

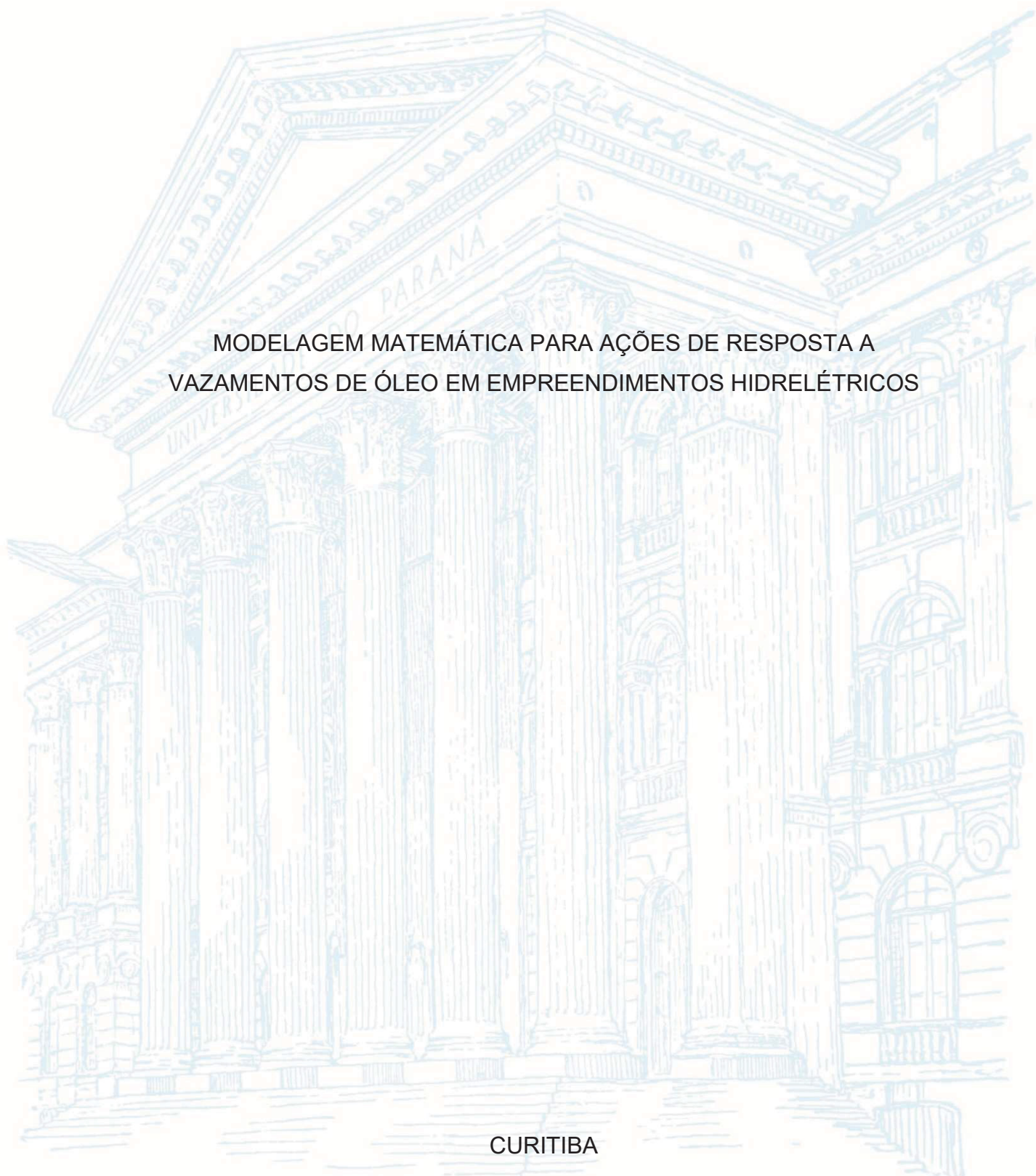
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CICERO MARTINS JUNIOR

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA AÇÕES DE RESPOSTA A  
VAZAMENTOS DE ÓLEO EM EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS

CURITIBA

2023



CICERO MARTINS JUNIOR

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA AÇÕES DE RESPOSTA A  
VAZAMENTOS DE ÓLEO EM EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Tobias B. Bleninger

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Martins Junior, Cicero

Modelagem matemática para ações de resposta a vazamentos de óleo em empreendimentos hidrelétricos. / Cicero Martins Junior. – Curitiba, 2023.  
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Bernward Bleninger.

1. Usinas hidrelétricas. 2. Reservatórios. 3. Rios. 4. Vazamento de óleo.  
5. Modelagem matemática - Teoria e aplicações. I. Bleninger, Tobias Bernward. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CICERO MARTINS JUNIOR** intitulada: **Modelagem matemática para ações de resposta a vazamentos de óleo em empreendimentos hidrelétricos**, sob orientação do Prof. Dr. TOBIAS BERNWARD BLENINGER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Agosto de 2023.

Assinatura Eletrônica

30/08/2023 13:32:14.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

30/08/2023 11:52:12.0

MAURÍCIO FELGA GOBBI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

30/08/2023 11:22:19.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

30/08/2023 12:35:50.0

FERNANDO OLIVEIRA ANDRADE

Avaliador Interno



Às pessoas maravilhosas com quem tenho a satisfação de, dia após dia, compartilhar aprendizados, desafios e sonhos, e que dão propósito a cada passo de minha jornada: Gi, André e Caio, este trabalho é dedicado a vocês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, meu pai Cicero e minha mãe Lídia, que cada qual a seu modo construíram histórias de superação no trabalho e na vida, sempre com muito amor aos filhos e um grande incentivo para buscarmos ir sempre cada vez mais longe.

Ao Prof. Dr. Tobias Bleninger, cuja orientação e inspiração foi fundamental nessa minha guinada de volta à academia, depois de 10 anos distante. Sou muito grato por todo o conhecimento compartilhado, pela compreensão e confiança, bem como pelas oportunidades e desafios lançados em cada conversa, que me fazem concluir esse ciclo com a certeza de ter buscado um caminho virtuoso.

Aos colegas e amigos da Companhia Paranaense de Energia. À Mônica, Rafael e Douglas, da divisão de Hidrologia, cujas sugestões e informações auxiliaram a obter dados fundamentais para esta pesquisa. À toda a equipe de Meio Ambiente da Copel Geração e Transmissão, especialmente à Fernanda e Jéssica, cujo apoio, liderança e amizade permitiram que eu pudesse – quase sempre, conciliar trabalho e mestrado. À minha amiga e MSc. Soraia, responsável por minha designação para o tema de emergências ambientais na Copel, e por incentivar e indicar o caminho das pedras no meu retorno à academia.

Aos professores e professoras do PPGERHA e PPGEA, referências em sua área de atuação, com os quais tive a honra de aprender e que auxiliam nossa engenharia a alçar degraus importantes rumo aos avanços que nosso país precisa. Particularmente aos professores Dr. Daniel Costa dos Santos e Dr. Cristóvão Fernandes, cujo acolhimento no início dessa jornada me deram confiança para me sentir no lugar certo.

Aos professores Dr. Fernando Oliveira Andrade e Dr. André Luiz Tonso Fabiani, cuja contribuição como examinadores na banca de qualificação foi fundamental para aprimorar esta pesquisa.

Aos amigos Rafaela, Michelle e Brenno, cuja presença – mesmo quando distantes fisicamente, torna mais felizes mesmo os dias mais cinzentos. Ainda descobriremos a harmonização perfeita entre vinho e amendoim.

E novamente, e sempre mais, agradeço à Gislene Brenner, minha companheira de vida e de luta, com quem há duas décadas tenho a felicidade de enfrentar, desvendar e construir o mundo.

*“Even with all our technology and the inventions that make modern life so much easier than it once was, it takes just one big natural disaster to wipe all that away and remind us that, here on Earth, we’re still at the mercy of nature.”*

(deGRASSE TYSON, N. 2017)

## RESUMO

Considerando que rios e reservatórios estão sujeitos a graves acidentes ambientais envolvendo derramamento de hidrocarbonetos, e que a modelagem matemática pode contribuir significativamente no planejamento e resposta a este tipo de emergências, tal qual já ocorre em áreas costeiras e oceânicas, este trabalho testou o uso do software DELFT3D como ferramenta operacional para a simulação de cenários de vazamento de óleo, tomando como objeto de estudo uma usina hidrelétrica no rio Iguaçu: a UHE Governador Ney Braga (GNB), no Estado do Paraná. Adotando critérios da Resolução Conama 398/2008, que baliza a elaboração de Planos de Emergência voltadas para áreas costeiras, foram compilados dados, avaliadas as vulnerabilidades e definidos os possíveis cenários mais críticos. Foram simuladas diferentes condições hidrodinâmicas e diversos cenários de vazamento e ações de resposta para as primeiras 24 horas após a ocorrência. Pode-se dizer que o DELFT3D atendeu bem aos principais requisitos necessários à modelagem em águas interiores, permitindo acurácia no cálculo das velocidades do escoamento, a representação adequada da morfologia, de condições de fluxo não permanente, variações de vento, interação com as margens, além dos processos de transporte e degradação do óleo, bem como a simulação de inserção de barreiras. A possibilidade de modelagem rápida do vazamento também se mostrou viável, permitindo obter em menos de 30 minutos os resultados para a simulação de períodos de 24 horas, desde que os cenários hidrodinâmicos mais prováveis tenham sido previamente executados. Avalia-se que seja necessário um aprofundamento dos estudos para uma definição mais acurada de parâmetros, uma vez que a maioria das referências de literatura são voltadas para ocorrências em áreas oceânicas, como coeficientes de dispersão, arraste do vento e probabilidade de adesão às margens. Apesar disso, a comparação entre os cenários modelados permite observar coerência e confiabilidade entre os resultados obtidos. Torna-se evidente, por exemplo, que a redução temporária da vazão e a mobilização imediata para a instalação de barreiras de contenção podem reduzir a área atingida de dezenas de quilômetros para algumas centenas de metros, dependendo do tempo dispendido nessas operações. Nesse sentido, a disponibilidade de pessoal treinado e de materiais adequados no local é imprescindível, bem como o mapeamento de áreas sensíveis à jusante do empreendimento e a priorização de proteção desses locais em situações de emergência. Para isso, como medida preventiva, considera-se que empreendimentos em águas interiores com potencial de ocorrências igual ou superior ao nível Tier 2 deveriam possuir planos de resposta à emergência ambiental, considerando a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental e modelagem matemática do potencial transporte do óleo, adaptando a estruturação proposta pela Resolução Conama 398/2008. Embora a modelagem matemática de vazamentos de óleo ainda demande aprofundamento da pesquisa aplicada, especialmente para rios e reservatórios, em seu estágio atual ela já é capaz de cumprir um papel fundamental, tanto para a conscientização de empresas, autoridades e sociedade quanto aos riscos relacionados a seus empreendimentos, quanto para reforçar a necessidade de evitar toda e qualquer emergência, mas ainda assim garantir que todos estejam preparados da melhor forma possível.

Palavras-chave: Modelagem matemática, vazamento de óleo, usinas hidrelétricas, rios, reservatórios.

## ABSTRACT

By considering that rivers and reservoirs can suffer serious environmental accidents involving hydrocarbon spills, and that mathematical modeling can be a powerful tool to the planning and response to those types of emergencies, akin to its utilization in coastal and oceanic regions, this study explores the application of the DELFT3D software as an operational tool for simulating oil spill scenarios. The Governador Ney Braga Hydroelectric Power Plant (GNB), located on the Iguaçu River in Paraná, serves as the object of study. Adopting criteria from the Conama<sup>1</sup>'s Resolution 398/2008, which guides the preparation of Emergency Plans for coastal areas, there were analyzed data, assessed vulnerabilities and the most critical scenarios were determined. There were simulated different hydrodynamic conditions and several leak scenarios and their respective response actions were noticed for the first 24 hours after the occurrence. It can be said that DELFT3D effectively meets the essential requirements for modeling in inland waters. This encompasses precise modeling of flow velocities, accurate representation of river morphology, consideration of oil dispersion under unsteady flow conditions, accounting for wind variations, interactions with riverbanks, oil transport, weathering, and simulations of oil boom deployment. Furthermore, the software allows for rapid modeling, yielding results within 30 minutes for 24-hour simulation periods when relevant hydrodynamic scenarios have been pre-executed. It is considered that further studies are necessary for a more accurate definition of parameters which, in the biggest part of the literature references are dedicated to occurrences in ocean areas, such as dispersion coefficients, wind drag and sticking probability. Nevertheless, the comparison between the modeled scenarios allows us to evaluate the results as coherent and reliable. It makes clear, for instance, that temporary reduction of the HPP flow and immediate mobilization for the oil boom deployment can reduce the affected area of dozens of kilometers for a few hundred meters, depending on the time spent in these operations. Thus, the presence of well-trained personnel and appropriate response materials is imperative, as is the identification and prioritization of environmentally and socially vulnerable areas downstream in emergency scenarios. Therefore, as a preventive measure, it is considered that enterprises in inland waters, with a potential for incidents equal to or exceeding Tier 2 severity, should develop comprehensive environmental emergency response plans. These plans should include the creation of environmental sensitivity maps and mathematical models to predict oil transport, aligning with the framework outlined in Conama's Resolution 398/2008. While further research is required for the mathematical modelling of oil spills, particularly for rivers and reservoirs, it is already playing a key role in creating awareness among companies, authorities and society about the risks related with their operations. In addition, it highlights the importance of both preventing emergencies and being well-prepared, in the best possible way, in case it occurs.

Keywords: Mathematical modeling, oil spills, hydroelectric plants, rivers, reservoirs.

---

<sup>1</sup> CONAMA: Brazilian National Environment Council

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos físico-químicos do óleo.....	24
Figura 2 - Rio Iguaçu, UHE GNB - área atingida pela emergência em 2015 .....	30
Figura 3 – Área de estudo: 12km a partir da UHE GNB.....	31
Figura 4 – Vista panorâmica UHE GNB .....	32
Figura 5 - Vista panorâmica de parte da UHE Salto Santiago .....	33
Figura 6 - Carta de Sensibilidade Ambiental na Jusante da UHE GNB .....	34
Figura 7 - Margens vegetadas formadas por mata ripária no rio Iguaçu .....	35
Figura 8 - Escarpas e barrancos não vegetados no rio Iguaçu .....	35
Figura 9 - Piers, atividades de pesca e turismo na jusante da UHE GNB.....	36
Figura 10 - Pontos de batimetria utilizados no RGFGGrid .....	37
Figura 11 - Análise estatística de vazões UHE GNB 1993-2023.....	38
Figura 12 –Estação de Laranjeiras do Sul/PR – Ventos predominantes.....	39
Figura 13 - Largura do Rio Iguaçu na jusante da UHE GNB.....	44
Figura 14 - Barreiras de contenção de óleo em rios.....	51
Figura 15 - Grade hidrodinâmica.....	52
Figura 16 - Exemplo de perfil do modelo tipo $\sigma$ e espessura das camadas .....	53
Figura 17 - condições de contorno do modelo e descargas .....	54
Figura 18 - Resultados restart file - nível d'água após 3 dias.....	55
Figura 19 - Localização da seção de monitoramento ADCP - nov/2005 .....	56
Figura 20 - Perfis ADCP - Magnitude de velocidade .....	57
Figura 21 - Ponto de Lançamento do óleo e Pontos de monitoramento .....	60
Figura 21 - Locais de Instalação de Barreiras .....	61
Figura 22 – Diagramação dos mapas de resultados ao longo do tempo .....	62
Figura 23 – Exemplo de gráficos de concentração do óleo - pontos de observação .....	63
Figura 24 - Exemplo de gráficos de concentração nas seções longitudinais .....	64
Figura 25 - exemplo de gráfico de status ao fim da simulação .....	64
Figura 26 - Localização da seção de monitoramento ADCP - nov/2005 .....	65
Figura 27 - Calibração Hidrodinâmica - dados modelados e medidos .....	66
Figura 28 - Acesso de barco a jusante da UHE GNB.....	66
Figura 29 - Cenário A.2 - Vazão constante de 1000m <sup>3</sup> /s - 100000 partículas.....	69
Figura 30 - Cenário A.2 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	70
Figura 31 - Cenário A.2 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51... ..	70



Figura 32 - Cenário A.2 - Status das partículas ao fim da simulação .....	70
Figura 33 - comparação entre concentrações nas seções longitudinais .....	72
Figura 34 - Cenário A.6 - Redução para 100m <sup>3</sup> /s.....	73
Figura 35 - Cenário A.6 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	74
Figura 36 - Cenário A.6 - Concentração nas seções longitudinais.....	74
Figura 37 - Cenário A.6 - Status das partículas ao fim da simulação.....	74
Figura 38 - Cenário A.7 - Vazão constante de 1000m <sup>3</sup> /s .....	76
Figura 39 - Cenário A.7 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	77
Figura 40 - Cenário A.7 - Concentração nas seções longitudinais.....	77
Figura 41 - Cenário A.7 - Status das partículas ao fim da simulação.....	77
Figura 42 - Cenário B.10 - Vento 3m/s < N-S Vazão 1000m <sup>3</sup> /s.....	79
Figura 43 - Cenário B.10 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	80
Figura 44 - Cenário B.10 - Concentração nas seções longitudinais.....	80
Figura 45 - Cenário B.10 - Status das partículas ao fim da simulação.....	80
Figura 46 - Diferentes direções de vento - seções longitudinais .....	81
Figura 47 - Diferentes % de arraste do vento - seções longitudinais .....	81
Figura 48 – Cenário B.11 - status das partículas ao fim da simulação.....	82
Figura 49 - Cenário C.12 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 2760kg de Óleo Fluibrax 400.....	83
Figura 50 - Cenário C.12 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	84
Figura 51 - Cenário C.12 - Concentração nas seções longitudinais.....	84
Figura 52 – Cenário C.12 - status das partículas ao fim da simulação .....	84
Figura 53 - Cenário D.14 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de Óleo HFO – Dh manual...	86
Figura 54 - Cenário D.14 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	87
Figura 55 - Cenário D.14 - Concentração nas seções longitudinais.....	87
Figura 56 - Cenário D.14 - status das partículas ao fim da simulação .....	87
Figura 57 - Cenário D.15 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de Óleo Ekofisk - Dh manual	88
Figura 58 - Cenário D.15 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	89
Figura 59 - Cenário D.15 - Concentração nas seções longitudinais.....	89
Figura 60 - Cenário D.15 - status das partículas ao fim da simulação .....	89
Figura 61 - Comparação utilizando Dh do modelo Fluibrax .....	90
Figura 62 - Cenário E.18 - 2 barreiras em B e C, Resposta Lenta.....	91
Figura 63 - Cenário E.18 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	92
Figura 64 - Concentração nas seções longitudinais.....	92
Figura 65 - Cenário E.18 - status das partículas ao fim da simulação .....	92

Figura 66 - Cenário E.19 - 2 barreiras em B e C, Resposta Rápida.....	94
Figura 67 - Cenário E.19 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	95
Figura 68 - Concentração nas seções longitudinais .....	95
Figura 69 – Cenário E.19 - status das partículas ao fim da simulação.....	95
Figura 70 - Cenário E.24 - Vazão 100m <sup>3</sup> /s, 2 barreiras em B e C, Resposta Lenta ..	97
Figura 71 - Cenário E.24 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	98
Figura 72 - Cenário E.24 - Concentração nas seções longitudinais.....	98
Figura 73 - Cenário E.24 - status das partículas ao fim da simulação .....	98
Figura 74 - Cenário E.25 - Óleo na superfície após 16h e concentração.....	99
Figura 75 - Cenário E.26 - Vazão 100m <sup>3</sup> /s, 1 barreira em A, Resposta Imediata....	100
Figura 76 - Cenário E.26 - Concentração nos pontos de monitoramento .....	101
Figura 77 - Cenário E.26 - Concentração nas seções longitudinais.....	101
Figura 78 - Cenário E.26 - status das partículas ao fim da simulação .....	101
Figura 79 - Cenário A.5 - Pontos de Monitoramento e Mapa de Concentrações ....	103
Figura 80 - Comparação E.20 e A.2 - Concentração pontos de monitoramento .....	103
Figura 81 - Comparação cenários E.21, E.22 e E.23 nas seções longitudinais .....	104
Figura 82 - Cenários E.18 e E.27 - Comparação nos pontos de monitoramento ....	105
Figura 83 - Cenários E.19 e E.28 - Comparação nos pontos de monitoramento ....	105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre modelos de derramamento de óleo .....	23
Quadro 2 - Informações Gerais UHE GNB.....	32
Quadro 3 - Informações Gerais UHE Salto Santiago .....	33
Quadro 4 - Equipamentos potenciais fontes de risco .....	42
Quadro 5 - Hipóteses de acidente para o transformador elevador de potência .....	42
Quadro 6 - Cenários de calibração hidrodinâmica .....	58
Quadro 7 - Cenários de lançamento de óleo.....	59
Quadro 8 - Coeficientes de Manning para o canal principal.....	67
Quadro 9 - Cenários destacados.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise estatística 1993-2023 .....	38
Tabela 2 - Parâmetros adotados para o óleo Fluibrax 400 .....	40
Tabela 3 - <i>Restart File</i> : vazões adotadas para as condições de contorno .....	54

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS POR DERRAMAMENTOS DE ÓLEO .....	19
2.2 PANORAMA DOS MODELOS PARA DERRAMAMENTO DE ÓLEO .....	22
<b>3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DO ÓLEO</b> .....	<b>24</b>
3.1 EQUAÇÕES GERAIS E PROCESSO DE CÁLCULO .....	25
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	29
4.2 COMPILAÇÃO DE DADOS .....	36
4.3 HIPÓTESES ACIDENTAIS E CRITÉRIOS DE RESPOSTA .....	41
4.4 MODELOS UTILIZADOS .....	44
4.5 CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....	52
4.6 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS .....	58
<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>65</b>
5.1 CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA .....	65
5.2 TEMPO DE MODELAGEM .....	67
5.3 CENÁRIOS DE VAZAMENTO DE ÓLEO E AÇÕES DE RESPOSTA .....	68
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>106</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>109</b>
<b>APÊNDICE I – FUNDAMENTOS DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA</b> .....	<b>112</b>
<b>APÊNDICE II – CENÁRIOS MODELADOS</b> .....	<b>128</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Motivada por graves acidentes ambientais e pelos avanços da computação nos últimos 30 anos, a modelagem matemática aplicada à predição da dispersão e transporte de vazamentos de óleo em corpos hídricos evoluiu significativamente no período. Modelos mais avançados têm demonstrado capacidade de capturar satisfatoriamente as principais trajetórias de transporte e destino para derramamentos, sendo amplamente validados em comparação com eventos reais, como a explosão da plataforma Deepwater Horizon, no Golfo do México em 2010, como aponta (SPAULDING, 2017). Acidentes deste tipo fizeram também evoluir a legislação ambiental em vários países. No Brasil, a Resolução Conama nº 398/2008 torna obrigatória a elaboração de Planos de Emergência específicos por empreendimentos em áreas oceânicas suscetíveis a derramamentos de óleo, inclusive com a necessidade de modelagem matemática como instrumento para a análise de vulnerabilidade e planejamento das ações de resposta (CONAMA, 2008).

Por outro lado, há uma relativa carência de pesquisas e trabalhos voltados à avaliação da sensibilidade e vulnerabilidade ao óleo em ambientes fluviais (BENEDITTI, 2015), embora derramamentos de óleo em águas interiores tenham potencial para causar impactos tão grandes ou maiores que os ocorridos em ambientes costeiros, devido à sua rápida distribuição espacial, menor diluição e dispersão, e alto potencial para interação do óleo com particulados e sedimentos presentes na água (KVOČKA et al., 2021). Apesar de envolverem volumes menores, tais vazamentos são muitas vezes mais frequentes, potencialmente próximos de áreas habitadas, de atividades econômicas sensíveis e de mananciais de abastecimento, podendo envolver riscos mais significativos do que aqueles observados em ambiente oceânico, conforme apontado por (COMERMA et al., 2021).

Considerando, portanto, que é necessário evidenciar que a possibilidade de contaminação por hidrocarbonetos em nossos rios e reservatórios é um risco a ser enfrentado, e que isso deve ser feito lançando mão de todas as ferramentas disponíveis para a prevenção e planejamento de atuação em caso de desastres, torna-se relevante testar o uso de aplicativos de modelagem cujo desenvolvimento – mesmo que não voltado prioritariamente para ocorrências em águas interiores, possa abarcar características importantes deste tipo de ambiente. A partir de dados como morfologia e batimetria, combinado com informações de velocidade do vento e dados



hidrológicos de vazão e nível dos rios e reservatórios, além de informações sobre os tipos e características dos óleos mais utilizados, softwares de modelagem matemática como o DELFT3D, MIKE, SisBAHIA, possuem módulos ou podem permitir adaptações capazes de aplicar algoritmos RANS<sup>2</sup> e lagrangeanos, que simulam respectivamente a hidrodinâmica e o transporte de partículas.

Avaliando estas ferramentas e lançando mão de uma delas, o DELFT3D, este trabalho apresenta um estudo envolvendo a modelagem matemática de um possível vazamento de óleo em usina hidrelétrica (UHE). Tais empreendimentos, tanto tem relação intrínseca com o leito do rio, quanto possuem equipamentos com grandes volumes de óleo, seja em transformadores, mancais de turbinas e vertedouros, sistemas de resfriamento, entre outros. UHEs possuem, portanto, o risco potencial de lançar diretamente na água dezenas de milhares de litros de contaminantes, como óleos minerais isolante ou lubrificante, o que torna essencial que detenham sistemas de contenção adequados e um robusto planejamento de resposta a emergências que atinjam a água.

Adotou-se como objeto de estudo um potencial vazamento na Usina Hidrelétrica Governador Ney Aminthas de Barros Braga (UHE GNB – também conhecida como UHE Segredo), segunda maior usina da COPEL em potência instalada, localizada na bacia do Rio Iguaçu, Estado do Paraná, considerando que a mesma passou por um acidente significativo em 2015, cujo detalhamento será feito no Capítulo 4.1. Assim, este trabalho busca estabelecer metodologia replicável a outros empreendimentos, considerando a possibilidade de adoção da modelagem matemática como ferramenta tanto para aprimorar as estratégias de planejamento como para a ação rápida em resposta a eventuais ocorrências.

Espera-se evidenciar diferenças, similaridades e adaptações eventualmente necessárias para permitir a aplicação de ferramentas computacionais para a modelagem de derramamentos de óleo em águas interiores, de modo que a mesma possa ser adotada satisfatoriamente a fim de prever cenários críticos e auxiliar na definição de logística, materiais e recursos necessários para a contenção e

---

<sup>2</sup> RANS refere-se ao acrônimo de “Reynolds-Averaged Navier Stokes” equations: Equações de Navier Stokes promediada por Reynolds

saneamento de ocorrências, buscando a efetividade relatada para ocorrências em ambiente oceânico.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho busca explorar o uso do DELFT3D como ferramenta operacional para utilização no planejamento e resposta a emergências em empreendimentos hidrelétricos em que, uma vez estabelecido um conjunto de condições mais prováveis para características como batimetria, vazão, velocidade do vento, tipo e volume de contaminantes, seja possível avaliar preliminarmente os cenários mais críticos para a dispersão dos contaminantes e, para estas mesmas condições, dimensionar as ações de resposta.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Simular o transporte e concentrações de contaminação por óleo a partir de um vazamento hipotético em usina hidrelétrica;
- Avaliar as concentrações calculadas para diferentes cenários, comparando com os limites da legislação;
- Estudar a viabilidade de adotar ferramentas para uma situação de acidente real em curso, que permita a modelagem rápida sob demanda, conforme sejam obtidos dados de campo;
- Estabelecer critérios para realizar uma análise de sensibilidade e vulnerabilidade ambiental das áreas potencialmente atingidas;
- Implementar cenários de modelagem com a adoção de medidas de combate à ocorrência, como barreiras de contenção, materiais absorventes, *skimmers*, entre outros, buscando o saneamento da emergência ambiental.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordados o contexto geral dos impactos socioambientais e o panorama dos modelos matemáticos relacionados a derramamentos de óleo atualmente utilizados.

### 2.1 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS POR DERRAMAMENTOS DE ÓLEO

#### 2.1.1 Contexto Geral

O petróleo e seus derivados têm um histórico de uso pela humanidade que remonta às primeiras civilizações, havendo registros milenares de sua utilização por povos desde a Mesopotâmia, Egito, Pérsia e China, com usos variados desde a pavimentação, calafetação de construções, aquecimento, iluminação, uso medicinal, impermeabilização de embarcações, entre outros (CRAIG, 2020). Mas foi a partir do século XIX que o uso do petróleo deu um salto para vir a tornar-se uma das maiores fontes de energia para a humanidade no século XX.

Avanços tecnológicos tais quais as descobertas nos processos de refino a partir do carvão mineral e do xisto em 1850; o início da exploração de poços de petróleo - tendo Edwin Drake como pioneiro nos EUA em 1859; e o advento da “era da propulsão mecânica” a partir da invenção dos motores a explosão; levaram o petróleo a adquirir uma importância econômica e geopolítica sem precedentes na história da humanidade. Muito embora o combate às mudanças climáticas tenha colocado em evidência a necessidade de substituição de combustíveis fósseis como o petróleo por fontes de energia que possam reduzir as emissões de gases do efeito estufa, em 2021 o petróleo ainda respondia por 31% do consumo de energia mundial (BP, 2022).

Em par com seu papel estratégico, o uso de hidrocarbonetos também protagonizou alguns dos piores desastres ambientais causados pelo ser humano.

Somente no Golfo do México, dois acidentes ocupam o 1º e 2º lugares entre os maiores derramamentos de petróleo da história. Em 1979, o poço Ixtoc I despejou um volume estimado em 3,3 milhões de barris (CORREA, 2010), superado apenas pela tragédia causada pela explosão e afundamento da plataforma Deepwater Horizon, em 2010, estimada em 4,9 milhões de barris de petróleo (USCG, 2010). Também como pano de fundo de diversas guerras e disputas geopolíticas ao longo do último século, um desastre simbólico envolvendo o petróleo foi o ocorrido no Golfo Pérsico em 1991,

durante a Guerra do Golfo, quando 4 milhões de barris de petróleo foram propositalmente lançados no mar por forças iraquianas, a pretexto de impedir um pouso na água de forças lideradas pelos EUA (ABCNews, 2010).

Em águas interiores, destacam-se as ocorrências relacionadas a oleodutos, como o incidente do Rio Kalamazoo em 2010, nos Estados Unidos da América, quando o rompimento de um duto lançou mais de 3 milhões de litros de óleo cru na água, causando danos em uma extensão de mais de 60 quilômetros a jusante do acidente (ZHU; GARCIA, 2015). No Brasil, tragédia semelhante ocorreu em 2000, a partir do rompimento do oleoduto Santa Catarina-Paraná (OSPAR), pertencente à Petrobrás, quando 4 milhões de litros de óleo cru foram lançados na bacia do Rio Iguaçu, com impactos ao longo de cerca de 100 quilômetros de extensão (PILCHOWSKI, 2003).

Nestas ocorrências e em centenas de outras situações relativamente menos graves, mas significativamente impactante para o meio ambiente, comunidades, empresas e entes públicos, a contenção e mitigação dos impactos dependem de uma atuação rápida e assertiva dos órgãos responsáveis, com a mobilização de recursos materiais específicos para este tipo de atividade e pessoal especializado para atuação emergencial. Desta forma, a capacidade de prever a dispersão de produtos químicos no corpo hídrico em emergências é fundamental para que a implementação das medidas ocorra nos locais mais efetivos, evitando retrabalhos, desperdício de materiais, impactos a áreas sensíveis, entre outros prejuízos ambientais e socioeconômicos.

### 2.1.2 Modelagem Aplicada a Derramamentos de Óleo em Águas Interiores

A partir dos anos 80, embora tenha havido um número crescente de pesquisas abordando a modelagem matemática de derramamentos de óleo, há prevalência de trabalhos voltados a ambientes oceânicos, e uma expressiva carência de pesquisas e trabalhos voltados à avaliação da sensibilidade e vulnerabilidade ao óleo em ambientes fluviais (BENEDITTI, 2015), cujas características demandam necessidades específicas para os modelos desenvolvidos, como já destacavam Yapa, Shen e Angamma, em artigo de 1994.

Evidentemente, a ocorrência de derramamentos de óleo em ambientes oceânicos tem historicamente uma capacidade significativamente maior de mobilizar

a atenção da mídia e da população em geral, dada a magnitude de acidentes ocorridos, os impactos ambientais com cenários de contaminação tomando conta de vastas regiões, mobilizando recursos humanos e materiais de grandes proporções.

Não por acaso, o mesmo pode ser observado também com relação à pesquisa acadêmica: dados de artigos científicos catalogados no banco de dados Scopus (2023) dão conta de que mais de 90% dos artigos relativos à modelagem matemática de vazamentos de óleo estavam direcionados a ambientes oceânicos, enquanto menos de 10% estariam associados a modelagem em águas interiores.

No entanto, embora derramamentos de óleo em águas interiores recebam atenção muito menor que derramamentos em oceanos, eles tendem a ocorrer mais frequentemente e possuem potencial de causar impactos tão grandes ou maiores, devido a sua rápida distribuição espacial, menor diluição e dispersão, e alto potencial para a interação do óleo com particulados e sedimentos presentes na água (KVOČKA; ŽAGAR; BANOVEC, 2021). A tendência de que ocorram próximo a centros urbanos, com atividades industriais, mananciais de abastecimento, atividades pesqueiras, e demais usos múltiplos, também amplifica os riscos de impactos à população, de forma que mesmo acidentes relativamente pequenos - em comparação com o rompimento de um casco de um grande navio cargueiro, podem incidir em graves prejuízos à população, às atividades econômicas, e aos ecossistemas da área atingida.

As principais diferenças de comportamento do óleo entre águas interiores e oceânicas, conforme apontado por Kvočka, Žagar E Banovec (2021) podem ser referentes à densidade do óleo, às forças de correnteza, à presença de estruturas hidráulicas que podem alterar o regime de escoamento, à possível presença de vegetação, com impacto significativo ao movimento da pluma de óleo, e à interação com o sedimento. Com relação à abordagem das modelagens, modelos para vazamentos em rios precisariam modelar velocidades de fluxo de forma mais detalhada, permitir a inclusão de morfologias complexas para simular realisticamente a interação do óleo com as margens, simular a propagação para condições de escoamento não-uniforme, detectar variações súbitas no nível da água, e permitir a modificação de dados de ventos, para representar corretamente seus efeitos na superfície da água.

## 2.2 PANORAMA DOS MODELOS PARA DERRAMAMENTO DE ÓLEO

De acordo com Spaulding (2017), a estrutura básica da geração atual de modelos que simulam derramamento de óleo, como OSCAR, SIMAP/OILMAP, GNOME/ADIOS, e outros, constituem-se em formulações que utilizam métodos Lagrangianos para os processos de transporte – advecção e dispersão, e algoritmos particulares para os processos de degradação. O método predominante para a predição do transporte é o *random walk*. Os campos de velocidade do fluxo hídrico são geralmente determinados por meio de modelos hidrodinâmicos, que podem ser bi ou tridimensionais, e modelos de vento e ondas bidimensionais, com foco em processos de transporte na superfície. Alternativamente, estes dados também podem ser obtidos por sistemas de medição de larga escala, como estações meteorológicas. Quanto aos algoritmos para os processos de degradação do óleo, estes tipicamente operam modelando a transferência de massa do óleo entre diferentes compartimentos ambientais (superfície, atmosfera, coluna d'água, leito ou margens/costas) ou mudando a composição ou características físicas do óleo (como densidade, viscosidade ou tensão interfacial). Muitas vezes estes algoritmos são empíricos, ou fundamentados em observações de campo e laboratório, porém com a limitação inerente à inviabilidade de avaliar o extenso número de possíveis situações de vazamentos de óleo. O óleo é geralmente caracterizado como um volume de um dado tipo (óleo cru, combustível, etc.), ou em termos de vários componentes, relacionados a sua destilação. Os modelos acompanham a distribuição da massa de óleo (total ou das frações - dissolvida, flutuante, etc) no espaço e tempo, a fim de permitir avaliar as áreas impactadas e onde este impacto é crítico para a dissolução, biodegradação e impacto aos ecossistemas.

O Quadro 1 apresenta um resumo da comparação entre as funcionalidades de 18 dos principais modelos de derramamento de óleo disponíveis, adaptado de Keramea (2021).



QUADRO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO

	CDOG	GNOME	OILMAPDEEP	SIMAP	OILMAP	TAMOC	OSCAR	MOTHY	OILTOX	POSEIDON	MEDSLIK	MEDSLIK-II	OILTRANS	OSERIT	MOHID	BLOSOM	OPENOIL	DELFT3D-PART
<b>Características gerais</b>																		
Código aberto		•				•						•	•		•		•	•
Transporte e degradação		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Modelo lagrangiano	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Modelo de transporte		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Pluma de campo próximo	•	•	•	•		•	•										•	
Transição de campo distante	•	•	•	•	•		•										•	
Modelo de superfície de óleo		•		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Pluma em subsuperfície	•	•	•	•		•	•				•						•	
Rastreamento retroativo		•		•	•			•			•	•		•	•	•	•	•
Componente estocástico		•		•	•		•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
Passo aleatório para difusão	•	•		•	•		•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
Banco de dados de óleo		•									•	•	•	•	•	•	•	
Dados batimétricos		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Ações de resposta		•	•	•	•		•	•			•	•	•	•	•	•	•	
Impacto ambiental				•		•	•							•	•			
Avaliação de danos				•			•							•				•
Pesquisa	•						•			•				•	•			•
<b>Transporte e degradação</b>																		
Advecção		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Espalhamento		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Difusão	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Adesão às margens		•		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Dispersão na coluna d'água		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Evaporação		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Emulsificação		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Dissolução		•	•	•		•	•						•		•			
Sedimentação				•	•		•	•	•	•	•	•			•			•
Biodegradação		•		•		•	•									•		•
Arraste do vento		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Mistura vertical turbulenta				•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•
Ressurgimento		•		•					•		•	•	•					•
Deriva de Stokes							•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•
Foto-oxidação																		•

FONTE: Adaptado de KERAMEA (2021).

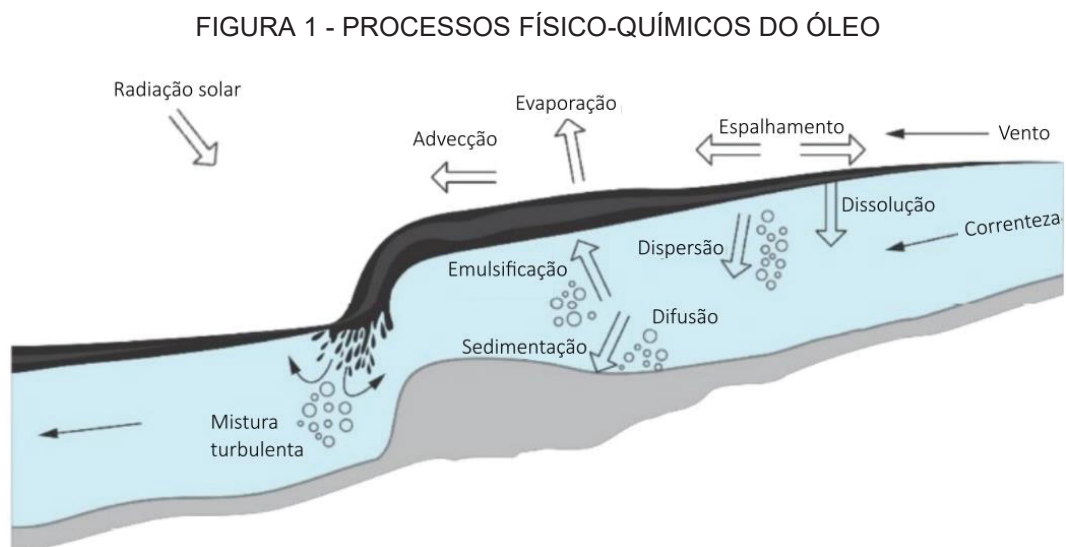
Nesta comparação, é observado que embora os modelos variem bastante em suas especificidades, todos são criticamente dependentes de dados meteorológicos e hidrológicos, e que a capacidade de importar estes dados diretamente de bases externas constitui um diferencial que é atendido apenas por alguns dos modelos no estado-da-arte, com a finalidade de uso operacional em atividades de resposta a uma emergência. Outra crítica diz respeito à lacuna da maior parte dos modelos quanto a algoritmos para o cálculo de processos como dissolução, mistura vertical, foto-oxidação e biodegradação do óleo.

### 3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DO ÓLEO

O transporte e a degradação do óleo na água dependem de um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos relacionados tanto ao tipo de óleo quanto ao ambiente atingido, incluindo condições meteorológicas (como ondas, ventos, correntes, radiação solar, etc), e características da descarga acidental - instantânea, contínua, superficial, profunda (KERAMEA et al., 2021). O destino e comportamento do óleo podem ser influenciados por processos físico-químicos de degradação, como espalhamento, evaporação, emulsificação, dissolução, foto-oxidação, biodegradação e sedimentação, a par de processos físicos de transporte, como mistura, dispersão, ressurgimento.

A Figura 1 representa de forma sistemática os processos mais relevantes, conforme apontado por Yapa, Shen e Angamma (1994, apud KVOČKA; ŽAGAR; BANOVEC, 2021):

- a) advecção devido à correnteza e ao vento;
- b) espalhamento superficial;
- c) mistura turbulenta sobre o leito do rio;
- d) interação do óleo com particulados e sedimentos;
- e) interação com as margens.
- f) processos de degradação, como evaporação, emulsificação, dissolução e oxidação;



FONTE: Adaptado de KVOČKA; ŽAGAR; BANOVEC (2021)

A fim de representar esta complexidade de processos, na maioria dos modelos a representação numérica de vazamentos de óleo adota uma abordagem lagrangeana, cujas equações e processos gerais de cálculo são descritos a seguir.

### 3.1 EQUAÇÕES GERAIS E PROCESSO DE CÁLCULO

Usualmente, o movimento do óleo em ambiente aquático, em sua parcela advectiva é atribuído ao campo de fluxo médio, enquanto a parcela relativa à dispersão é causada por flutuações turbulentas do escoamento. Vários processos físicos e químicos de degradação atuam sobre o óleo, enquanto ele se movimenta. A equação geral para a variação da concentração de um traçador  $C(x, y, z, t)$ , com unidade de massa por volume, misturado no ambiente aquático é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (\vec{K} \nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t), \quad (3.1)$$

onde  $\vec{U}$  representa a velocidade média do curso hídrico,  $\vec{K}$  é o tensor de difusividades que parametriza os efeitos da turbulência, e  $r_j(C)$  incorpora as  $M$  modificações que afetam a concentração em função de processos de transformação física, química e biológica (DE DOMINICIS et al., 2013).

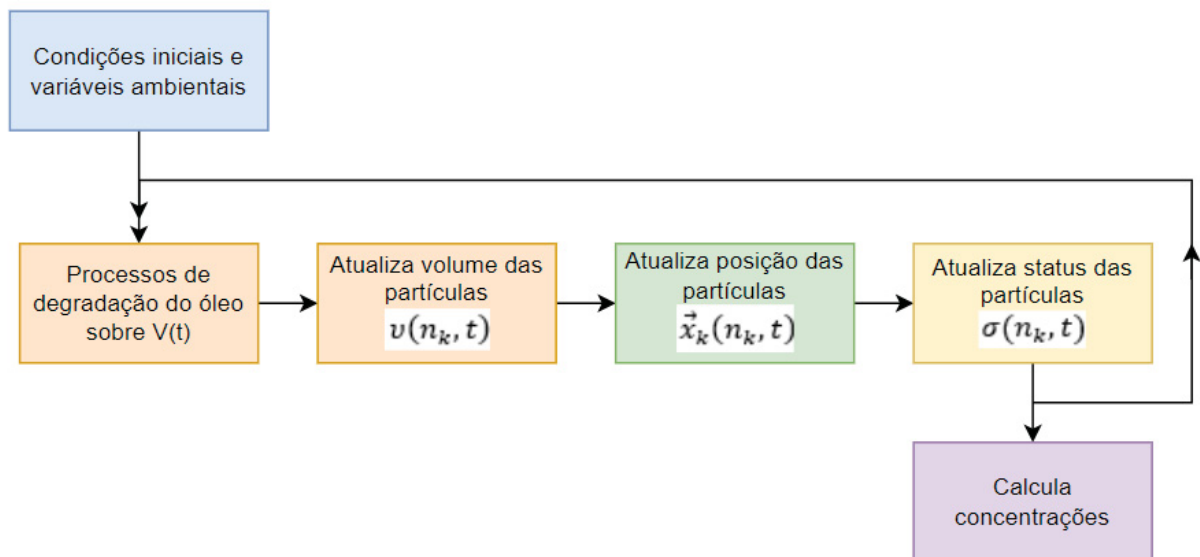
Algumas premissas fundamentais são assumidas nesse processo de cálculo lagrangeano. Uma das mais importantes é a de que as partículas constituintes do óleo não influenciam os processos e a hidrodinâmica da água. Comumente esta premissa se verifica – exceto para uma condição em que o volume de óleo fosse muito grande em relação ao corpo hídrico, como um vazamento de milhares de litros que atinja um pequeno córrego, por exemplo, ou em uma condição em que a camada de óleo pudesse modificar as interações entre ar-água e o arraste superficial pelo vento. Outra premissa é a de que as partículas constituintes do modelo se movem através de deslocamentos infinitesimais sem inércia e sem interação entre si. Após cada deslocamento infinitesimal o volume associado a cada partícula é modificado devido aos processos físico-químicos atuantes na mancha como um todo (e não em cada partícula individualmente). Aplicando estas premissas, a equação (3.1) pode ser dividida em duas:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^M r_j(x, C_1(x, t), t) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\vec{U} \cdot \nabla C_1 + \nabla \cdot (\vec{K} \nabla C_1) \quad (3.3)$$

Onde a taxa de mudança de  $C_1$  é a variação da concentração de óleo devido somente aos processos de intemperismo, enquanto a taxa final de mudança de  $C$  é dada pela equação de advecção-difusão atuando em  $C_1$ . A Figura 2 resume o processo geral de cálculo utilizado pelos modelos de transporte de óleo a partir das premissas adotadas.

