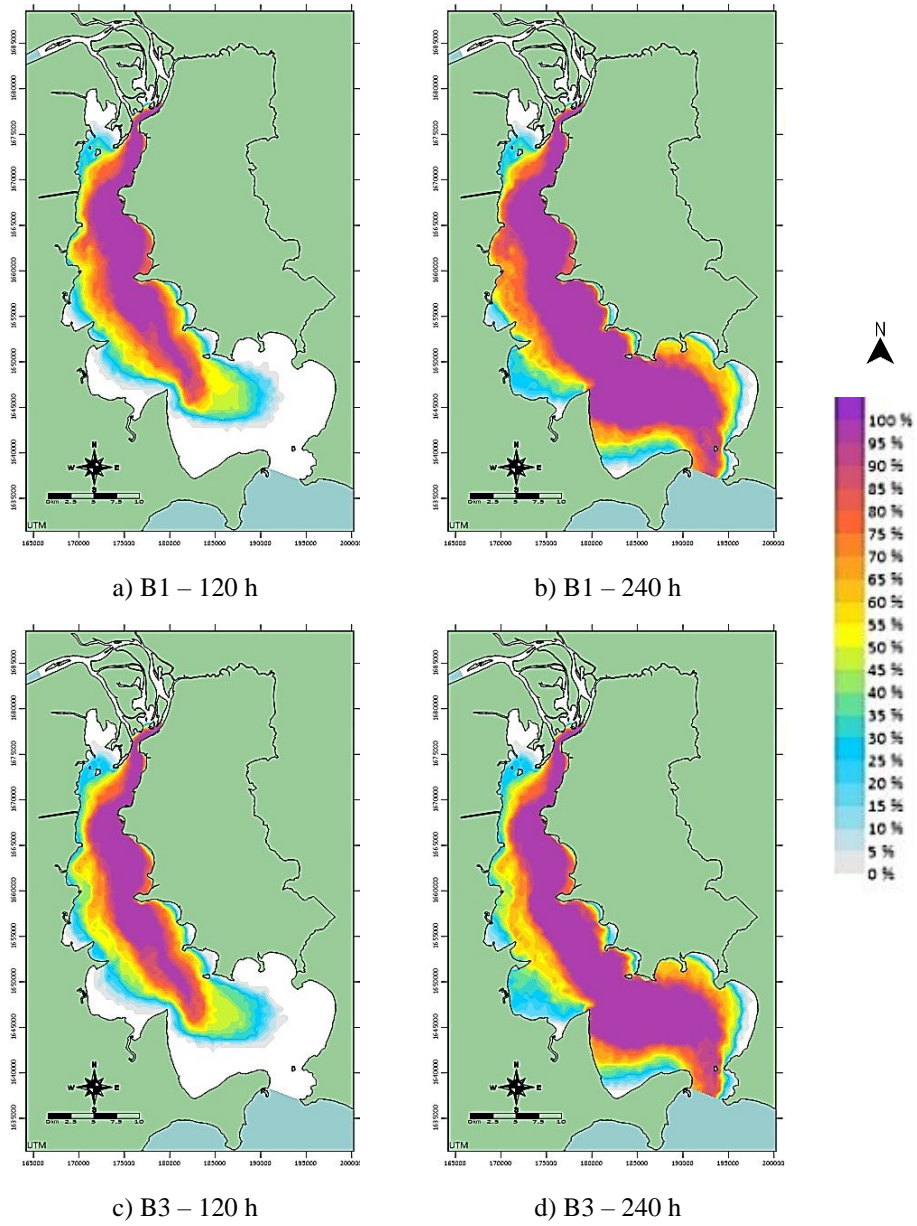
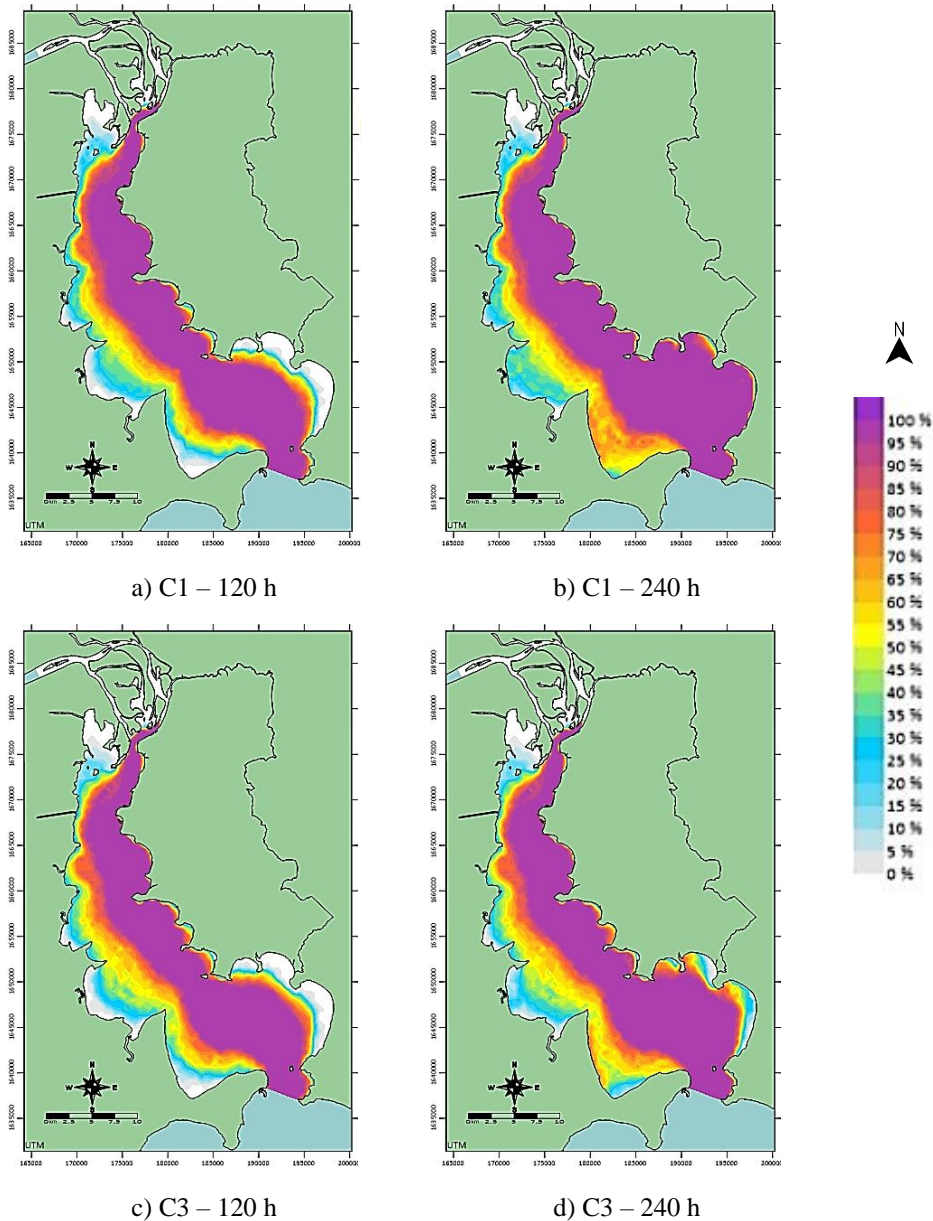