FIGURA 2 – PROCESSO GERAL DE CÁLCULO – MODELOS DE ÓLEO



FONTE: Adaptado de DE DOMINICIS et al. (2013)

Nos modelos em geral, a pluma de óleo é discretizada em  $N$  partículas, cada qual podendo ser caracterizada por um vetor de posição  $\vec{x}_k(n_k, t)$ , um volume  $v(n_k, t)$  e um índice de status da partícula  $\sigma(n_k, t)$ , onde  $n_k$  é o número identificador da partícula e  $k = 1, \dots, N$ .

### 3.1.1 Atualização do volume das partículas

No tempo inicial  $t_0$ , todas as partículas recebem possuem uma fração do volume total, conforme o número de partículas definido nas configurações iniciais do modelo. Após a aplicação das equações referentes aos processos de degradação do óleo, geralmente por meio de fórmulas empíricas que emulam os processos de transformação atuando sobre a pluma de óleo como um todo, como evaporação, emulsificação, biodegradação, etc., então o volume do óleo é atualizado, seguindo-se a atualização do volume das partículas, que de modo simplificado é representado por:

$$v(n_k, t) = \frac{V(t)}{N}, \quad (3.4)$$

onde  $v(n_k, t)$  é o volume da partícula  $n_k$  no tempo  $t$ ,  $V(t)$  é o volume total de óleo.

### 3.1.2 Atualização da posição das partículas

Em seguida, pode-se resolver a Equação (3.3) aplicando o formalismo lagrangeano. Considerando a posição da partícula (3.5), a alteração da sua posição em cada passo temporal pelos processos de advecção-difusão pode ser calculada por um método progressivo – como representado em (3.6) – como deslocamentos infinitesimais  $d\vec{x}_k(n_k, t)$ , que possuem uma parcela determinística, definida pelo campo de velocidades calculado nos modelos hidrodinâmico, de vento e ondas ( $\vec{U}(\vec{x}_k, t)dt$ ); e uma parcela estocástica  $d\vec{x}'_k(t)$ , que representa os efeitos de turbulência e de movimento browniano, calculados utilizando um passo aleatório, comumente chamado de *random walk*, baseado no Método de Monte Carlo (RUBINSTEIN; KROESE, 2016). O detalhamento sobre o cálculo da parcela estocástica é apresentado em 4.4.1.

$$\vec{x}_k(n_k, t) = (x_k(n_k, t), y_k(n_k, t), z_k(n_k, t)); \quad (3.5)$$

$$\vec{x}_k(n_k, t + 1) = \vec{x}_k(n_k, t) + d\vec{x}_k(n_k, t); \quad (3.6)$$

$$d\vec{x}_k(n_k, t) = \vec{U}(\vec{x}_k, t)dt + d\vec{x}'_k(t). \quad (3.7)$$

### 3.1.3 Atualização do status das partículas

O status da partícula define basicamente em qual compartimento do modelo a partícula se encontra após cada deslocamento (na superfície, na margem, dispersa na coluna d'água, ou no leito), definindo se a partícula continua no corpo hídrico e a que processos estará sujeita no passo temporal seguinte – por exemplo, uma partícula que atingiu a margem poderá não ser mais remobilizada para o corpo hídrico, enquanto outra que está dispersa na coluna d'água não será sujeita aos efeitos de ventos e ondas, mas somente da correnteza, e ainda apenas uma partícula na superfície da água pode estar sujeita ao processo de evaporação. O status da partícula é atualizado conforme o compartimento em que a partícula se localiza após o deslocamento. Esta designação pode variar conforme cada modelo. Por exemplo, no MedslikII, o índice do status para partículas na superfície é  $\sigma(n_k, t) = 0$ , na coluna d'água  $\sigma(n_k, t) = 1$ , no leito  $\sigma(n_k, t) = 2$ , e nas margens  $\sigma(n_k, t) = -L_i$ , onde  $L_i$  designa o segmento em que a partícula foi retida (DE DOMINICIS et al., 2013).

### 3.1.4 Cálculo das concentrações do óleo

Cumpridas estas etapas, a concentração de óleo no modelo é então calculada considerando as partículas presentes em cada célula da grade de cálculo, e seu volume respectivo.

Em paralelo, os processos seguem afetando a pluma de contaminante e atualizando o volume de óleo, a posição e o status das partículas enquanto durar a simulação. No tópico 4.4.1 serão tratadas as formulações utilizadas pelo DELFT3D-PART.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo está organizado em 3 etapas principais:

1. Caracterização da área de estudo e compilação de dados, verificação de consistência e análise estatística, com o uso de plataformas abertas como SNIRH/ANA, bem como dados de monitoramentos hidrológico e de qualidade da água da Copel GeT, necessários para a construção e validação dos modelos hidrodinâmicos.
2. Construção e calibração do modelo hidrodinâmico, utilizando o módulo DELFT3D-FLOW, software de modelagem hidrodinâmica e de transporte, gratuito e de código aberto;
3. Implementação e verificação da modelagem – utilização do módulo DELFT3D-PART, para aplicação do *particle tracking* e comparação de cenários tendo como objeto de estudo a UHE GNB.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Em 15 de abril de 2015 uma falha na Unidade Geradora 4 (UG4) da Usina Hidrelétrica Governador Ney Aminthas de Barros Braga (UHE GNB) causou um curto-circuito seguido por danos estruturais a 2 transformadores elevadores da usina, cada um com capacidade de armazenamento de 23.600 litros de óleo mineral isolante naftênico. Com o dano estrutural ocorreu vazamento do óleo, que em sua maior parte ficou retido pelos sistemas de contenção da usina. Porém, uma parte do óleo acabou projetada para área fora da bacia de contenção, sendo carregada pelo sistema de drenagem pluvial até o rio Iguaçu. Estima-se que aproximadamente 3.000 litros de óleo tenham chegado ao rio (cerca de 6% do volume total), na área à jusante da barragem (COPEL, 2015).

Assim que identificada a ocorrência, foram acionados os planos de ação de emergência da usina, bem como mobilizadas as equipes de meio ambiente para atuar na contenção e retirada do óleo. A Figura 3 ilustra a região atingida onde se deram as operações de resposta, que exigiram a mobilização de dezenas de profissionais, entre empregados da Copel, terceiros, membros da Defesa Civil e da empresa concessionária da UHE Salto Santiago, cujo reservatório fica logo à jusante da UHE GNB.

FIGURA 3 - RIO IGUAÇU, UHE GNB - ÁREA ATINGIDA PELA EMERGÊNCIA EM 2015



FONTE: O Autor (2023)

Ao longo de vários dias as equipes trabalharam na contenção e limpeza do óleo disperso no corpo hídrico, demandando ações de implantação de barreiras de contenção e materiais absorventes para retirada do óleo por uma distância de aproximadamente 12km à jusante da UHE GNB. Além disso, a ocorrência demandou uma grande quantidade de recursos materiais, representando um volume significativo de gastos diretos com as ações emergenciais, além da necessidade de paralisação temporária da geração de energia da UHE GNB, e também das usinas UHE Salto Santiago, à jusante da ocorrência, e UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Neto (GBM), a montante do reservatório de GNB.

Eventos similares já ocorreram em diversos empreendimentos do Setor Elétrico, tanto por falha ou acidentes em equipamentos com óleo, inundações por eventos de cheia, tombamentos de veículos em estradas no entorno de empreendimentos, entre outros possíveis acidentes, relacionados ou não à operação do empreendimento.

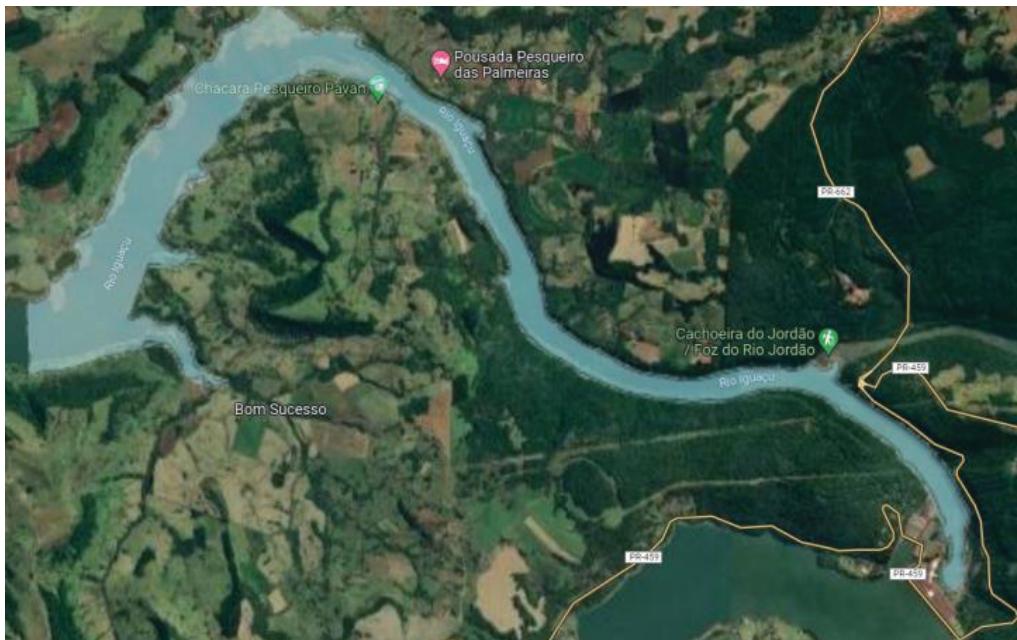
Apesar de poder ser classificada como uma descarga de óleo de pequenas proporções – se considerados os critérios da Resolução Conama 398/2008, mais amplamente expostos no Capítulo 4.3, a ocorrência de 2015 na UHE GNB expôs a necessidade de um planejamento mais aprofundado a respeito desse tipo de

contingência, e dada a disponibilidade de um conjunto de dados que permite uma avaliação da coerência dos resultados a serem obtidos na modelagem da dispersão do óleo, considera-se que a área de estudo permite uma boa base para os objetivos desta pesquisa.

#### 4.1.1 Informações gerais da área de estudo

A área de estudo compreende a região da barragem da UHE GNB, até uma distância de 12km a partir da barragem, compreendendo um trecho de rio e remanso do reservatório da UHE Salto Santiago. As modelagens demonstraram, posteriormente, que mesmo para as condições de maior vazão modeladas as concentrações mais significativas de óleo não ultrapassam essa extensão de 12km nas primeiras 24 horas, conforme será demonstrado no Capítulo 5.2, de forma que esta área pode ser considerada apropriada para o escopo deste estudo.

FIGURA 4 – ÁREA DE ESTUDO: 12KM A PARTIR DA UHE GNB



FONTE: O Autor (2023)

#### 4.1.2 Jusante da UHE GNB e Derivação do Rio Jordão

Inaugurada em 29 de setembro de 1992, a Usina Governador Ney Aminthas de Barros Braga, inicialmente denominada Usina Segredo, teve como marco fundamental o primeiro Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do Brasil para uma usina hidrelétrica, o qual foi elaborado e aprovado em 1987 (COPEL, 2023), inaugurando

voluntariamente a implantação deste requisito da Política Nacional de Meio Ambiente, Lei Federal nº 6938/1981, regulamentada pela Resolução Conama nº 001/1986, através da qual os órgãos ambientais passaram a ter a atribuição de exigir o RIMA nos processos de licenciamento (CONAMA, 1986).

FIGURA 5 – VISTA PANORÂMICA UHE GNB



FONTE: Copel (2023)

QUADRO 2 – INFORMAÇÕES GERAIS UHE GNB

Nome		Usina Hidrelétrica Governador Ney Aminthas de Barros Braga – UHE GNB					
Endereço		Rodovia PR 459/662 Reserva do Iguaçu – PR					
Municípios atingidos		Mangueirinha-PR (22,75Km <sup>2</sup> ), Reserva do Iguaçu (30,44Km <sup>2</sup> ), Bituruna (3,44Km <sup>2</sup> ), Cel. Domingos Soares (22,51Km <sup>2</sup> ), Pinhão (5,74Km <sup>2</sup> )					
Potência instalada		1260 MW					
Altura da Barragem		145 m					
Comprimento da barragem		700 m					
Coordenadas em UTM		E: 388.550 N:7.147.050					
Área do reservatório		8488 ha					
Níveis							
Montante Máximo	607 m	Montante Mínimo	602 m	Jusante Máximo	497 m	Jusante Mínimo	492 m
Vazões turbinadas							
Afluente Mínima	286 m <sup>3</sup> /s	Afluente Normal	737 m <sup>3</sup> /s	Afluente Máxima	1820 m <sup>3</sup> /s		

FONTE: Copel (2023)



#### 4.1.3 Montante da UHE Salto Santiago

A Usina Hidrelétrica Salto Santiago localiza-se no curso médio do rio Iguaçu, entre os municípios Rio Bonito do Iguaçu e Saudade do Iguaçu, a jusante da UHE GNB e a montante da UHE Salto Osório, e teve sua operação iniciada em 1980. A apresenta dados gerais do empreendimento.

QUADRO 3 - INFORMAÇÕES GERAIS UHE SALTO SANTIAGO

Nome		Usina Hidrelétrica Salto Santiago					
Empreendedor		ENGIE Brasil Energia S.A.					
Endereço		Urutu, Saudade do Iguaçu - PR					
Municípios atingidos		Rio Bonito do Iguaçu-PR (Km <sup>2</sup> ), Porto Barreiro (30,44Km <sup>2</sup> ), Virmond (3,44Km <sup>2</sup> ), Candói (22,51Km <sup>2</sup> ), Foz do Jordão (5,74Km <sup>2</sup> ), Saudade de Iguaçu-PR, Chopinzinho-PR, Mangueirinha-PR					
Potência instalada		1420 MW					
Altura da Barragem		80 m					
Comprimento da barragem		1400 m					
Coordenadas em UTM		E: 388.550 N:7.147.050					
Área do reservatório		20800 ha					
<b>Níveis</b>							
<b>Montante Máximo</b>	506 m	Montante Mínimo	481 m	Jusante Máximo	397 m	Jusante Mínimo	389 m

FONTE: Engie (2023)

A Figura 6 apresenta uma vista panorâmica da barragem da UHE Salto Santiago, localizada a cerca de 85km da barragem da UHE GNB, pelo rio Iguaçu.

FIGURA 6 - VISTA PANORÂMICA DE PARTE DA UHE SALTO SANTIAGO

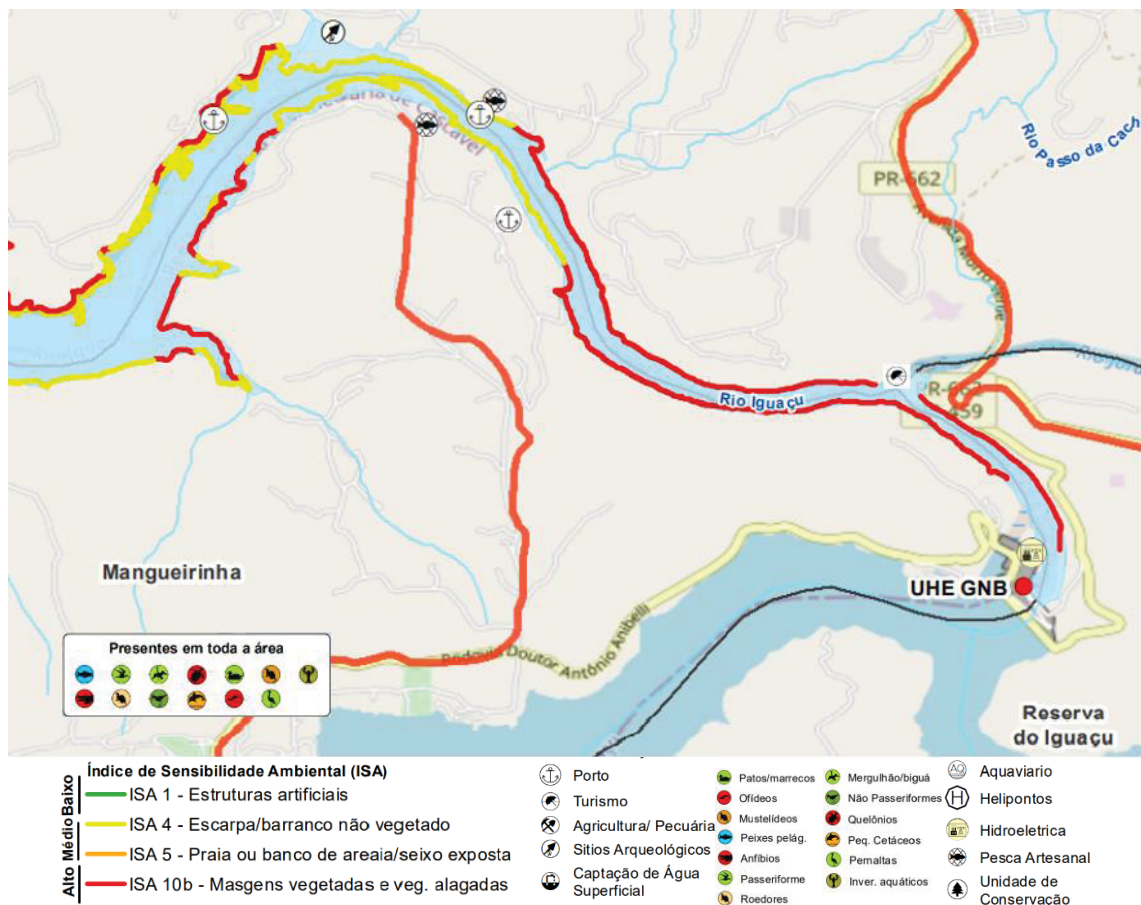


FONTE: Engie (2023).

#### 4.1.4 Vulnerabilidade Ambiental da área de estudo

Para avaliar a vulnerabilidade desta área, faz-se necessário mapeá-la em termos de sensibilidade socioambiental a tensores antrópicos, e sua susceptibilidade ao vazamento de óleo, de forma que o cruzamento entre estas duas informações determina a vulnerabilidade (ROCHA, 2008). Tomando como base as “Especificações Técnicas para Elaboração de Cartas de Susceptibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo” do Ministério do Meio Ambiente - (MMA, 2004), a carta de vulnerabilidade apresentada na Figura 7 ilustra resultado de estudos feitos pela Copel GeT e Ambipar (2023), destacando pontos de vulnerabilidade socioeconômica – devido à existência de atividades de turismo, piers, pesca artesanal, sítios arqueológicos, além da própria hidrelétrica; e vulnerabilidade ambiental, caracterizadas por estruturas, escarpas e barrancos não vegetados, margens vegetadas, etc., além de espécies animais potencialmente presentes na área.

FIGURA 7 - CARTA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL NA JUSANTE DA UHE GNB



FONTE: Adaptado de Copel e Ambipar (2023)

A carta demonstra que boa parte da área potencialmente atingida na região possui Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) Alto, composto por margens vegetadas como a ilustrada na Figura 8. Secundariamente, observam-se áreas com ISA médio, associado a escarpas e barrancos não vegetados, como os representados na Figura 9. Também são destacados os pontos com atividades de turismo, como na cacheira da foz do rio Jordão, pesca artesanal, e piers/portos para atividades de lazer e pesca (ver Figura 10).

Estas áreas mais sensíveis devem ser tidas como prioridade no planejamento de resposta à emergência, buscando reduzir a susceptibilidade das mesmas ao derramamento de óleo, e com isso diminuindo a vulnerabilidade socioambiental na área de estudo.

FIGURA 8 - MARGENS VEGETADAS FORMADAS POR MATA RIPÁRIA NO RIO IGUAÇU



FONTE: Copel e Ambipar (2023)

FIGURA 9 - ESCARPAS E BARRANCOS NÃO VEGETADOS NO RIO IGUAÇU



FONTE: Copel e Ambipar (2023)



FIGURA 10 - PIERS, ATIVIDADES DE PESCA E TURISMO NA JUSANTE DA UHE GNB



FONTE: Copel e Ambipar (2023)

## 4.2 COMPILAÇÃO DE DADOS

Para a construção do modelo hidrodinâmico que servirá de base ao modelo de transporte do óleo, foi realizado o levantamento de dados que permitam representar o mais fielmente possível as condições do ambiente a ser modelado, envolvendo a obtenção e tratamento de informações relacionadas à batimetria, vazões, condições climáticas, ventos, etc. A seguir, são descritas as atividades para a obtenção e formatação destas informações, a fim de permitir seu uso no aplicativo de modelagem.

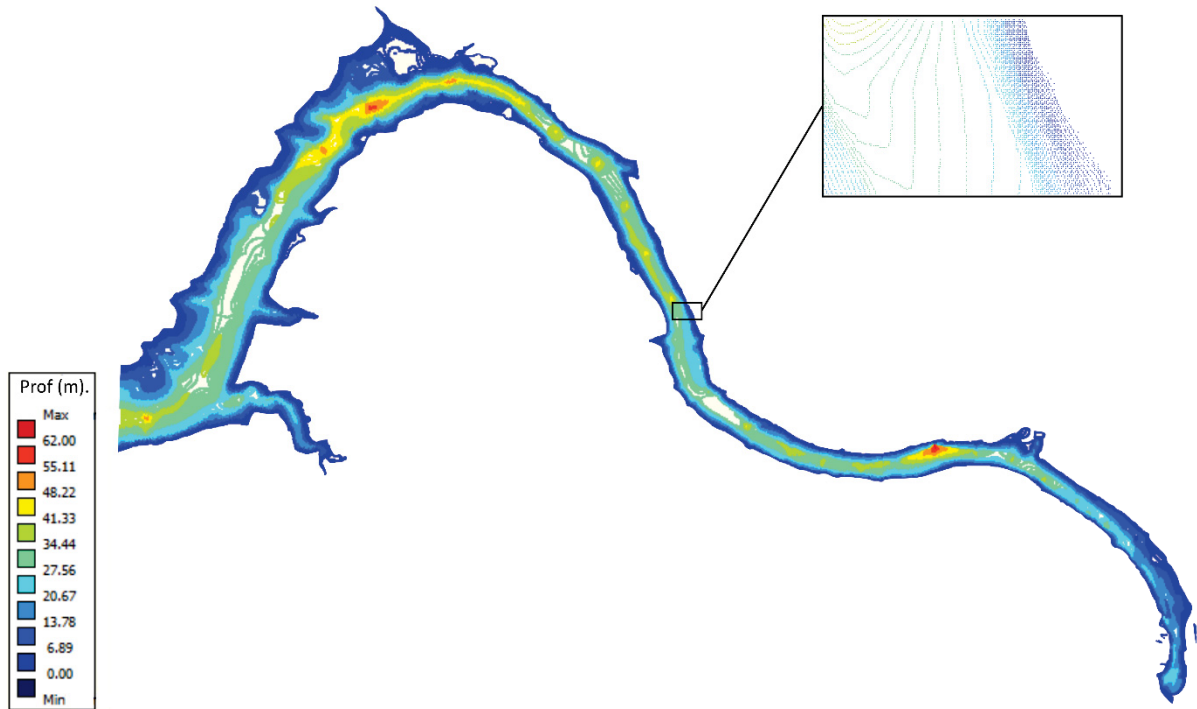
### 4.2.1 Batimetria e morfologia

Os dados brutos de batimetria e morfologia do reservatório no trecho a jusante da UHE GNB, pertencente à área da UHE Salto Santiago foram obtidos através da plataforma do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2022). Os mapas de morfologia e batimetria mais recentes da jusante da UHE GNB foram produzidos e disponibilizados pelo empreendedor na plataforma da ANA em 2019. Os dados foram obtidos em formato Geodatabase, e convertidos para a leitura no DELFT3D utilizando o módulo Quickplot, da Deltares. O trecho modelado neste estudo compreende uma extensão de 12km a jusante da UHE GNB, correspondente à região em que se concentraram as atividades de contenção do óleo na ocorrência de 2015. A Figura 11 ilustra os dados de batimetria transformados de curvas de nível em pontos de profundidade, para serem utilizados



no processo de construção da grade do modelo, utilizando os módulos RGFGGrid e Quickin, do DELFT3D.

FIGURA 11 - PONTOS DE BATIMETRIA UTILIZADOS NO RGFGGRID



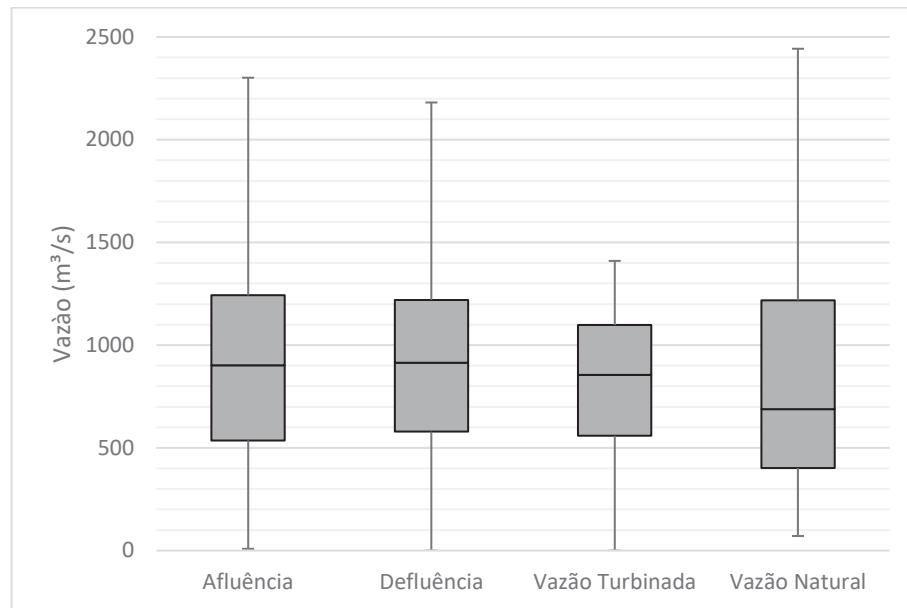
FONTE: O Autor (2023)

#### 4.2.2 Vazões

As vazões para a região de estudo foram obtidas de dados históricos do monitoramento registrados no site do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da Agência Nacional de Águas (SAR-ANA).

Analisando-se os dados históricos de vazões da UHE GNB, considerando vazões médias diárias afluentes, defluentes, turbinadas e natural para a usina, registradas no SAR-ANA entre 1993 e 2023 (ANA, 2023), foi elaborado o diagrama de caixas apresentado na Figura 12, representando os quartis referentes à distribuição dos dados, cujos valores calculados estão discriminados na Tabela 1. Neste trabalho, serão considerados cenários representando situações de cheia, mediana e de seca, utilizando respectivamente vazões próximas aos valores representativos do 3º, 2º e 1º quartil para vazão turbinada.

FIGURA 12 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE VAZÕES UHE GNB 1993-2023



FONTE: O Autor (2023)

TABELA 1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA 1993-2023

Valor	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Vazão turbinada (m³/s)	Vazão natural (m³/s)
Mínimo	8,6	0,0	0,0	70,8
Quartil 1	536,4	579,3	559,0	401,8
Mediana	901,3	915,0	855,0	688,0
Quartil 3	1242,4	1220,0	1098,0	1218,2
Máximo	7477,5	7670,0	1410,0	9360,1
Max(ls)	2301,6	2181,1	1410,0	2442,7
Min(li)	8,56	0	0	70,84

FONTE: O Autor (2023)

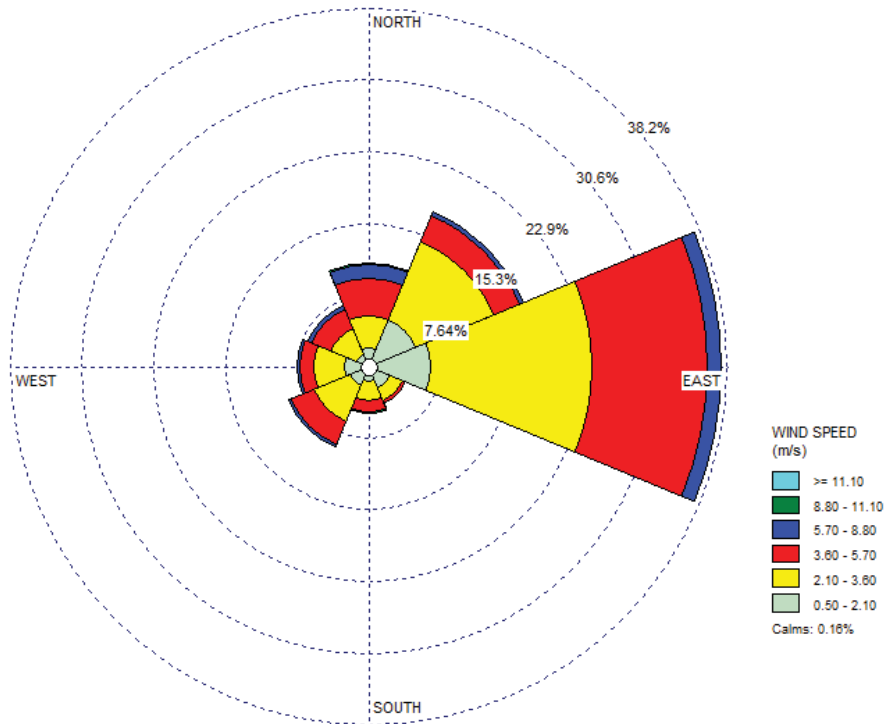
#### 4.2.3 Direção, Velocidade e Arraste do vento

A direção e velocidade do vento é muito importante na dispersão de materiais flutuantes como o óleo, devido à sua potencial predominância no comportamento hidrodinâmico na camada superior do corpo hídrico. Dados obtidos da estação meteorológica de Laranjeiras do Sul/PR (INMET, 2022), referentes ao período entre 2017 e 2022, foram trabalhados com auxílio do aplicativo WRPLOT, para obtenção da velocidade média e predominância da direção do vento a 10m da superfície.

Os resultados demonstram que na região os ventos predominantes ocorrem de E para W, como ilustra a Figura 13. A velocidade média calculada pelo aplicativo, a partir dos dados históricos, é de 3,06m/s para o ano.

Optou-se por adotar, nos modelos a serem realizados, a velocidade média de 3m/s, com direção predominante de E-W, e coeficiente de arraste do vento<sup>3</sup> de 1%. Outros cenários de direção do vento e coeficiente de arraste foram testados e estão descritos no tópico 5.3.

FIGURA 13 – ROSA DOS VENTOS ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE LARANJEIRAS DO SUL/PR – VENTOS PREDOMINANTES



FONTE: O Autor (2023)

#### 4.2.4 Características do óleo

O óleo utilizado nos transformadores da UHE GNB é o óleo isolante de base naftênica, classificado como “Óleo Mineral Isolante Tipo A” pela Resolução nº 900/2022 da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2022), atendendo também a norma ASTM D3487 – *Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus*. O óleo utilizado na unidade, denominado como Fluibrax 400, comercializado pela Petrobrás Distribuidora S.A., de acordo com sua Ficha de

<sup>3</sup> Coeficiente de arraste do vento: percentual que corrige a velocidade do vento medida a 10m para a velocidade na superfície.

Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ (PETROBRAS, 2021) possui viscosidade cinemática variando entre 385 a 415 cSt a 40°C.

$$SG = \frac{\rho_{oleo}}{\rho_{H_2O}} = \frac{920}{1000} = 0.92$$

$$API_{gravity} = \frac{141.5}{SG} - 131.5 \quad (4.1)$$

$$API_{fluibrax400} = \frac{141.5}{0.92} - 131.5 = 22.3^\circ$$

Calculando o respectivo grau API<sup>4</sup> conforme apresentado em (4.1), obtém-se um resultado de 22.3°API, o qual o classifica como na transição entre óleo médio e pesado, de acordo com os padrões definidos pelo *American Petroleum Institute* (ATTIR, 2018). Os valores a serem utilizados na modelagem para os demais parâmetros que caracterizam o óleo estão apresentados na Tabela 2, e se baseiam no cruzamento de dados de grau API e viscosidade cinemática, em comparação com fontes como o Banco de Dados de Óleos Crus e Produtos de Petróleo do Governo do Canadá (CANADA, 2021), utilizado neste trabalho.

TABELA 2 – PARÂMETROS ADOTADOS PARA O ÓLEO FLUIBRAX 400

Parâmetro	Valor	Unidade
Evaporação por dia	0,05	1/DIA
Probabilidade de adesão às margens	0,01	%
Fração volátil	94,0	%
Parâmetro de emulsificação	2E-6	-
Teor máximo de água	0.7	-
Fração de início da emulsificação	1.0	-
Densidade	920	KG/M <sup>3</sup>
Viscosidade cinemática	400	CST
Espessura mínima	0,00005	M
Coefficientes de dispersão a e b	1.00 e 0.01	-

FONTE: O Autor (2023)

<sup>4</sup> Grau API: medida padronizada pelo American Petroleum Institute, que compara quão leve ou pesado é o hidrocarboneto em comparação com a água. API < 10° correspondem a óleos muito pesados ou betumes, API entre 10° e 22.3° são óleos pesados, API entre 22.3 e 31.1°, óleos médios e API > 31° caracterizam óleos leves.

A probabilidade de adesão às margens influencia diretamente sobre o estado da partícula de óleo, representando uma probabilidade de as partículas que encontram-se na superfície da água serem transferidas para a margem quando tocam as células da grade correspondentes aos limites do modelo. Neste estudo foram testados valores diferentes para esta probabilidade de adesão, concluindo-se pela adoção da probabilidade de 1% das partículas. Com relação aos coeficientes de dispersão, o módulo PART permite especificar valores e parâmetros para a dispersão vertical e horizontal. Para a dispersão vertical, a fim de considerar uma situação simplificada para o modelo, adotou-se valor igual a  $D_z=0$ , representando que as condições hidrodinâmicas não teriam capacidade de promover dispersão vertical do óleo. Com relação à dispersão horizontal, conforme será apresentado em 4.4.1, o módulo PART a considera como dependente do tempo, sendo  $D_{x,y} = a \cdot t^b$ , onde  $t$  corresponde ao tempo e  $a$  e  $b$  são coeficientes derivados da calibração do modelo. Neste estudo, foram testados diversos valores, e adotados os valores de  $a = 1.00$  e  $b = 0.01$ , que apresentaram resultados mais aceitáveis, em uma avaliação qualitativa comparando o histórico da ocorrência em 2015 e os resultados das modelagens com outros coeficientes.

Além do óleo Fluibrax 400, foram testados cenários utilizando diferentes óleos e coeficientes de dispersão horizontal, com base nos modelos de óleo leve e pesado constantes no manual do DELFT3D-PART (DELTARES, 2020).

### 4.3 HIPÓTESES DE ACIDENTES E CRITÉRIOS DE RESPOSTA

A definição dos cenários do vazamento de óleo a ser modelado utilizou como referência a Resolução Conama 398/2008, que em seu Anexo II – Informações Referenciais para Elaboração do Plano de Emergência Individual, estabelece critérios para identificação e avaliação dos riscos, definição das hipóteses de acidentes, análise de vulnerabilidade e medidas de preparação para resposta (CONAMA, 2008).

#### 4.3.1 Identificação e avaliação dos riscos

O Quadro 4 apresenta a listagem com alguns dos principais equipamentos utilizados na UHE GNB que contém hidrocarbonetos, e respectivos volumes. Conforme se observa, os transformadores elevadores de potência são o risco principal a ser considerado, tanto pelo histórico apresentado em 4.1, quanto por tratar-se dos

equipamentos com maior volume de óleo dentre todas as estruturas do empreendimento, correspondente a 12 equipamentos com 23600 litros cada.

QUADRO 4 – EQUIPAMENTOS POTENCIAIS FONTES DE RISCO

Identificação	Tipo de óleo estocado	Capacidade máxima (l)	Capacidade de contenção secundária	Data e causas de acidentes anteriores
Transformadores elevador de potência	Óleo Mineral Isolante de base naftênica	12 x 23600	Tanque SAO 200.000 Litros	Conforme 4.1
Mancal escora do gerador	Óleo Lubrificante	14000	Kits e Poço de drenagem	Sem histórico
Regulador hidráulico de velocidade	Óleo Lubrificante	7630	Kits e Poço de drenagem	Sem histórico
Mancal guia da turbina	Óleo Lubrificante	4 x 1780	Kits e Poço de Drenagem	Sem histórico
Centrais oleodinâmicas do vertedouro	Óleo Lubrificante	3 x 1820	Contenções e Poço de drenagem	Sem histórico

FONTE: O Autor (2023)

#### 4.3.2 Hipóteses de acidentes e Descarga de Pior Caso

No Quadro 5 são ilustradas algumas hipóteses acidentais relacionadas ao transformador elevador de potência, seguindo o ordenamento proposto pelo item 2.2 do Anexo II da Resolução Conama 398/2008. Para cada hipótese são apontadas as situações mais críticas que poderiam ser ocasionadas, e indicação de áreas atingidas e cenários que poderão compor a modelagem.

QUADRO 5 - HIPÓTESES DE ACIDENTE PARA O TRANSFORMADOR ELEVADOR DE POTÊNCIA

Equipamento atingido	Hipótese	Descarga de pior caso (L)	Regime de vazão	Áreas atingidas	Condições meteorológicas e hidrodinâmicas
Transformador Elevador de Potência	Vazamento por fissura ou ruptura do tanque do equipamento	23600	Instantâneo ou Contínuo	Corpo Hídrico	Diversas, podendo variar Vento direção E ou W e velocidade típica ou maior; Manutenção ou Interrupção da vazão da usina; Abertura ou não do Vertedouro
	Falha na linha de transferência	23600	Instantâneo ou Contínuo	Corpo Hídrico	
	Vazamento de óleo devido a ruptura no tanque do caminhão	<30000	Instantâneo ou Contínuo	Corpo Hídrico	

FONTE: O Autor (2023)

A descarga de pior caso ( $V_{PC}$ ) corresponde, para tanques, equipamentos de processo e outros tipos de reservatórios, à capacidade máxima do equipamento atingido, de acordo com a Resolução Conama 398/2008. Neste caso, embora uma das hipóteses seja a de ruptura do tanque do caminhão que eventualmente esteja operando transferência do óleo do transformador, que podem comportar até 30m<sup>3</sup> de óleo, optou-se por utilizar como volume de pior caso:

$$V_{PC} = 23600L \quad (4.2)$$

correspondente ao volume unitário de um transformador. A Resolução não considera a existência de sistema de contenção, levando em conta que a capacidade de resposta precisa ser dimensionada para a possibilidade de indisponibilidade ou falha deste sistema.

#### 4.3.3 Capacidade de Resposta

O Anexo III da Resolução Conama 398/2008 estabelece critérios para a definição da capacidade de resposta à ocorrência de vazamento da descarga de pior caso, que deverá ser assegurada pelo empreendedor por meio de recursos próprios ou de terceiros contratados previamente. São consideradas descargas pequenas aquelas até 8m<sup>3</sup>, médias entre 8 e 200m<sup>3</sup>, e grandes aquelas acima de 200m<sup>3</sup>. Esta classificação é coerente com a proposta pela Convenção Internacional para Preparação, Resposta e Cooperação contra a Poluição por Óleo (OPRC), que adota classificação *Tier 1* para ocorrências pequenas, passíveis de resposta por recursos locais, *Tier 2* para ocorrências médias, que demandam recursos em escala regional, e *Tier 3*, ocorrências de grandes vazamentos cuja resposta necessita de uma articulação nacional ou mesmo internacional (IPIECA, 2007).

No caso da UHE GNB, o  $V_{PC}$  adotado corresponde a uma descarga de volume médio (entre 8 e 200m<sup>3</sup>), para o qual o tempo de resposta deve ser inferior a 6 horas, e a Capacidade Efetiva Diária de Recolhimento de Óleo (CEDRO) deve ser igual a 50% do volume de descarga média – que corresponderia a 10% do volume de pior caso, ou seja,  $CEDRO_{dm} = 0.5 * V_{dm} = 0.5 * 0.1V_{PC} = 1180L/dia$ .

De acordo com a resolução, a extensão das barreiras de contenção disponíveis ( $L_{bc}$ ) devem permitir atender – para a proteção de rios, canais e outros corpos hídricos – o maior valor entre: 3,5 vezes a largura do corpo hídrico ( $L_{bc} = 3,5 * L_{rio}$ ), ou 1,5 +



a velocidade máxima da corrente vezes a largura do corpo hídrico ( $L_{bc} = (1,5 + 1,94U_c) * L_{rio}$ ), sendo  $U_c$  a velocidade da correnteza em m/s e  $L_{rio}$  a largura do corpo hídrico em metros. Acima dos dois critérios, a resolução prevê  $L_{bc}$  máximo de 350 metros.

Como mostra a Figura 14, dado que mesmo no trecho mais estreito à jusante da UHE GNB o corpo hídrico ultrapassa 100 metros de largura, de forma que em qualquer trecho  $L_{bc}$  ultrapassaria 350m, adota-se que a usina deve possuir, minimamente, 350 metros de barreiras de contenção para resposta a ocorrências com óleo. Com relação à quantidade de barreiras de absorção, o empreendimento deve possuir pelo menos a mesma extensão relativa a barreiras de contenção, portanto 350 metros, e quantidade equivalente de mantas absorventes.

FIGURA 14 - LARGURA DO RIO IGUAÇU NA JUSANTE DA UHE GNB



FONTE: Google Maps (2023)

#### 4.4 MODELOS UTILIZADOS

Este estudo adota os modelos disponíveis no pacote DELFT3D, versão 4.04.02, que inclui módulos para a simulação tridimensional da hidrodinâmica (FLOW) e do transporte de partículas (PART), dentre outros, além de ferramentas de pré-processamento para a construção da grade numérica (RGFGrid e Quickin) e pós-



processamento (Quickplot). Desenvolvidos pelo Intituto Deltares, estes modelos já foram amplamente validados em estudos tanto em laboratório quanto em campo (GERRITSEN et al, 2008), além de serem disponíveis em versão *open source*.

Para este estudo, destaca-se a relevância da modelagem hidrodinâmica tridimensional possibilitada pelo DELFT3D-FLOW, a qual influi significativamente para o tipo de área modelada, considerando-se uma região com forte influência da variação da correnteza – proporcionada pela operação da casa de força da usina – combinada com a existência de um remanso do reservatório da usina à jusante. Sugere-se que, com a utilização de um modelo tridimensional, tais variações e sua influência sobre o transporte de partículas serão melhor representadas no ambiente fluvial existente. Informações sobre a discretização numérica desenvolvida no DELFT3D-FLOW podem ser consultados no Apêndice I.

Ainda, utiliza-se o modelo Delt3d-PART considerando que, além de representar de modo satisfatório os processos mais relevantes relacionados ao transporte e degradação do óleo, as funcionalidades relacionadas à simulação de ações de resposta, como a implantação de barreiras de contenção, são um diferencial qualitativo para este estudo.

#### 4.4.1 DELFT3D PART

Como apresentado no Capítulo 3, a modelagem de transporte de partículas em geral adota premissas que permitem que o cálculo se dê em duas etapas, uma relacionada à advecção das partículas e outra relacionada à dispersão, que modela os efeitos de turbulência não resolvidos no módulo hidrodinâmico.

O DELFT3D-PART é baseado no princípio de que o movimento de partículas ou substâncias dissolvidas na água pode ser descrito por um grande número de partículas que são sujeitas à advecção devido às correntes e à dispersão horizontal e vertical. Assim, o movimento das partículas é tratado em duas etapas a cada passo temporal, em que a primeira etapa calcula a advecção devido principalmente às forças gravitacionais, gradiente de pressão e ventos, e a segunda etapa aplica o *random walk*, considerando a premissa de que o tamanho e direção do movimento nessa etapa é um processo randômico, relacionado à dispersão horizontal e vertical (DELTARES, 2020). Para a modelagem de um vazamento de óleo, também são considerados os processos físico-químicos aos quais a pluma de contaminante estará

sujeita, sendo que no DELFT3D-PART são calculados os efeitos de evaporação, dispersão (*entrainment*), emulsificação, adesão às margens, sedimentação da mancha de óleo. Outros processos como oxidação e biodegradação, podem ser simulados utilizando um parâmetro de decaimento de primeira ordem.

A equação de advecção-difusão, nestas condições, pode ser descrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_a C)}{\partial x} + \frac{\partial(v_a C)}{\partial y} + \frac{\partial(w_a C)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - S_p, \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde  $C$  corresponde à concentração por unidade de volume da partícula,  $u_a$ ,  $v_a$  e  $w_a$  são as componentes da velocidade de corrente interpolada para a localização da partícula,  $D_x$ ,  $D_y$  e  $D_z$  são respectivamente os coeficientes de difusão turbulenta em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e  $S_p$  representa todos os processos de degradação que influenciam a concentração  $C$ . Esta equação, descrita no manual do PART, é uma outra forma de representação já apresentada no tópico 3.1. Adotando as premissas da abordagem lagrangeana, o processo de cálculo no PART é realizado conforme segue.

#### 4.4.1.1 Advecção-difusão

Em cada passo temporal, o deslocamento  $dx(t)$  de cada partícula pode ser resolvido como descrito por (DE DOMINICIS et al., 2013):

$$d\vec{x}_k(t) = [\vec{U}_c(\vec{x}, t) + \vec{U}_w(\vec{x}, t) + \vec{U}_s(\vec{x}, t)]dt + d\vec{x}'_k(t), \quad (4.4)$$

em que  $d\vec{x}_k(t)$  é o deslocamento da partícula,  $\vec{U}_c$  corresponde à velocidade obtida do modelo hidrodinâmico,  $\vec{U}_w$  é a correção devido à ação do vento,  $\vec{U}_s$  seria a correção devido à interferência das ondas, e  $d\vec{x}'_k(t)$  representa os efeitos de turbulência. As correções devido ao vento e ondas são aplicadas apenas às partículas na superfície do escoamento. No DELFT3D-PART, os efeitos de ventos e ondas são agregados.

Os efeitos de turbulência são determinados utilizando um gerador de números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1. Supondo que o movimento de uma partícula através do fluido recebe um impulso aleatório a cada passo temporal, devido

à ação de movimentos turbulentos incoerentes, e que estes movimentos não têm memória de seu passo anterior, pode-se definir  $d\vec{x}'_k$  como:

$$d\vec{x}'_k(t) = (2r - 1)d, \quad (4.5)$$

onde  $d$  é o percurso médio da partícula e  $r$  é um número real aleatório entre 0 e 1.

Sendo o deslocamento médio quadrático da equação (4.5):

$$\langle d\vec{x}'_k(t)^2 \rangle = \int_0^1 [(2r - 1)d]^2 dr = \frac{1}{3}d^2, \quad (4.6)$$

Considerando que o deslocamento quadrático médio dos termos turbulentos na equação (4.4) equivalem a  $\langle d\vec{x}'_k(t)^2 \rangle = 2\vec{K}\Delta t$ , e igualando a (4.6), tem-se que o deslocamento máximo de cada partícula em cada passo temporal equivale a (DELTAIRES, 2020):

$$d = \sqrt{6\vec{D}\Delta t}, \quad (4.7)$$

de forma que as componentes de  $d\vec{x}'_k(t)$  podem ser descritas como:

$$\begin{aligned} dx'_k(t) &= [2r - 1]\sqrt{6\vec{D}_h\Delta t}, \\ dy'_k(t) &= [2r - 1]\sqrt{6\vec{D}_h\Delta t}, \\ dz'_k(t) &= [2r - 1]\sqrt{6\vec{D}_v\Delta t}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

O coeficiente de dispersão horizontal  $D_h$  no DELFT3D-PART, ao qual estão sujeitas tanto  $dx'_k$  quanto  $dy'_k$ , é tomado como uma função exponencial dependente do tempo, conforme:

$$D_h = at^b, \quad (4.9)$$

em que  $a$  e  $b$  são coeficientes utilizados na calibração do modelo.

O coeficiente de dispersão vertical  $D_v$ , para escoamentos misturados verticalmente, é estimado no DELFT3D-PART em função do comprimento de mistura e da energia cinética turbulenta, como:

$$D_V = \frac{c_\mu^{1/4} L \sqrt{k}}{\sigma_c}, \quad (4.10)$$

com  $c_\mu$  sendo uma constante  $\approx 0.09$ ,  $L$  o comprimento de mistura (m),  $k$  a energia cinética turbulenta, e  $\sigma_c$  o número de Prandtl-Schmidt.

#### 4.4.1.2 Lançamento

O DELFT3D-PART calcula os efeitos de transporte, espalhamento, evaporação e dispersão na coluna d'água (*entrainment*) da massa de óleo.

O lançamento do óleo determina a área atingida pelo contaminante e pode ser configurada tanto como instantâneo quanto contínuo. Para o lançamento instantâneo, o raio inicial  $R_0$  da mancha é definido como um dado de entrada, ou calculado pela seguinte formulação (DELTARES, 2020):

$$R_0 = \frac{k_2}{k_1} \left( \frac{V_0^5 g \left( \rho_w \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w} \right)}{v_w^2} \right)^{1/12}, \quad (4.11)$$

em que  $V_0$  é o volume inicial do vazamento de óleo,  $\rho_0$  e  $\rho_w$  correspondem à densidade do óleo e da água, respectivamente,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $v_w$  é a viscosidade cinemática da água, e as constantes de Fay:  $k_1 = 1,14$  e  $k_2 = 1,45$ .

#### 4.4.1.3 Vento e ondas

Os efeitos do vento e ondas afetam principalmente o processo de advecção-difusão, e no PART são agregados e representados como um fator empírico baseado no arraste e ângulo de deflexão, dependentes da velocidade e direção do vento local, e da latitude da área estudada.

Considerando que o arraste pelo vento tipicamente varia entre 1 e 3% da velocidade do vento, é adotado um percentual de 1.0% no PART. Já o ângulo de deflexão entre a direção do vento e da advecção do óleo pode variar entre  $0^\circ$  e  $25^\circ$ , com uma média de  $15^\circ$ , e é adotado como um parâmetro empírico dependente da latitude, devido à influência do efeito Coriolis associado às ondas.

$$\vec{U}_{ww}(\vec{x}, t) = \vec{U}_w(\vec{x}, t) + \vec{U}_s(\vec{x}, t) = C_{wd}(\vec{U}_w - \vec{U}_c) \quad (4.12)$$

A equação (4.12) apresenta o cálculo no PART para a correção de velocidade devido ao vento e ondas  $\vec{U}_{ww}$ , onde  $C_{wd}$  corresponde ao percentual de arraste do vento ( $\sim 1.0\%$ ),  $\vec{U}_w$  a velocidade do vento local, e  $\vec{U}_c$  a velocidade da correnteza.

#### 4.4.1.4 Evaporação

A evaporação do óleo altera o volume das partículas e é implementada como um processo de decaimento de primeira ordem, podendo ser definida no PART como uma série temporal ou como uma fração fixa do óleo que decai a cada dia. Em (4.13), a equação demonstra a variação da fração evaporada do óleo  $F_v$  a uma taxa de evaporação  $k$  constante, que depende das características do óleo, assim como sua fração volátil  $F_{vol}$ :

$$\frac{dF_v}{dt} = - \left( \frac{F_{vol} - F_v}{1 - F_v} \right) k . \quad (4.13)$$

Considerando que a viscosidade do óleo também varia durante o processo de evaporação, a viscosidade cinemática é determinada utilizando a equação:

$$\eta = \eta_0 e^{C_v F_v} . \quad (4.14)$$

O módulo PART adota  $C_v = 1$  para óleos leves (com viscosidade cinemática menor que 500cSt) e  $C_v = 10$  para óleos pesados (viscosidade maior que 500cSt).

#### 4.4.1.5 Dispersão do óleo na coluna d'água (*entrainment*)

No Part, este processo de dispersão do óleo na coluna d'água é implementado como um decaimento de ordem zero, cuja taxa é independente da concentração de óleo na superfície, dependente da energia de ondas dissipadas ao longo da mancha, e do tipo de óleo. Assim, a taxa de dispersão  $F_E$  é dada pela equação:

$$F_E = 5.08 \cdot 10^{-8} C_0 S_{cov} D_e^{0.57} n_w , \quad (4.15)$$

onde  $C_0$  é uma constante relacionada ao tipo de óleo,  $S_{cov}$  é a proporção do corpo hídrico coberto por óleo na área de estudo relevante,  $D_e$  é a dissipação de energia de onda por unidade de área, e  $n_w$  é o número de ondas por período.

#### 4.4.1.6 Emulsificação

A emulsificação corresponde ao processo de mistura de água e óleo, caracterizado pela formação de uma espécie de creme viscoso, comumente chamado de “mousse de chocolate”. Este processo é dependente da composição do óleo, atingindo um ápice entre 10 e 100 horas após um vazamento, tendo como impacto principal a ampliação do volume de material contaminado e, conseqüentemente, a dificuldade operacional para sua recuperação.

No PART, este processo é implementado utilizando o algoritmo apresentado por Mackay et. al., em que a fração de água no óleo emulsificado  $\tilde{F}_{wc}$  é dada por:

$$\tilde{F}_{wc} = \zeta_1 (U_w + 1)^2 \left( 1 - \frac{F_{wc}}{\zeta_2} \right), \quad (4.16)$$

onde  $U_w$  é a velocidade do vento,  $F_{wc}$  a proporção de água contida, e  $\zeta_1$  e  $\zeta_2$  são parâmetros relacionados ao tipo de óleo.

A emulsificação afeta principalmente a viscosidade – alterando, portanto, o processo de dispersão. Da mesma forma, ela altera o processo de evaporação, demandando implementação de algoritmos específicos que considerem estas alterações.

#### 4.4.1.7 Adesão às margens

Ao atingir as margens do curso hídrico, pela ação do vento ou dispersão horizontal, uma parte do óleo pode permanecer aderida ao solo, atingindo áreas potencialmente sensíveis do ponto de vista ambiental. Este processo é simulado no PART adotando-se um índice de probabilidade de adesão (*sticking probability*), que deve ser especificado pelo usuário.

#### 4.4.1.8 Sedimentação do óleo

Embora geralmente o óleo eventualmente disperso na coluna d'água tenda a retornar à superfície, ele também pode sedimentar em algumas circunstâncias, como quando o óleo é adsorvido ao sedimento na coluna d'água, quando é queimado *in-situ*, ou quando é adsorvido por materiais oleofílicos que possam tornar a mistura mais densa do que a água. Este processo é simulado em conjunto com a probabilidade de adesão. Em ambos os processos, a partícula adere à margem ou ao leito se um número aleatório entre 0 e 1 for menor do que a probabilidade de adesão definida.

#### 4.4.1.9 Outros processos de degradação

O PART permite a incorporação de outros processos de degradação do óleo, como oxidação, dissolução, decaimento bacteriológico, etc., mediante a simulação de um decaimento de primeira ordem, o qual pode ser especificado na entrada de dados.

#### 4.4.1.10 Medidas de Resposta Emergencial

Após uma ocorrência de vazamento de óleo, quando há acionamento de equipes para operações de resposta, geralmente haverá a utilização de barreiras de contenção – estruturas flutuantes que permitem a contenção do óleo e seu direcionamento para remoção, como as ilustradas na Figura 15. Outra medida de resposta possível é a adição de dispersantes ao óleo, acelerando sua decomposição como forma de evitar que frações mais concentradas atinjam áreas sensíveis (embora esta alternativa não seja possível pela legislação brasileira). O PART permite a inclusão deste tipo de medidas de resposta a emergência por meio de algoritmos que alteram o processo de advecção-difusão das partículas do óleo, para o caso das barreiras, e interferem nos processos de degradação o óleo, para o caso dos dispersantes.

FIGURA 15 - BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE ÓLEO EM RIOS

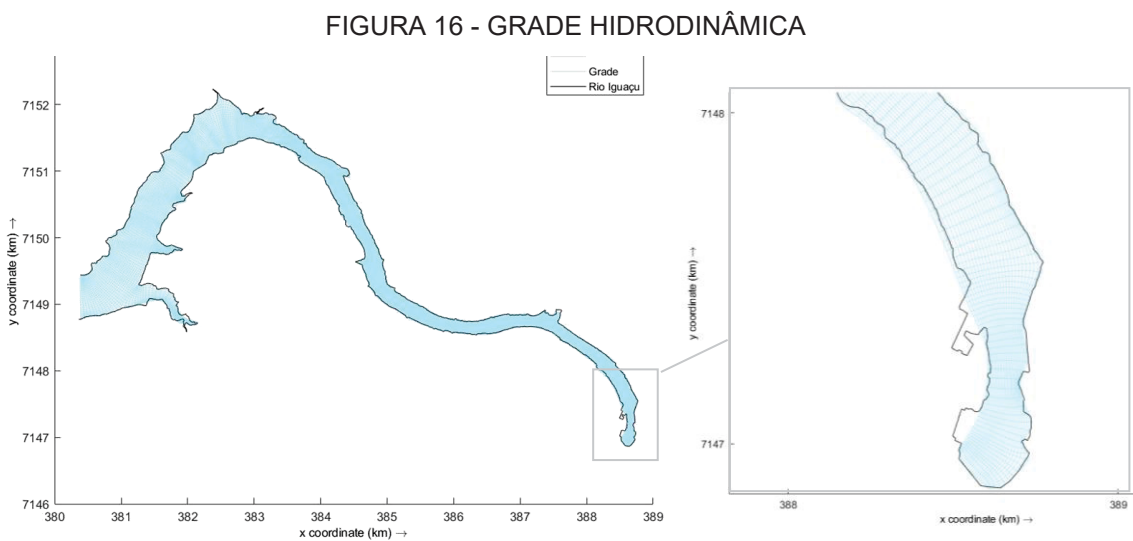


FONTE: (SINDIPETRO, 2020)

## 4.5 CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

### 4.5.1 Domínio espacial e temporal

A construção da grade computacional se deu para um trecho de 12 quilômetros a partir da barragem da UHE GNB, correspondente à área em que se dariam as ações iniciais em situação de emergência durante o primeiro dia da ocorrência, considerando a batimetria e morfologia do corpo hídrico, buscando um maior refinamento na área próxima à barragem da UHE GNB e incorporando os afluentes principais na área de estudo. Definido no módulo RGFGGrid, o modelo final conta com uma grade na horizontal com 437 pontos na direção M (longitudinal) e 77 pontos na direção N (transversal), cobrindo uma área de aproximadamente 4.5km<sup>2</sup> – na cota máxima normal do reservatório Salto Santiago, a 506 metros acima do nível do mar, representado na Figura 16.

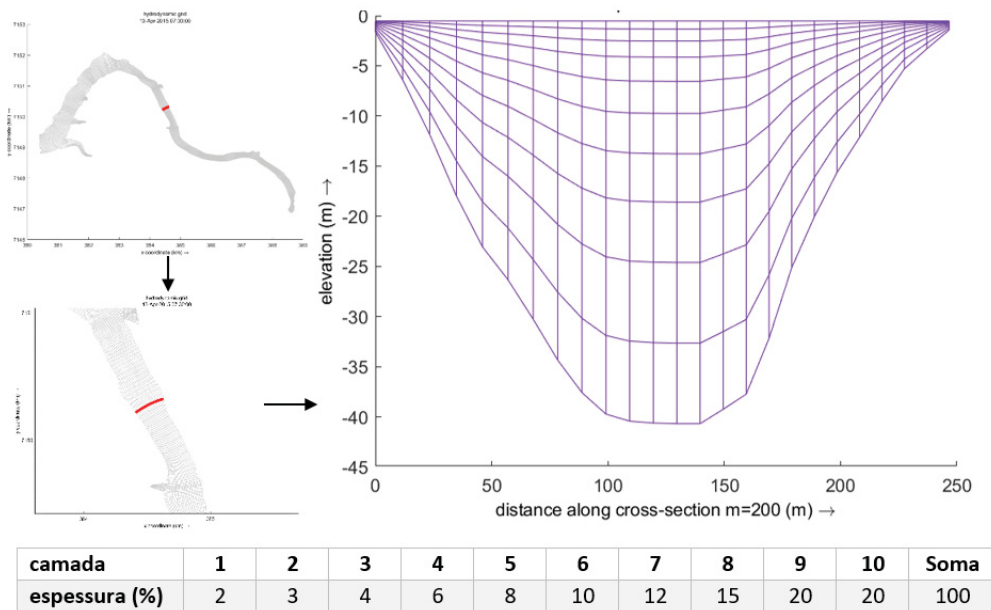


FONTE: O Autor (2023)

A discretização vertical foi definida incorporando os dados de batimetria no módulo Quickin e no DELFT3D-FLOW, onde foi adotado o modelo de tipo sigma ( $\sigma - model$ ), em que o número de camadas é constante em qualquer ponto do modelo. Foi definida a utilização de 10 camadas, distribuídas de forma que as camadas superiores tivessem refinamento maior, devido sua maior correspondência com a área afetada pelo óleo, conforme apresentado na Figura 17, para a seção M=200.



FIGURA 17 - EXEMPLO DE PERFIL DO MODELO HIDRODINÂMICO TIPO  $\Sigma$  E ESPESSURA DAS CAMADAS



FONTE: O Autor (2023)

Quanto ao domínio temporal, o modelo adotou como período de simulação o período de 24 horas, que neste caso corresponderia ao período de interesse para a adoção das primeiras ações de limpeza e recuperação das áreas atingidas em caso de uma emergência com óleo. O passo temporal adotado para o modelo hidrodinâmico foi de 0,05 minutos (3 segundos), o qual atendeu às limitações ao passo temporal recomendadas pelo Delft3D-FLOW, com base no número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) verificado no módulo Quickin do Delft3D, confirmado pela não observação de instabilidades na implementação do modelo hidrodinâmico.

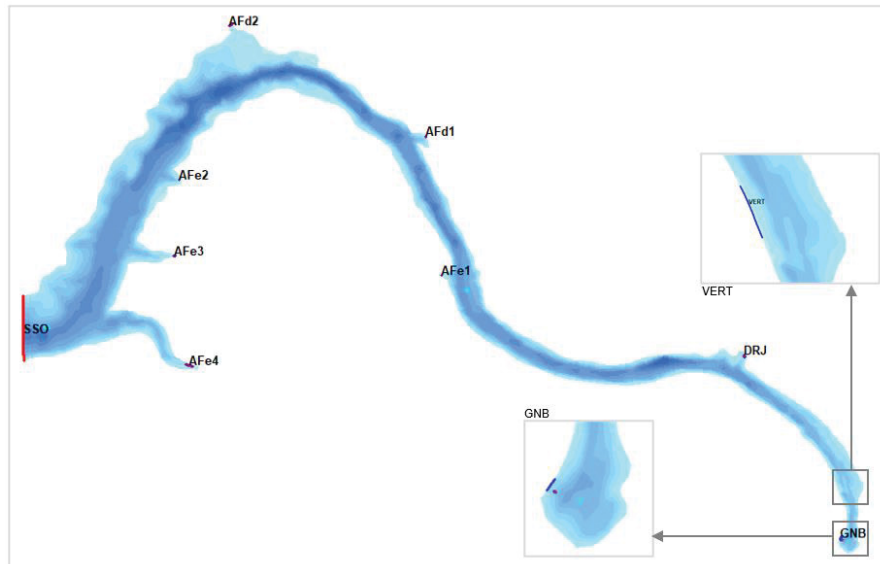
#### 4.5.1.1 Condições de contorno

Foram adotadas como condições de contorno abertas a saída da casa de força (GNB) e a seção final do modelo, no reservatório da UHE Salto Santiago (SSO), a 12km da casa de força (Ver Figura 18). Em um dos cenários, também foi incluída como condição de contorno aberta a região do vertedouro da UHE GNB.

Nestas seções foram estabelecidas séries temporais de vazões, com valores constantes ou variáveis conforme o cenário adotado, a ser descrito em 4.6.

Também foram incluídos no trecho modelado como pontos de descarga de vazão os locais correspondentes aos afluentes principais, aos quais foram atribuídas vazões constantes estimadas.

FIGURA 18 - CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO E DESCARGAS



FONTE: O Autor (2023)

#### 4.5.1.2 Condições Iniciais

Como condição inicial do modelo hidrodinâmico, foi utilizado um arquivo *restart file* configurado para simular um número de dias de operação com vazões constantes na UHE GNB, no contorno de saída (SSO), e nos afluentes, conforme Tabela 3, para “estabilizar” o modelo.

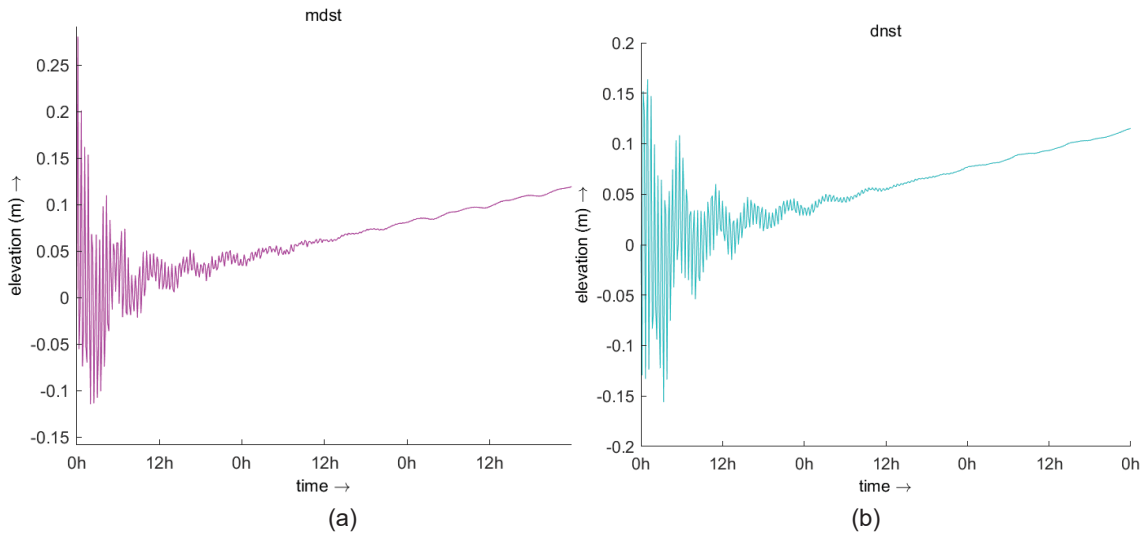
TABELA 3 - *RESTART FILE*: VAZÕES ADOTADAS PARA AS CONDIÇÕES DE CONTORNO E DESCARGAS

Contornos e descargas	GNB	DRJ	Afd1	Afd2	Afe1	Afe2	Afe3	Afe4	SSO
Vazão (m³/s)	1000	50	1	1	1	1	5	10	1065

FONTE: O Autor (2023)

A simulação de 3 dias mostrou-se satisfatória para a estabilidade. A Figura 19 ilustra os resultados para pontos de observação na região central do trecho simulado (*midstream*) e para região de jusante próxima à saída do trecho simulado (*downstream*), demonstrando que após 36 horas a instabilidade torna-se mínima. Verifica-se a elevação do nível d’água ao longo do tempo, devido à soma da contribuição dos afluentes ser levemente maior que a vazão de saída em SSO.

FIGURA 19 - RESULTADOS RESTART FILE - NÍVEL D'ÁGUA APÓS 3 DIAS PONTOS  
(A) MIDSTREAM (B) DOWNSTREAM



FONTE: O Autor (2023)

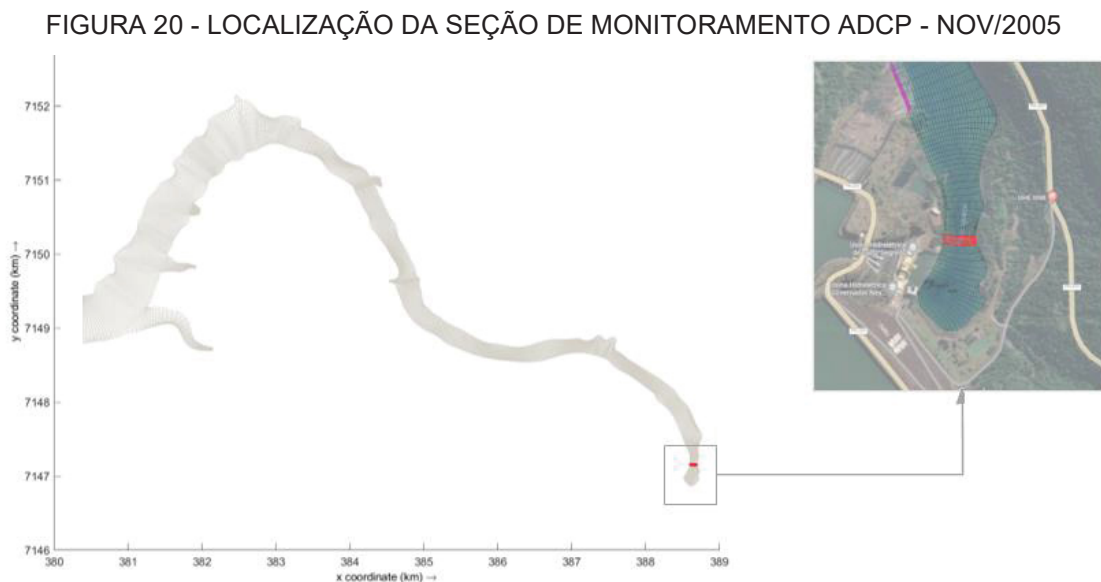
#### 4.5.2 Parâmetros físicos do modelo

Como é detalhado no Apêndice I, o DELFT3D-FLOW é um modelo que resolve as equações de Navier-Stokes adotando Equações Promediadas de Reynolds (RANS), a aproximação de Boussinesq e de Águas Rasas. No modelo foram adotados como parâmetros a gravidade  $g = 9,81m/s^2$ , densidade da água  $\rho_{H_2O} = 1000kg/m^3$ , densidade do ar  $\rho_{ar} = 1,23kg/m^3$ , e coeficientes de arraste do vento padrão do modelo. A rugosidade de fundo foi definida utilizando a fórmula de Manning, inicialmente com  $n = 0,025$ , uniforme em  $U$  e  $V$ , valor sujeito a variação para a calibração do modelo, e a rugosidade de parede considerando uma condição de escorregamento com tensão tangencial zero (*free slip condition*). Quanto à viscosidade turbulenta horizontal, esta foi mantida uniforme em toda a grade, com valor de  $\nu_v = 1,0m^2/s$ . O modelo adotado para a viscosidade turbulenta vertical foi o  $k - \varepsilon$ . Entre os demais processos cuja inclusão pode ser implementada no modelo, foi inserido o vento uniforme  $U_{10} = 3m/s$  com direção  $90^\circ$  (E-W).

#### 4.5.3 Calibração hidrodinâmica

A calibração do modelo envolve quantificar parâmetros hidrodinâmicos, comparando resultados modelados com valores reais observados, utilizando descritores estatísticos. Estes parâmetros podem ser o coeficiente de rugosidade, a viscosidade turbulenta horizontal, ou o modelo de turbulência.

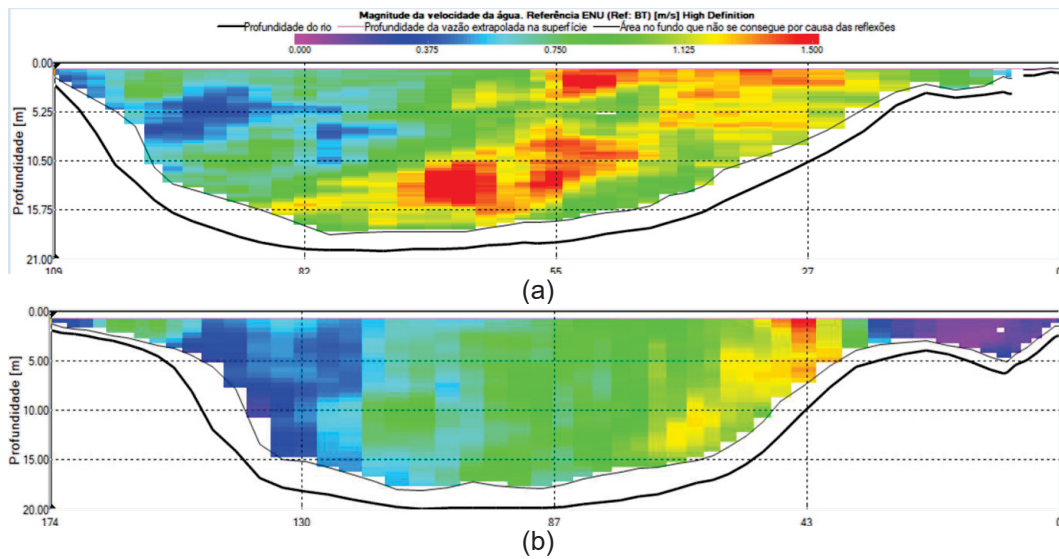
Para fins de comparação com os resultados do modelo, foram utilizados dados históricos de ADCP obtidos junto à Copel GeT, referentes a medições realizadas em novembro de 2005 (COPEL, 2005). Os dados de ADCP foram medidos próximo à jusante da usina, onde a magnitude das velocidades médias varia entre 0 e 1,5m/s. A seção correspondente ao local onde foram realizadas as medições ADCP está representado na Figura 20.



FONTE: O Autor (2023)

As leituras foram visualizadas utilizando o software Winriver e estão ilustradas na Figura 21.

FIGURA 21 - PERFIS ADCP - MAGNITUDE DE VELOCIDADE  
 (A)  $Q_{max} = 1200m^3/s$  (B)  $Q_{min} = 870m^3/s$



FONTE: O Autor (2023)

O modelo hidrodinâmico foi configurado para rodar nas condições de vazão medidas na campanha ADCP, sendo modelado para as vazões máxima e mínima medidas na campanha.

Para a comparação, foram utilizadas as formulações da raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro absoluto médio (MAE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), implementadas no Matlab para a comparação de pixels de imagens em escala de duas cores dos valores calculados e observados.

Para a comparação entre as imagens, as mesmas foram colocadas em uma mesma escala no software Inkscape, onde também foi projetada uma máscara que representasse uma área que contivesse valores medidos e calculados para mesmos pontos da seção. Com isso, excluíram-se da comparação áreas próximas ao leito e na superfície da água. As imagens geradas pelo Winriver e pelo Quickplot foram colocadas na mesma escala de cores, sendo utilizada uma escala gradiente de amarelo a preto, dado que o Winriver não permite criar um gráfico diretamente em escala de cinza.

Aplicada a máscara e preparadas as imagens no Inkscape, no Matlab elas são então convertidas para escala de cinza, e aplicadas as seguintes equações para os cálculos estatísticos:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} ;$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| ; \quad (4.17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} ;$$

onde  $\hat{y}_i$  representa o valor calculado no ponto  $i$ ,  $y_i$  o valor medido, e  $\bar{y}$  representa o valor médio de todos os valores medidos.

Buscou-se calibrar o modelo aproximando os resultados de RMSE, MAE e  $R^2$  de valores ideais, utilizando o coeficiente  $n$  de Manning como parâmetro de calibração para reduzir as diferenças entre os valores calculados e os valores observados.

#### 4.6 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Considerando os requisitos adotados com base na Resolução Conama 398/2008, o histórico de condições hidrodinâmicas do empreendimento, as características de ventos da região de estudo, os parâmetros dos óleos mais utilizados, e a experiência com a ocorrência anterior de vazamento na usina, foram definidos alguns cenários, tanto para as condições predominantes quanto para outras situações de interesse definidas ao longo do estudo, descritas no Quadro 6 para as calibração hidrodinâmica e no Quadro 7 para os cenários de acidente ambiental.

QUADRO 6 - CENÁRIOS DE CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA

<b>n</b>	<b>Vazão(m³/s)</b>	<b>Vento(m/s)</b>	<b>Observações</b>
<b>1</b>	1200	3m/s 90°	Calibração n=0.025
<b>2</b>	1200	3m/s 90°	Calibração n=0.035
<b>3</b>	1200	3m/s 90°	Calibração n=0.050

FONTE: O Autor (2023)

QUADRO 7 - CENÁRIOS DE LANÇAMENTO DE ÓLEO

Cj.	n	Vazão (m³/s)	Vento (m/s)	Massa de óleo (kg)	Tipo de óleo	Barreiras	Observação
A	1	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q cheia, 10000 partículas
	2	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q cheia, 100000 partículas
	3	860	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q mediana
	4	550	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q seca
	5	1000→600	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q turb=0, Qvert= 600m³/s
	6	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q turbinada reduzida
	7	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Vazamento contínuo
B	8	1000	3m/s 180°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento N-S
	9	1000	3m/s 270°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento W-E
	10	1000	3m/s 0°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento S-N
	11	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	% de arraste do vento: 3%
C	12	1000	3m/s 90°	2760	Fluibrax400	sem	volume do óleo (3000L)
	13	1000	3m/s 90°	7360	Fluibrax400	sem	volume do óleo (8000L)
D	14	1000	3m/s 90°	21000	HFO	sem	Tipo de óleo pesado
	15	1000	3m/s 90°	21000	Ekofisk	sem	Tipo de óleo leve
	16	1000	3m/s 90°	21000	HFO	sem	coeficiente de dispersão
	17	1000	3m/s 90°	21000	Ekofisk	sem	coeficiente de dispersão
E	18	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	19	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	2 barreiras, resposta rápida
	20	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	1 após 1h	1 barreira, resposta imediata
	21	1000	3m/s 180°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	Vento N-S, resposta rápida
	22	1000	3m/s 270°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	Vento W-E, resposta rápida
	23	1000	3m/s 0°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	Vento S-N, resposta rápida
	24	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	25	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	2 barreiras, resposta rápida
	26	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	1 após 1h	1 barreira, resposta imediata
	27	550	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	28	550	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	2 barreiras, resposta rápida

FONTE: O Autor (2023)

No módulo FLOW foram desenvolvidos cenários para 10 condições hidrodinâmicas distintas, sendo 3 para a calibração do modelo, com diferentes valores de  $n$  de Manning. Outros 7 diferentes cenários compõe o conjunto A apresentado no Quadro 7, com vazões constantes de cheia, vazão mediana e de seca, redução de vazão turbinada após início da ocorrência, e redução da vazão turbinada seguida de abertura do vertedouro.

Todos os cenários de emergência ambiental implementados no PART simulam a ocorrência de vazamento tendo como ponto de lançamento a jusante imediata da

Casa de Força da UHE GNB, acontecendo 2 horas após o início do modelo. A Figura 22 ilustra o ponto de lançamento do óleo utilizado para todos os cenários, bem como os pontos de monitoramento configurados no PART.

FIGURA 22 - PONTO DE LANÇAMENTO DO ÓLEO E PONTOS DE MONITORAMENTO



FONTE: O Autor (2023)

Todos os cenários do conjunto A foram testados no PART para o lançamento do volume de pior caso  $V_{pc}$  de 21000kg de óleo, e condição de vento predominante de intensidade 3m/s e direção E-W, para o óleo Fluibrax 400, utilizado nos transformadores elevadores de potência.

No Conjunto B estão descritas as simulações de diferentes condições para o vento além da predominante, tendo sido testadas outras 3 direções de vento com mesma intensidade, e um cenário alterando o percentual de arraste do vento.

Além da ocorrência de vazamento de volume correspondente à Descarga de Pior Caso ( $V_{PC}$ ), no conjunto C foram simuladas descargas menores de óleo, correspondentes tanto ao volume estimado na ocorrência de 2015, de 3000L (2760kg de óleo Fluibrax 400) quanto ao volume limite para ocorrência com nível de resposta Tier 1, equivalente a 8000L, ou 7360kg de óleo Fluibrax 400.

Por sua vez, o conjunto D representou a simulação de lançamento de um óleo mais leve (*Ekofisk*) e um mais pesado (HFO) que o Fluibrax400, com base em características disponíveis no manual do DELFT3D-PART. Os cenários 14 e 15 diferem dos cenários 16 e 17 pelo valor do coeficiente de dispersão horizontal, que



nos primeiros segue o padrão adotado neste trabalho para os demais cenários, e nos seguintes utiliza os coeficientes do tutorial do DELFT3D.

Nos cenários em que há a implantação de barreiras, correspondentes ao conjunto D do Quadro 7, estas são implantadas em pontos que correspondem a locais que buscam proteger áreas sensíveis e posicionadas próximas de rampas de barco e/ou em áreas que podem ser utilizadas como base operacional para pontos de recolhimento de óleo e materiais absorventes, como ilustra a Figura 23.

FIGURA 23 - LOCAIS DE INSTALAÇÃO DE BARREIRAS



FONTE: O Autor (2023)

Para as ações de resposta, os cenários hidrodinâmicos foram testados para condições sem barreiras de contenção, com redução da vazão, e em cenários com a implantação de barreiras em B e C iniciando após 5 horas da ocorrência (resposta lenta), outro com a implantação em 2 horas após a ocorrência (resposta rápida), e outro com implantação de barreira em A, após 1 hora da ocorrência (resposta imediata).

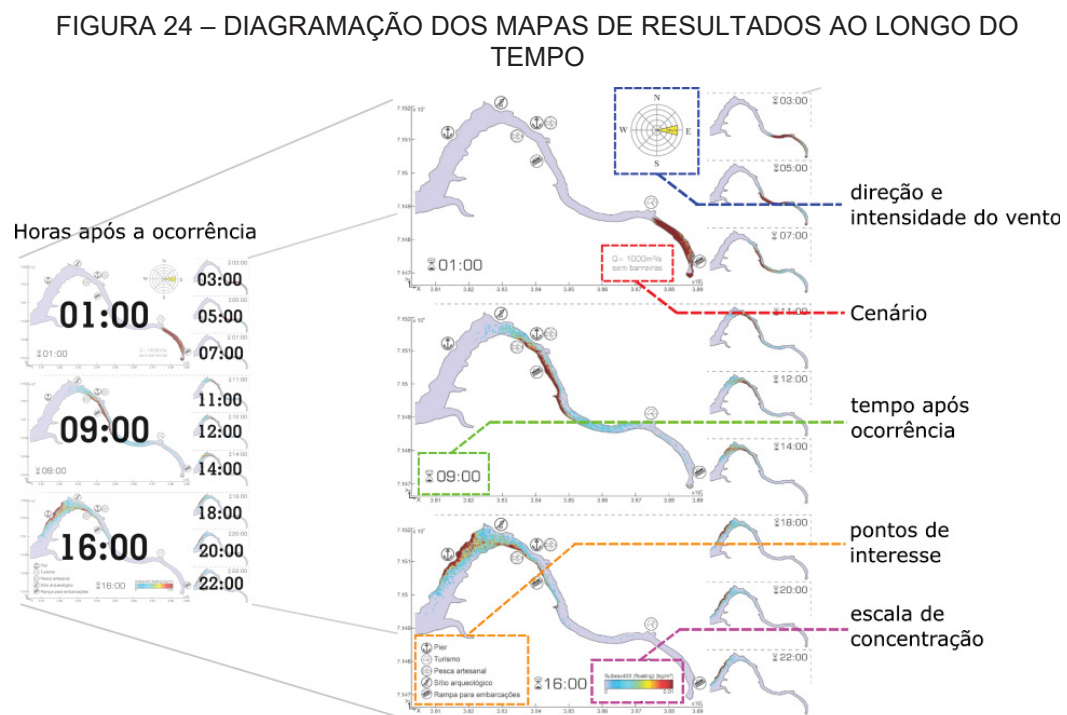
#### 4.6.1 Apresentação dos resultados

Quanto à apresentação dos resultados para a modelagem da pluma de óleo, buscou-se estabelecer uma escala de concentração que demonstre risco ambiental significativo. Embora não exista legislação que defina especificamente um limite mínimo aceitável de presença de óleo em corpo hídrico oriundo de acidente ambiental,

aqui considera-se que uma escala adequada para visualização pode ser deduzida da Resolução Conama 430/2011. Esta resolução estabelece em seu Artigo 16, letra e, que as condições para efluentes lançados diretamente em corpo receptor não podem ultrapassar a concentração de 20mg/L para óleos minerais, equivalente a  $0.02\text{kg}/\text{m}^3$  (CONAMA, 2011). Como a escala das concentrações no DELFT3D-PART é dada em  $\text{kg}/\text{m}^2$ , considerando que o óleo fica concentrado majoritariamente na superfície, e estipulando uma camada de 0.50m como a de interesse na superfície do corpo hídrico, dividindo-se  $\frac{0.02\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.50\text{m}} = 0.01\text{kg}/\text{m}^2$ , optou-se por definir a escala adequada para representar a concentração como sendo de 0 a  $0.01\text{kg}/\text{m}^2$ , considerando que qualquer valor acima disso para a camada superficial estaria acima da concentração máxima de óleos minerais para efluentes em corpo hídrico.

Os gráficos de resultados são apresentados em 4 formatos principais.

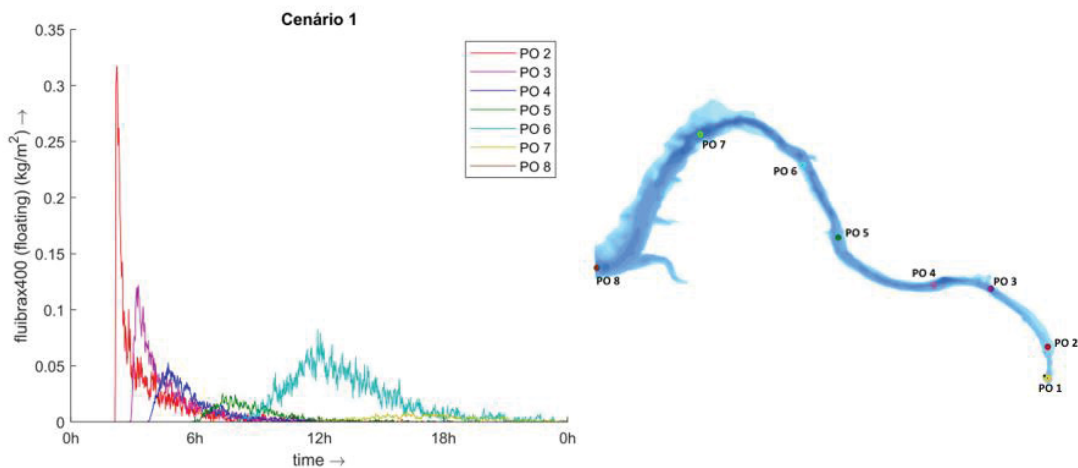
Primeiro, ilustrando a evolução da pluma de óleo na superfície do corpo hídrico ao longo do tempo. Estas figuras foram construídas utilizando o módulo Quickplot do DELFT3D e macros no Matlab, para automatizar a extração dos resultados da ocorrência nos horários desejados, e com pós-processamento em Corel Draw para uma melhor diagramação dos resultados. A Figura 24 detalha os componentes dos mapas utilizados.



FONTE: O Autor (2023)

O segundo tipo de gráfico, exemplificado na Figura 25, demonstra os resultados para as concentrações obtidos nos pontos de observação, em  $\text{kg}/\text{m}^2$ , para cada cenário distinto. Para estes gráficos, optou-se por retirar os resultados do ponto de observação PO 1 para melhor comparação dos resultados dos demais pontos, devido à concentração neste ponto ser muito maior em relação aos demais, devido este se encontrar no local de lançamento do óleo. A construção dos gráficos se deu utilizando o Quickplot e códigos no Matlab para aprimorar a legibilidade.