Figura 69 – Comparação entre as simulações do cenário de cheia C1 (reflexão total das margens) e C3 (com coeficiente de absorção) para os instantes 120h e 240h.



6.2.4 Análise da interação das manchas de dispersão de óleo (terceira série de simulações – A3, B3 e C3) com as margens do Rio Guaíba

A fim de compreender a interação da mancha de óleo com as margens, inicialmente foi feita uma avaliação qualitativa comparando os resultados de absorção de exemplos determinísticos (terceira série de simulações, subida gradual dos níveis, com coeficiente de absorção médio – Ex. A3, Ex. B3 e Ex. C3 para os cenários hidrodinâmicos de estiagem, média e cheia, respectivamente) com as Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (SAO).

Na sua seleção foram considerados os mesmos instantes iniciais de derramamento já descritos no item 6.2.1, referentes aos exemplos determinísticos da primeira série de simulações, uma vez que ambas equivalem ao mesmo período (tendência geral de subida de níveis), o que muda é o coeficiente de absorção considerado.

Já que para os exemplos de vazão média e de cheia foi possível observar as manchas atingindo a Lagoa dos Patos, optou-se por utilizar um recorte da Carta SAO a nível tático de Porto Alegre (PEL13), contemplando toda a extensão do Rio Guaíba em uma única imagem (Figura 70). Na Figura 71 é apresentado mapa considerando as partículas absorvidas na margem (destacadas na cor azul) para os exemplos dos três cenários no último instante analisado (240 h).

Nos três cenários foram registradas partículas absorvidas na margem leste do Guaíba na região do Porto de Porto Alegre (ver Figura 7) e também nas ilhas do Delta do Jacuí na margem oeste. A margem na qual se localiza a infraestrutura do Porto é considerada índice 1 (ISL 1), por se tratar de estruturas artificiais lisas. A tendência é que não haja penetração de óleo e que a permanência seja baixa, com a remoção ocorrendo rapidamente, de forma natural.

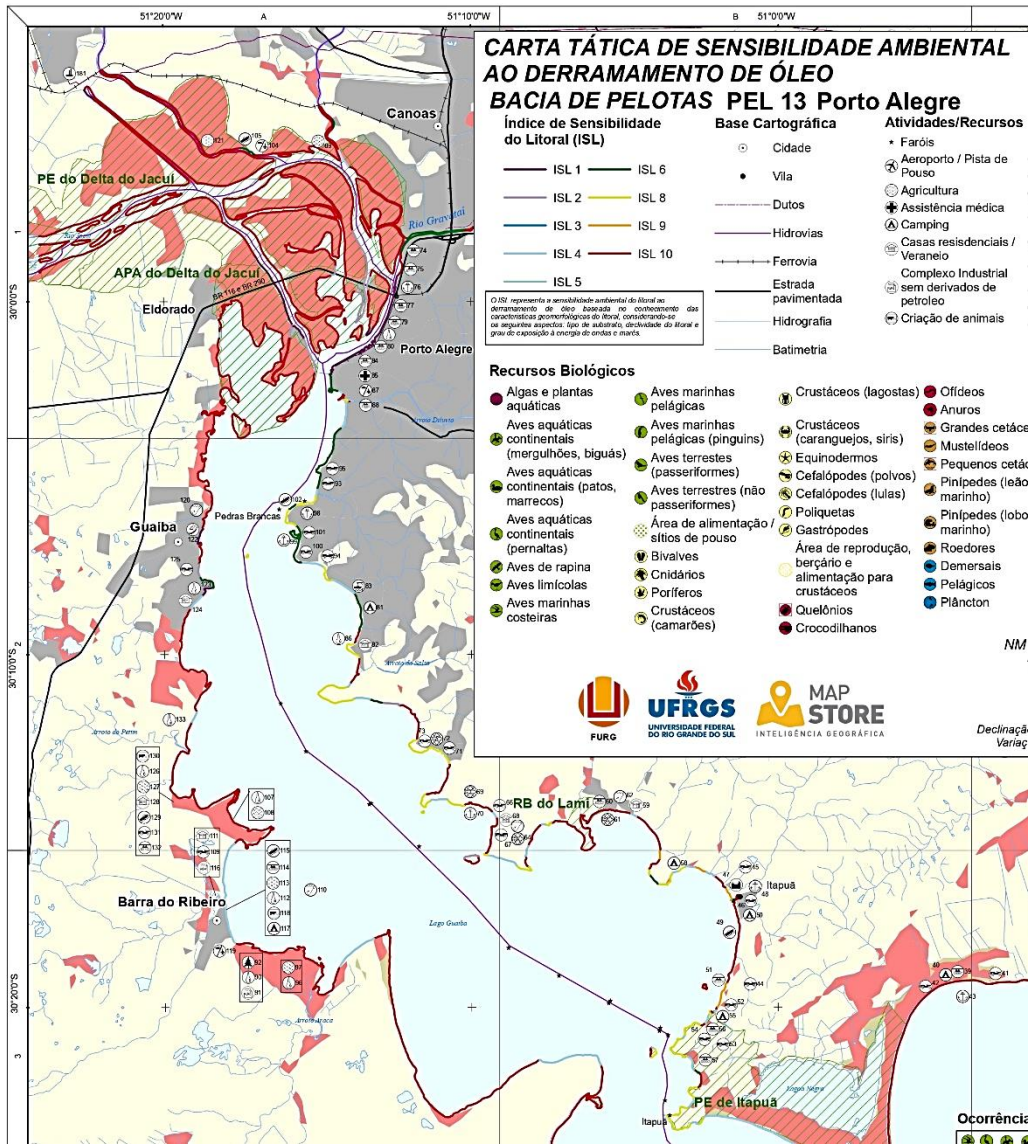
O contorno das ilhas que compõe o Delta do Jacuí, entretanto, é considerado Índice 10 (ISL 10), caracterizado por zonas pantanosas com vegetação acima d'água. Neste caso, o impacto na biota pode ser alto, e a remoção natural ocorre de forma extremamente lenta, pois o óleo fica retido. Esta classificação é dada para os habitats mais sensíveis, devido ao seu valor biológico.

Para o cenário de estiagem (Figura 71a), foram observadas, ainda, partículas absorvidas na margem oeste da saída da Ponta do Gasômetro (ver Figura 9), assim como as proximidades dos municípios de Guaíba e Eldorado do Sul, todos com maior índice de sensibilidade ao óleo associado (ISL10), com a mancha ficando contida nesta região. Para os cenários de vazão média (Figura 71b) e cheia (Figura 71c), ficaram partículas absorvidas na maior parte da margem leste até em torno da Ponta Grossa (ver Figura 9), intercalando-se trechos com índices de sensibilidade ISL4, ISL6 e ISL8.

Ainda, passando a Ponta do Salgado (ver Figura 9), para o cenário de vazão média (Figura 71b), um trecho da margem oeste de ISL10 também apresentou retenção de partículas, assim como na Ponta do Faxinal, de mesmo índice. Para o cenário de cheia