FIGURA 25 – EXEMPLO DE GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DO ÓLEO NOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO

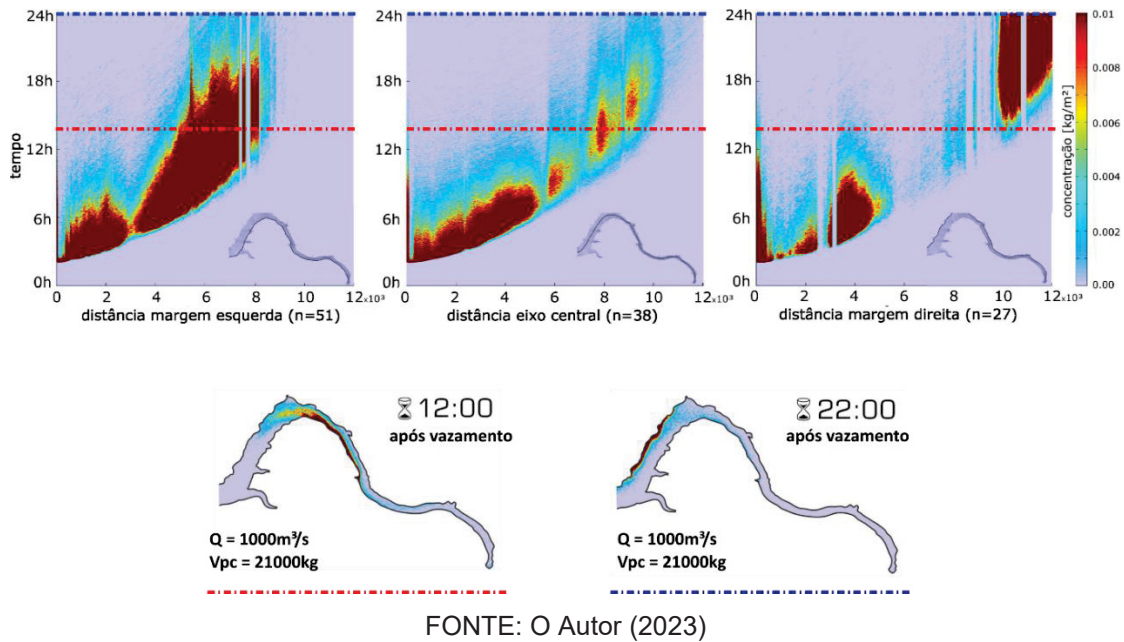


FONTE: O Autor (2023)

O terceiro tipo de gráfico utilizado explora a concentração de óleo fluando na superfície ao longo de seções longitudinais da grade matemática, para todo o tempo de simulação, permitindo visualizar o comportamento da pluma nas seções correspondentes às margens direita – a qual na grade utilizada corresponde a  $N = 27$ , na margem esquerda<sup>5</sup> – denominada  $N = 51$ , e no eixo central do reservatório,  $N = 38$ . Estes gráficos dispostos conjuntamente foram especialmente úteis para identificar a tendência da pluma de contaminante de atingir as margens ou permanecer na calha do rio, ao longo do tempo. A Figura 26 exemplifica um desses gráficos, ilustrando os respectivos mapas para o mesmo cenário, após 12 e 22 horas do vazamento, correspondentes respectivamente a 14 e 24 horas após o início da simulação.

<sup>5</sup> Margens direita e esquerda representam, por convenção, as margens respectivamente à direita e à esquerda em relação ao sentido da correnteza, de montante para jusante.

FIGURA 26 - EXEMPLO DE GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS AO LONGO DO TEMPO



FONTE: O Autor (2023)

Por fim, o quarto gráfico apresenta o status das concentrações de contaminante ao fim da simulação, demonstrando o compartimento a que as partículas de óleo estão associadas, sendo “óleo flutuante” a parcela que segue na superfície do corpo hídrico, “óleo aderido às margens” as partículas que atingiram os contornos fechados do modelo e foram transferidas para fora da superfície da água, além do compartimento “óleo evaporado”, que é apresentado em gráfico de linhas em conjunto com os dois outros compartimentos. A Figura 27 ilustra esse tipo de gráfico. A construção dos gráficos se deu utilizando o Quickplot para gerar os mapas de concentração, o Notepad++ para extrair os dados referentes às quantidades de óleo em cada compartimento dos arquivos de saída \*.out do DELFT3D, o Excel para gerar o gráfico de linhas, e o Matlab para a rotina que concatenou as figuras de todos os cenários.

FIGURA 27 - EXEMPLO DE GRÁFICO DE STATUS AO FIM DA SIMULAÇÃO



FONTE: O Autor (2023)

## 5 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, divididos entre os resultados para a calibração do modelo hidrodinâmico, um resumo sobre o tempo de modelagem dos cenários, e a apresentação dos principais cenários modelados para as hipóteses de vazamento de óleo e ações de resposta, bem como a comparação entre diferentes cenários.

### 5.1 CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA

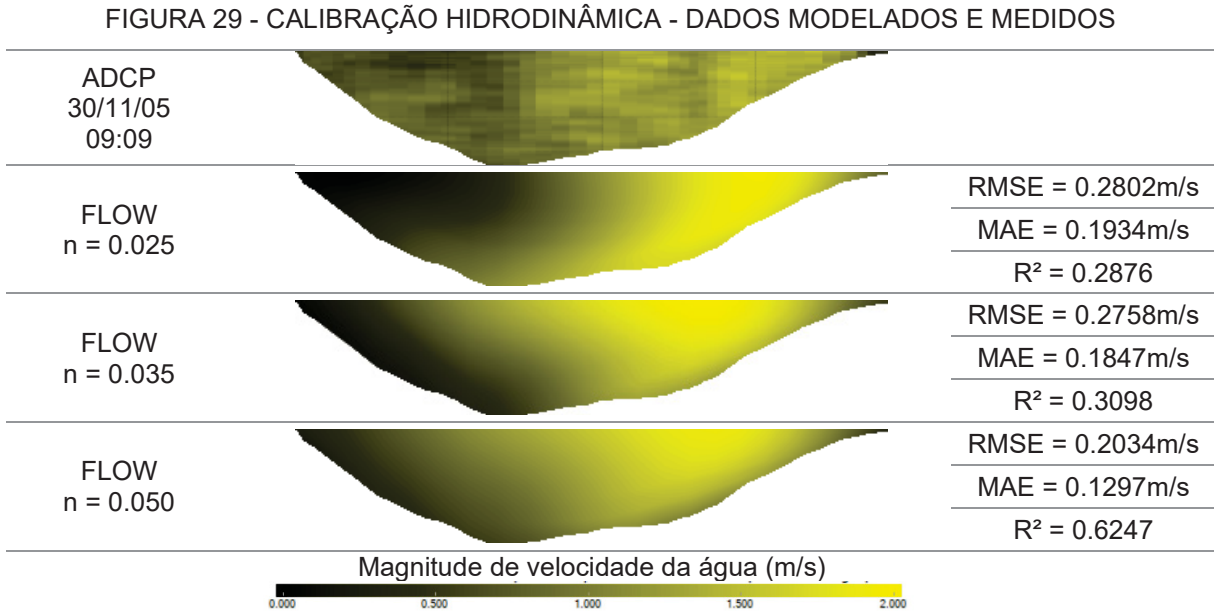
Conforme apresentado na metodologia, a calibração do modelo hidrodinâmico se deu pela comparação estatística entre os dados medidos e os resultados modelados, adotando como parâmetro o coeficiente de rugosidade de Manning. A seção correspondente ao local onde foram realizadas as medições ADCP está representado na Figura 28.



FONTE: O Autor (2023)

A Figura 29 apresenta os resultados, para as seções ajustadas utilizadas para o cálculo dos valores de RMSE, MAE e  $R^2$  no Matlab. Os resultados demonstram que para valores maiores do coeficiente  $n$  de Manning, são reduzidos significativamente o erro médio quadrático (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE), bem como o coeficiente de determinação  $R^2$  aproxima-se de 1.0, demonstrando que o trecho de fato apresenta rugosidade elevada.





FONTE: O Autor (2023)

A tendência observada foi a de que um número de Manning maior ainda conduziria a resultados estatísticos mais favoráveis para a seção. No entanto, considerando que isso poderia influenciar demasiadamente os resultados para o restante da grade de cálculo, e que não há dados para estabelecer um número variável ao longo do percurso modelado, optou-se por manter o  $n = 0.050$ . Este valor é coerente com a literatura (Quadro 8), correspondendo a condição de canal principal com muitas rochas, como ilustra a Figura 30.

FIGURA 30 - ACESSO DE BARCO A JUSANTE DA UHE GNB



FONTE: O Autor (2023)

Ainda, considerando as características do modelo DELFT3D-FLOW, que utiliza equações promediadas (RANS) e, portanto, não teria capacidade de representar todos os vórtices presentes no escoamento real, pode-se considerar que o RMSE de 0.2034m/s e o MAE de 0.1297m/s são resultados razoáveis, permitindo considerar que o modelo permite uma representação coerente do escoamento em estudo.

QUADRO 8 - COEFICIENTES DE MANNING PARA O CANAL PRINCIPAL

Tipo de canal e descrição	Mínimo	Normal	Máximo
A. Limpo, reto, sem fendas ou piscinas profundas	0.025	0.030	0.033
B. Similar a "A" com mais rochas e plantas	0.030	0.035	0.040
C. Limpo, sinuoso, algumas piscinas e baixios	0.033	0.040	0.045
D. Similar a "C" com algumas plantas e rochas	0.035	0.045	0.050
E. Igual acima, inclinações e seções mais rugosas	0.040	0.048	0.055
F. Igual ao "D" com mais pedras	0.045	0.050	0.060
G. Trechos lentos, plantas, piscinas profundas	0.050	0.070	0.080

FONTE: Adaptado de Chow (1959)

Adotando  $n = 0.050$ , foram calculados os cenários para a hidrodinâmica e aplicação das hipóteses acidentais definidas.

## 5.2 TEMPO DE MODELAGEM

A avaliação do tempo computacional para a realização das modelagens foi feita comparando o tempo total dispendido para a realização de cada cenário. Todos os cenários foram calculados em um computador Notebook Dell, com processador Intel Core i7-7700HQ, CPU de 2.80GHz, e memória RAM de 16GB, rodando com sistema operacional Windows 10 Home. O período simulado foi de 72 horas para o *restart file*, e 24 horas para todos os demais modelos, utilizando uma grade numérica de 477 pontos em x (M), por 77 em y (N), com 10 camadas na vertical.

Para o *restart file*, o tempo dispendido foi de 09:34 horas. Foram rodados 10 diferentes cenários de condições hidrodinâmicas, cujo tempo médio foi de 03:02 horas.

Quanto à modelagem de transporte de óleo, O cenário 1 e 2 foram rodados inicialmente, utilizando respectivamente 10000 e 100000 partículas. Considerando que não houve diferença significativa no tempo de modelagem, todos os demais cenários foram rodados utilizando 100000 partículas. Para os 28 cenários utilizados neste estudo o tempo dispendido em média foi de 16 minutos.

Com isso, verifica-se que uma vez tendo modelados previamente os cenários hidrodinâmicos mais significativos para o corpo hídrico, conhecendo e mantendo previamente configurados os modelos de transporte para os tipos de óleo existentes no empreendimento, a realização de uma modelagem rápida sobre demanda é possível em cerca de 30 minutos, considerando o tempo necessário para configuração

dos arquivos de entrada à emergência específica, desde que utilizada máquina com capacidade similar ou maior à utilizada neste estudo.

### 5.3 CENÁRIOS DE VAZAMENTO DE ÓLEO E AÇÕES DE RESPOSTA

Todos os cenários apresentados em 4.6 foram modelados no PART e seus resultados estão apresentados na totalidade no Apêndice II. No Quadro 9 estão elencados os cenários a serem destacados nesta apresentação de resultados, não obstante os demais cenários sejam discutidos em seus aspectos mais relevantes.

QUADRO 9 - CENÁRIOS DESTACADOS

Cj	n	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Vento	Massa de óleo (kg)	Tipo de óleo	Barreiras	Observação
A	2	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q cheia, 100000 partículas
	6	1000à100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q turbinada reduzida
	7	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Vazamento contínuo
B	10	1000	3m/s 0°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento S-N
C	12	1000	3m/s 90°	2760	Fluibrax400	sem	volume do óleo (3000L)
D	14	1000	3m/s 90°	21000	HFO	sem	Óleo pesado ( $D_h$ do manual)
	15	1000	3m/s 90°	21000	Ekofisk	sem	Óleo leve ( $D_h$ do manual)
	17	1000	3m/s 90°	21000	Ekofisk	sem	$D_h$ do modelo
E	18	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	24	1000à100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	26	1000à100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	1 após 1h	1 barreira, resposta imediata

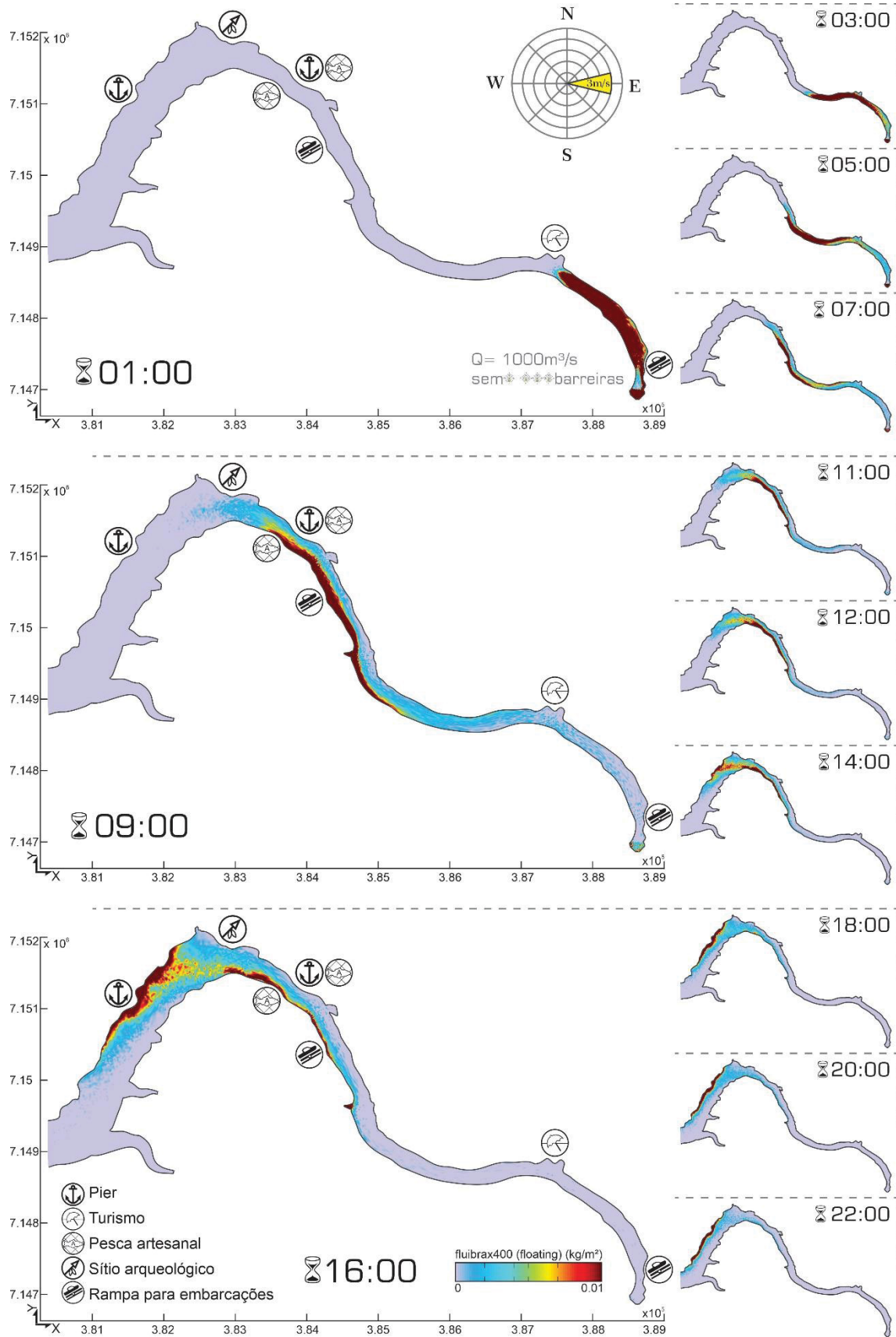
FONTE: O Autor (2023)

#### 5.3.1 Cenário A.2

A simulação A.2 pode ser considerado o cenário mais crítico para os impactos socioambientais potencialmente gerados pelo acidente simulado, devido à manutenção da vazão alta na usina, sem ações de resposta. Como pode ser visto na Figura 31, em menos de 1 hora após o acidente o óleo teria percorrido cerca de 2km, e a região de cachoeiras da Foz do Rio Jordão seria atingida. Depois de 9 horas a pluma de contaminante chegaria as áreas de pesca artesanal e piers das áreas de lazer e pousadas na comunidade entre 6 e 8km da usina, especialmente na margem esquerda, e após 16 horas seria atingida a margem direita no terço final da área modelada.

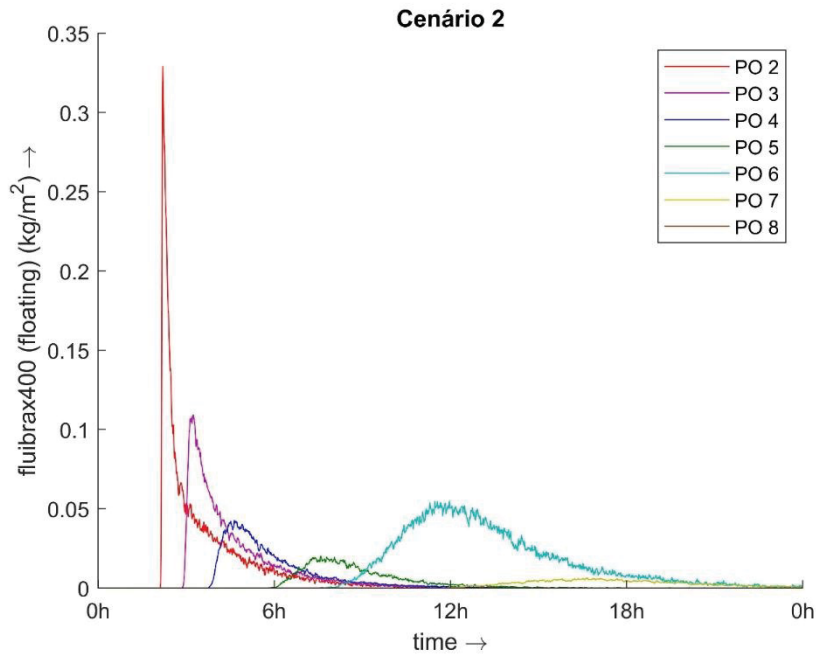


FIGURA 31 - CENÁRIO A.2 - VAZÃO CONSTANTE DE 1000M<sup>3</sup>/S, 21000KG DE ÓLEO FLUIBRAX 400 - 100000 PARTÍCULAS



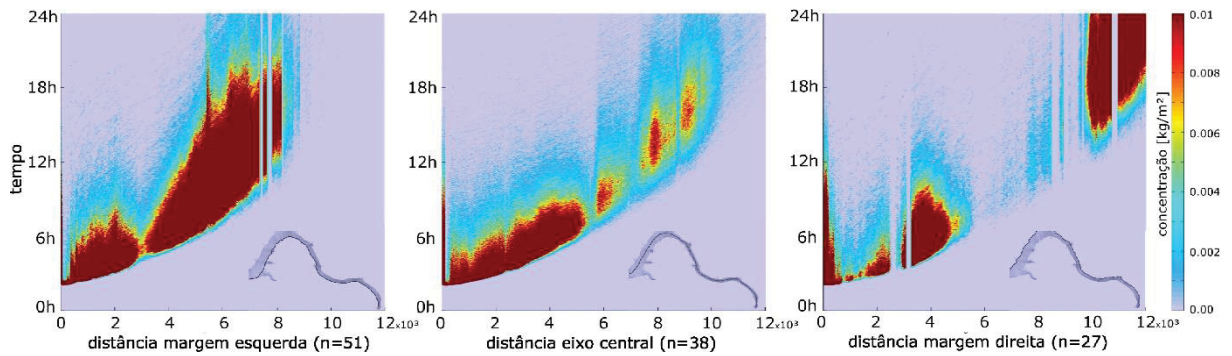
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 32 - CENÁRIO A.2 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



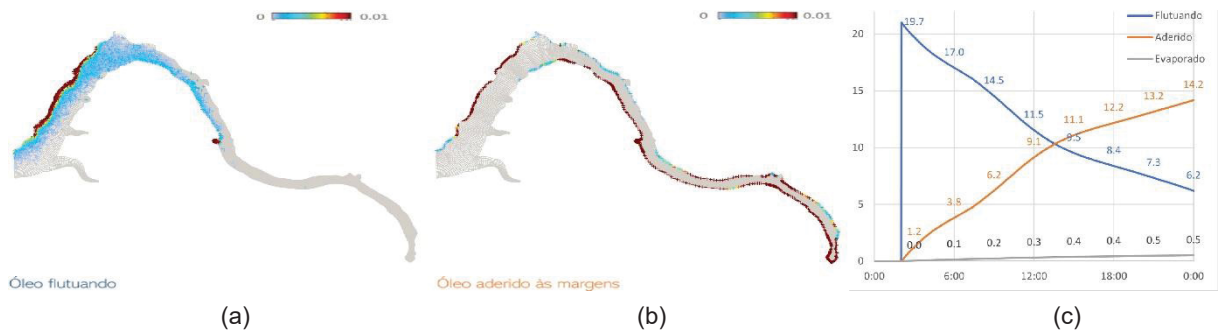
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 33 - CENÁRIO A.2 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 34 - CENÁRIO A.2 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



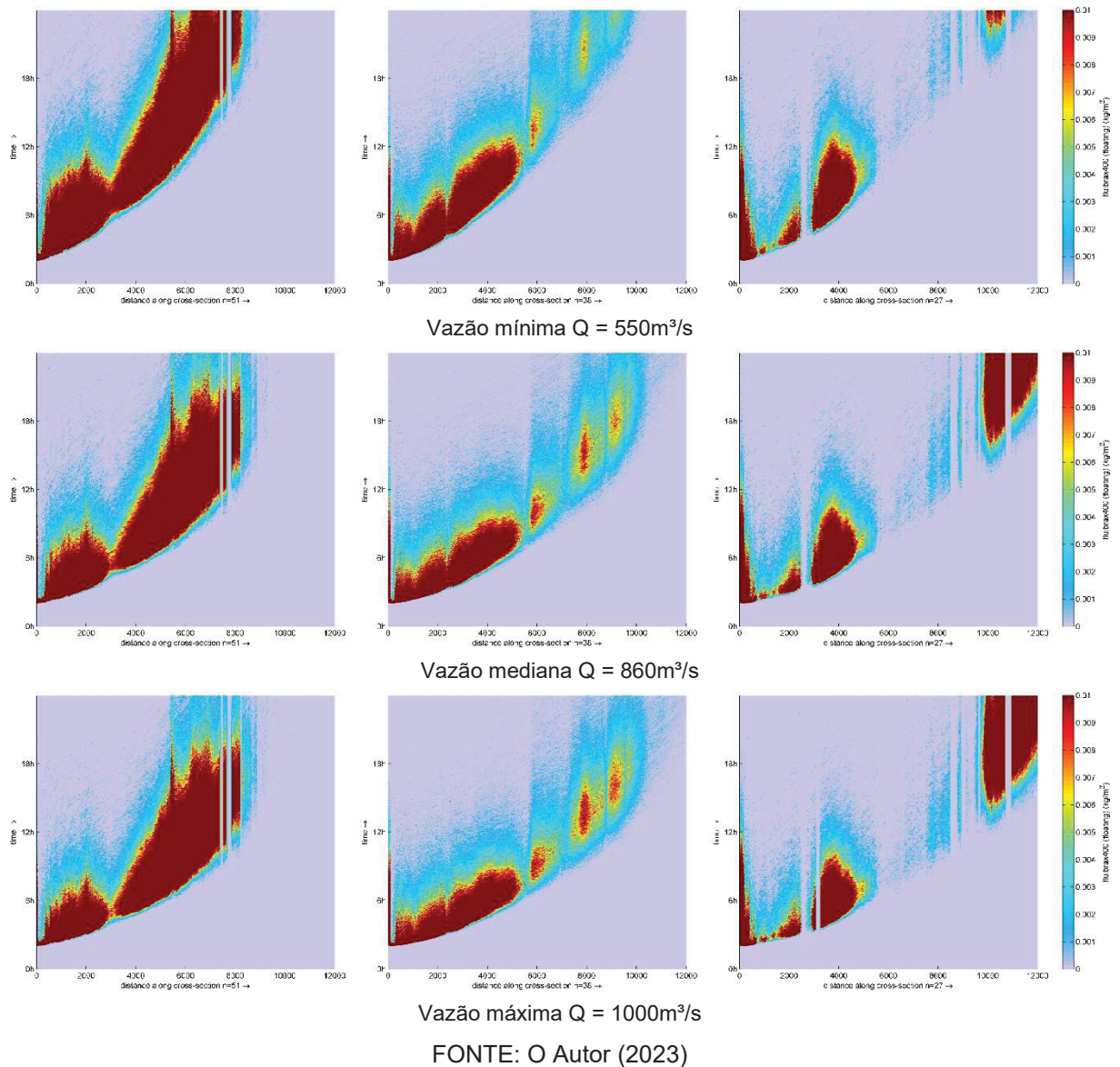
FONTE: O Autor (2023)

Este cenário é significativamente influenciado pelo arraste do óleo pelo vento, que, em sua intensidade de 3m/s e direção predominante de E-W, coincide com a direção da correnteza do rio Iguaçu particularmente no trecho entre 2 e 5km da usina, amplificando o processo de transporte do óleo. 5 horas após a ocorrência, após percorrer o trecho mencionado, a maior concentração do óleo é lançada para a margem esquerda, retornando ao eixo central do rio cerca de 10 horas após o acidente e depois de 8km percorridos. Isso pode ser observado na Figura 32 que apresenta um pico de concentração no ponto de observação PO 6, e na Figura 33 que demonstra que entre 8 e 9km cessa a contaminação da margem esquerda, que passa a se concentrar na margem direita após a curva do rio nesse trecho.

A Figura 34 demonstra que todo o trecho simulado seria atingido pelo óleo, com exceção do terço final da margem esquerda, sendo que a parcela flutuante seria de cerca de 6000kg após 22h da ocorrência, majoritariamente concentrada próxima à margem direita do terço final do modelo, e toda a margem estaria contaminada, tendo 14000kg de óleo sido aderidos às margens, com concentrações mais significativas na margem esquerda. Nota-se, ainda, que cerca de 500kg de óleo teriam sido evaporados ao fim da simulação.

Conforme já mencionado, os resultados dos cenários A.1 e A.2 foram praticamente idênticos, vez que a única diferença se referia ao número de partículas na configuração inicial do modelo. Como o desempenho do cálculo também foi o mesmo, todos os demais cenários foram rodados utilizando 100.000 partículas, considerando uma melhor definição gráfica dos resultados apresentados. Por sua vez, os cenários A.3 e A.4 teriam comportamento bastante semelhante ao A.2, como pode-se observar pelos gráficos de concentrações nas seções longitudinais apresentados na Figura 35. Nota-se que para a menor vazão a concentração do óleo na margem esquerda seria relativamente maior, devido à maior prevalência do arraste pelo vento. Com exceção do trecho final da área estudada (entre 9 e 12km), o vento tenderia a concentrar o óleo na margem esquerda. Nos cenários de vazão mediana e máxima a correnteza tende a manter o óleo na calha do rio por mais tempo, lançando-o contra a margem direita na seção final da área de estudo.

FIGURA 35 - COMPARAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS

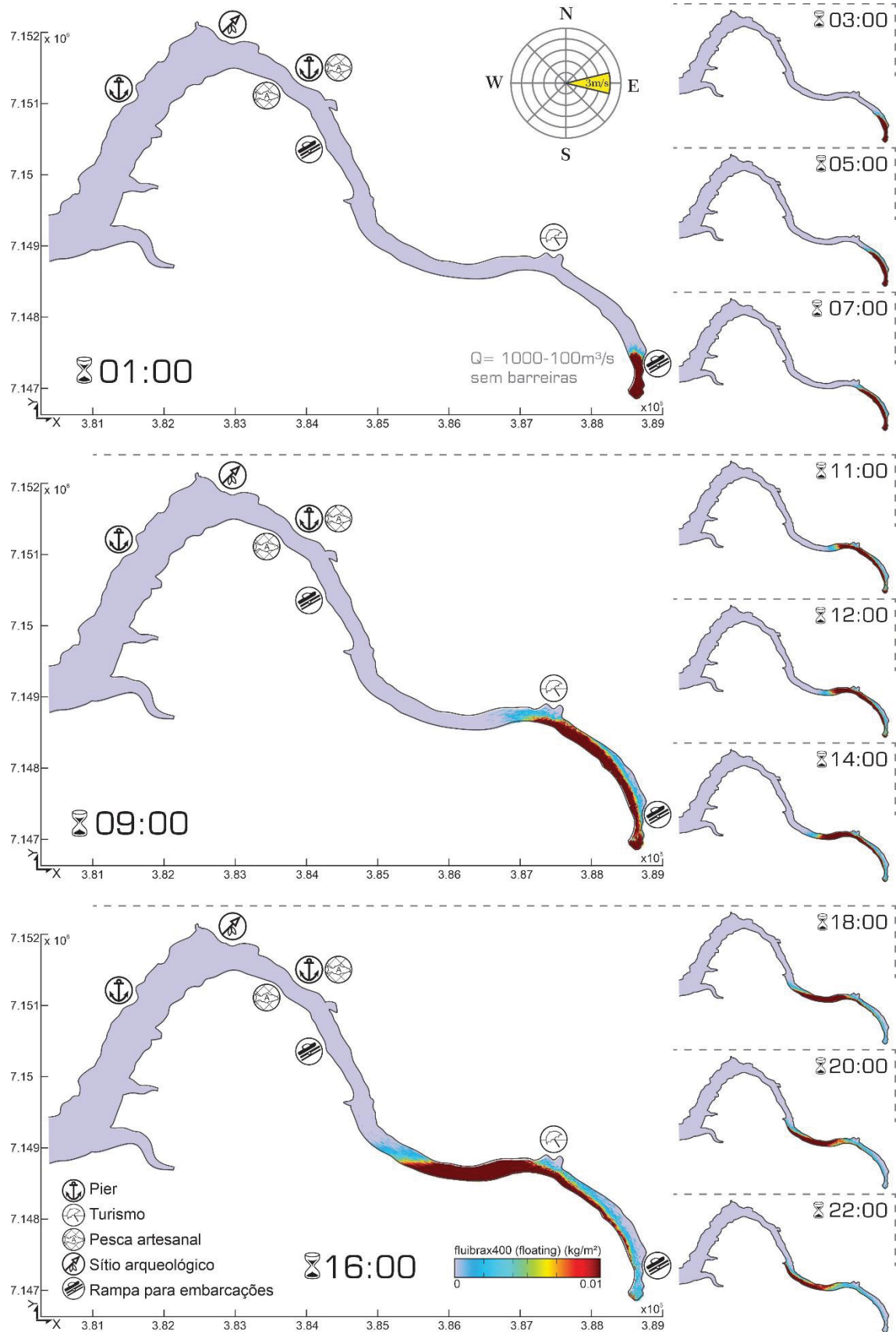


### 5.3.2 Cenário A.6

O cenário A.6 representa a redução abrupta da vazão da usina logo após a ocorrência, de  $1000$  para  $100\text{m}^3/\text{s}$ , o que pode ser tido como uma medida fundamental no momento inicial da ocorrência. Além da ampliação do tempo que a pluma de contaminante levaria para atingir uma mesma área, como observa-se na Figura 36, a redução da vazão também é muito importante para viabilizar a implantação de medidas de resposta como a colocação de barreiras e materiais absorventes, dado que podem não haver condições de segurança para as atividades de embarcações em situações de fluxo muito alto.

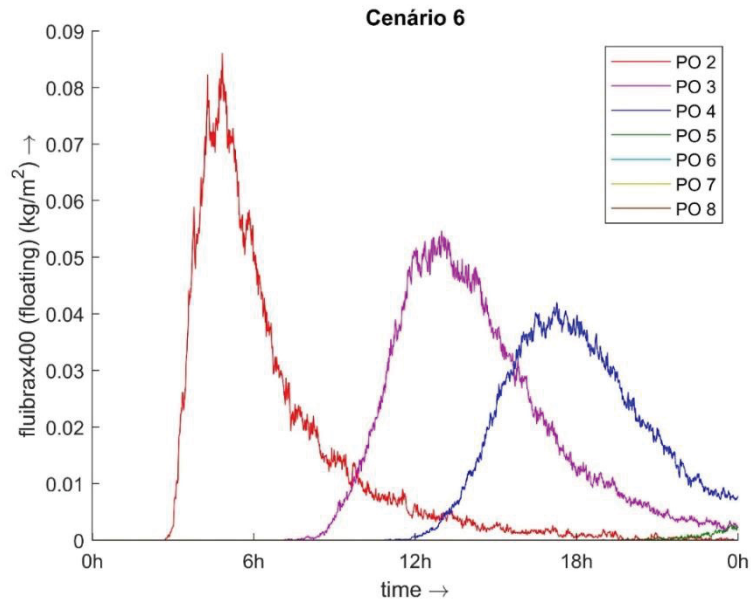


FIGURA 36 - CENÁRIO A.6 - REDUÇÃO PARA 100M³/S, 21000KG DE ÓLEO FLUIBRAX 400



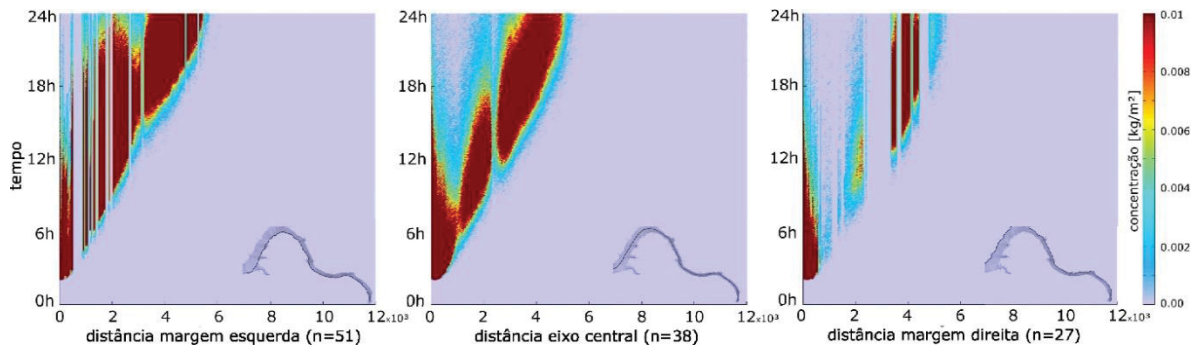
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 37 - CENÁRIO A.6 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



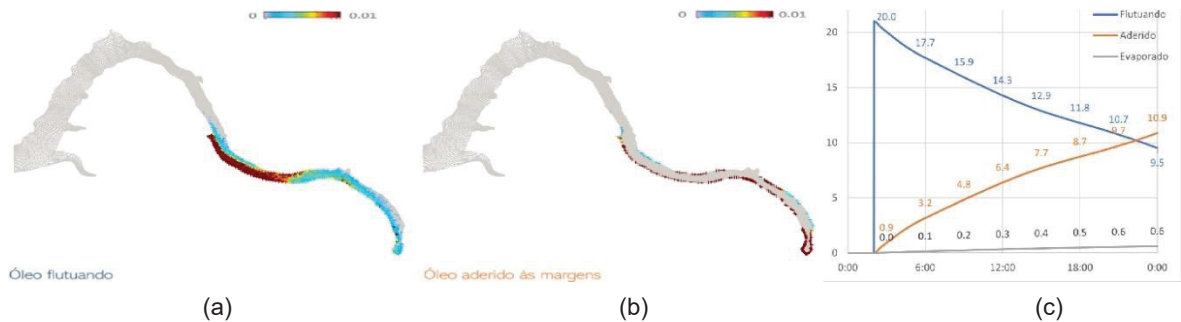
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 38 - CENÁRIO A.6 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 39 - CENÁRIO A.6 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)

Com a redução da vazão, o óleo leva cerca de 7 horas para atingir a área da foz do rio Jordão, e até o fim do período simulado o trecho atingido foi de cerca de 6km, com curvas de concentração na Figura 37 apresentando base mais larga, denotando uma maior lentidão no transporte do óleo ao longo do tempo, com picos de concentração indo até o ponto de observação PO 4. Devido ao arraste do vento tornar-se a principal força atuando sobre a pluma de contaminação, para a direção e intensidade simulada a margem esquerda é a mais atingida, como apresenta a Figura 38, embora uma grande parte do óleo permaneça na calha do rio. A Figura 39 reforça essa observação, demonstrando que embora quase 11000kg teriam sido aderidos às margens, cerca de 9500kg ainda estariam na superfície da água, passíveis de serem recuperados com menores impactos ambientais. Aproximadamente 500kg teriam passado pelo processo de evaporação.

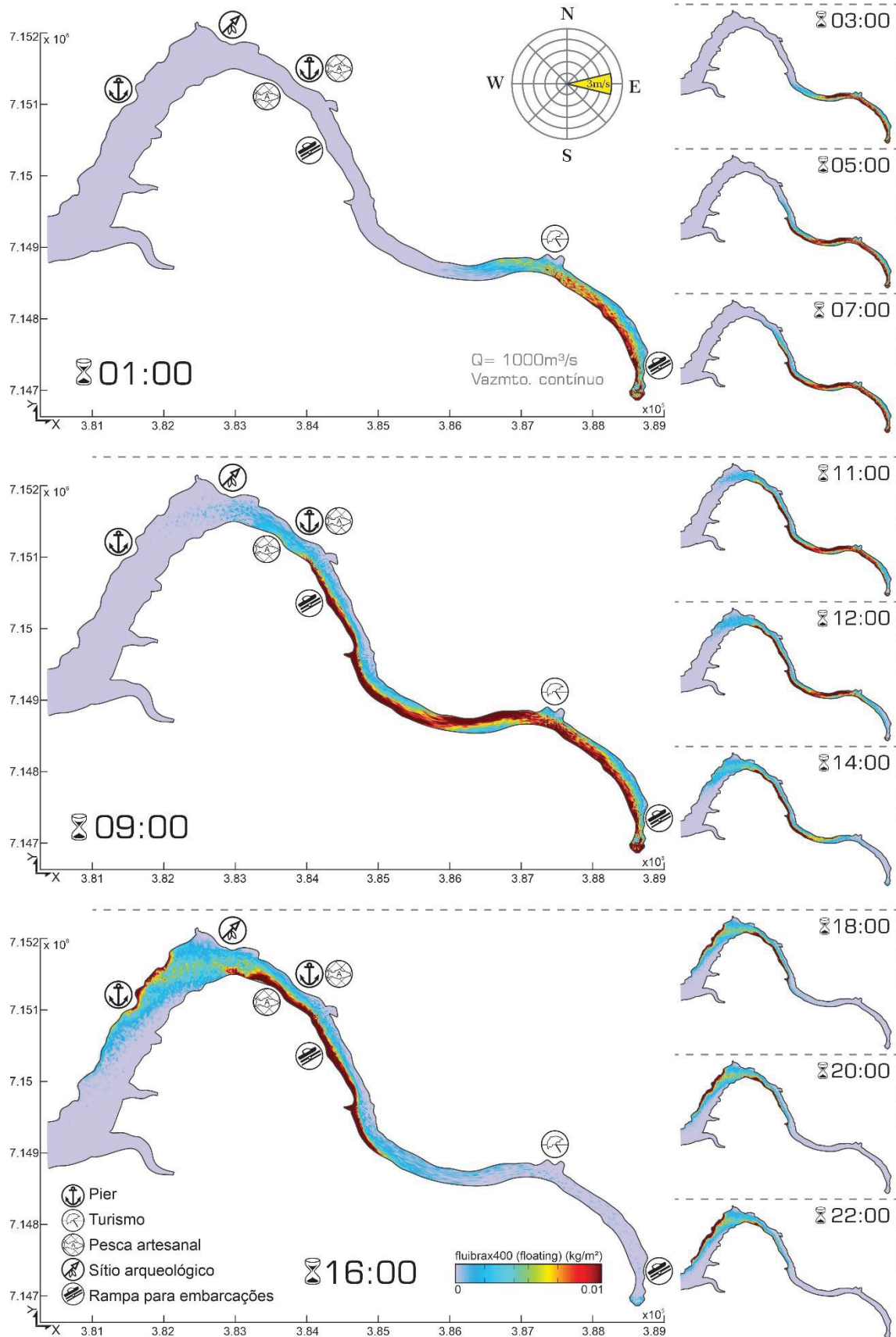
Importante destacar que a redução da vazão à jusante depende também da concomitante redução da vazão da usina subsequente. Ou seja, a operação de redução da vazão na UHE GNB dependeria também da redução da vazão turbinada na UHE Salto Santiago, sem a qual teria-se um rebaixamento do nível d'água, com a possibilidade de amplificar as margens atingidas pela ocorrência.

### 5.3.3 Cenário A.7

Este cenário representa a condição crítica em que o vazamento não ocorresse de modo instantâneo, mas distribuído ao longo do tempo. A simulação se dá por um vazamento de 0,55 litros por segundo, durante 10:30 horas, perfazendo o mesmo volume lançado nos demais cenários.

Como não há medidas de resposta nem redução de vazão, conforme apresenta-se na Figura 40, o óleo atinge as áreas sensíveis em tempos parecidos ao observado no cenário A.2, apesar de que em concentrações inicialmente menores e com a característica de que a pluma ocupa uma área mais alongada no curso hídrico enquanto dura o vazamento. O gráfico da Figura 41 também caracteriza o período do vazamento, sendo que as curvas de concentração dos pontos próximos à usina se mantêm em patamar até o encerramento do vazamento, quando a curva passa a migrar para os pontos mais a jusante, particularmente o PO 6. Neste gráfico optou-se por apresentar o PO 1, para ilustrar o seu comportamento nesse cenário, dado a escala de concentração se dar de modo menos díspar entre ele e os demais pontos.

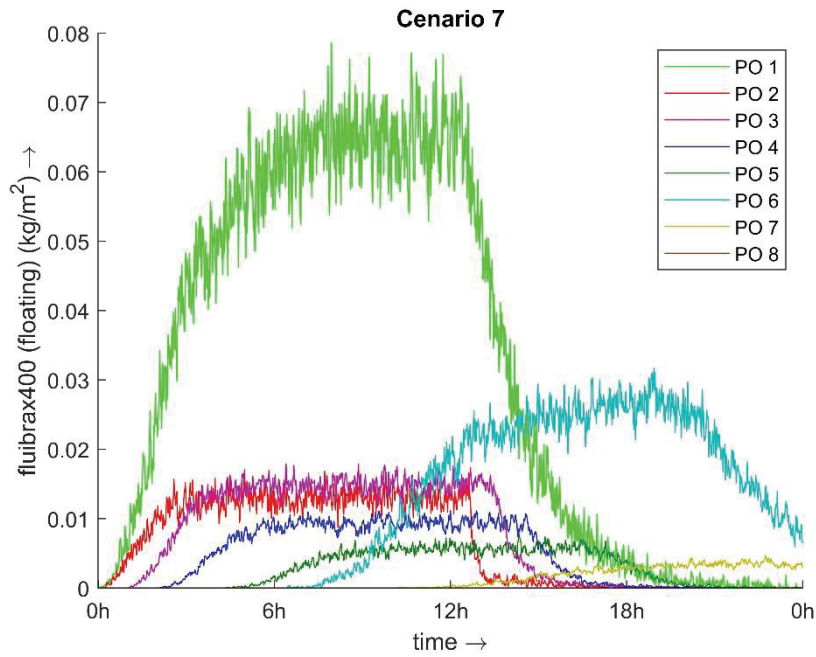
FIGURA 40 - CENÁRIO A.7 - VAZÃO CONSTANTE DE 1000M<sup>3</sup>/S,  
VAZAMENTO CONTÍNUO, 21000KG DE ÓLEO FLUIBRAX 400



FONTE: O Autor (2023)

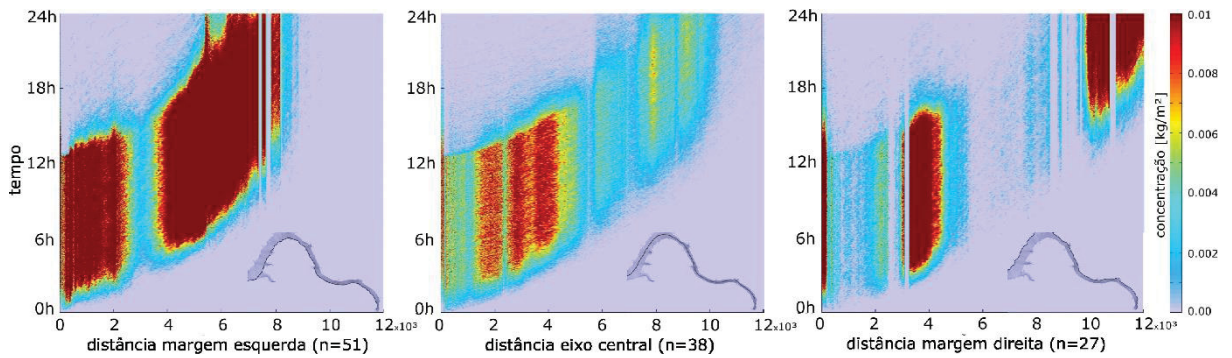


FIGURA 41 - CENÁRIO A.7 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



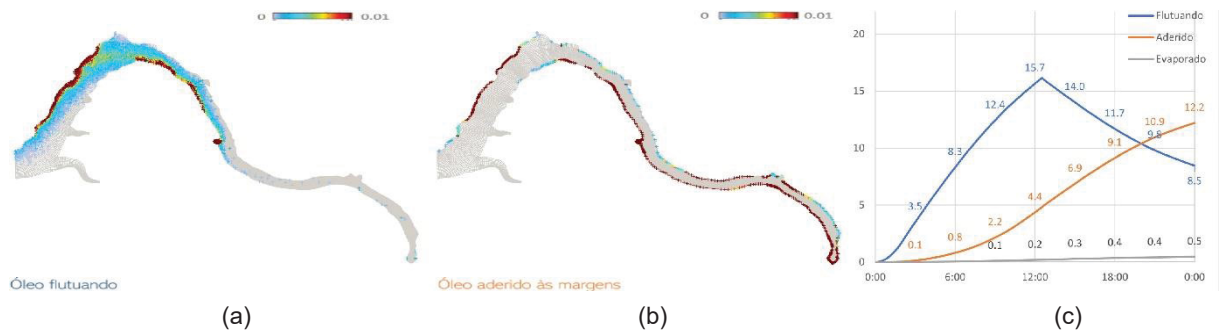
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 42 - CENÁRIO A.7 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 43 - CENÁRIO A.7 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)

A Figura 41 também denota essa permanência dos patamares de concentração do óleo durante o período simulado, especialmente próximo às margens e com menor intensidade no eixo central, comparativamente, que refletem num aparente atraso da pluma de contaminação, que 22h após o início da simulação ocupa uma área equivalente àquela ocupada pelo óleo depois de 16h no cenário A.2, conforme observa-se na Figura 42. Apesar disso, ao final da simulação já teriam se acumulado mais de 12000kg de óleo nas margens do rio Iguaçu, restando 8500kg na superfície da água, e tendo sido afetados todos os pontos sensíveis identificados na área do modelo. Similar aos demais cenários, o volume evaporado teria sido de 500kg.