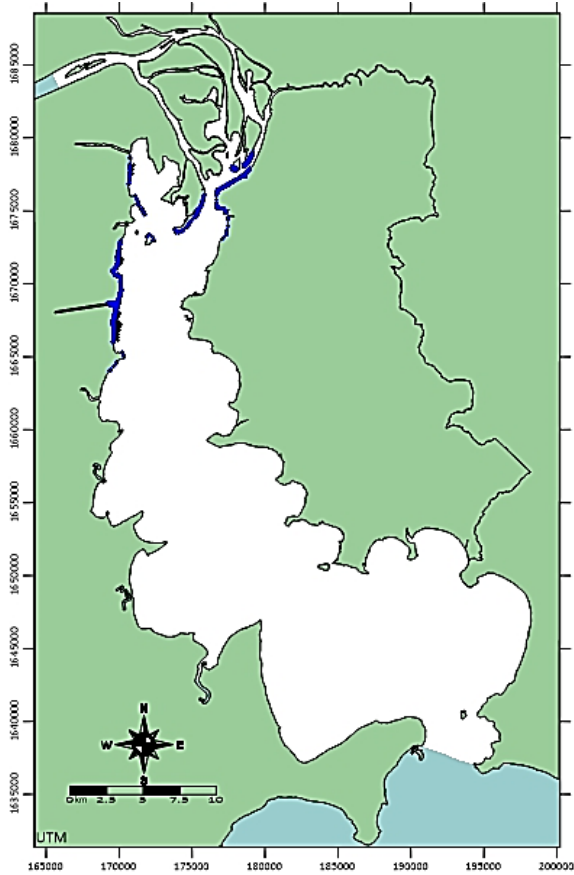
(Figura 71c), foram registradas partículas absorvidas na margem leste em trechos da Reserva Biológica do Lami e do Parque Estadual de Itapuã (Unidades de Conservação), ambos com maiores índices de sensibilidade associados.

Figura 70 – Recorte da Carta SAO Tática PEL13 (Porto Alegre).

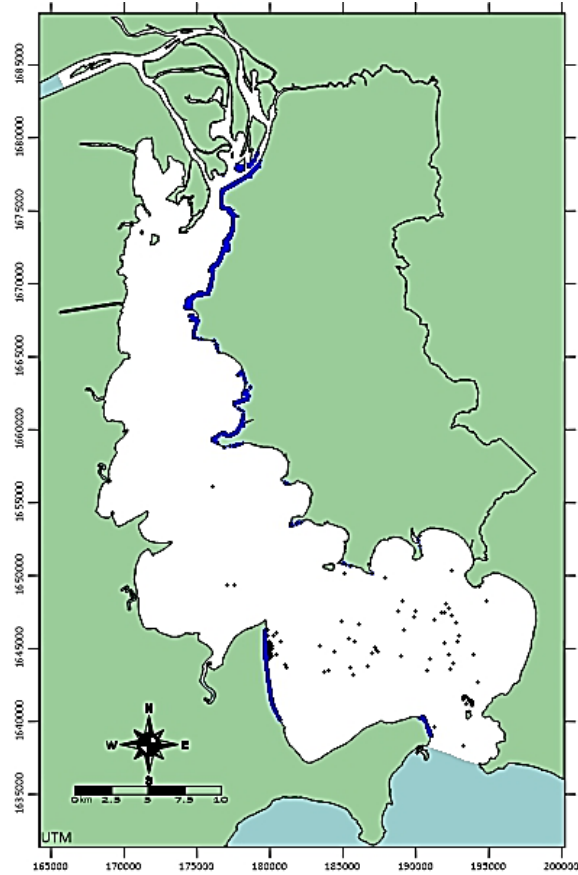


Fonte: FURG (c2022 – adaptado)

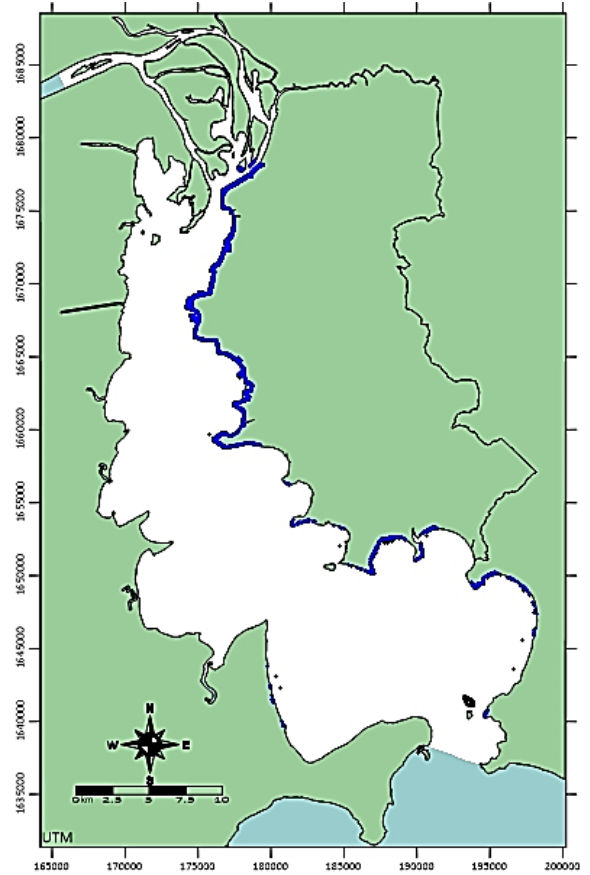
Figura 71 – Mapa de partículas retidas nas margens (destacadas em azul) para os exemplos determinísticos dos três cenários hidrodinâmicos (Ex. A3, Ex. B3, Ex. C3) considerando coeficiente de absorção (terceira série de simulações, período de elevação dos níveis do Rio Guaíba).



a) Ex. A3 – Cenário de Estiagem



b) Ex. B3 – Cenário de Vazão Média



c) Ex. C3 – Cenário de Cheia

Acredita-se, entretanto, que além de uma avaliação qualitativa, que indica apenas a sensibilidade dos pontos atingidos, seja necessário mensurar a interação com a margem. Para isso, o SisBaHiA possui uma ferramenta que calcula o número de toques no litoral e transforma isso num valor de volume retido pelas margens (para cada derramamento), com base no coeficiente de absorção.

Para os exemplos determinísticos apresentados, este volume foi de 2.394 m³ no cenário de estiagem, 1.469 m³ para o cenário de vazão média, e 2.079 m³ para o cenário de cheia, considerando 240 h depois do derramamento. Ainda, para o conjunto de derramamentos de cada simulação, considerando a abordagem probabilística e o mesmo intervalo de tempo, foram calculados a média e o desvio padrão dos volumes acumulados. Os resultados estão indicados na Tabela 14.

Tabela 14 – Informações de volume acumulado na margem considerando as simulações com coeficiente de absorção (terceira série de simulações).

Cenário	Abordagem Determinística (ex. individual)	Abordagem Probabilística (estatísticas para o conjunto de derramamentos)			
	Volume (m3)	Média dos volumes (m3)	Desvio padrão dos volumes (m3)	Maior volume para um derramamento (m3)	Menor volume para um derramamento (m3)
Estiagem	2394,2	2392,5	9,5	2398	2357
Média	1469,9	1693,8	536,2	2363,4	402,81
Cheia	2079,0	927,8	485,0	2211,5	343,3

Em relação ao volume original derramado (2400 m³), as frações retidas são de 99,7%, 70,5% e 38,7% para os cenários probabilísticos de estiagem (A3), média (B3) e cheia (C3), respectivamente. É possível concluir que para o cenário de estiagem as simulações têm, em média, uma interação maior com a margem, seguido pelo cenário de vazão média e de cheia, o que já tinha sido indicado nas análises anteriores.

Os valores de desvio padrão para os cenários hidrodinâmicos de vazões maiores são bastante significativos, indicando uma variedade maior da interação com a margem dependendo das condições às quais o derramamento está sujeito ao longo da sua trajetória. Em relação às limitações do *software*, não é considerada a saturação do meio, que pode ocorrer no ambiente natural.

6.2.5 Considerações finais das simulações de dispersão de óleo realizadas

Os principais resultados observados são que, para o cenário hidrodinâmico de estiagem, considerando derramamentos ocorrendo durante um período de elevação dos níveis para uma hipótese de absoluto pior caso de dispersão, na qual não foi considerada absorção pelas margens, o deslocamento da mancha no mesmo intervalo de tempo é menor do que para os cenários hidrodinâmicos de vazão média e cheia (sendo maior para este último).

Ainda, para este mesmo cenário, a tendência de deslocamento da mancha foi em direção à margem oeste desde a saída da Ponta do Gasômetro, apresentando uma probabilidade alta de atingir o município de Guaíba (maior do que 75%) três dias depois. Isso provavelmente está associado a maior influência do vento em um cenário de vazão mais baixa, conforme característica da dinâmica do rio.

Já para os cenários de vazão média e de cheia, de comportamento mais semelhante, o deslocamento ocorre mais próximo da margem direita, com a mesma probabilidade de ser atingida 12 e 6 horas depois, respectivamente, na região entre a Ponta do Gasômetro e a Ponta do Dionísio.

Depois desse ponto, a tendência é que a mancha atinja o canal de escoamento longitudinal do rio, se direcionando rapidamente na direção da Lagoa dos Patos (em menos de cinco dias para o cenário de cheia, sendo que em três já se observa uma probabilidade muito baixa - menor do que 5% - de isto acontecer; para o cenário de vazão média, em torno de 10 dias).

Em relação a segunda série de simulações realizadas (período de descida dos níveis do Rio Guaíba), verificou-se que a mancha referente ao cenário de estiagem fica ainda mais contida ao nordeste do Rio Guaíba passados 5 dias, porém inicialmente não se observa uma diferença tão grande na tendência do comportamento.

Já para os cenários de vazão média e cheia se observou uma diferença mais significativa do comportamento, com tendência de também se deslocar para o oeste (probabilidades de atingir a margem de 25% nas 24 h, e de 75% nas 36 horas que seguem o incidente para o primeiro; e de 50% em 24 h para o cenário de cheia).

Em relação ao tempo para atingir Itapuã, não foram observadas diferenças significativas, entretanto se destaca, tendo em vista os tempos de resposta previstos pela CONAMA 398 (12, 36 e 60h), que é de extrema importância considerar as diferenças de comportamento da mancha nos instantes iniciais.

Considerando um coeficiente de absorção médio (0,2) para o período de elevação de níveis e fazendo uma comparação, as principais diferenças observadas foram apenas para os instantes finais, sendo que a tendência de deslocamento da mancha para o cenário de estiagem também ficou mais contida.

Para o cenário de vazão média, as maiores probabilidades (entre 75% e 100%) foram mais observadas na direção da margem leste e do centro do rio, apesar de não ter sido alterada a probabilidade de atingir a margem oeste (em torno de 25%). No cenário de cheia, não foram observadas diferenças significativas, provavelmente em função de ser o cenário com menor interação com a margem.