#### 5.3.4 Cenário B.10

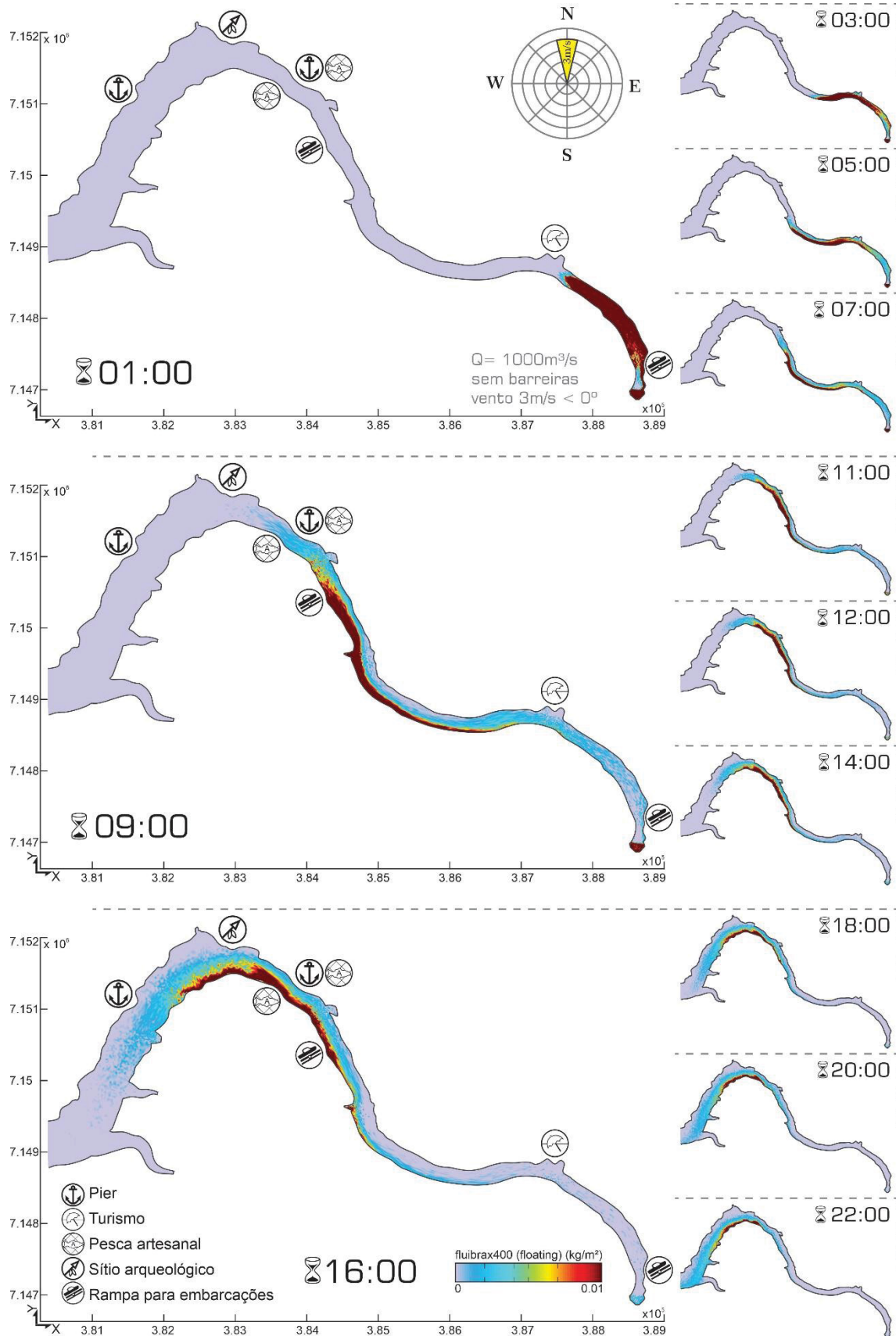
Este cenário explorou a alteração das condições meteorológicas, particularmente da direção do vento, buscando analisar sua influência sobre a área atingida. Manteve-se a intensidade em 3m/s, porém a direção foi alterada para o sentido Norte-Sul. Com isso, observa-se que a pluma de contaminação também percorre toda a extensão da área modelada, havendo porém uma expressa intensificação da contaminação da margem esquerda do rio Iguaçu e menores impactos à margem direita.

A Figura 44 ilustra esse comportamento, podendo-se destacar que a direção do vento poderia fazer permanecer uma parte do óleo em áreas de recirculação nas proximidades da casa de força. A Figura 46 apresenta que após 4km praticamente a concentração do óleo na margem direita é mínima, enquanto a margem esquerda acumula a contaminação atingindo áreas que em outros cenários, com o vento predominante, eram preservadas.

Ao final da simulação a massa de óleo flutuando no corpo hídrico é de cerca de 7000kg, enquanto 13500kg seriam aderidos às margens, e 500kg teriam evaporado.

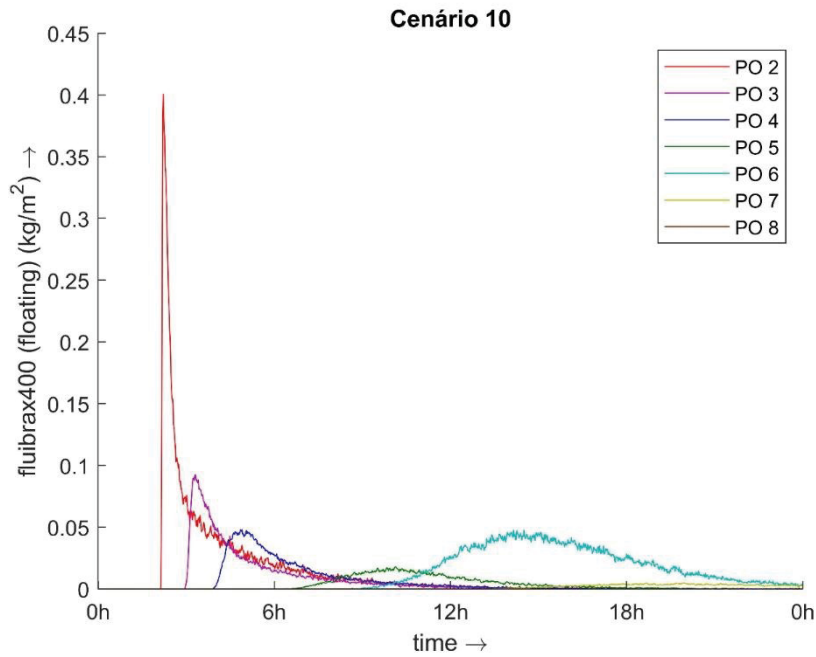
A influência da direção do vento na determinação da área atingida também foi percebida nos cenários B.8 e B.9, que respectivamente simularam vento na mesma intensidade de 3m/s mas direção Sul-Norte e Oeste-Leste, respectivamente. Os resultados destes cenários para as seções longitudinais são ilustrados na Figura 44, nos quais a margem direita seria a mais afetada, inversamente ao identificado nos cenários A.1 e B.10.

FIGURA 44 - CENÁRIO B.10 - VENTO 3M/S < N-S VAZÃO 1000M³/S, 21000KG DE ÓLEO FLUIBRAX 400



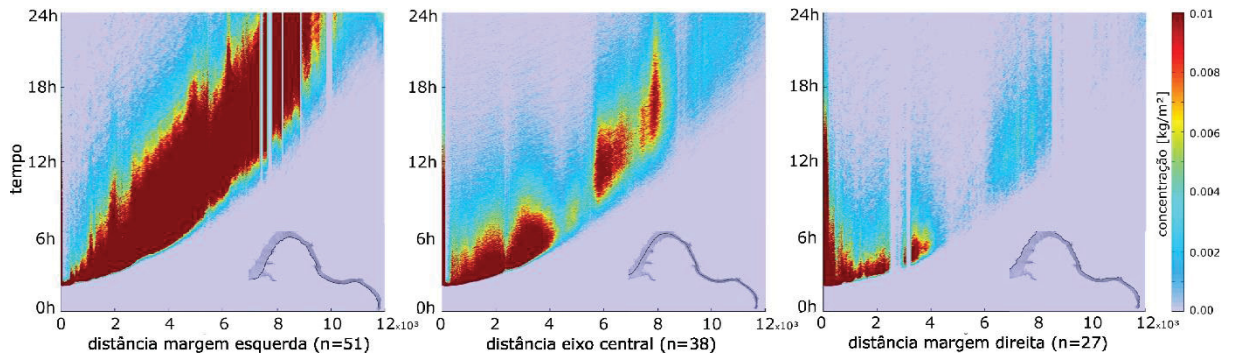
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 45 - CENÁRIO B.10 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



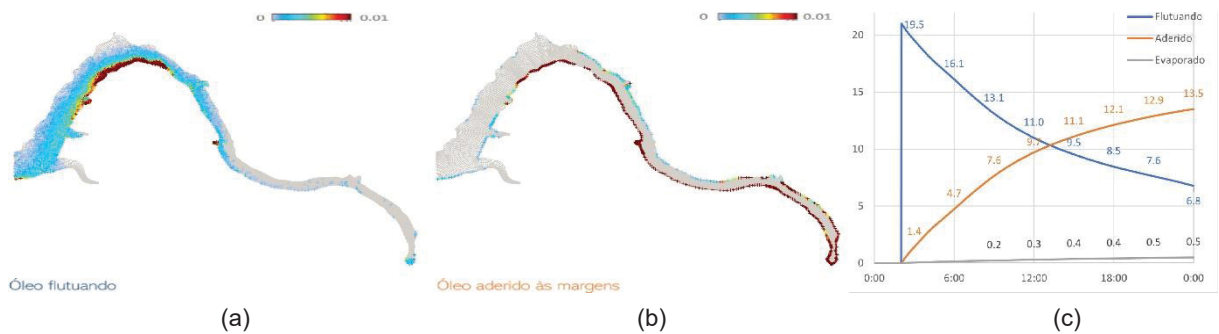
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 46 - CENÁRIO B.10 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

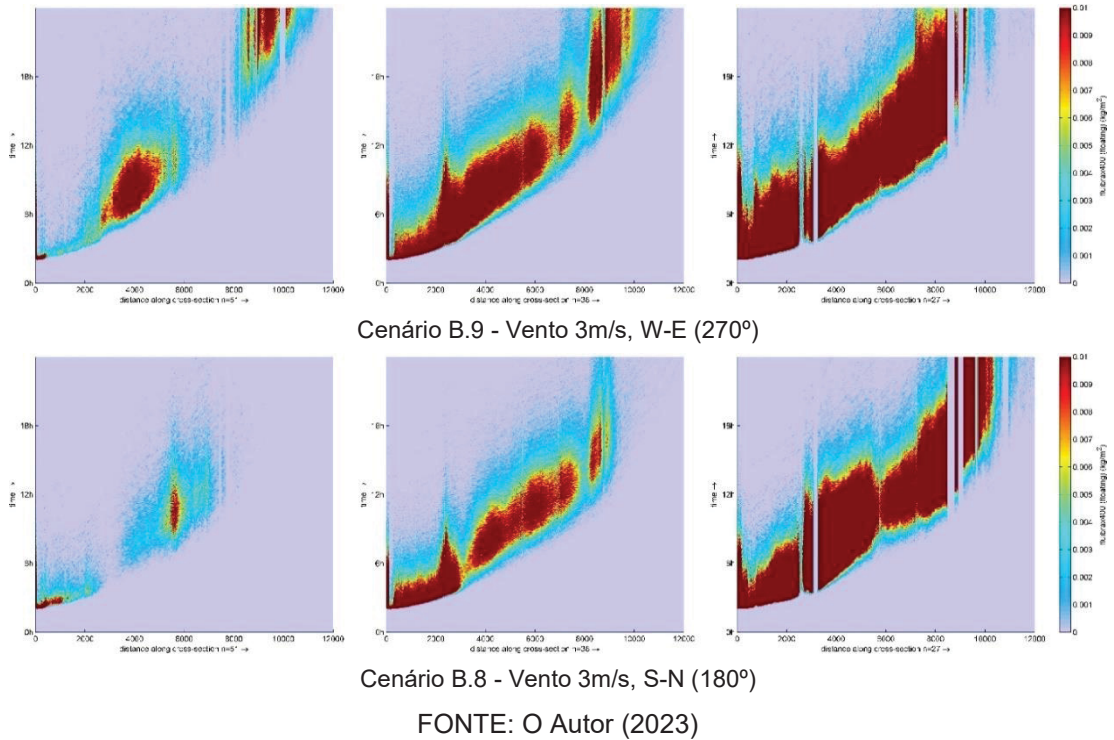
FIGURA 47 - CENÁRIO B.10 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)

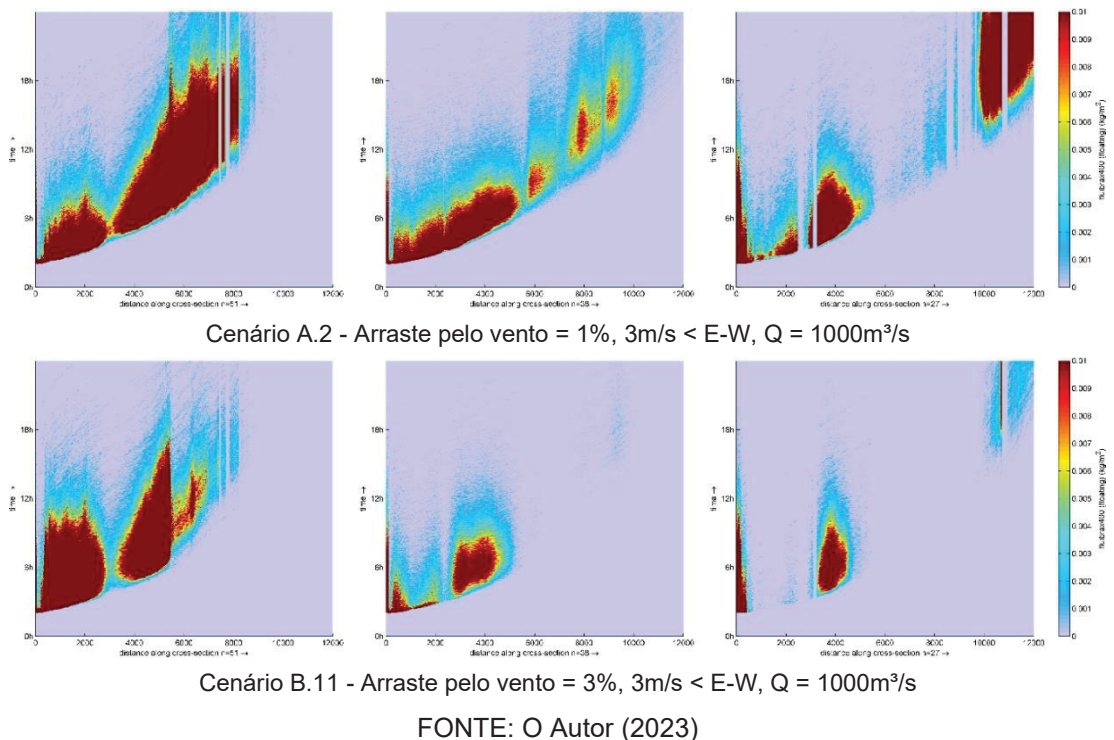


FIGURA 48 - DIFERENTES DIREÇÕES DE VENTO - SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51

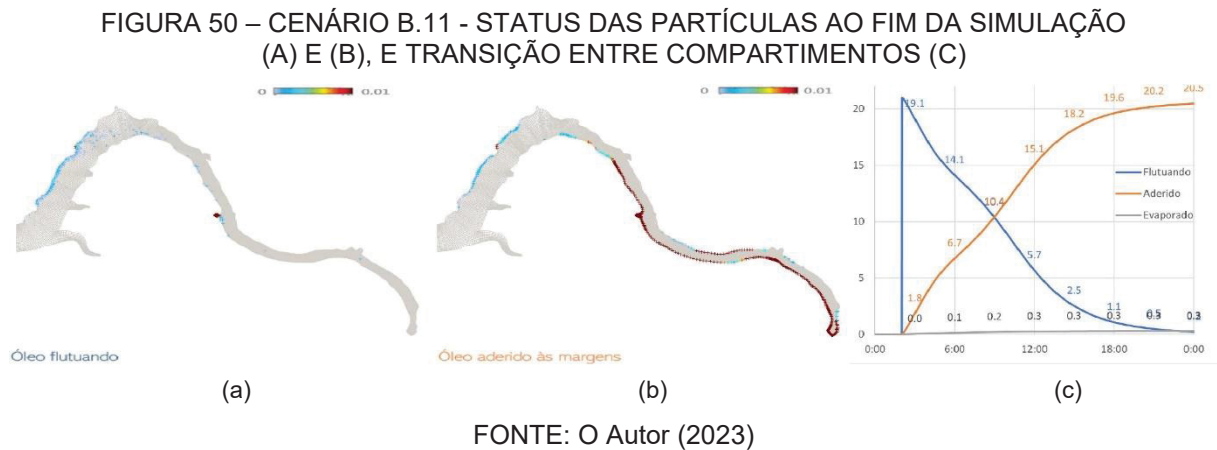


Outro cenário simulado relacionado às condições meteorológicas foi o B.11, em que foi alterado o % de arraste pelo vento para 3%, para as mesmas condições de intensidade e direção predominante (3m/s < E-W).

FIGURA 49 - DIFERENTES % DE ARRASTE DO VENTO - SEÇÕES LONGITUDINAIS



Esta comparação demonstra que os cenários possuem significativa sensibilidade às alterações neste parâmetro. O coeficiente de arraste em 3% tende a promover uma adesão do óleo à margem esquerda do rio em um tempo muito menor, fazendo com que esta área se torne a mais impactada em termos de presença e concentração de óleo. Com um arraste de 3% a concentração do óleo prevaleceria nos primeiros 6km da margem esquerda do rio Iguaçu após o local do acidente.

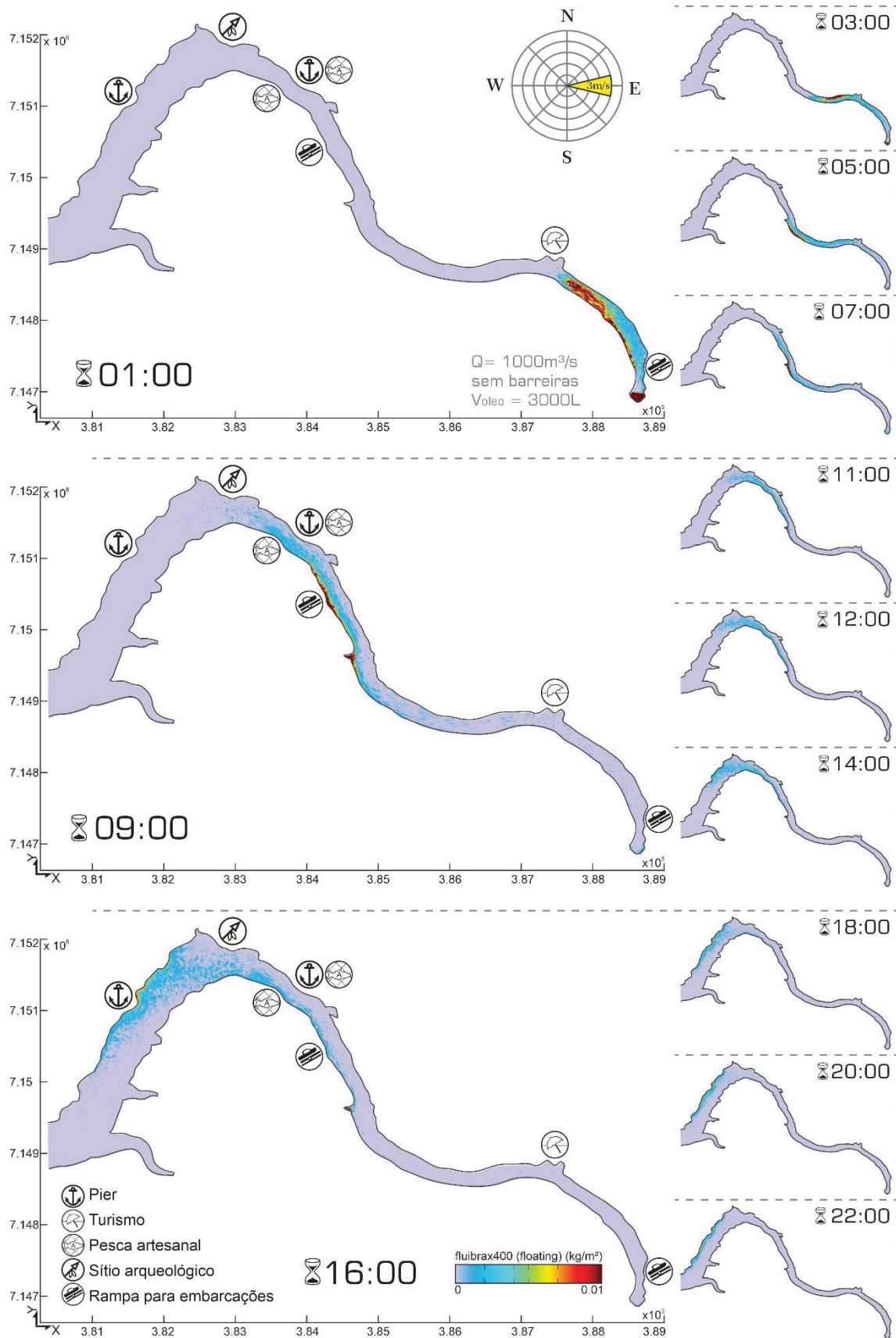


Muito embora a área atingida aparenta ser reduzida, a Figura 50 demonstra que a adesão às margens nesse trecho se daria em concentrações muito maiores que o observado em cenários com arraste de 1%, sendo que praticamente todo o óleo estaria aderido a essa fração das margens nas primeiras 24 horas, o que dificultaria significativamente a possibilidade de recuperação do ambiente, demandando uma operação mais complexa por um tempo maior.

### 5.3.5 Cenário C.12

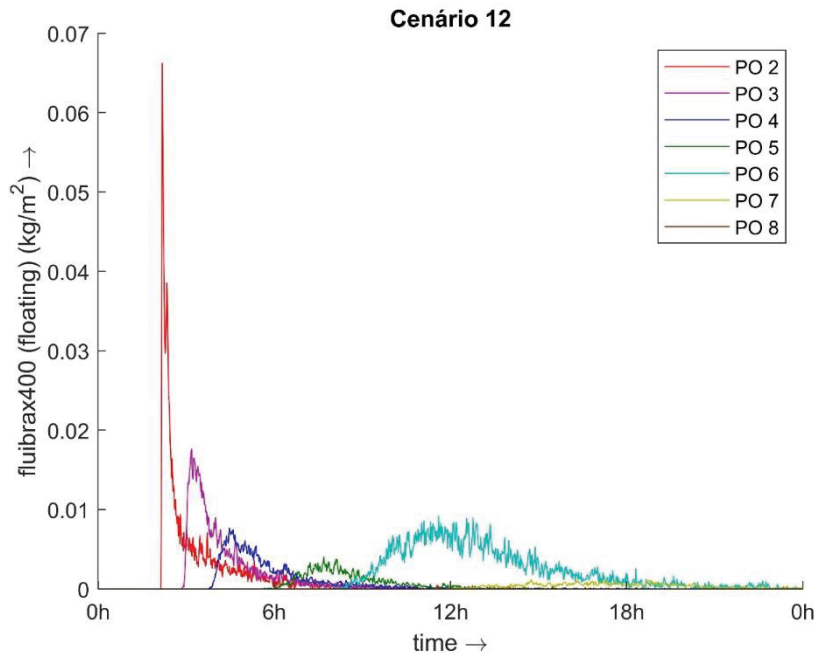
O aspecto de interesse neste cenário, assim como do cenário C.13, foi o de comparar o processo de transporte do óleo para um volume de vazamento menor do que a descarga de pior caso ( $V_{pc}$ ), considerando que em situações menos críticas os sistemas de contenção da usina evitariam que o volume total de um transformador fosse parar no corpo hídrico. Nesse caso, o lançamento de 3000L, equivalente a 2760kg de óleo Fluibrax 400 foi simulado, e os resultados demonstram que – de modo geral, a pluma de contaminação apresentaria o mesmo comportamento que o  $V_{pc}$ , embora obviamente em concentrações menores.

FIGURA 51 - CENÁRIO C.12 - VAZÃO 1000M<sup>3</sup>/S, 2760KG DE ÓLEO FLUIBRAX 400



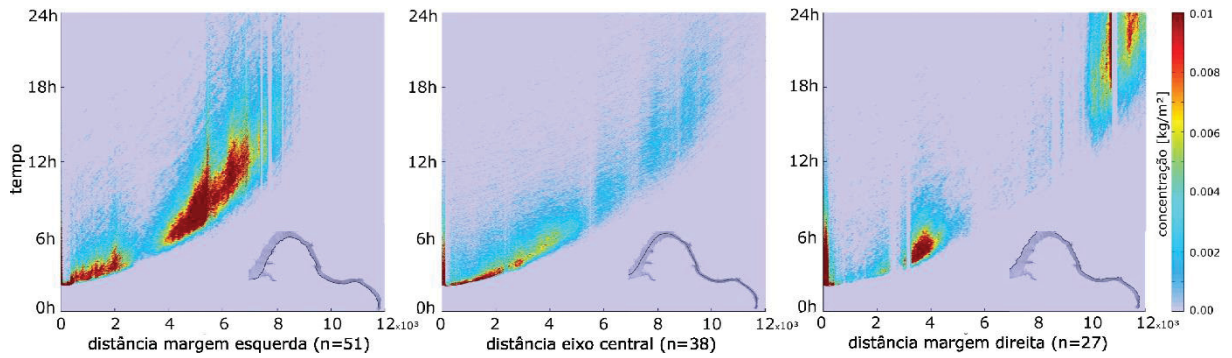
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 52 - CENÁRIO C.12 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



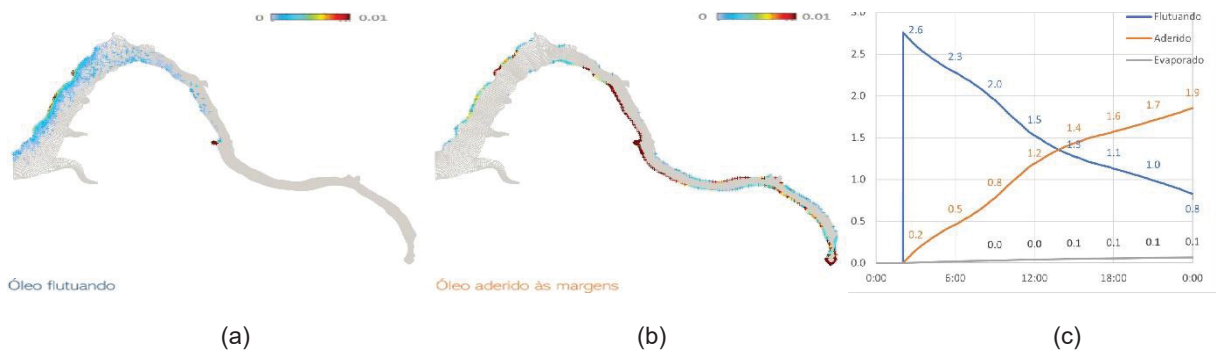
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 53 - CENÁRIO C.12 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 54 – CENÁRIO C.12 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)



Como demonstra a Figura 54, após 22h do lançamento do óleo a massa acumulada nas margens e na superfície seriam respectivamente de 1900 e 800 quilos, equivalentes a 68.8% e 29.0%, praticamente idêntica aos percentuais observados no cenário A.2 (67.6% e 29.5%). Cerca de 100 quilos (3,3%) teria sido evaporado. Com isso, fica evidente que o tempo de resposta para condições similares independe do volume de óleo lançado, ou seja, a mobilização para instalação de barreiras de contenção e materiais absorventes deverá manter as mesmas tratativas com relação ao tempo.

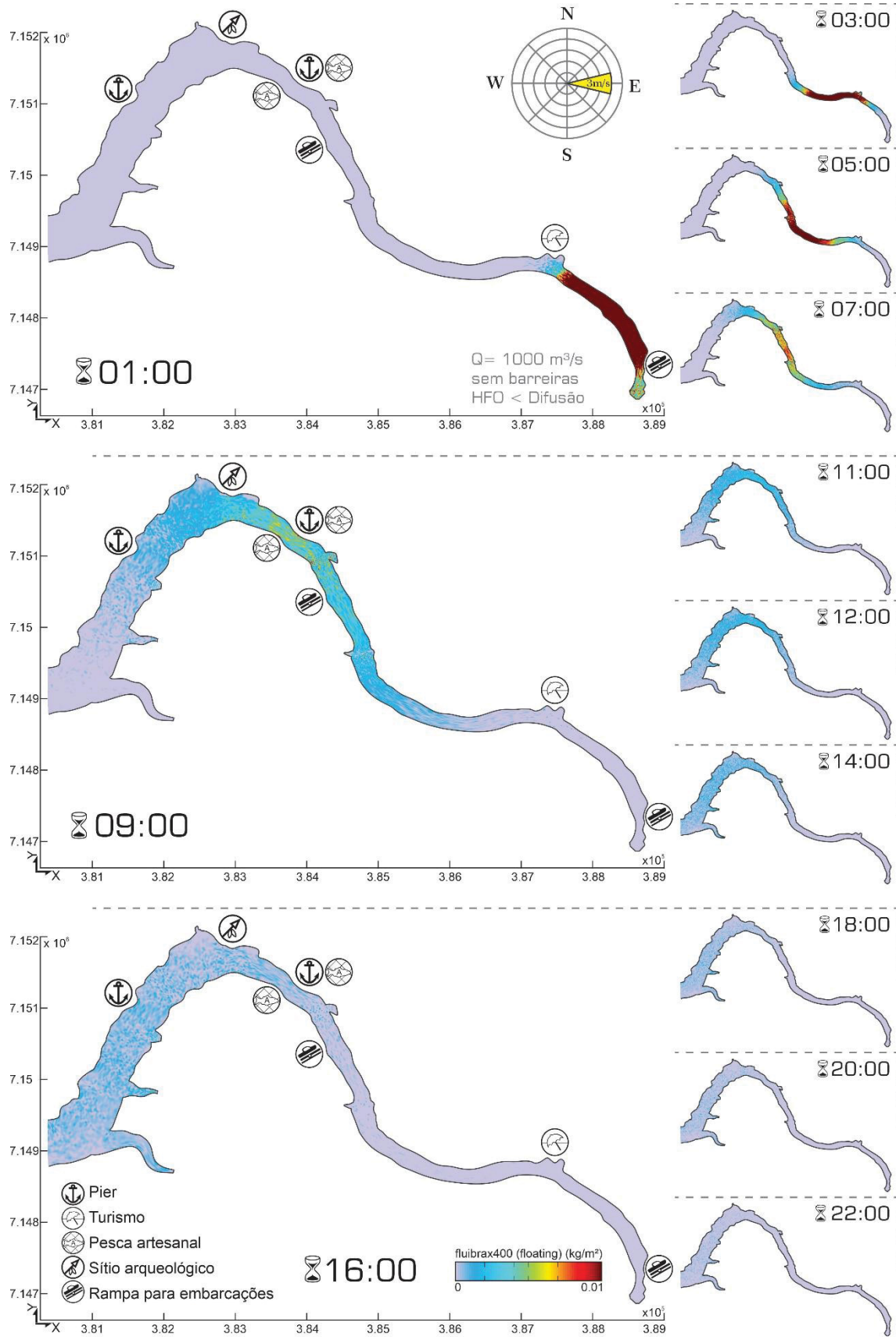
#### 5.3.6 Cenários D.14 e D.15

A fim de testar a sensibilidade do modelo a parâmetros relativos a diferentes tipos de óleo, o cenário D.14 utilizou como referência os parâmetros indicados no manual do DELFT3D para um óleo pesado denominado HFO, enquanto o cenário D15 utilizou o modelo de óleo leve chamado de Ekofisk.

Seguindo os parâmetros do manual ambos os modelos de óleo adotam coeficientes de dispersão horizontal bem maiores do que o utilizado para o Fluibrax 400, o que leva ao comportamento observado na Figura 55 e na Figura 59, em que ao longo de toda a simulação o óleo ocupa o corpo hídrico de margem a margem, de forma que mesmo os gráficos de concentrações longitudinais (Figura 57 e Figura 61) apresentam concentrações semelhantes em todas as respectivas seções.

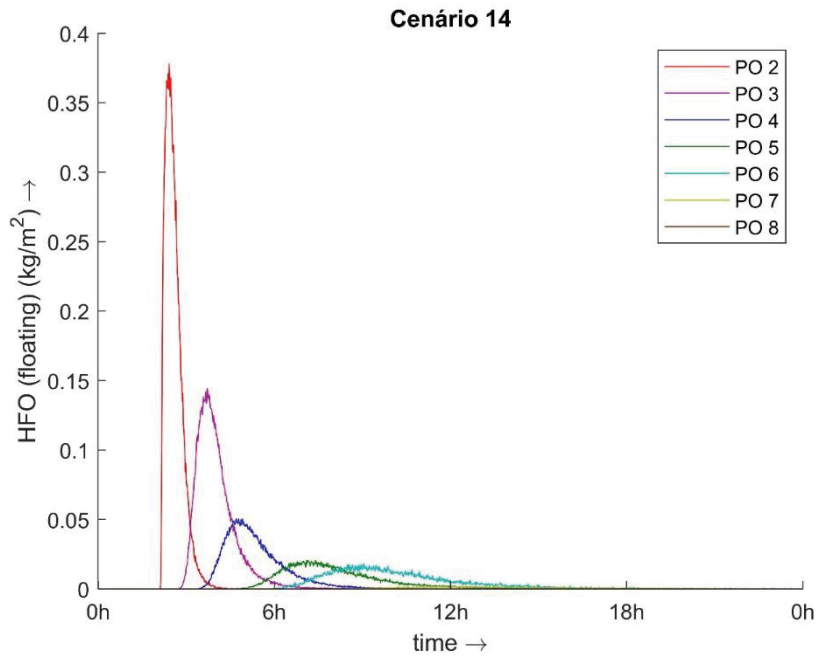
Uma diferença relevante entre esses dois tipos de óleo, porém, é a de que enquanto a probabilidade de adesão do HFO às margens é maior, o mesmo parâmetro é zerado no Ekofisk, levando a um comportamento distinto nesse aspecto. Com isso, o cenário D.14 apresenta praticamente toda a extensão das margens contaminadas ao fim da simulação, sendo 19800 quilos aderidos às margens, 400 quilos somente ainda flutuando e 200 quilos evaporados. Enquanto isso, para o cenário D.15 cerca de 10 mil quilos permaneceriam na superfície da água, e 600 quilos teriam sido evaporados – devido ao maior % de evaporação diário deste óleo, enquanto 5 mil quilos já teriam sido lançados a jusante do modelo.

FIGURA 55 - CENÁRIO D.14 - VAZÃO 1000M<sup>3</sup>/S, 21000KG DE ÓLEO HFO –  $D_h$  MANUAL



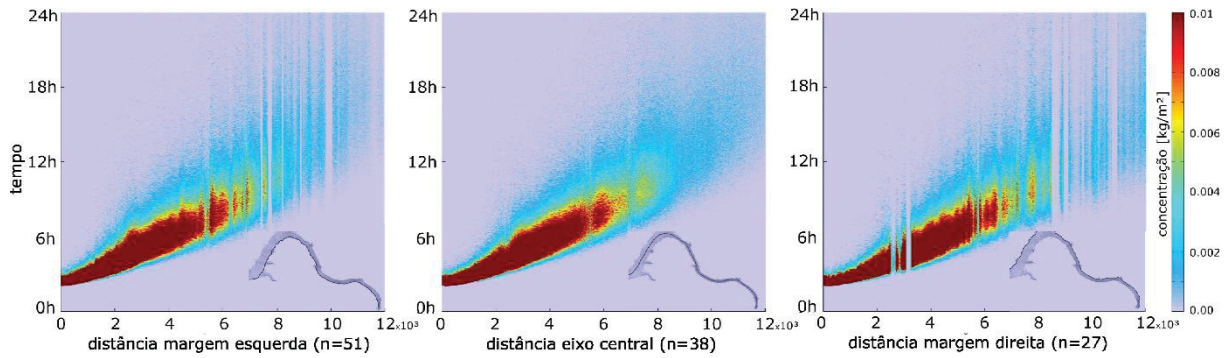
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 56 - CENÁRIO D.14 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



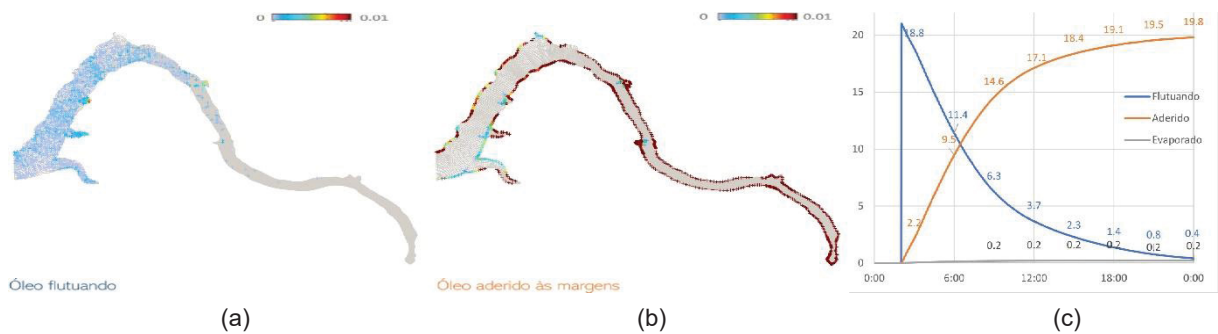
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 57 - CENÁRIO D.14 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



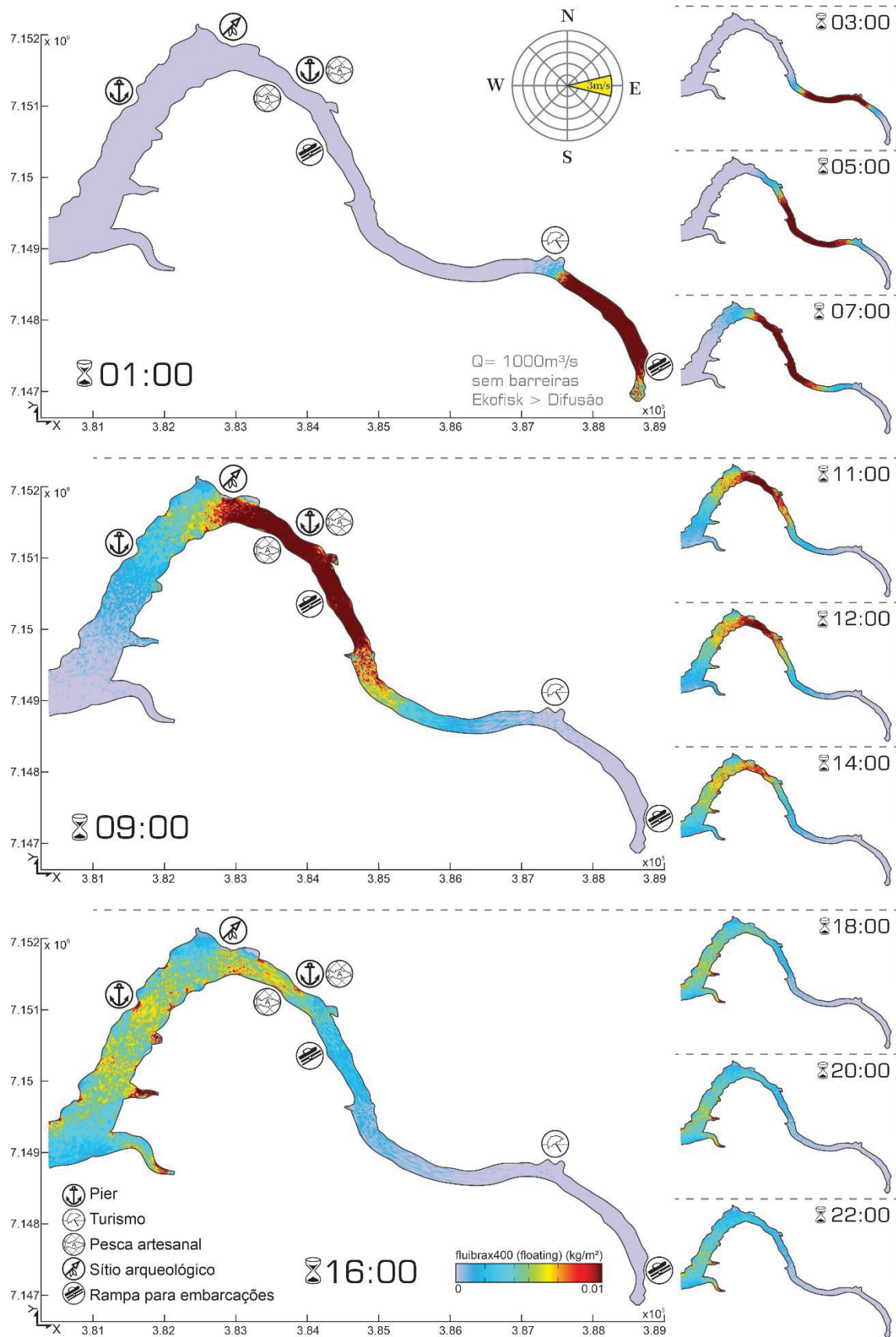
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 58 - CENÁRIO D.14 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



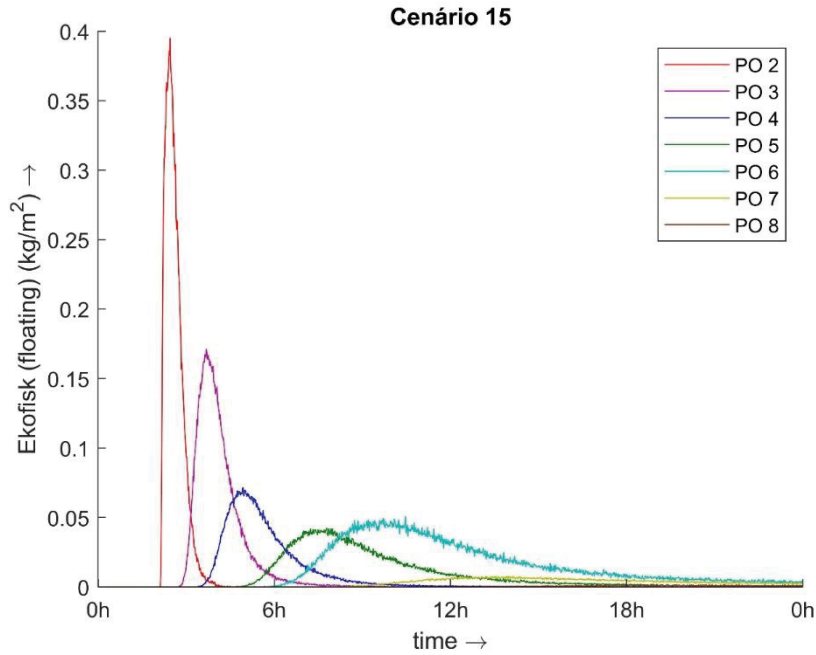
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 59 - CENÁRIO D.15 - VAZÃO 1000M<sup>3</sup>/S, 21000KG DE ÓLEO EKOFISK -  $D_h$  MANUAL



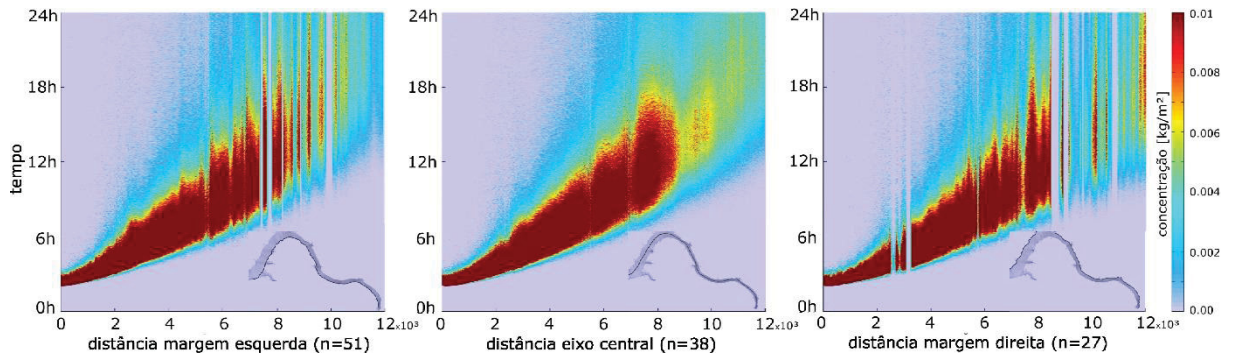
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 60 - CENÁRIO D.15 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



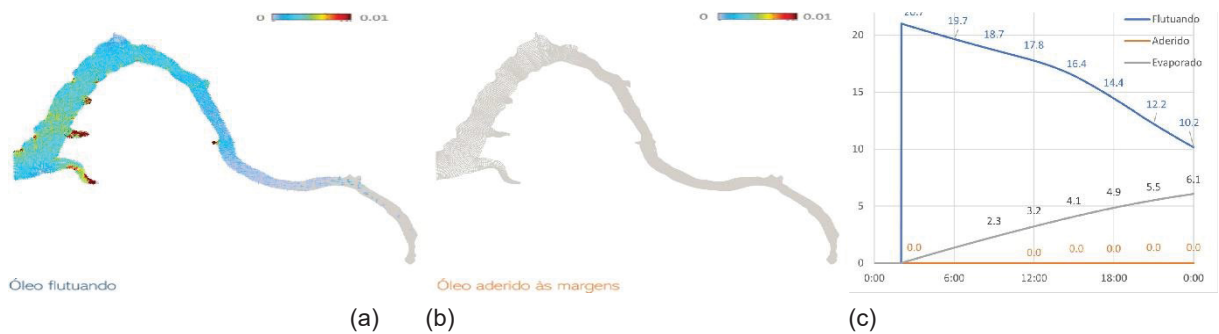
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 61 - CENÁRIO D.15 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 62 - CENÁRIO D.15 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)

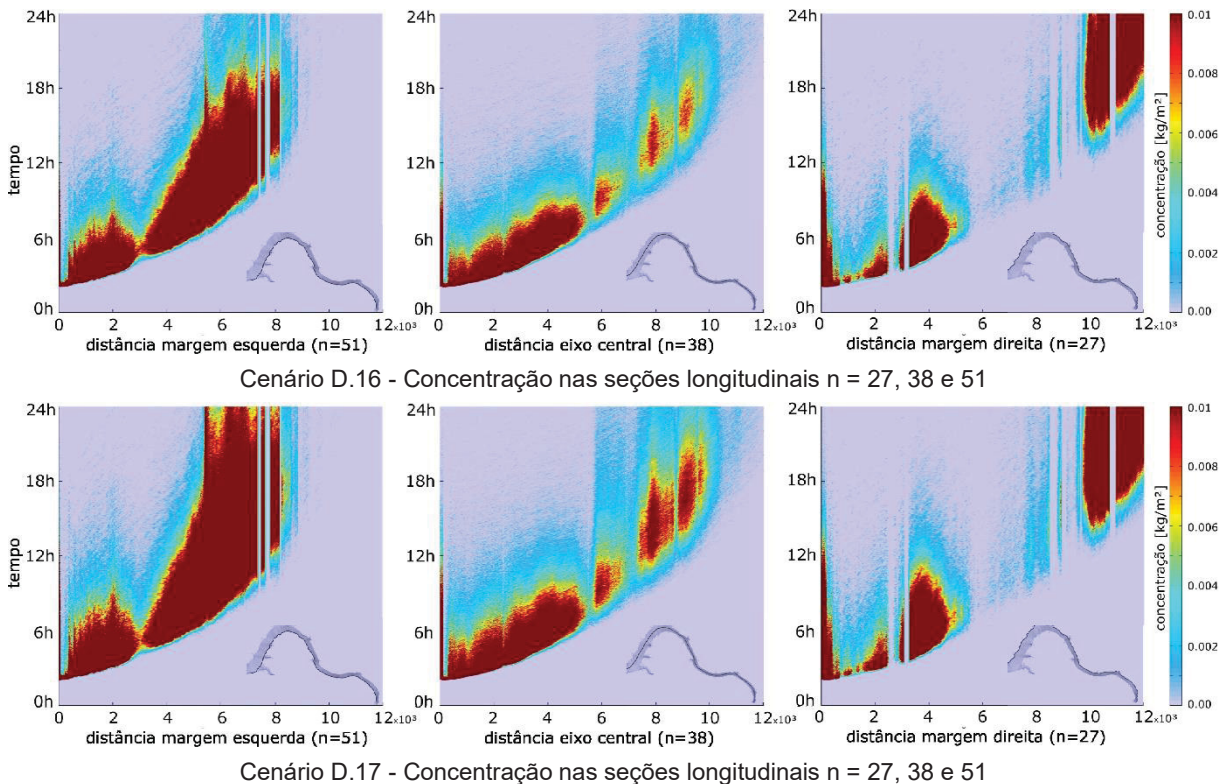


FONTE: O Autor (2023)



Reforça-se a sensibilidade do parâmetro  $D_h$  dispersão horizontal, considerando que simulando o cenário para o mesmo tipo de óleo, porém com os valores de dispersão adotados para os demais cenários, obteve-se comportamento bastante semelhante ao cenário A.2.