Isso foi corroborado pela análise de volume acumulado, que indicou que 99,7% do volume foi retido para as simulações de estiagem (considerando o coeficiente de absorção), 70,5% para o cenário de vazão média e de 38,7% para o cenário de cheia. Entretanto, destaca-se altos valores de desvio padrão observados, o que indica uma variabilidade grande entre os derramamentos (simulados de forma probabilística).

Por fim, ressalta-se que as margens do Rio Guaíba são caracterizadas por uma alta sensibilidade ambiental ao óleo, sendo atribuído para a margem oeste ao longo de praticamente toda sua extensão, ISL10 (maior índice possível), enquanto na margem leste intercalam-se índices 6, 8 e 10.

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo teve como principal objetivo avaliar a dispersão de manchas de óleo no Rio Guaíba utilizando modelagem computacional, a fim de fornecer subsídios para a tomada de decisão e melhoria da gestão ambiental do Porto de Porto Alegre. Deste modo, foi fundamental entender os conceitos e processos envolvidos no comportamento do óleo no ambiente e o aparato legal envolvido, além da caracterização da área de interesse e do corpo hídrico associado (Rio Guaíba).

Foi necessário implementar uma metodologia de simulação computacional, sendo utilizados os *softwares* de modelagem hidrodinâmica e de transporte de contaminantes (advecção-difusão) GUAÍBA e SisBaHiA, considerando os cenários hidrodinâmicos e as hipóteses acidentais de derramamento de óleo propostas. Foi adotada uma análise sazonal, a fim de se considerar diferenças entre regimes de estiagem, vazão média e cheia, simulando-se um derramamento definido como o pior caso ocorrendo na região do Cais Navegantes do Porto de Porto Alegre, considerando um óleo de elevada persistência.

Assim foi possível avaliar a dispersão das manchas de óleo, indicando através de uma abordagem determinística e probabilística, a evolução da passagem da mancha do contaminante ao longo do Rio Guaíba em diferentes instantes ao longo de 10 dias depois do derramamento, servindo como embasamento para ações de resposta a um incidente. Para o cenário de estiagem, observou-se que a mancha ficou mais contida à margem oeste, enquanto para os cenários de vazão média e de cheia ela apresentou possibilidade de atingir Itapuã (transportada pelo canal de escoamento longitudinal), sendo que as duas situações possuem implicações ambientais associadas.

Os resultados hidrodinâmicos e de dispersão da mancha de óleos obtidos são coerentes com o indicado na caracterização do Rio Guaíba em diversos estudos, uma vez que para menores vazões (cenário de estiagem) é possível observar a influência característica dos ventos, mas conforme a vazão aumenta, a tendência é que haja um predomínio da influência das correntes na determinação do escoamento (cenários de vazão média e de cheia). Além disso, também foram indicadas as áreas de maior sensibilidade ao óleo atingidas, com base nas Cartas SAO.

De modo geral pode-se concluir que as possibilidades para o estudo de dispersão de óleo são inúmeras, porém acredita-se que tenha sido fornecida uma ideia inicial do que pode ser avaliado. Destaca-se que foi possível comparar os dois *softwares* utilizados, além de terem sido adotados modelos já validados e calibrados, e condições iniciais e de contorno que buscassem representar a complexa dinâmica do Rio Guaíba. Ressalta-se a importância de ser realizada a Análise de Riscos do Porto de Porto Alegre, assim como a aquisição de dados de monitoramento atualizados (principalmente dados variáveis para as entradas dos modelos).

Estudos futuros podem incluir simulações outros volumes e tipos de óleo com diferentes propriedades e comportamentos, visto que são exigências do PEI. Além disso, tendo em vista a quantidade de dados que podem ser obtidos com as simulações, acredita-se que podem ser desenvolvidos estudos interessantes capazes de propor uma metodologia consolidada para a análise de vulnerabilidade, ou ainda analisar de forma mais aprofundada como a complexa dinâmica do Rio Guaíba pode afetar a dispersão do óleo (assim como as consequências associadas). Destaca-se, por fim, que os resultados gerados neste estudo serão aplicados na parte de Modelagem Hidrossedimentológica e da Qualidade da Água do Programa de Gestão Ambiental Portuária Porto de Porto Alegre.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS - ANTAQ. **Sustentabilidade**. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br/assuntos/meio-ambiente>. Acesso em: 29/06/2022.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **Fate Of Spilled Oil In Marine Waters: Where Does It Go? What Does It Do? How Do Dispersants Affect It?** 1999. Washington, D.C.

ANDRADE NETO, J. S.; RIGON, L. T.; TOLDO JR, E. E.; SCHETTINI, C. A. F. **Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal**. 2012. Pesquisas em Geociências, 39 (2): 161–171.

BENEDITTI, C. A. **Vulnerabilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial: estudo de caso rio Tietê/Reservatório de Barra Bonita**. 2015. 130f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

BÍCEGO, M. C. **Contribuição ao estudo de hidrocarbonetos biogênicos e do petróleo no ambiente marinho**. 1988. Ed Resenha Tributária. São Paulo. 156p.

BORCHE, A. **Modelação de Estuários e Lagos (Fundamento): descrição dos modelos de circulação e transporte de massa**. [s.d.; a]. Porto Alegre.

BORCHE, A. **Modelação Matemática do Rio Guaíba**. [s.d.; b]. Porto Alegre.

BORCHE, A. **Modelo Matemático de Correntologia do Estuário do Rio Guaíba**. 1985. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Recursos Hídricos, Publicação n. 12. Porto Alegre.

BORCHE, A. **IPH-A: Aplicativo para modelação de estuários e lagoas – Manual de Utilização do sistema**. 1996. Publicação em Recursos Hídricos N° 33. IPH/UFRGS. 38p.

BORCHE, A.; CYBIS, L. F. **Modelo matemático de circulação e de qualidade das águas do estuário do Rio Guaíba**. 1985. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos hídricos. São Paulo. Anais, V 1, p. 419 – 432.

BRASIL. **Lei n.º 10.233, de 05 de junho de 2001**. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, e dá outras providências. Publicada no D.O.U de 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10233.htm. Acesso em: 29/06/2022.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Plano de Emergência Individual: Modo Portuário**. 2021. Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/20EMERGNCIAINDIVIDUAL.pdf>. Acesso em: 23/08/2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo**. 2007. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental.

ÇENGEL, Y. A. & CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 2012. AMGH, Porto Alegre.

CHAUDHRY, M. H. **Open-channel flow**. 2008. New York: Springer.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução N° 398, de 11 de junho de 2008**. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração. Disponível em: <http://www.mpce.mp.br/wp-content/uploads/2015/12/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CONAMA-n%C2%BA-398-08-Plano-Emerg%C3%Aancia-Individual-para-polui%C3%A7%C3%A3o-por-%C3%B3leo.pdf>. Acesso 30/06/2022.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS (DMAE). **Lago Guaíba**. Disponível em: https://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=197. Acesso em: 29/08/2022.

ELEY, D. D.; HEY, M. J.; SYMONDS, J. D. **Emulsions of water in asphaltene-containing oils 1. Droplet size distribution and emulsification rates**. 1988. *Colloids and surfaces*, v. 32, p. 87-101.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **IMO 2020: A nova regulamentação de combustíveis marítimos**. 2019. Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Rio de Janeiro.

FAY, J. A. **The spread of oil slicks on a calm sea**. 1969. In: Hoult, D.P. (eds) *Oil on the Sea*. Ocean Technology. Springer, Boston, MA, p. 53-63.

FERNANDES, R. **Modelação de hidrocarbonetos**. 2001. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Superior Técnico. Portugal.

FICK, C.; TOLDO JR., E. E.; NUNES, J. C. R. **Relatório De Atividades do Subprograma de Monitoramento e Modelagem Hidrossedimentológica e da Qualidade da Água do Programa de Gestão Ambiental do Porto de Porto Alegre**. Maio de 2022. Porto Alegre.

FINGAS, M. F.; FIELDHOUSE, B.; MULLIN, J. **Studies of water-in-oil emulsions: the role of asphaltenes and resins**. 1996. Canada.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL – RS (FEPAM-RS). **Qualidade Ambiental: Região Hidrográfica do Guaíba**. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asphttps://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=197. Acesso em: 29/08/2022.

FURG - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE. **Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da Bacia Marítima de Pelotas**. Disponível em: <https://saopelotas.furg.br/2-uncategorised/47-cartas-operacionais>. Acesso em: 03/07/2022.

GOIS, D. M. M. de. **Estudo da circulação hidrodinâmica e da dispersão de óleo na zona costeira entre Macau e Galinhos RN**. 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GURGEL, F. O. M. **Aplicações de modelagem hidrodinâmica para ações de resposta a incidentes de poluição por derrame de óleo: estudo de caso da Enseada dos Anjos em Arraial do Cabo-RJ**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil**. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 03/07/2022.

INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION (ITOPF). **Fate of marine oil spills: technical information paper 2**. 2011a. London, UK. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-02-fate-of-marine-oil-spills/>. Acesso em: 31/07/2022.

INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION (ITOPF). **Effects of Oil Pollution on the Marine Environment: technical information paper 13**. 2011b. London, UK. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-13-effects-of-oil-pollution-on-the-marine-environment/>. Acesso em: 31/07/2022.

JOBIM, G. S. **Dispersão de poluentes: simulação numérica do Lago Guaíba**. 2012. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JONES, R. **A simplified Pseudo-component Oil evaporation Model**. 1997. NOAA, USA in Proceedings of the Twentieth Arctic and Marine Oilspill Program, Technical Seminar, Volume 1, p.43-60. Vancouver, Canada.

KOEPPEN, W. **Climatologia: um estúdio de los climas de la tierra**. 1948. Fondo de Cultura Econômica, México. 478p.

LEHR, W.; JONES, R.; EVANS, M.; SIMECEK-BEATTY, D.; OVERSTREET R. **Revisions of the ADIOS oil spill model**. 2002. Environmental Modelling & Software, v. 17, n. 2, p. 189-197.