FIGURA 63 - COMPARAÇÃO UTILIZANDO DH DO MODELO FLUIBRAX



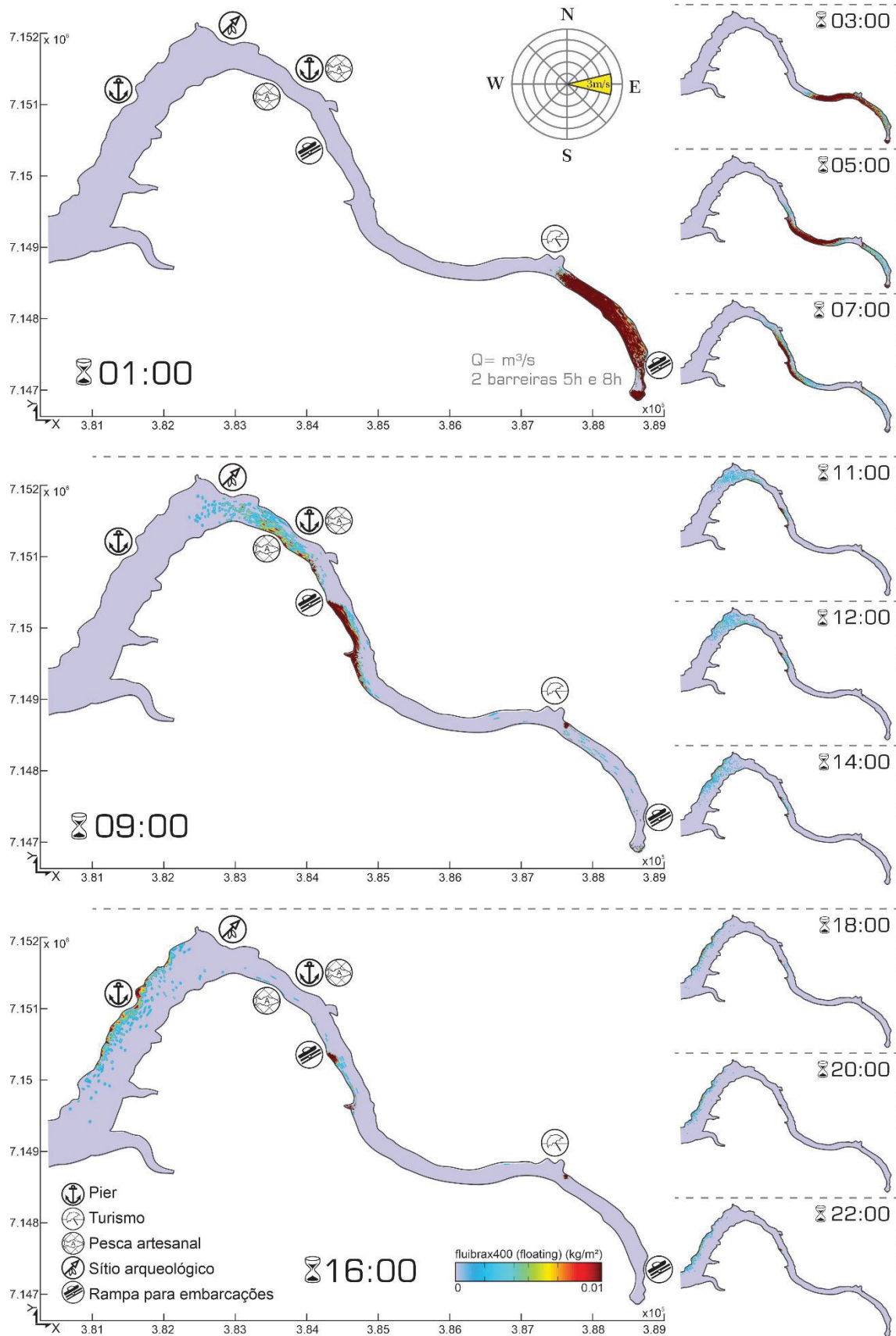
FONTE: O Autor (2023)

### 5.3.7 Cenário E.18

A implantação de barreiras de contenção foi testada para diversos cenários, incluindo a hipótese de manutenção da vazão alta ou reduzida, com a instalação de barreiras como resposta lenta (iniciando após 5h da ocorrência), rápida (iniciando após 2h) e imediata (iniciando após 1h).

O cenário E.18 representa a pior condição, de manutenção da vazão alta e resposta lenta, dado que a instalação das barreiras em B e C aconteceria após grande parte do óleo ter passado por esses pontos de interesse. Ainda assim, pode-se verificar que, em relação ao cenário A.2, tem-se uma redução de impacto significativa, de forma que as concentrações de óleo que atingiriam a jusante das barreiras seriam relativamente menores, como demonstra a Figura 64.

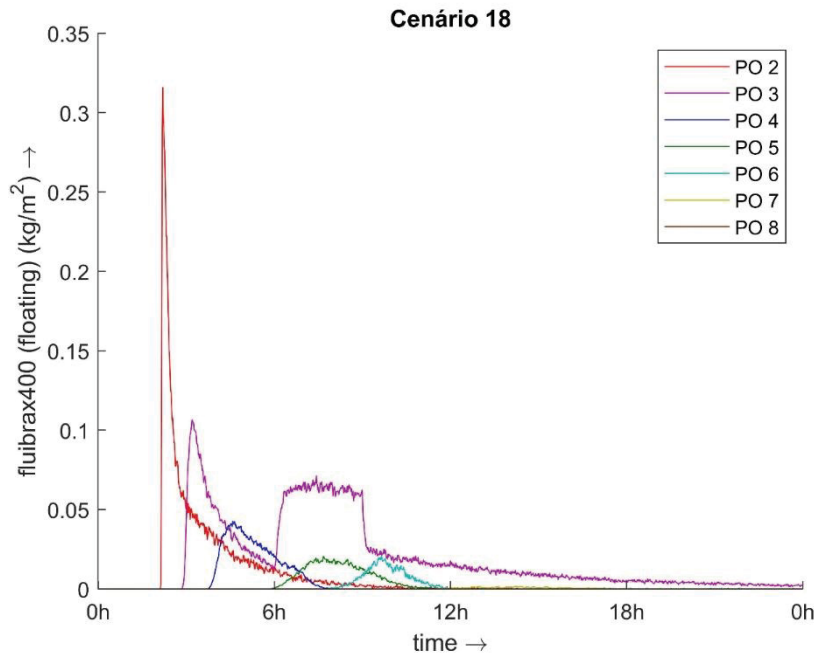
FIGURA 64 - CENÁRIO E.18 - 2 BARREIRAS EM B E C, RESPOSTA LENTA



FONTE: O Autor (2023)

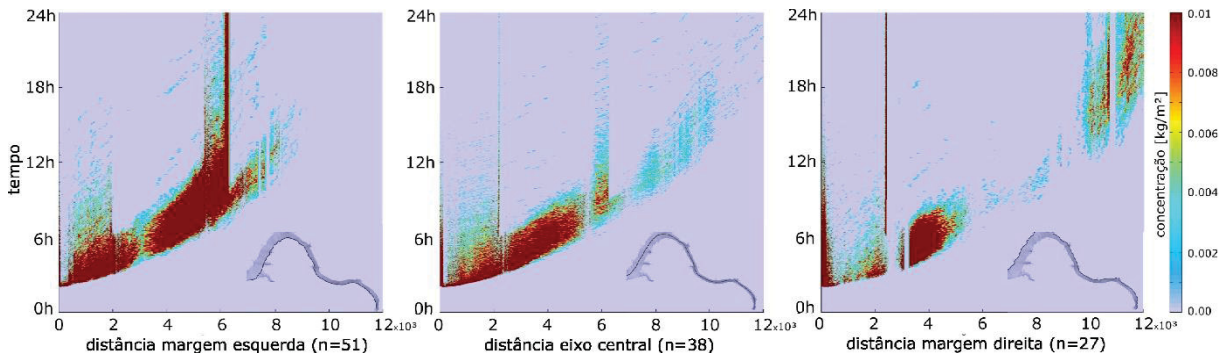


FIGURA 65 - CENÁRIO E.18 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



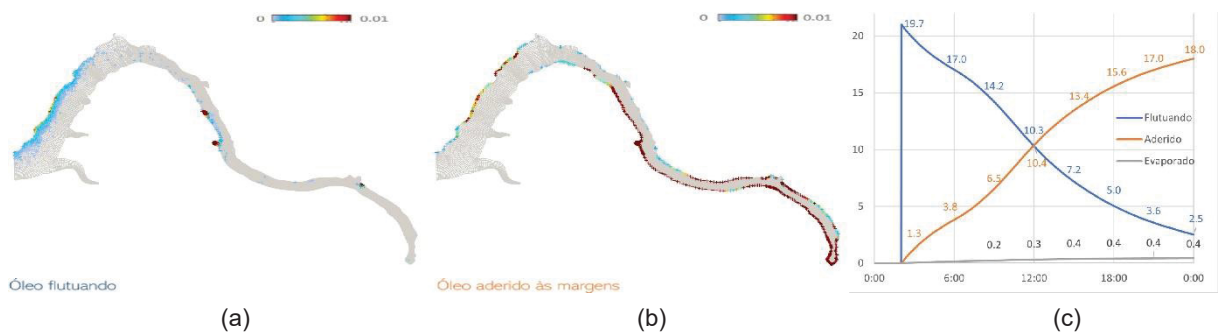
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 66 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 67 - CENÁRIO E.18 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)

Na Figura 65 cumpre destacar as concentrações de óleo entre os pontos de monitoramento PO 3 e PO 4, que se localizam a montante e jusante da barreira em B. Até cerca de 5h após a ocorrência as concentrações seguem idênticas ao cenário A.2, mas a partir desse momento a barreira é instalada em B e em seguida em C, passando a acumular o óleo, e propiciando uma redução significativa das concentrações nos pontos de monitoramento à jusante.

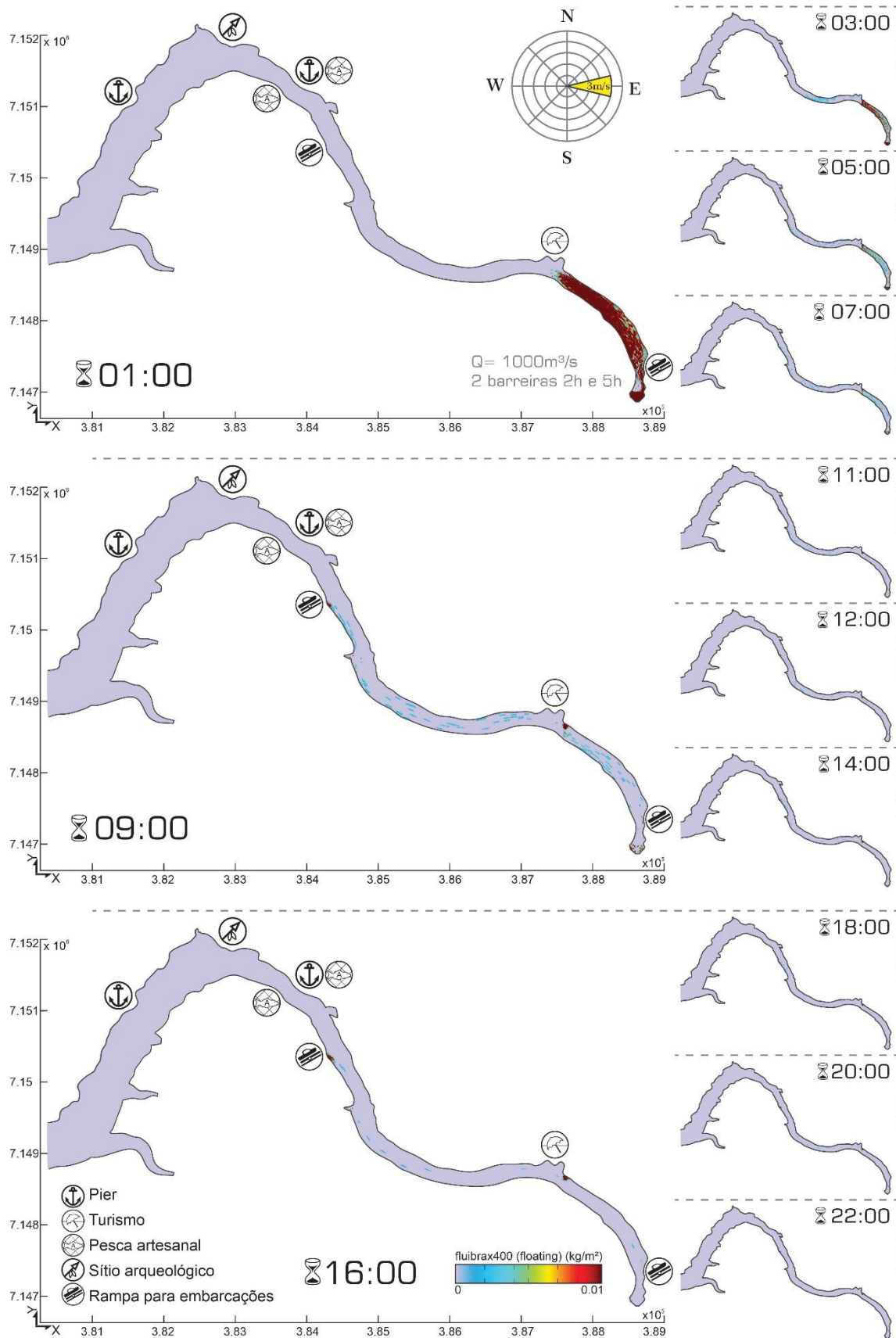
As barreiras foram posicionadas de forma a utilizar a correnteza para defletir o óleo para a margem, o que se mostrou efetivo quando se observa a Figura 66: após 5h do vazamento (7h de simulação) o óleo que ainda não havia ultrapassado a barreira B passa a se acumular na margem direita – caracterizado no gráfico pela linha que segue até o fim da simulação. Após 9h, a barreira C atua defletindo o óleo para a margem esquerda.

Apesar disso, a Figura 67 demonstra que a área atingida por frações de óleo ao fim da simulação, mesmo após a instalação das barreiras em B e C, seria muito semelhante àquela prevista caso não houvesse instalação de barreiras. Sobre a quantidade de óleo flutuando ou retida nas margens, o resultado apresenta que teria-se 18 mil quilos de óleo aderido, contra 2,5 mil quilos de óleo que restaria flutuando. Há que se destacar que o modelo do DELFT3D-PART não simula a retirada do óleo devido a ações de resposta, ou seja, à medida em que a barreira deflete o óleo para a margem ela contribui para o compartimento “óleo aderido”. Dessa forma, dado que todos os demais parâmetros são idênticos, a diferença de 3.8 mil quilos aderidos entre este cenário e o cenário A.2 pode ser compreendida como um saldo positivo, sendo a quantidade de óleo que poderia ser recuperada devido à deflexão na região das barreiras.

#### 5.3.8 Cenário E.19

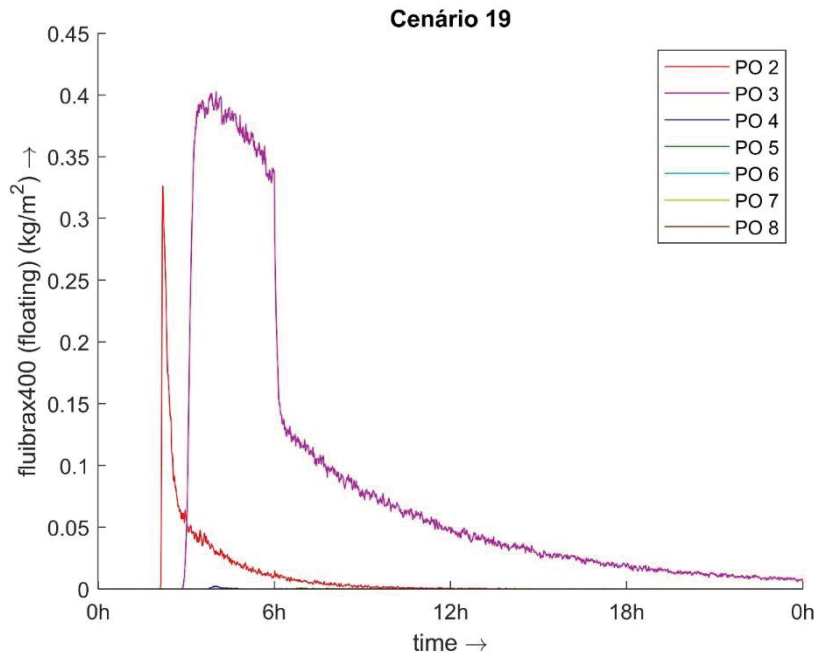
O cenário E.19 considera a manutenção de vazão alta, porém com a implantação de barreiras em resposta rápida – a partir de 2h após a ocorrência para a primeira barreira no ponto B, e 5h para a segunda barreira em C. Como apesar da vazão alta a maior parte do óleo ainda não teria ultrapassado a localização da barreira em B, tem-se um significativo ganho de eficiência na resposta à emergência, como é denotado pela Figura 68 e será discutido a seguir.

FIGURA 68 - CENÁRIO E.19 - 2 BARREIRAS EM B E C, RESPOSTA RÁPIDA



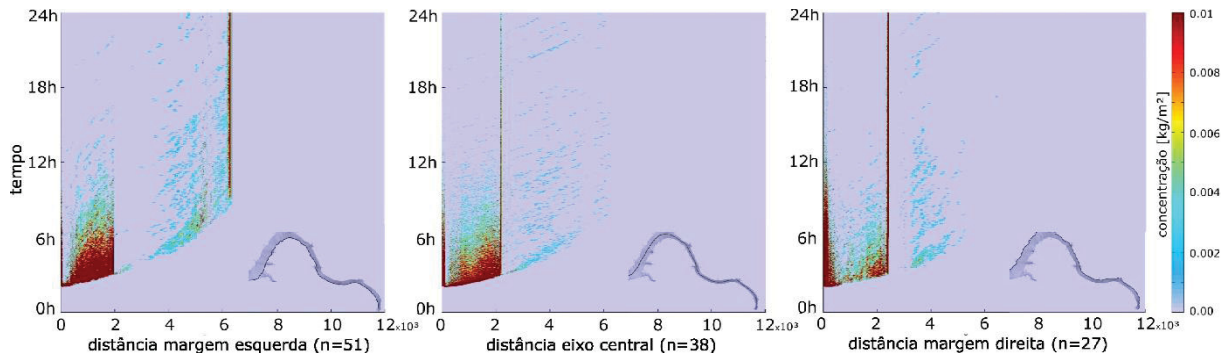
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 69 - CENÁRIO E.19 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



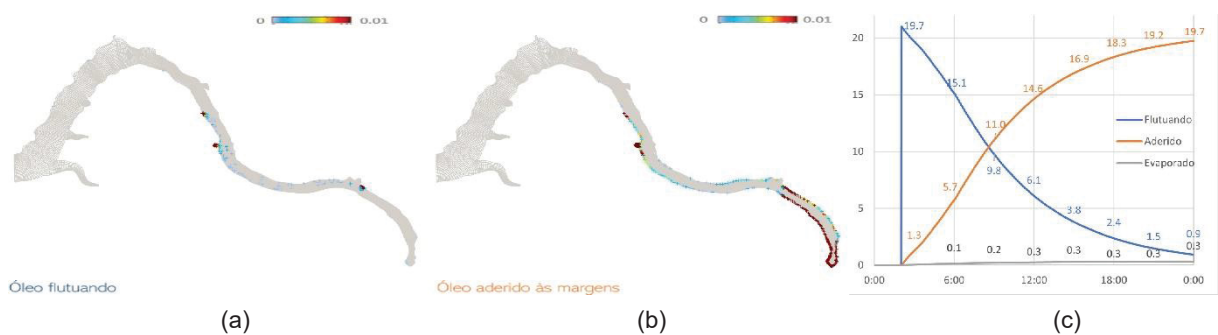
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 70 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 71 – CENÁRIO E.19 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)

Os resultados ilustrados na Figura 69 demonstram que praticamente todo o óleo seria retido na barreira B, levando a concentração nos pontos a jusante do PO 3 a praticamente zero. As maiores concentrações de óleo ficariam restritas à posição da barreira B no eixo central do rio Iguaçu e na margem direita, enquanto a barreira em C reteria na margem esquerda a maior parte do óleo que tivesse passado a barreira B antes das 2 horas, como pode ser observado na Figura 70.

A Figura 71 reforça que a maior parte do contaminante ficaria retida antes da barreira em B, amplificando a massa de óleo aderida às margens de 14.2 para 19.7 mil quilos, uma diferença de 5.500 quilos.

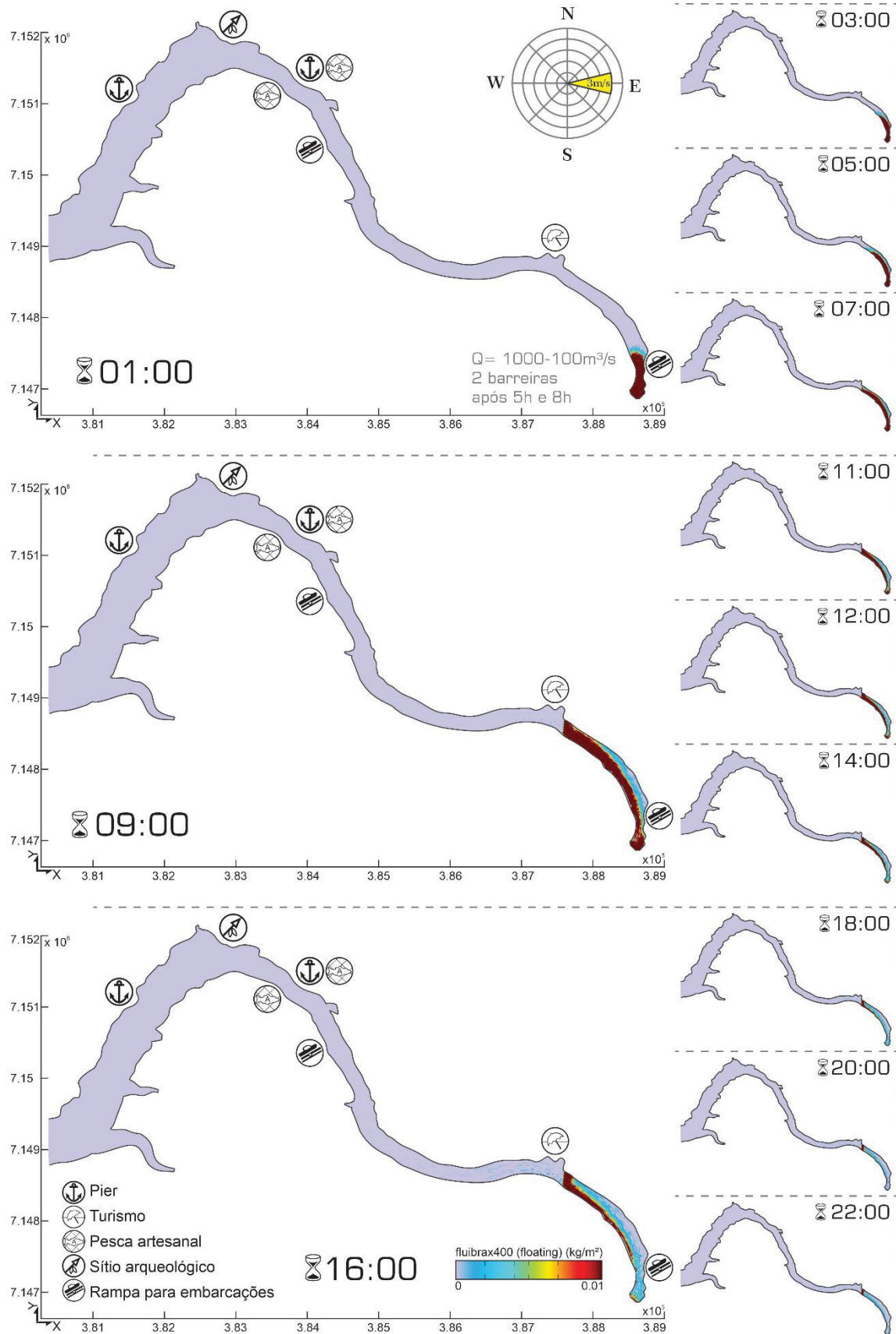
#### 5.3.9 Cenário E.24

O cenário E.24, assim como os cenários E.25 e E.26, simularam uma condição mais favorável em que houvesse a redução da vazão da usina, de  $1000\text{m}^3/\text{s}$  para  $100\text{m}^3/\text{s}$ , mas com a resposta lenta – após 5h da ocorrência.

Como apresentado na Figura 72, apesar da resposta lenta, a redução da vazão contribuiria para reduzir o transporte da massa de óleo, permitindo que a instalação da barreira se dê antes da pluma de contaminante atingir a posição da barreira em B. Com isso, observa-se na Figura 73 que a concentração seria predominante do ponto PO 3, a montante da barreira, sendo praticamente zerado nos pontos de monitoramento a jusante durante o período da simulação.

O status das partículas ao fim da simulação indicam que as quantidades de óleo flutuando (15600kg) e aderido (4900kg) seriam similares às do cenário A.2, porém concentradas nos primeiros 2km a jusante da usina, preservando a maior parte das áreas sensíveis identificadas e facilitando as operações de recuperação da área. Destaca-se também que a redução da vazão seria muito importante para a segurança das operações embarcadas para a instalação das barreiras e materiais absorventes.

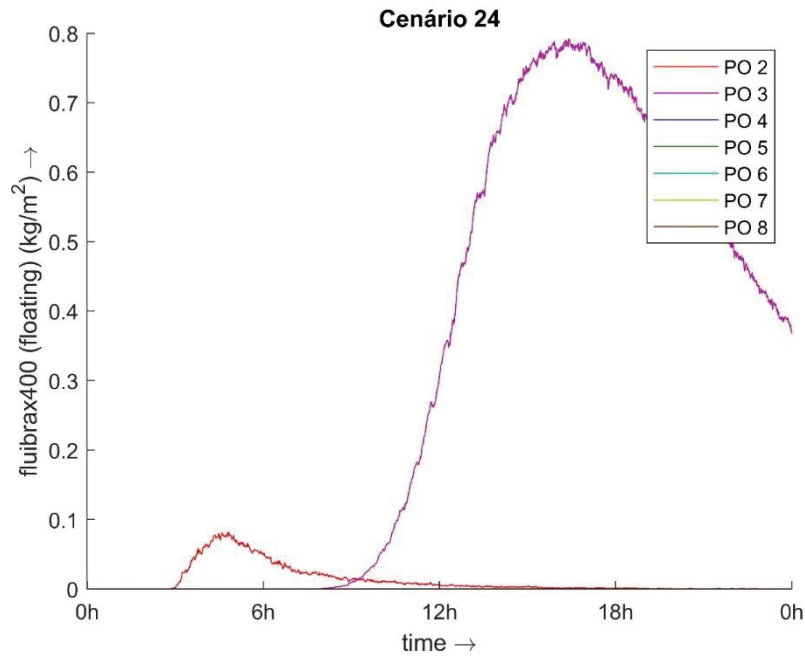
FIGURA 72 - CENÁRIO E.24 - VAZÃO REDUZIDA A 100M³/S, 2 BARREIRAS EM B E C, RESPOSTA LENTA



FONTE: O Autor (2023)

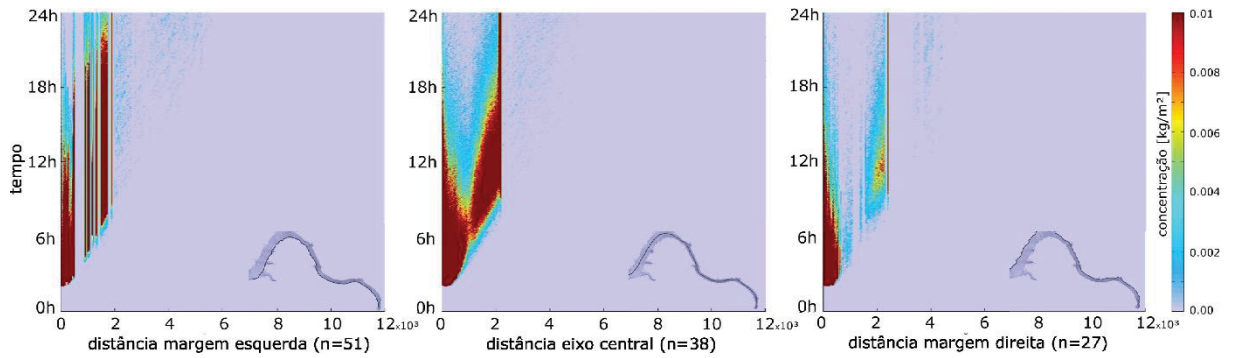


FIGURA 73 - CENÁRIO E.24 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



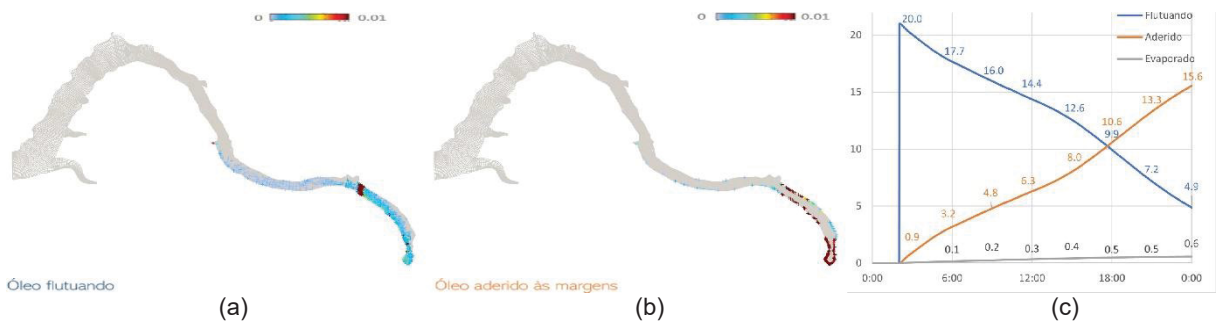
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 74 - CENÁRIO E.24 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 75 - CENÁRIO E.24 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)

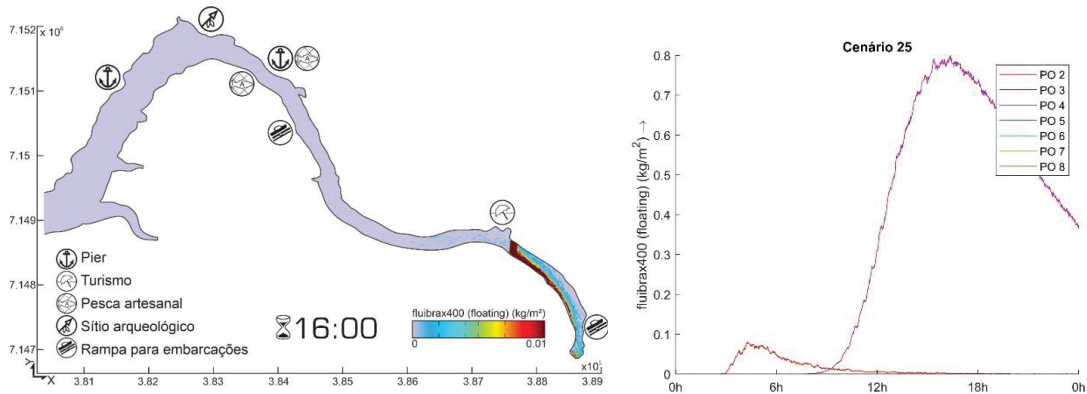


FONTE: O Autor (2023)



Estes resultados foram muito similares para o cenário E.25, de resposta rápida, indicando que a redução da vazão por si tornaria indiferente a colocação das barreiras após 2h ou 5h, uma vez que a pluma de contaminante ainda não teria atingido a região da barreira em B em ambos os cenários. A Figura 76 ilustra essa similaridade.

FIGURA 76 - CENÁRIO E.25 - ÓLEO NA SUPERFÍCIE APÓS 16H E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO



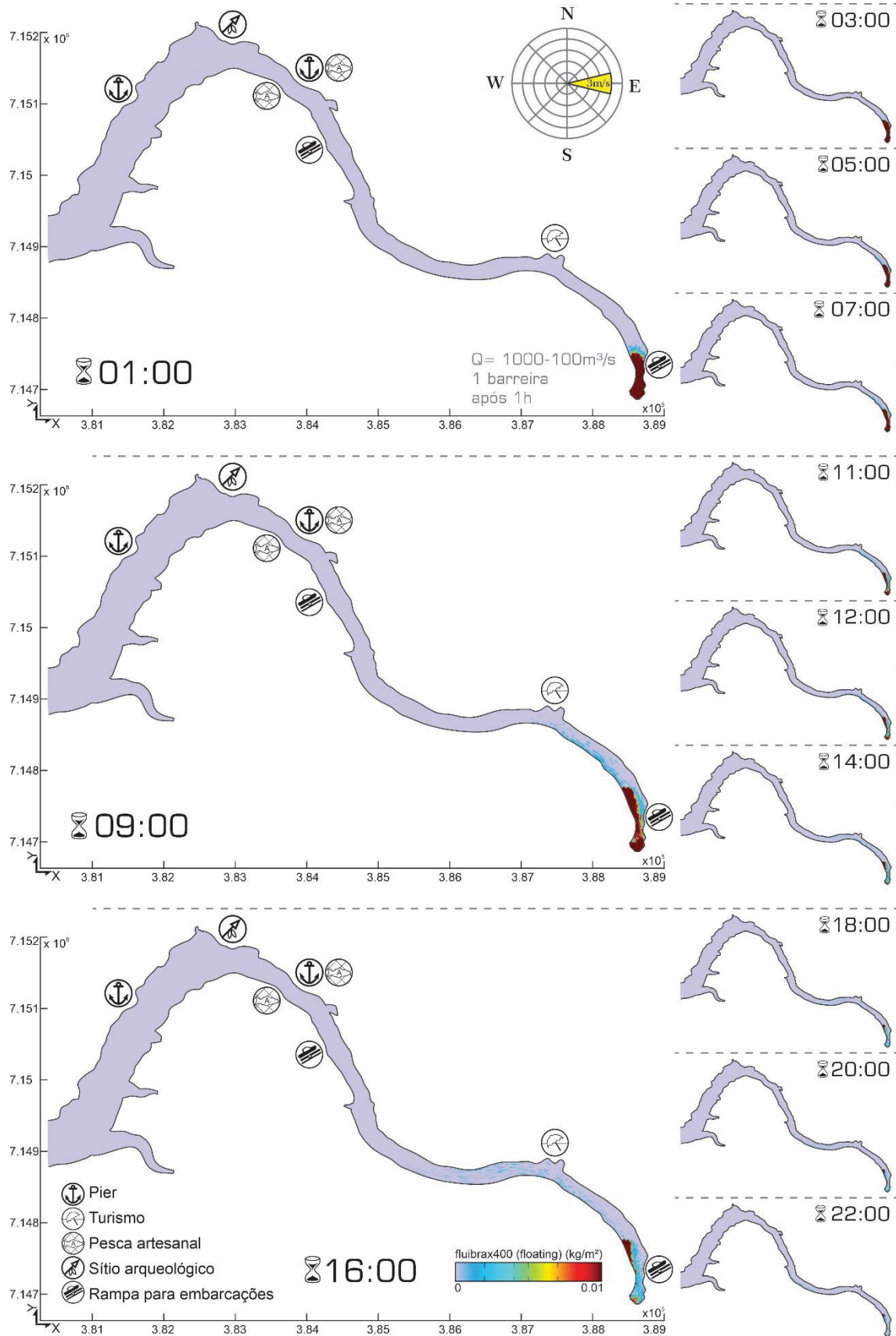
FONTE: O Autor (2023)

### 5.3.10 Cenário E.26

Considerando os resultados dos cenários anteriores, avaliou-se também a possibilidade de resposta quase imediata, em que a redução da vazão fosse seguida da instalação de uma única barreira que pudesse ser feita em apenas uma hora após a ocorrência, na posição A.

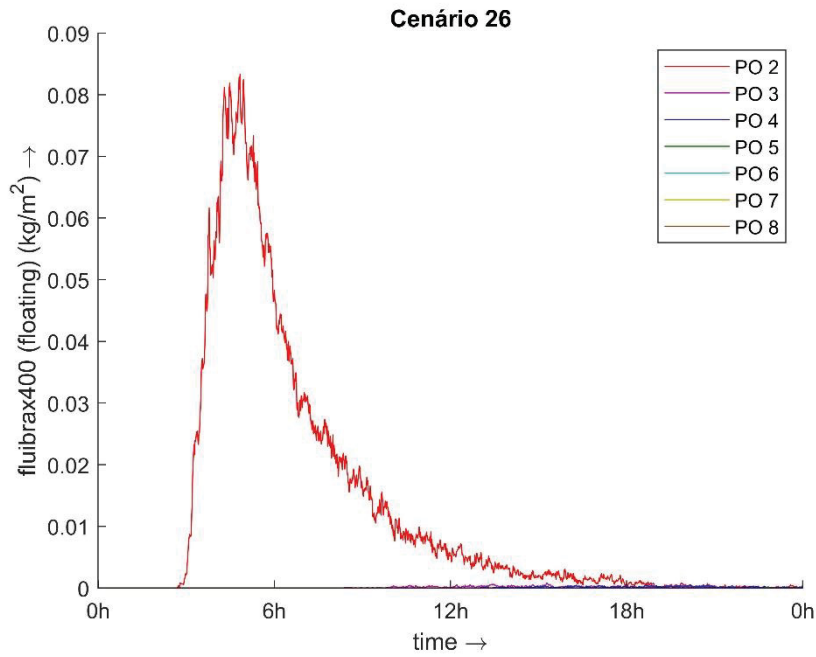
Os resultados demonstram que o cenário E.26 teria o menor impacto ambiental em comparação com os demais, afetando uma extensão de menos de 700 metros desde o ponto do vazamento, como pode ser visto na Figura 77. Os pontos de monitoramento a jusante do PO 2 praticamente não registrariam concentrações significativas de óleo (ver Figura 78), salvaguardando todas as áreas sensíveis, inclusive as margens vegetadas nas proximidades da usina. As operações de retirada do óleo e recuperação da área impactada seriam facilitadas sobremaneira, pela proximidade com a rampa de barco da própria usina como base de operações. O impacto social e danos de imagem também seriam mitigados, na medida em que o dano observado seria restrito à área de segurança do empreendimento.