LOPES, C. F.; MILANELLI, J. C. C.; POFFO, I. R. F. **Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza–Manual de Orientação**. 2007. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente. 120p.

MARTINHO, V. **Estudo da dispersão de manchas de óleo na área de atuação do porto do Rio Grande–RS**. 2010. 71f. TCC – Laboratório de oceanografia costeira e estuarina, Programa de recursos humanos, n. 27-ANP, 2010.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. **Desktop ADIOS**. Disponível em: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/adios.html>. Acesso em: 22/07/2022.

MONTEZUMA, P. N. **Modelagem de cenários de derramamento de óleo na Baía de Ilha Grande para elaboração do Plano de Emergência**. 2004. Projeto Final de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 91p.

NICOLODI, J. L. **O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação**. 2007. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PEDROSA, L F. **Análise dos mecanismos de planejamento e resposta para incidentes com derramamento de óleo no mar: uma proposta de ação**. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

PETROBRAS. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ: óleo combustível marítimo MF – 380**. 2019. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.vibraenergia.com.br/sites/default/files/pdfs/fispq-oleocomb-oc-mar-mf-380.pdf>. Acesso em: 03/07/2022.

PIERRAT, E. A. S. **Estudo da balneabilidade atual e futura das praias do Lami e Belém Novo em Porto Alegre (RS): Comparação de modelos de dispersão de poluentes numéricos e analíticos em meio aquático**. 2016. TCC - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PISA (Projeto Integrado Socioambiental): LERSCH, E. C.; HOFFMANN, C. X.; ROSMAN, P. C. C. **Segundo Relatório Complementar de Avaliação de Impacto do Projeto Integrado Socioambiental ETE Serraria: Aplicação dos Modelos Matemáticos Transientes SisBaHiA e IPH-A**. 2013. Porto Alegre.

PORTOS RS. Disponível em: <https://www.portosrs.com.br>. Acesso em: 03/07/2022.

PORTOS RS. **Relatório de Andamento do Programa de Gestão Ambiental do Porto de Porto Alegre – Volume 1**. 2022. Porto Alegre.

POTTER, M. & WIGGERT, D. **Mecânica dos Fluidos (Tradução da 3ª Edição Norte-Americana)**. 2009. Antonio Pacini (tradutor). São Paulo, SP, Brasil: Cengage Learning.

ROSMAN, P. C. C. Comunicação pessoal realizada no dia 26/07/2022.

SCHWARZBACH, M. S. R.; BORCHE, A.; LERSCH, E. C.; HOFFMANN, C. X. **Aplicação do Modelo IPH-A, de correntologia e transporte de poluentes, à baía de Ipanema**. 1997. 19º Congresso Brasileiro de Eng. Sanitária e Ambiental.

SCOTTA, F. C. **A hidrodinâmica e sedimentologia do rio Guaíba analisados por sensores geocústicos e orbitais**. Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

SCOTTÁ, F. C.; ANDRADE, M. M.; WESCHENFELDER, J.; TOLDO JR, E. E.; NUNES, J. C. R. **Descarga líquida e sólida em suspensão no Rio Guaíba, RS, Brasil.** 2020. Pesquisas em Geociências, Porto Alegre. Vol. 47, n. 3 (dez. 2020), e094818. 19 p.

SEA TEMPERATURE. **Porto Alegre Water Temperature.** 2022. Disponível em: <https://www.seatemperature.org/south-america/brazil/porto-alegre.htm>. Acesso em: 10/07/2022.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. M. **Métodos computacionais em hidráulica.** 2017. EDUFBA. Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SIQUEIRA, L. F. G. **Sobre a Eficiência de Operações de Recolhimento de Derramamentos de Óleo com e sem Técnica de Decantação.** 2015. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SISBAHIA. **Manual do Usuário do SisBaHiA.** 2017. Disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisBAHIA/A1Index.htm>.

SISBAHIA. **Referência Técnica do SisBaHiA.** 2021. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBaHiA_RefTec_v11a.pdf.

SOTO, Y. J. M. **A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR.** 2004. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SOUZA, C. F. de. **Sistema integrado para tomada de decisão espacial em situações de derramamento de óleo no litoral norte do Estado do RN.** 2006. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SUPERINTENDÊNCIA DO PORTO DE RIO GRANDE - SPURG. **Plano de Emergência Individual do Porto de Rio Grande.** 2019. Disponível em: <https://www.portosrs.com.br/site/public/uploads/site/resp-ambiental/86.pdf>. Acesso em: 03/07/2022.

THOMAS, J. E (organizador). **Fundamentos de engenharia de petróleo.** 2001. Rio de Janeiro: Interciência, Petrobrás.

U.S. ARMY. **Coastal Engineering Manual, Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate.** 2005. Engineer Manual 1110-2-1100. US Army Corps of Engineers, Washington, DC.

VAZ, A. C.; MÖLLER JR., O. O.; ALMEIDA, T. L.de. **Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos.** 2006. Atlântica, Rio Grande.

ZANARDI, E. **Hidrocarbonetos no Canal de São Sebastião e Influência na Plataforma Interna Adjacente - Influência do Derrame de Maio de 1994.** 1996. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico. USP. São Paulo - SP, p. 112.