FIGURA 77 - CENÁRIO E.26 - VAZÃO REDUZIDA A 100M<sup>3</sup>/S, 1 BARREIRA EM A, RESPOSTA IMEDIATA



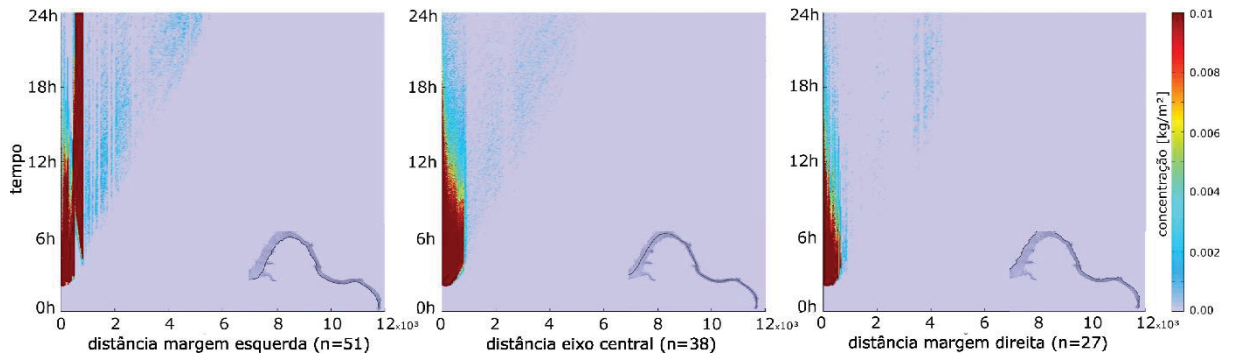
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 78 - CENÁRIO E.26 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO - SUPERFÍCIE



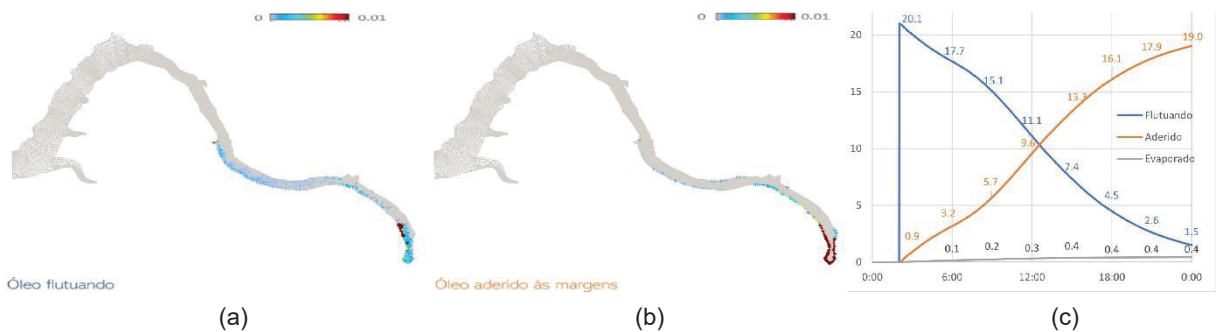
FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 79 - CENÁRIO E.26 - CONCENTRAÇÃO NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51



FONTE: O Autor (2023)

FIGURA 80 - CENÁRIO E.26 - STATUS DAS PARTÍCULAS AO FIM DA SIMULAÇÃO (A) E (B), E TRANSIÇÃO ENTRE COMPARTIMENTOS (C)



FONTE: O Autor (2023)

A maior concentração do óleo na margem esquerda, como se vê na Figura 79 demonstra que o posicionamento da barreira atendeu bem ao propósito de defletir o óleo para esta margem.

Ao fim da simulação, 22h após a ocorrência, o status das partículas seria de 19000kg de óleo aderido, enquanto 1500kg ainda seguiriam flutuando, majoritariamente nas margens e na superfície da água na região entre a usina e a barreira A, conforme ilustra a Figura 80.

Esse aumento da fração aderida, da ordem de 8000kg em comparação com o cenário A.6 pode ser interpretado como fruto da redução da área de circulação das partículas de óleo, o que ampliaria a tendência de que as mesmas toquem as margens e fiquem aderidas, o que nesse caso seria positivo dado que a área próxima viabilizaria uma utilização amplificada de materiais absorventes, *skimmers* recolhedores de óleo, bombas de vácuo, etc., permitindo uma operação de retirada do contaminante em menor tempo, bem como facilitando o restabelecimento da operação normal do empreendimento.

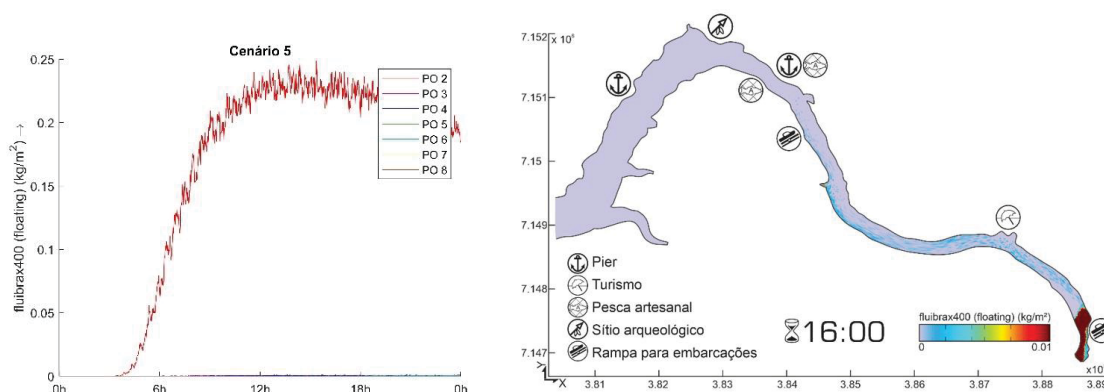
### 5.3.11 Outros cenários

#### 5.3.11.1 Cenário A.5

Foi simulado um cenário com a hipótese de abertura do vertedouro, condição que pode ser necessária em uma situação crítica em que a emergência se dê com o reservatório da usina já próximo do nível máximo *maximorum*, exigindo a manutenção da vazão turbinada e/ou abertura do vertedouro por condição de segurança à barragem. O cenário A.5 simulou a interrupção abrupta da vazão turbinada, de 1000m<sup>3</sup>/s para 30m<sup>3</sup>/s, sendo compensada por uma abertura do vertedouro de 600m<sup>3</sup>/s.

A particularidade desse cenário seria o surgimento de uma recirculação que manteria grande parte do óleo retido a montante do vertedouro, como se observa na Figura 81. Apesar da aparente redução da área impactada, deve-se notar que durante este regime hidráulico não haveria condições de segurança para a adoção de nenhuma medida de contenção ou remoção do óleo, devido ao excesso de turbulência na região próxima à barragem causada pelo vertedouro.

FIGURA 81 - CENÁRIO A.5 - PONTOS DE MONITORAMENTO E MAPA DE CONCENTRAÇÕES APÓS 16H

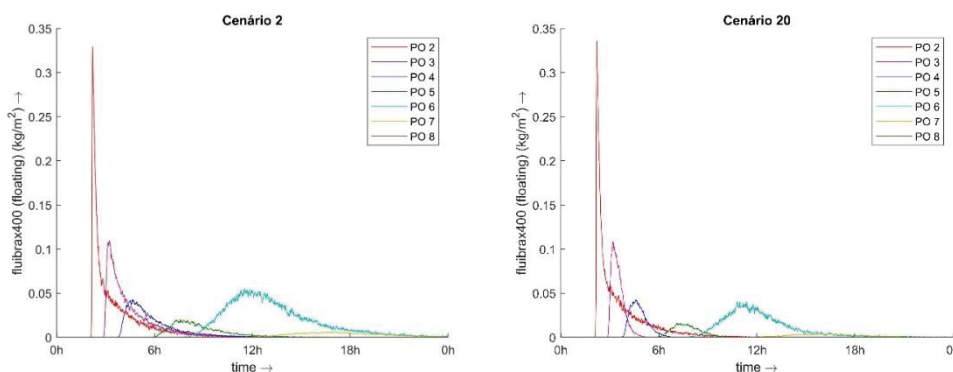


FONTE: O Autor (2023)

### 5.3.11.2 Cenário E.20

O cenário E.20 testou a instalação da barreira em A uma hora após o vazamento, sem redução de vazão na usina. Nesta hipótese, observou-se a concentração do óleo nos pontos de monitoramento manteve-se muito similar ao cenário A.2 (ver Figura 82), dado que a manutenção da vazão teria transportado a maior parte do óleo antes da barreira ser implantada, de forma que esta ação de resposta seria praticamente inócua.

FIGURA 82 - COMPARAÇÃO E.20 E A.2 - CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO – SUPERFÍCIE



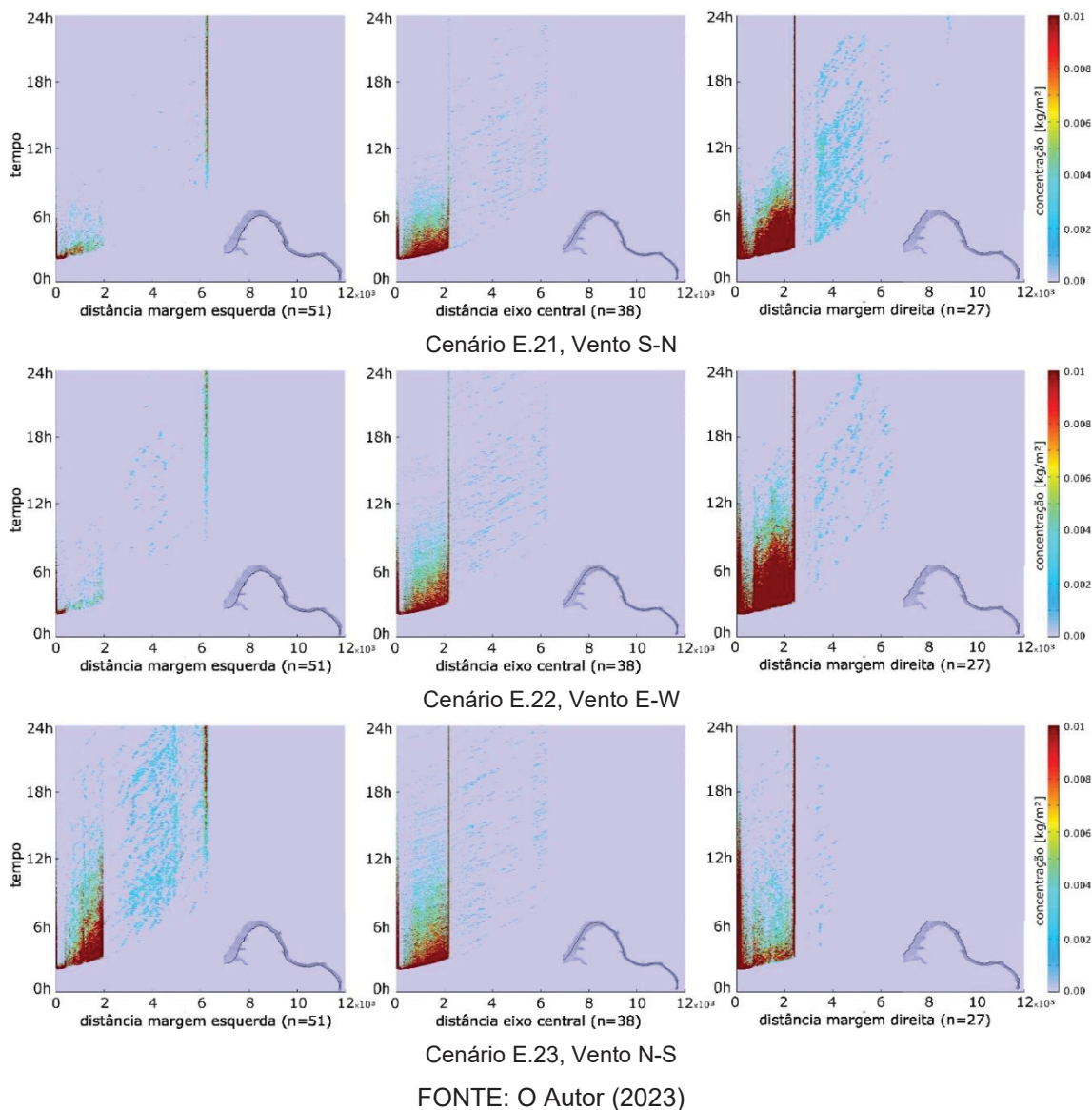
FONTE: O Autor (2023)

### 5.3.11.3 Cenários E.21, E.22 e E.23

Os cenários E.21, E.22 e E.23, que simularam a resposta rápida para diferentes direções do vento (S-N, W-E e N-S, respectivamente) tiveram comportamento semelhante ao cenário E.19, como pode ser visto na Figura 83, com variação apenas nas concentrações nas margens esquerda e direita. Em todos eles, a barreira deflete

a maior parte o óleo para a margem direita, embora os cenários E.21 e E.22 amplifiquem a concentração nessa margem, o que facilitaria a recuperação do contaminante, enquanto a direção do vento nos cenários E.19 e E.23 possui um impacto maior para a margem esquerda na região anterior à barreira.

FIGURA 83 - COMPARAÇÃO CENÁRIOS E.21, E.22 E E.23 NAS SEÇÕES LONGITUDINAIS N = 27, 38 E 51

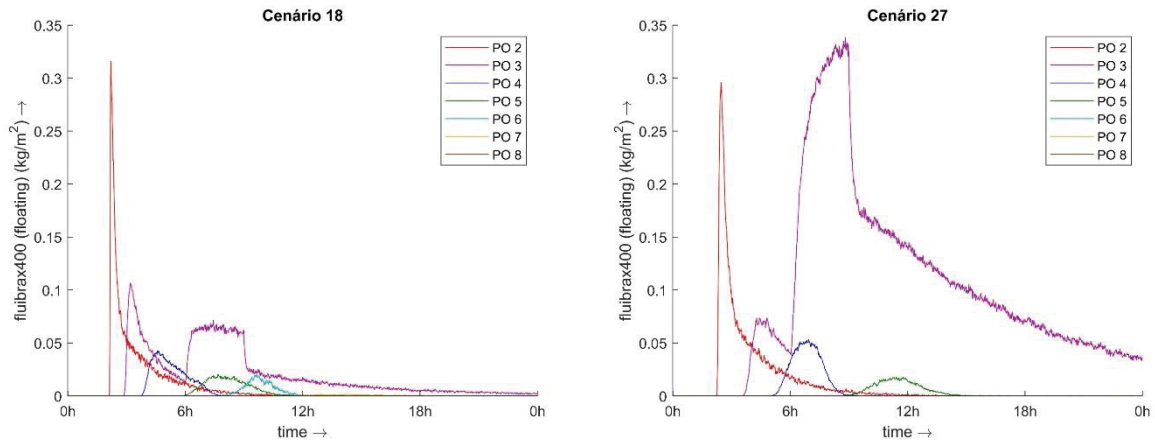


#### 5.3.11.4 Cenários E.27 e E.28

Os cenários E.27 e E.28, que simularam a manutenção da vazão de  $550\text{m}^3/\text{s}$  e instalação de barreiras como resposta lenta e rápida, respectivamente, tiveram resultados comparáveis aos observados nos cenários E.18 e E.19, que também possuem vazão constante, mas de  $1000\text{m}^3/\text{s}$ .



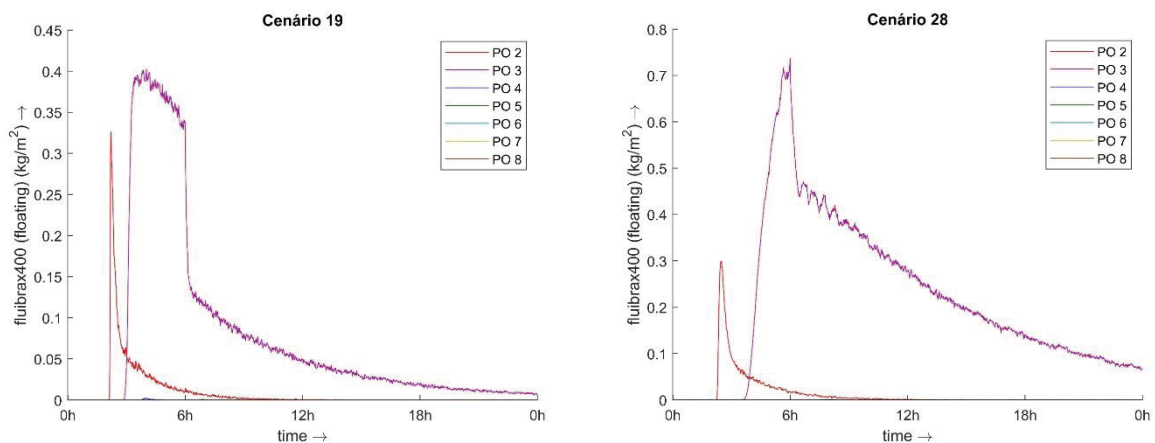
FIGURA 84 - CENÁRIOS E.18 E E.27 - COMPARAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES NOS PONTOS DE MONITORAMENTO



FONTE: O Autor (2023)

Tanto para a resposta lenta quanto rápida, verifica-se que os cenários E.27 e E.28 seriam mais eficiente que os cenários E.18 e E.19, retendo na barreira em B uma massa maior de óleo, como se vê com a elevação da curva de concentração para o PO 3 na Figura 84 e na Figura 85, devido à menor vazão reduzir a velocidade do transporte do óleo.

FIGURA 85 - CENÁRIOS E.19 E E.28 - COMPARAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES NOS PONTOS DE MONITORAMENTO



FONTE: O Autor (2023)

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados da calibração para o modelo hidrodinâmico, em comparação com dados de medições ADCP, permitiram uma aproximação do escoamento real com RMSE de 0,20m/s, MAE de 0,13m/s e  $R^2$  de 0,62, o que pode ser considerado adequado considerando as limitações do modelo, que assim como a maior parte dos softwares para modelagem de escoamentos utiliza equações promediadas de Reynolds (RANS), que não teriam a capacidade de representar todos os vórtices em escala de subgrade. No processo de calibração verificou-se uma significativa sensibilidade do modelo à adoção de diferentes coeficientes de rugosidade de fundo, de forma que uma representação mais precisa da área de estudo demandaria a definição de diferentes coeficientes para diferentes regiões do corpo hídrico, e sua calibração utilizando um número maior de medições em campo. Apesar disso, considera-se que os valores obtidos para RMSE e MAE são satisfatórios para os objetivos desta pesquisa.

Quanto à modelagem para vazamentos de óleo, pode-se avaliar que em termos relativos foi possível obter resultados confiáveis que colaboram de modo importante na definição de estratégias de resposta em situação de emergência, embora existam desafios a serem superados. Em se tratando de parâmetros de entrada para os modelos, por exemplo, há poucas fontes que permitam especificar os coeficientes que determinam a dispersão horizontal do corpo hídrico, ou o percentual de arraste pelo vento. Características como a probabilidade do óleo de adesão à margem, não constam nas fichas de informações dos produtos, precisando da utilização de parâmetros para óleos com características similares de viscosidade e grau API na literatura. Uma melhor definição desses parâmetros dependeria de calibração com base em estudos de campo e laboratório. Todavia, a comparação entre os cenários modelados permite observar coerência e robustez entre os resultados obtidos e, uma vez que a escala deste tipo de estudo não pretende determinar exatamente onde cada partícula estará em cada momento, mas compreender como as concentrações em média se comportarão no corpo hídrico e, a partir disso, planejar as ações de resposta para os cenários mais críticos, pode-se afirmar que as modelagens desenvolvidas atendem ao objetivo proposto.

Quanto à possibilidade de utilização do modelo como ferramenta operacional, ou seja, passível de ser utilizada para o planejamento e mesmo para a atuação

durante uma ocorrência real – simulando rapidamente o cenário de eventuais situações em andamento, considera-se que foi demonstrada sua viabilidade sob certas condições. O tempo médio para as simulações de vazamento de óleo no módulo DELFT3D-PART para a área estudada foi relativamente baixo, permitindo que um novo cenário possa ser configurado e apresente resultados relativos a 24 horas de simulação em cerca de 30 minutos, para o *hardware* utilizado. A limitação fica por conta da necessidade de que os modelos hidrodinâmicos para as condições mais significativas de vazão e ventos tenham sido previamente elaborados. Para a situação de usinas hidrelétricas, a possibilidade de controle da vazão turbinada ou vertida pode mitigar essa limitação, viabilizando que o escoamento seja ajustado para uma condição hidrodinâmica já calculada. Outro fator potencialmente limitante é o de que a execução de uma modelagem e a interpretação de seus resultados depende de um equipamento com boa capacidade de processamento e armazenamento de dados, além de conhecimento específico para operar os módulos do DELFT3D, inclusive etapas que não possuem interface de usuário, bem como ferramentas de pós-processamento além do próprio Quickplot. Uma visão de futuro pode buscar incorporar práticas que têm sido desenvolvidas para outros modelos matemáticos, como por exemplo a captura automática de dados meteorológicos e hidrológicos das áreas de estudo, permitindo facilitar a configuração dos arquivos de entrada, o aprimoramento da interface de usuário com a inclusão de ferramentas para a configuração de cenários com barreiras, *skimmers*, dispersantes, etc., e o desenvolvimento de formas de apresentação dos resultados que permitam ao usuário visualizar e comparar cenários de modo mais interativo e facilitado.

Para se estabelecer as medidas de resposta mais adequadas, tão importante quanto conhecer as condições hidrodinâmicas da área atingida é dispor de informações que permitam caracterizar adequadamente os potenciais impactos sociais e ambientais a jusante do ponto de vazamento. Neste sentido, a utilização da metodologia com base na Resolução Conama 398/2008 – que disciplina a elaboração dos Planos de Emergência Individual, incluindo a necessidade de elaboração de cartas de sensibilidade ambiental e modelagem matemática para cenários críticos, demonstra-se uma importante ferramenta para a avaliação e mapeamento da vulnerabilidade ambiental e planejamento de ações de resposta. Embora sua obrigatoriedade aplique-se particularmente para a indústria petrolífera em áreas costeiras e em mar aberto, é preciso levar em conta que as ocorrências em águas

interiores – quando não devidamente combatidas, podem causar impactos tão ou mais significativos que aqueles em áreas oceânicas. Seja pelo potencial impacto direto aos ecossistemas aquáticos, seja pela contaminação rápida e de difícil reversão de áreas preservadas nas margens do corpo hídrico, ou ainda pela possibilidade de contaminar mananciais, áreas habitadas, e inúmeras atividades produtivas ligadas ao rio, sugere-se que o planejamento para emergências de acordo com o modelo do PEI deveria ter sua aplicação estendida a águas interiores, ao menos para empreendimentos cujos equipamentos possam causar uma descarga de pior caso igual ou superior a ocorrências de médio porte, ou nível *Tier 2*.

Por fim, é válido considerar que a modelagem matemática aplicada a vazamentos de óleo, especialmente em águas interiores, possui desafios importantes que dependem de aprofundamento da pesquisa aplicada. Mas por si – em seu estágio atual, ela já é capaz de cumprir um papel fundamental, na medida em que serve como instrumento para a conscientização das partes envolvidas quanto aos riscos relacionados aos seus empreendimentos tendo em vista – em primeiro lugar, evitar toda e qualquer vazamento de óleo, e ainda assim – caso necessário responder a uma ocorrência, possuir a melhor preparação possível.

## 7 REFERÊNCIAS

ABCNEWS. **Timeline: 20 years of major oil spills.** Disponível em: <<https://bit.ly/3OUR79F>>. Acesso em: 30/5/2023.

ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios.** Agência Nacional de Águas, 2023. Disponível em: <<https://bit.ly/3YFcoZe>>. Acessado em 05/2/2023.

ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – Curvas de Cota x Área x Volume de UHEs.** Agência Nacional de Águas, 2022. Disponível em: <<https://bit.ly/3qJOjDX>>. Acessado em: 08/05/2022.

ANP. **Resolução nº 900/2022: Dispõe sobre as especificações dos óleos minerais isolantes tipo A e tipo B, de origem nacional ou importada, comercializados no território nacional.** Agência Nacional de Petróleo, Brasília-DF. 2022.

ATTIR, R. **API and Crude Oil Density... A Quick Guide to API Gravity.** Disponível em: <<https://bit.ly/3OUitxM>>. Acesso em: 14/8/2023.

BENEDITTI, C. A. **Vulnerabilidade Ambiental ao Óleo em Ambiente Fluvial: Estudo de Caso Rio Tietê - Reservatório de Barra Bonita-SP.** Rio Claro - SP, 2015.

BP. **BP Statistical Review of World Energy 2022,( 71st edition).** Bp, 2022. Disponível em: <<https://bit.ly/44aKJAo>>. Acesso em 1/8/2023.

CANADA. **Environment Canada Crude Oil and Petroleum Product Database.** 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/447Rovh>>. Acesso em 5/8/2023.

COMERMA, E.; ROWE, J.; MORANDI, A.; et al. **Literature Review of Oil Spill Trajectory and Weathering Models for Inland Waters.** 2021.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 001/1986 – Define as situações e estabelece os requisitos e condições para desenvolvimento de Estudo de Impacto Ambiental – EIA e respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA.** Brasília-DF, 1986.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 398/2008: Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional.** Brasília-DF, 2008.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 430/2011: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.** Brasília-DF, 2011.

COPEL. **Medições ADCP á jusante da UHE GNB, em 30/11/2005.** Curitiba-PR, 2005.

COPEL. **Relatório referente às ações tomadas pela Copel GeT durante a ocorrência de 15.04.2015.** Curitiba-PR, 2015.

COPEL. **Usina Ney Braga.** Disponível em: < <https://bit.ly/3qyvUtT> >. Acesso em: 01/05/2023.

COPEL; AMBIPAR. **Plano de Resposta a Emergência Ambiental – UHE GNB**. Curitiba-PR, 2023.

CORREA, A. **Vazamento despejou 4,9 mi de barris de Petróleo no Golfo**. Disponível em: <<https://bit.ly/44ehFbk>>. Acesso em: 30/5/2023.

CRAIG, J. **History of Oil: Regions and Uses of Petroleum in the Classical and Medieval Periods**. p.1–9, 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/45nLZBg>>. Acesso em: 29/5/2023.

DE DOMINICIS, M.; PINARDI, N.; ZODIATIS, G.; LARDNER, R. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting-Part 1: Theory. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1851–1869, 2013.

DELTARES. **D-WAQ PART - User Manual**. Delft, 2020.

ENGIE. **Usina Hidrelétrica Salto Santiago**. Disponível em: <<https://bit.ly/44cP5qY>>. Acesso em: 01/05/2023.

INMET. **Dados Meteorológicos de Estações Automáticas**. Instituto Nacional de Metrologia, 2022. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acessado em 08/05/2022.

IPIECA. **Guide to Tiered Preparedness and Response**. Londres, 2007.

KERAMEA, P.; SPANOUDAKI, K.; ZODIATIS, G.; GIKAS, G.; SYLAIOS, G. **Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges**. Journal of Marine Science and Engineering, 1. fev. 2021. MDPI AG.

KVOČKA, D.; ŽAGAR, D.; BANOVEC, P. **A review of river oil spill modeling**. Water (Switzerland), 2. jun. 2021a. MDPI AG.

MMA. **Especificações Técnicas para Elaboração de Cartas de Susceptibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo**. Brasília-DF, 2004.

PETROBRAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ PRODUTO: FLUIBRAX 400**. 2021.

PILCHOWSKI, R. W. **Avaliação dos Impactos de Derramamento de Óleo sobre a Ictiofauna do Altíssimo, Alto e Médio Rio Iguaçu**. Curitiba, 2003.

ROCHA, T. DE C. F. **Mapeamento da Sensibilidade Ambiental do Litoral de Ubatuba-SP a Vazamentos de Petróleo**. 2008.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **Simulation and the Monte Carlo Method**. Wiley, 2016.

SINDIPETRO. **20 Anos da Maior Tragédia Ambiental do Paraná**. Disponível em: <<https://bit.ly/45vmqy7>>. Acesso em: 26/7/2023.

SPAULDING, M. L. **State of the art review and future directions in oil spill modeling**. Marine Pollution Bulletin, 15. fev. 2017. Elsevier Ltd.



USCG. **On Scene Coordinator Report Deepwater Horizon Oil Spill**. 2010.

YAPA, P. D.; SHEN, H. T.; ANGAMMANA, K. S. **Modeling oil spills in a river-lake system**. 1994.

ZHU, Z.; GARCIA, M. H. **Three-Dimensional Numerical Modeling of Morrow Lake in Kalamazoo River, Michigan**. 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/459lij5>>. Acesso em: 30/5/2023

## **APÊNDICE I – FUNDAMENTOS DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CICERO MARTINS JUNIOR

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA AÇÕES DE RESPOSTA A  
VAZAMENTOS DE ÓLEO EM RIOS E RESERVATÓRIOS

APÊNDICE I

FUNDAMENTOS DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA E O DELFT3D-FLOW

CURITIBA

2023

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>115</b>
<b>1 EQUAÇÕES DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO</b> .....	<b>115</b>
<b>2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA</b> .....	<b>118</b>
2.1 TURBULÊNCIA .....	118
2.2 REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES - RANS .....	118
2.3 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES PARA ÁGUAS RASAS .....	121
<b>3 DELFT3D FLOW</b> .....	<b>123</b>
3.1 DISCRETIZAÇÃO NUMÉRICA .....	124
3.2 MÉTODO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO ADI .....	126
<b>4 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>127</b>

## INTRODUÇÃO

A simulação do transporte de uma massa de óleo oriundo de um vazamento que atinge um curso d'água só pode ser feito, tradicionalmente, a partir do conhecimento da hidrodinâmica do corpo hídrico a ser modelado. Ou seja, a modelagem matemática se dá em duas etapas, sendo desenvolvido e calculado primeiramente o modelo hidrodinâmico e, subseqüentemente, o modelo de transporte do óleo.

Por sua vez, modelos hidrodinâmicos geralmente adotam a abordagem euleriana para a solução das equações de Navier-Stokes para a quantidade de movimento, enquanto os modelos de óleo adotam uma abordagem lagrangeana.

Para ambas as abordagens são aplicadas soluções numéricas, dado que a grande complexidade inerente às equações de Navier-Stokes, de segunda ordem e não-lineares, somente possibilita o desenvolvimento de soluções analíticas para alguns casos muito específicos, que geralmente não representam a realidade dos ambientes a serem modelados em situações reais como o objeto deste estudo. Neste tópico são apresentados os conceitos e as equações fundamentais para os modelos hidrodinâmicos.

### 1 EQUAÇÕES DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Historicamente, o desenvolvimento das equações que modelam o escoamento de fluídos partiu da derivação da 2ª Lei de Newton, aplicada a uma partícula infinitesimal, cuja dedução inicial foi desenvolvida por Euler para fluídos ideais no século XVIII e aprimorada por Cauchy no início do século XIX (Truesdell, 1953).

A equação de Cauchy para a quantidade de movimento é apresentada em formato vetorial em (1.1).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma_{i,j} \quad (1.1)$$

Onde  $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}$  representa as forças inerciais,  $\rho \vec{g}$  as forças de campo, e  $\nabla \cdot \sigma_{i,j}$  as forças de superfície. Esta formulação nos propiciou 3 equações, uma para cada eixo, porém com um número grande de incógnitas. Buscando uma solução, em trabalhos distintos e em décadas diferentes, Navier e Stokes trabalharam na resolução do tensor

de tensões  $\sigma_{i,j}$ , desenvolvendo formulações para fluidos newtonianos viscosos, segundo as quais:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \\ \tau_{zx} = \tau_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \sigma_{xx} = -p - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \sigma_{yy} &= -p - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}; \\ \sigma_{zz} = -p - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}\end{aligned}\tag{1.2}$$

Onde  $\tau_{ij}$  representa as tensões cisalhantes,  $\sigma_{ii}$  as tensões normais,  $\mu$  a viscosidade, e  $\vec{V}$  o vetor velocidade. Exemplificando a aplicação das tensões em (1.2) na equação (1.1), temos, para o eixo  $x$ :

$$\begin{aligned}\rho \left( \frac{D\vec{V}}{Dt} \right) &= (\rho \cdot g_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left( -p - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right)\end{aligned}\tag{1.3}$$

Em notação vetorial, a equação geral de Navier-Stokes para a conservação da quantidade de movimento corresponde a (1.4), utilizada sempre em conjunto com a equação da conservação de massa (1.5).

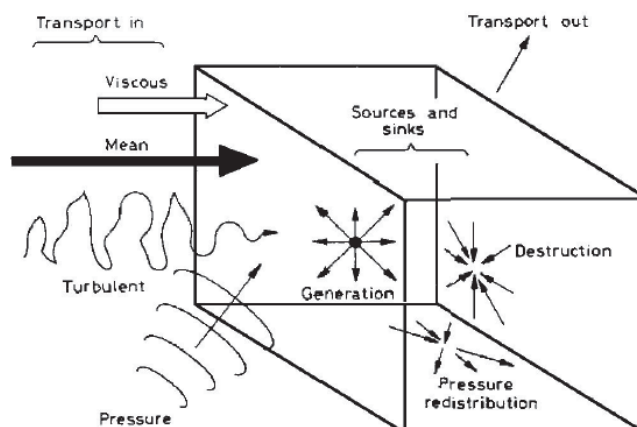
$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3}\mu \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) + \rho \vec{g}\tag{1.4}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{V}) = 0\tag{1.5}$$

Na equação (1.4), temos no lado esquerdo da equação a componente relativa às forças inerciais ( $\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right)$ ), e no lado direito temos as componentes relativas às forças de gradiente de pressão ( $-\nabla p$ ), às forças viscosas ( $\mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3}\mu \nabla (\nabla \cdot \vec{V})$ ) e às forças de campo ( $\rho \vec{g}$ ). A Figura 1 ilustra o significado físico de cada um dos termos da equação de quantidade de movimento para um volume de controle elementar.



FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DOS TERMOS DA EQUAÇÃO DE NAVIER STOKES



Fonte: (adaptado de Smits, 2009).

No caso de fluidos incompressíveis, não há variação da massa específica ao longo do tempo, portanto  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , o que elimina o primeiro termo da equação de conservação de massa. Para o termo restante  $\nabla(\rho \vec{V}) = 0$ , como a densidade  $\rho$  não pode ser zero, chegamos à conclusão de que o divergente do vetor de velocidades é zero, satisfazendo a equação (1.5), que passa a ser:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1.6)$$

Com isso, a equação de quantidade de movimento (1.4) também sofre alteração nos termos relativos às forças viscosas, pois  $\frac{1}{3} \mu \nabla(\nabla \cdot \vec{V})$  também passa a ser 0. Com isso, temos as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis (1.7).

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (1.7)$$

Observa-se que as equações obtidas são de 2ª ordem e não-lineares, o que torna muito difícil a obtenção de soluções analíticas, que são possíveis apenas para casos muito específicos. Porém, por meio delas é possível obter soluções numéricas satisfatórias, utilizando determinadas condições iniciais e de contorno.

## 2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem da hidrodinâmica do corpo hídrico permite determinar o campo de velocidades do escoamento, o que é essencial para estudar o comportamento do corpo hídrico em si e de outras substâncias nele, como é o caso de uma massa de óleo sendo transportada e dispersada. A principal dificuldade envolta nessa modelagem é o fato de que não há solução geral para as equações de Navier-Stokes, o que obriga a desenvolver soluções numéricas que permitam, para determinadas condições de contorno, aplicar simplificações que deem conta de incorporar informação dinâmica suficiente para representar o escoamento de forma confiável e eficiente. A principal simplificação diz respeito à modelagem dos efeitos da turbulência (Smits, 2009).

### 2.1 TURBULÊNCIA

A eficiência da modelagem está diretamente ligada ao custo computacional para a implementação da solução buscada. A partir dos anos 1970, computadores passaram a permitir a implementação de soluções numéricas dos tipos LES (*Large Eddy Simulations*) e DNS (*Direct Numerical Simulations*) para escoamentos turbulentos, mas com enormes limitações em termos de custo computacional (Smits, 2009). Em DNS a resolução da grade numérica deve ser configurada pequena o suficiente para resolver (teoricamente) todas as escalas de movimento, enquanto LES resolveria as escalas em grades maiores, sendo acoplada a modelagens que resolveriam a turbulência nas escalas sub-grade. Embora tenham trazido grandes avanços para a modelagem, a complexidade envolta nesse processo de cálculo ainda demanda um grande custo computacional, conforme aponta Smits (2009), o que torna o DNS impraticável mesmo para um escoamento relativamente simples, exceto por uma máquina computacional muito potente, e inviável para escoamentos mais complexos.

### 2.2 REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES - RANS

Dentre as abordagens utilizadas para buscar contornar este tipo de problema, uma das mais utilizadas é o método de “Média Promediada de Reynolds para as equações de Navier-Stokes”, usualmente abreviada como RANS, do inglês *Reynolds-*

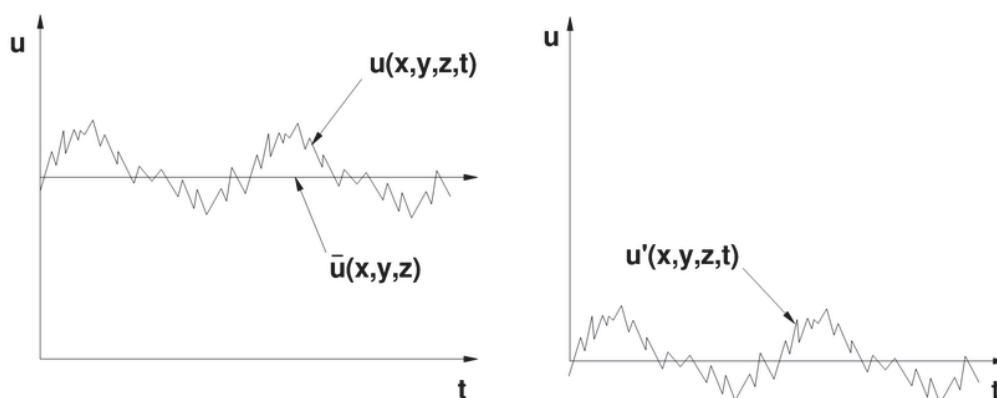
*Averaged Navier Stokes.* Este método proposto por Reynolds consiste em tratar a turbulência como um fenômeno estatístico, que pode ser integrado ao longo do tempo. Assim, a velocidade passa a ser tomada como uma média que incorpora tanto aquelas oriundas do fluxo principal quanto a dependente das variações da turbulência:

$$\bar{U}(\vec{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U(\vec{x}, t) dt \quad (2.1)$$

$$U(\vec{x}, t) = \bar{U}(\vec{x}) + u'(\vec{x}, t)$$

Onde  $U(\vec{x}, t)$  é a velocidade total, decomposta em dois termos:  $\bar{U}$  que se refere à velocidade média, e  $u'$  sendo a componente relativa à flutuação da velocidade provocada pela turbulência, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Decomposição de Reynolds para uma velocidade  $u$



Fonte: (Make, 2014)

Exemplificando a aplicação dessa abordagem, também chamada de decomposição de Reynolds, na equação de quantidade de movimento para a componente  $x$ , teríamos

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial u'}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{U} \frac{\partial u'}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + v' \frac{\partial u'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \\ & + \bar{V} \frac{\partial u'}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} + w' \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \bar{W} \frac{\partial u'}{\partial z} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{U} + \nu \nabla^2 u' \end{aligned} \quad (2.2)$$

Considerando as propriedades matemáticas para médias (Brunton, 2021):

$$\begin{aligned} \overline{u'} &= 0; \overline{u'^2} \neq 0; \overline{u + v} = \bar{u} + \bar{v}; \bar{\bar{u}} = \bar{u}; \\ \overline{u \cdot v} &= \bar{u} \cdot \bar{v}; \overline{u \cdot v} \neq \bar{u} \cdot \bar{v}; \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} \end{aligned} \quad (2.3)$$

E aplicando a cada termo da equação (2.2), a mesma pode ser simplificada para (2.4), que corresponde a uma equação de quantidade de movimento para o escoamento médio no tempo. Com isso, porém, permanecem novas incógnitas relativas às médias temporais das flutuações de velocidade,  $\overline{u'^2}, \overline{u'v'}, \overline{u'w'}$ , chamados tensores de Reynolds.

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left[ \mu \nabla^2 \bar{U} - \rho \underbrace{\left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right)}_{\text{tensores de Reynolds}} \right] \quad (2.4)$$

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[ \mu \nabla^2 \bar{V} - \rho \underbrace{\left( \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right)}_{\text{tensores de Reynolds}} \right] \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{W}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \left[ \mu \nabla^2 \bar{W} - \rho \underbrace{\left( \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right)}_{\text{tensores de Reynolds}} \right] - gH \end{aligned} \quad (2.6)$$

O número de incógnitas se torna maior do que o número de equações, ocasionando um “problema de fechamento”. A respeito disso, a solução mais usualmente adotada e proposta originalmente por Boussinesq, em 1877, se dá através da suposição de que os tensores podem ser modelados como um tipo de viscosidade em função do fluxo médio – considerando que as unidades dos tensores são similares às da viscosidade (embora sejam oriundas do termo convectivo). Com essa aproximação, torna-se matematicamente possível resolver o problema de fechamento para as equações de Navier-Stokes.

$$-\overline{u'v'} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.7)$$

Vários modelos foram desenvolvidos para representar esses tensores em função da viscosidade turbulenta  $\nu_t$ , como representado na equação (2.7), onde  $\bar{U}$  e  $\bar{V}$  representam as velocidades médias em  $x$  e  $y$ ,  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $\delta_{ij}$  é uma função Delta de Dirac.

O modelo originalmente proposto por Boussinesq (1877) tratava o valor de  $\nu_t$  como uma constante, o que se demonstrou não produzir resultados confiáveis, especialmente para regiões com variações súbitas do escoamento como curvas, estruturas, ou condições anisotrópicas do fluxo (Wellinger et al., 2021). Prandtl aprimorou esta proposta em 1925, considerando que a viscosidade turbulenta deveria variar no espaço dependendo no perfil do fluxo médio, conforme o comprimento de mistura. Por sua vez, Jones e Launder propuseram em 1942 o modelo  $k$ - $\varepsilon$ , um dos mais aplicados em fluidodinâmica computacional (CFD) até hoje, em que a equação adotada para a viscosidade turbulenta vertical tem a forma apresentada em (2.8), em que  $c'_\mu$  é uma constante determinada por calibração, derivada da constante empírica  $c_\mu = 0,09$ , definida no modelo  $k$ - $\varepsilon$  (Rodi, 1984);  $L$  é o comprimento de mistura, e  $k$  a energia cinética turbulenta. Tanto a energia turbulenta  $k$  quanto a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta  $\varepsilon$  são calculadas por meio de duas equações de transporte de segunda ordem (DELTARES, 2020).

$$\nu_t = c'_\mu L \sqrt{k} = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

### 2.3 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES PARA ÁGUAS RASAS

Outra importante simplificação desenvolvida para a resolução das equações de Navier-Stokes é a hipótese de escoamento em águas rasas, que é considerada válida quando o comprimento do corpo d'água ( $L$ ) é bem maior que a profundidade ( $H$ ), da ordem de  $\frac{L}{H} > 20$  (Pereira & Tucci, 2016).

Nesta hipótese, podem ser desconsideradas as acelerações e tensões verticais, de forma que a componente em  $y$  das equações de Navier-Stokes torna-se simplesmente (2.9), onde  $H$  corresponde à profundidade total, conforme ilustrado na Figura 3.

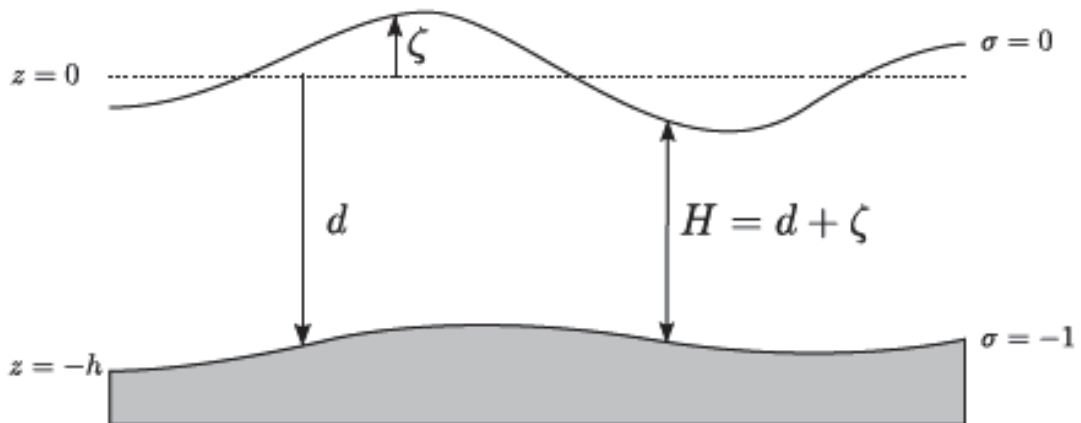
$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -g\rho H \quad (2.9)$$

A qual pode ser integrada e resulta na pressão hidrostática dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_z^0 \rho(x, y, z', t) dz' \quad (2.10)$$

Em que  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica em  $z = 0$ .

FIGURA 3 - DEFINIÇÃO DE NÍVEL DA ÁGUA ( $\zeta$ ), PROFUNDIDADE ( $d$ ) E PROFUNDIDADE TOTAL ( $H$ )



A partir destas simplificações é possível realizar a discretização numérica que é utilizada no Delft-FLOW conforme será apresentado no Capítulo 3 deste apêndice.



### 3 DELFT3D FLOW

As equações de Navier-Stokes no modelo DELFT3D-FLOW são derivadas para a resolução das equações de águas rasas para fluidos incompressíveis com superfície livre. Adotando Médias Promediadas de Reynolds (RANS), a aproximação de Boussinesq e a aproximação de Águas Rasas, já discutidas no Capítulo 2, o DELFT3D resolve as equações utilizando um sistema de coordenadas curvilineares (Deltares, 2020). Para tal, os coeficientes  $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  e  $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  são adotados, onde  $\xi$  representa o eixo  $x$  e  $\eta$  representa o eixo  $y$ .

As equações de Navier Stokes para fluidos incompressíveis, que originalmente tem a forma:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{u} &= 0 \\ \rho \left( \frac{D\vec{V}}{Dt} + v \cdot \nabla v \right) &= -\nabla p + \mu \nabla^2 v \end{aligned} \quad (3.1)$$

Após a aplicação das premissas utilizadas pelo DELFT3D-FLOW, tornam-se:

a) para a equação da continuidade:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)\bar{U}\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)\bar{V}\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} \\ = (d + \zeta)Q \end{aligned} \quad (3.2)$$

Onde  $\bar{U}$  e  $\bar{V}$  são as velocidades médias na profundidade:

$$\bar{U} = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma ; \quad \bar{V} = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad (3.3)$$

E  $Q$  representa as contribuições por unidade de área devido a lançamentos e sumidouros de água, precipitação e evaporação:

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) \, d\sigma + P - E \quad (3.4)$$

Sendo  $q_{in}$  e  $q_{out}$  as fontes e sumidouros locais de água por unidade de volume, respectivamente,  $P$  representa uma fonte não local de precipitação e  $E$  uma fonte não local de evaporação. Por exemplo, a tomada de água de uma usina é um sumidouro e pode ser modelado como tal. Na superfície livre pode haver fontes devido a precipitação, ou sumidouros devido a evaporação.

b) para as equações da quantidade de movimento

Na direção  $\zeta$  é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{(d+\zeta)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3.5)$$

E na direção  $\eta$  é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{(d+\zeta)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3.6)$$

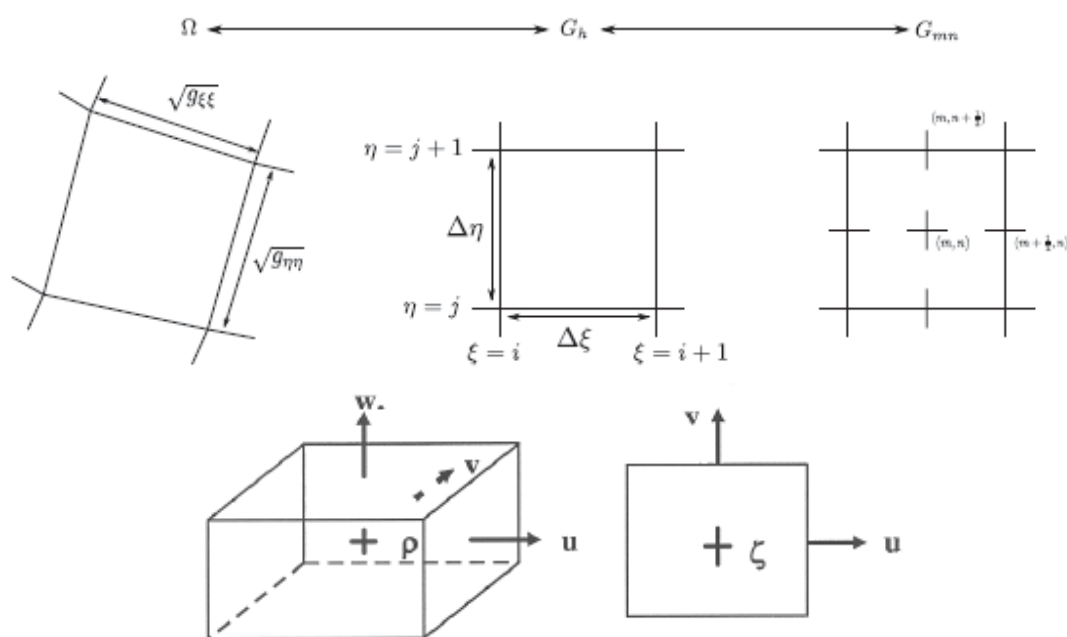
Onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes do vetor velocidade nas horizontais e na vertical (m/s),  $f$  é o parâmetro de Coriolis (1/s),  $F_\xi$  e  $F_\eta$  são as componentes relativas aos tensores de Reynolds ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho_0$  a massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ ),  $d$  é a profundidade a partir da superfície de referência,  $\zeta$  a elevação a partir da superfície de referência (m),  $P$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ ),  $\nu_v$  é a viscosidade turbulenta ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) e  $M_\xi$  e  $M_\eta$  representam os termos fonte e sumidouros.

### 3.1 DISCRETIZAÇÃO NUMÉRICA

O DELFT3D-FLOW faz a discretização das equações baseando-se no Método de Diferenças Finitas, partindo de uma grade curvilínea, assumida como ortogonal e bem estruturada. Para a conversão da grade numérica do espaço físico para o computacional, faz-se o mapeamento dos vértices da grade, em que as coordenadas  $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  e  $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  são discretizadas na grade computacional, como ilustra a Figura 4, conformando o que é denominado grade escalonada (*staggered grid*). Na grade

escalonada as variáveis de nível  $\zeta$  e velocidade da água ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) são arranjadas de forma que os pontos de pressão são definidos no centro da célula, e os componentes de velocidade são dispostos perpendicularmente à face das células em que estão localizados.

FIGURA 4 - DISCRETIZAÇÃO DA GRADE DO ESPAÇO FÍSICO PARA O COMPUTACIONAL - GRADE ESCALONADA



Legend:

- + water level ( $\zeta$ ) / density ( $\rho$ ) point
- velocity point ( $u$ ,  $v$  or  $w$ )

Fonte: (adaptado de DELTARES, 2020)

As vantagens desse arranjo seriam as de que as condições de contorno podem ser implementadas de modo simples, permitindo utilizar um número menor de variáveis de estado discretas em comparação com grades não escalonadas, para uma mesma acurácia. Além disso, grades escalonadas para águas rasas preveniriam oscilações espaciais no nível de água (Deltares, 2020).

### 3.2 MÉTODO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO ADI

O método padrão utilizado pelo DELFT3D-FLOW para a integração temporal é chamado *Alternating Direction Implicit* (ADI) para as equações de águas rasas, proposto inicialmente por Leendertse e Gritton (1971). Este método é dividido em dois estágios, cada qual correspondendo a meio passo temporal. Em cada estágio, todos os termos do modelo de equações são resolvidos em um modo consistente com acurácia de segunda ordem (ao menos) no espaço.

Para a discretização espacial dos termos de advecção horizontal, três opções estão disponíveis no DELFT3D-FLOW. As duas primeiras (WAQUA e Cycling) são baseadas no método ADI, e não é imposta restrição no passo temporal. O terceiro esquema, denominado Flooding, possui integração explícita do termo advectivo e o passo temporal é restrito pelo número de Courant para advecção.

Para o gradiente de nível de água e termos advectivos, os níveis de tempo são alternados: se em um estágio um termo é tomado implicitamente no tempo, este termo será tomado explicitamente no tempo no estágio seguinte. Para completar o passo temporal, cada termo é integrado separadamente em segunda ordem de acurácia no tempo. Na forma vetorial, para o caso 2D, as equações do método ADI são dadas por:

Estágio 1:

$$\frac{\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} - \vec{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^l + B\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} = \vec{d} \quad (3.7)$$

Estágio 2:

$$\frac{\vec{U}^{l+1} - \vec{U}^{l+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^l + B\vec{U}^{l+1} = \vec{d} \quad (3.8)$$

Com:

$$A_x = \begin{pmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} \quad A_y = \begin{pmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

E

$$B = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Sendo  $\lambda$  o coeficiente de atrito linearizado para o fundo.

Para aprimorar a estabilidade, o atrito de fundo é integrado implicitamente para cada estágio.  $\vec{d}$  é o lado direito da equação contendo forçantes como vento e pressão atmosférica.

#### 4 REFERÊNCIAS

- Brunton, S. (2021, April 2). *Turbulente: Reynolds Averaged Navier-Stokes*. <https://www.youtube.com/watch?v=mDt-HJEXK6g>
- Deltares. (2020). *DELFT3D-FLOW - User Manual*.
- Leendertse, J. J., & Gritton, E. C. (1971). A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas. *The New York City Rand Institute*.
- Make, M. K. P. (2014). *Predicting scale effects on floating offshore wind turbines A numerical analysis of model-and full-scale wind turbines using a RANS CFD solver*.
- Pereira, R. S., & Tucci, C. E. M. (2016). *Modelo matemático baseado nas equações de águas rasas para solução de problemas tridimensionais*. <https://semengo.furg.br/images/2006/34.pdf>
- Rodi, W. (1984). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics: A State of the Art Review*. International Association for Hydraulic Research. <https://books.google.com.br/books?id=G2IYAQAIAAJ>
- Smits, A. J. (2009). *Lectures in Fluid Mechanics Viscous Flows and Turbulence*.
- Truesdell, C. (1953). Notes on the History of the General Equations of Hydrodynamics. *The American Mathematical Monthly*, 60(7), 445–458. <http://www.jstor.org/stable/2308407>
- Wellinger, P., Uhl, P., Weigand, B., & Rodriguez, J. (2021). Analysis of turbulence structures and the validity of the linear Boussinesq hypothesis for an infinite tube bundle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 91, 108779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108779>

## APÊNDICE II – CENÁRIOS MODELADOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CICERO MARTINS JUNIOR

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA AÇÕES DE RESPOSTA A  
VAZAMENTOS DE ÓLEO EM RIOS E RESERVATÓRIOS

APÊNDICE II  
CENÁRIOS MODELADOS

CURITIBA

2023

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cenário A.1 - Vazão constante de 1000m <sup>3</sup> /s, 10000 partículas .....	133
Figura 2 - Cenário A.1 - concentração de óleo nos pontos de observação .....	135
Figura 3 - Cenário A.1 - Concentrações de óleo fluuando ao longo do tempo de simulação .....	135
Figura 4 - Cenário A.2 - Vazão constante de 1000m <sup>3</sup> /s, 100000 partículas .....	136
Figura 5 - Cenário A.2 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície.....	137
Figura 6 - Cenário A.2 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	137
Figura 7 - Cenário A.2 - Status das partículas ao fim da simulação .....	137
Figura 8 - Cenário A.3 - Vazão constante de 860m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Fluibrax 400 .....	138
Figura 9 - Cenário A.3 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície.....	139
Figura 10 - Cenário A.3 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	139
Figura 11 - Cenário A.4 - Vazão constante de 550m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Fluibrax 400.....	140
Figura 12 - Cenário A.4 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície.....	141
Figura 13 - Cenário A.4 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	141
Figura 14 - Cenário A.5 - Redução para 600m <sup>3</sup> /s pelo vertedouro, 21000kg de óleo Fluibrax 400 ....	142
Figura 15 - Cenário A.5 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície.....	143
Figura 16 - Cenário A.5 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	143
Figura 17 - Cenário A.6 - Redução para 100m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Fluibrax 400 .....	144
Figura 18 - Cenário A.6 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície.....	145
Figura 19 - Cenário A.6 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	145
Figura 20 - Cenário A.6 - Status das partículas ao fim da simulação .....	145
Figura 21 - Cenário A.7 - Vazão constante de 1000m <sup>3</sup> /s, vazamento contínuo .....	146
Figura 22 - Cenário A.7 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície.....	147
Figura 23 - Cenário A.7 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	147
Figura 24 - Cenário A.7 - Status das partículas ao fim da simulação .....	147
Figura 25 - Cenário B.8 - Vento 3m/s < S-N Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Fluibrax 400 .....	148
Figura 26 - Cenário B.8 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	149
Figura 27 - Cenário B.8 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	149
Figura 28 - Cenário B.9 - Vento 3m/s < W-E vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Fluibrax 400 .....	150
Figura 29 - Cenário B.9 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	151
Figura 30 - Cenário B.9 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	151
Figura 31 - Cenário B.10 - Vento 3m/s < N-S Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Fluibrax 400 .....	152
Figura 32 - Cenário B.10 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	153
Figura 33 - Cenário B.10 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	153
Figura 34 - Cenário B.10 - Status das partículas ao fim da simulação.....	153
Figura 35 - Cenário B.11 - Vento 3m/s < E-W, com percentual de arraste 3%, vazão 1000m <sup>3</sup> /s.....	154
Figura 36 - Cenário B.11 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície.....	155
Figura 37 - Cenário B.11 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51.....	155
Figura 38 - Cenário C.12 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 2760kg de óleo Fluibrax 400.....	156

Figura 39 - Cenário C.12 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	157
Figura 40 - Cenário C.12 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	157
Figura 41 - Cenário C.12 - Status das partículas ao fim da simulação.....	157
Figura 42 - Cenário C.13 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 7360kg de óleo Fluibrax 400.....	158
Figura 43 - Cenário C.13 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	159
Figura 44 - Cenário C.13 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	159
Figura 45 - Cenário D.14 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo HFO – Dh manual.....	160
Figura 46 - Cenário D.14 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	161
Figura 47 - Cenário D.14 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	161
Figura 48 - Cenário D.14 - Status das partículas ao fim da simulação.....	161
Figura 49 - Cenário D.15 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Ekofisk - Dh manual .....	162
Figura 50 - Cenário D.15 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície .....	163
Figura 51 - Cenário D.15 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	163
Figura 52 - Cenário D.15 - Status das partículas ao fim da simulação.....	163
Figura 53 - Cenário D.16 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo HFO – Dh modelo.....	164
Figura 54 - Cenário D.16 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície .....	165
Figura 55 - Cenário D.16 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	165
Figura 56 - Cenário D.17 - Vazão 1000m <sup>3</sup> /s, 21000kg de óleo Ekofisk – Dh modelo.....	166
Figura 57 - Cenário D.17 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	167
Figura 58 - Cenário D.17 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	167
Figura 59 - Cenário D.17 - Status das partículas ao fim da simulação.....	167
Figura 60 - Cenário E.18 - 2 barreiras em B e C, resposta lenta.....	168
Figura 61 - Cenário E.18 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	169
Figura 62 - Cenário E.18 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	169
Figura 63 - Cenário E.18 - Status das partículas ao fim da simulação.....	169
Figura 64 - Cenário E.19 - 2 barreiras em B e C, resposta rápida .....	170
Figura 65 - Cenário E.19 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	171
Figura 66 - Cenário E.19 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	171
Figura 67 - Cenário E.19 - Status das partículas ao fim da simulação.....	171
Figura 68 - Cenário E.21 - Vento 3m/s < S-N, 2 barreiras em B e C, resposta rápida .....	172
Figura 69 - Cenário E.21 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	173
Figura 70 - Cenário E.21 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	173
Figura 71 - Cenário E.22 - Vento 3m/s W-E, 2 barreiras em B e C, resposta rápida .....	174
Figura 72 - Cenário E.22 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	175
Figura 73 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	175
Figura 74 - Cenário E.23 - Vento 3m/s < N-S, 2 barreiras em B e C, resposta rápida .....	176
Figura 75 - Cenário E.23 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	177
Figura 76 - Cenário E.23 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	177
Figura 77 - Cenário E.24 - Vazão reduzida a 100m <sup>3</sup> /s, 2 barreiras em B e C, resposta lenta.....	178
Figura 78 - Cenário E.24 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	179

Figura 79 - Cenário E.24 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	179
Figura 80 - Cenário E.24 - Status das partículas ao fim da simulação.....	179
Figura 81 - Cenário E.25 - Vazão reduzida a 100m <sup>3</sup> /s, 2 barreiras em B e C, resposta rápida .....	180
Figura 82 - Cenário E.25 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	181
Figura 83 - Cenário E.25 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	181
Figura 84 - Cenário E.26 - Vazão reduzida a 100m <sup>3</sup> /s, 1 barreira em A, resposta imediata .....	182
Figura 85 - Cenário E.26 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	183
Figura 86 - Cenário E.26 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	183
Figura 87 - Cenário E.26 - Status das partículas ao fim da simulação.....	183
Figura 88 - Cenário E.27 - Vazão constante 550m <sup>3</sup> /s, 2 barreiras em B e C, resposta lenta.....	184
Figura 89 - Cenário E.27 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	185
Figura 90 - Cenário E.27 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	185
Figura 91 - Cenário E.28 - Vazão constante 550m <sup>3</sup> /s, 2 barreiras em B e C, resposta rápida.....	186
Figura 92 - Cenário E.28 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície .....	187
Figura 93 - Cenário E.28 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51 .....	187

Quadro 1 - Cenários de lançamento de óleo

Cj	Vazão (m³/s)	Vento (m/s)	Volume de óleo (kg)	Tipo de óleo	Barreiras	Observação	
A	1	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q cheia, 10000 partículas
	2	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q cheia, 100000 partículas
	3	860	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q mediana
	4	550	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q seca
	5a	1000→600	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q turb=0, Qvert= 600m³/s
	5b	1000→1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q turb=400, Qvert=600m³/s
	6	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Q turbinada reduzida
B	7	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	Vazamento contínuo
	8	1000	3m/s 180°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento N-S
	9	1000	3m/s 270°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento W-E
	10	1000	3m/s 0°	21000	Fluibrax400	sem	Direção do vento S-N
C	11	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	sem	% de arraste do vento: 3%
	12	1000	3m/s 90°	2760	Fluibrax400	sem	volume do óleo (3000L)
D	13	1000	3m/s 90°	7360	Fluibrax400	sem	volume do óleo (8000L)
	14	1000	3m/s 90°	21000	HFO	sem	Tipo de óleo pesado
	15	1000	3m/s 90°	21000	Ekofisk	sem	Tipo de óleo leve
	16	1000	3m/s 90°	21000	HFO	sem	coeficiente de dispersão
E	17	1000	3m/s 90°	21000	Ekofisk	sem	coeficiente de dispersão
	18	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	19	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	2 barreiras, resposta rápida
	20	1000	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	1 após 1h	1 barreira, resposta imediata
	21	1000	3m/s 180°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	Vento N-S, resposta rápida
	22	1000	3m/s 270°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	Vento W-E, resposta rápida
	23	1000	3m/s 0°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	Vento S-N, resposta rápida
	24	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	25	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	2 barreiras, resposta rápida
	26	1000→100	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	1 após 1h	1 barreira, resposta imediata
	27	550	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 5h e 8h	2 barreiras, resposta lenta
	28	550	3m/s 90°	21000	Fluibrax400	2 após 2h e 5h	2 barreiras, resposta rápida

Figura 1 - Cenário A.1 - Vazão constante de 1000m<sup>3</sup>/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400, 10000 partículas

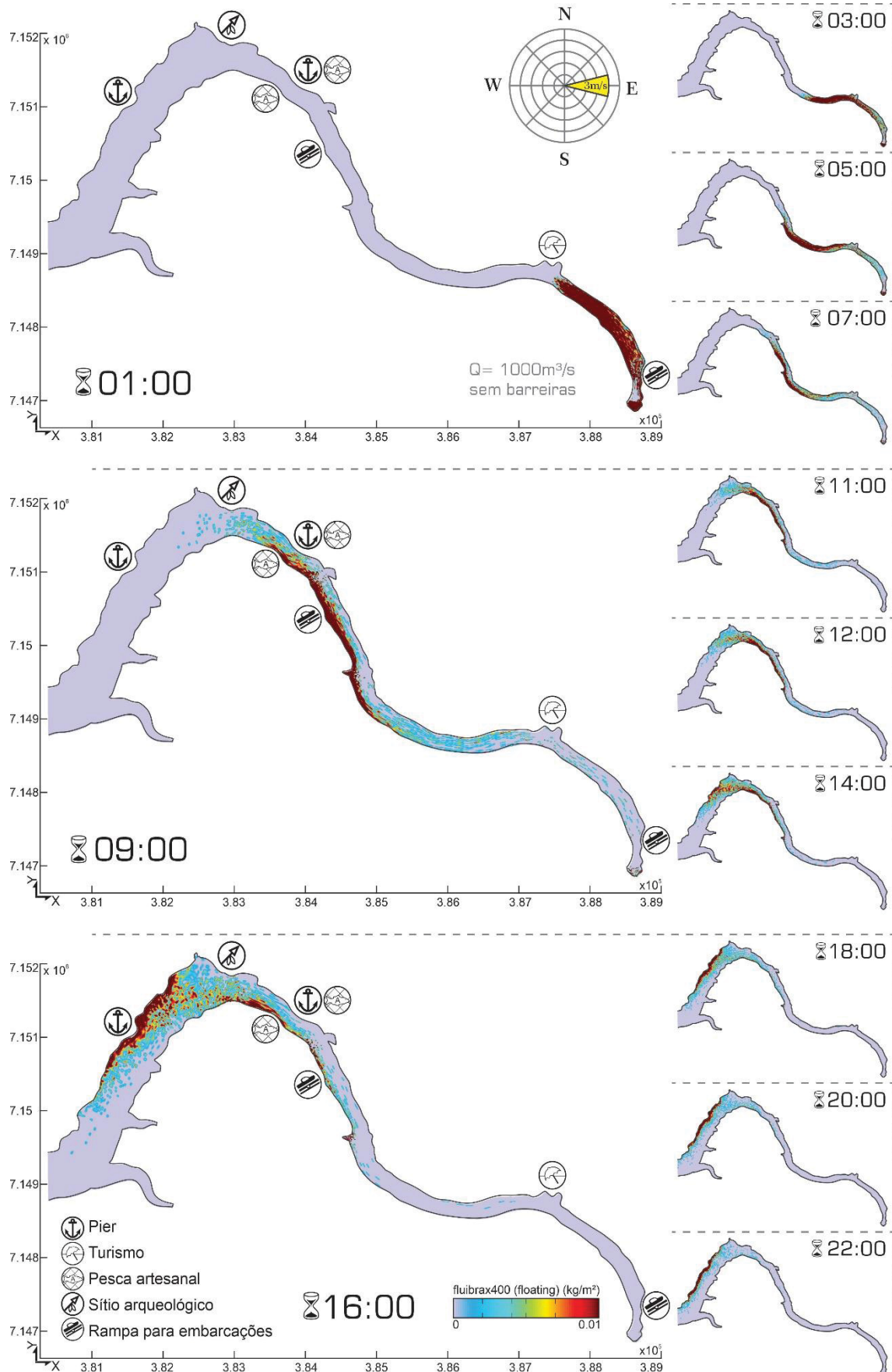




Figura 2 - Cenário A.1 - concentração de óleo nos pontos de observação

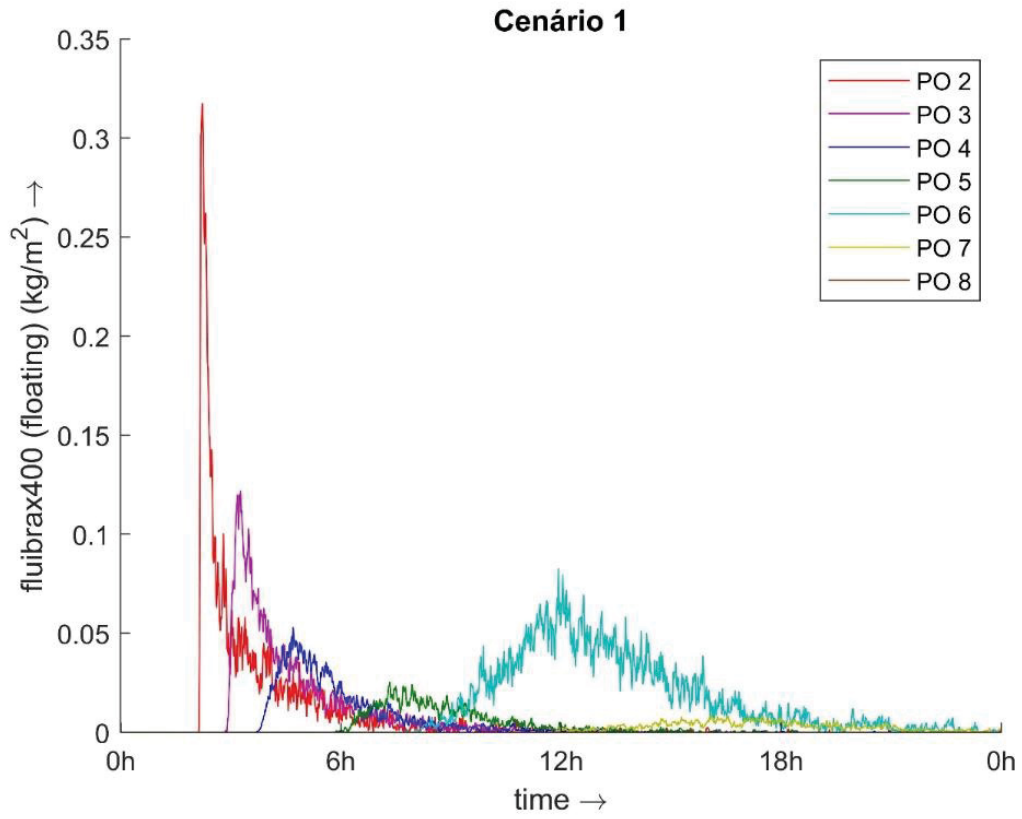


Figura 3 - Cenário A.1 - Concentrações de óleo flutuando ao longo do tempo de simulação

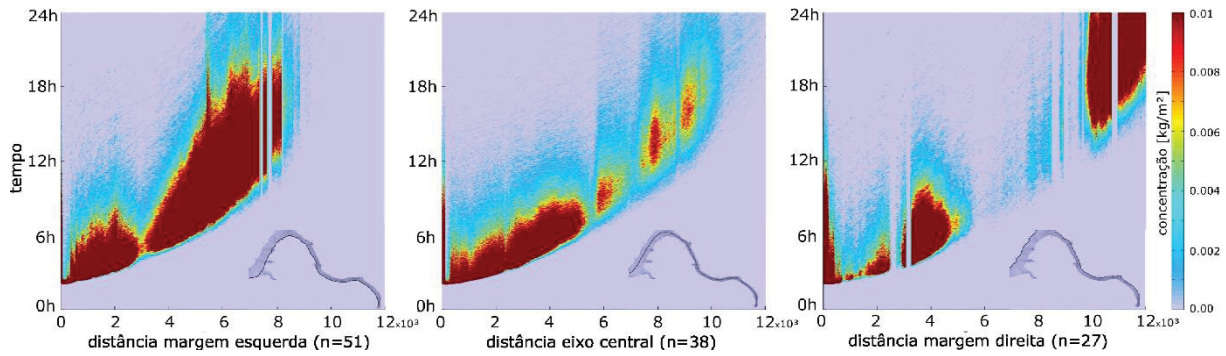


Figura 4 - Cenário A.2 - Vazão constante de 1000m<sup>3</sup>/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400 – 100000 partículas

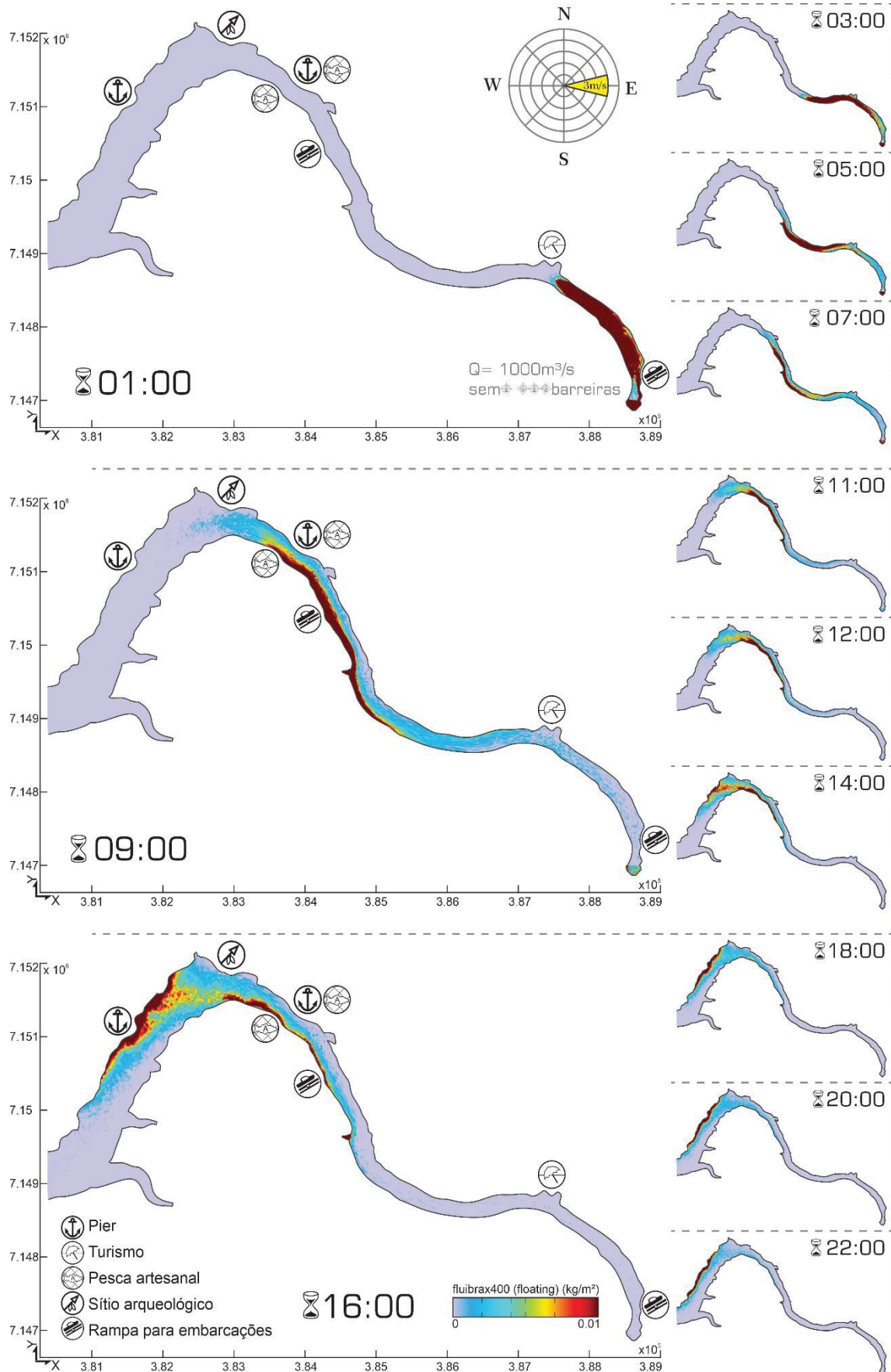


Figura 5 - Cenário A.2 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície

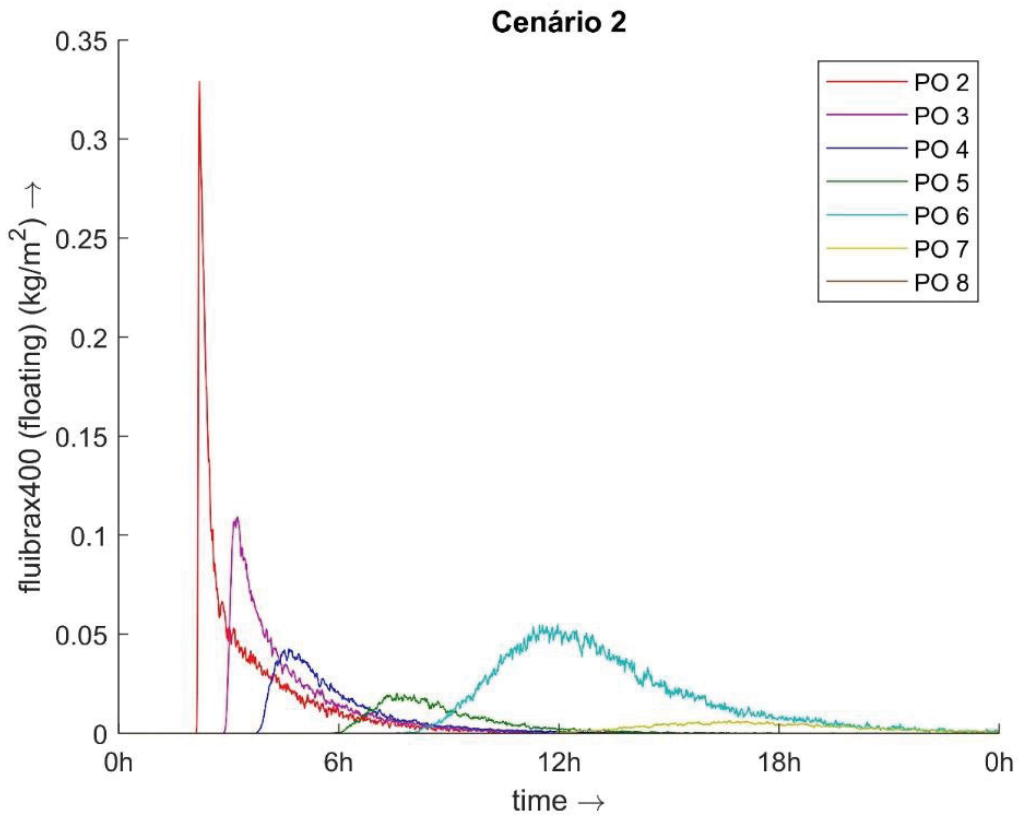


Figura 6 - Cenário A.2 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

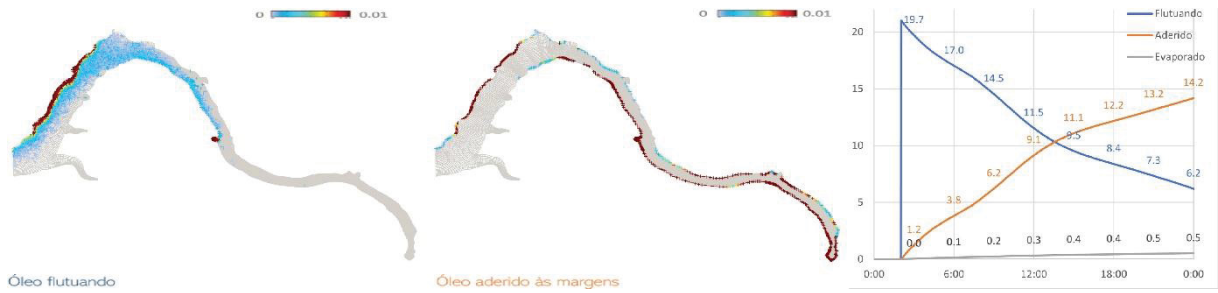


Figura 7 - Cenário A.2 - Status das partículas ao fim da simulação

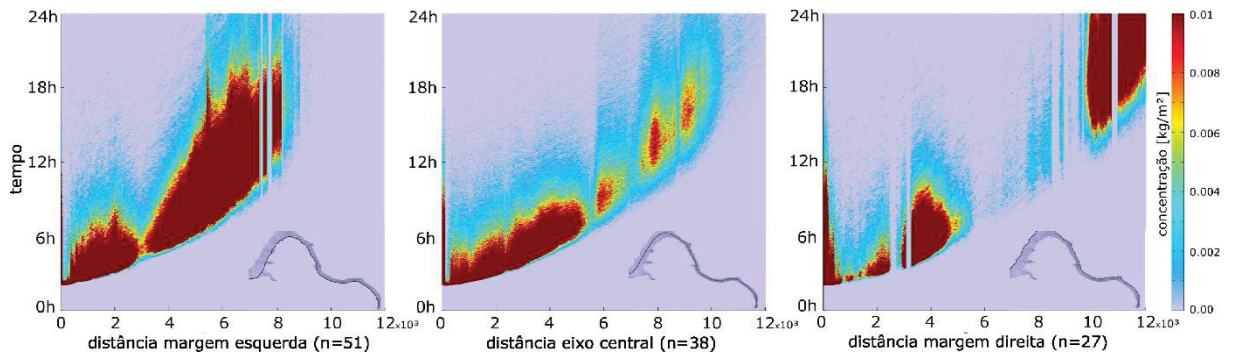


Figura 8 - Cenário A.3 - Vazão constante de 860m<sup>3</sup>/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

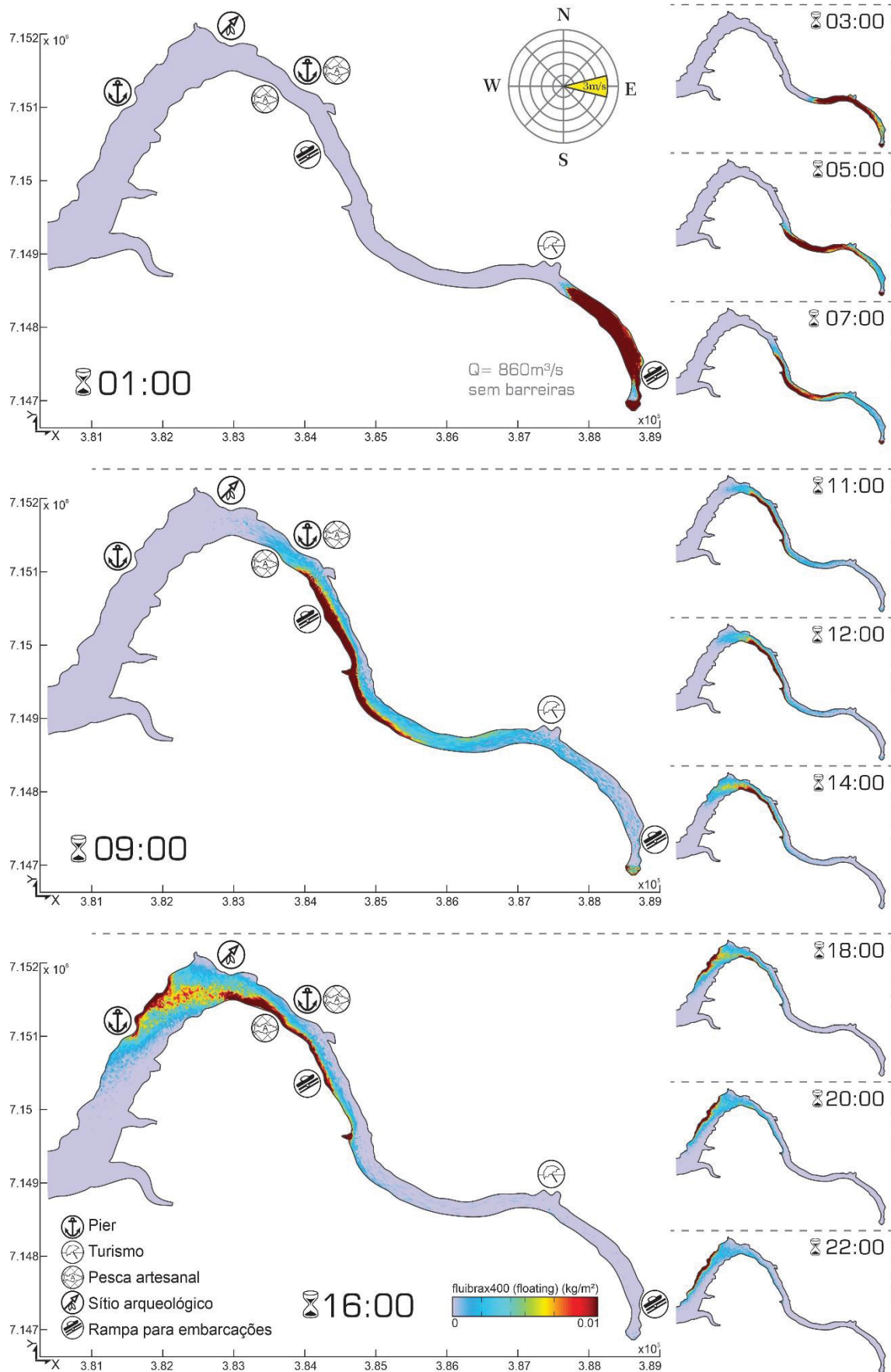


Figura 9 - Cenário A.3 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície

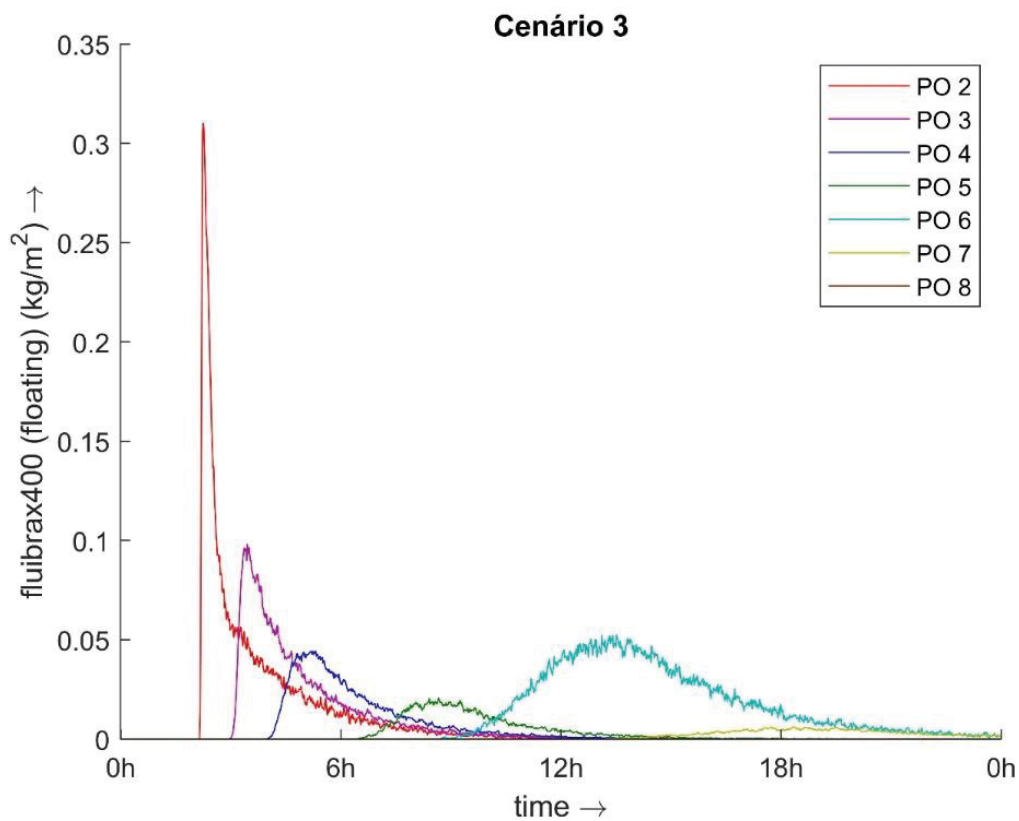


Figura 10 - Cenário A.3 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

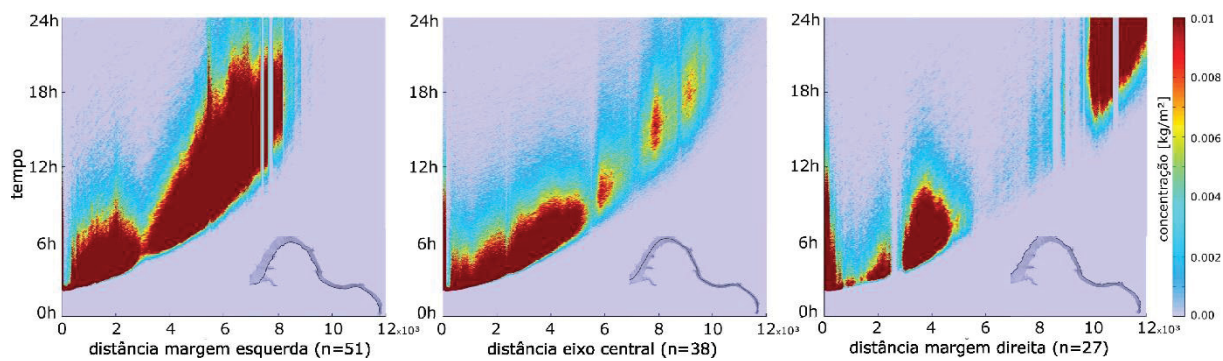




Figura 11 - Cenário A.4 - Vazão constante de 550m³/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

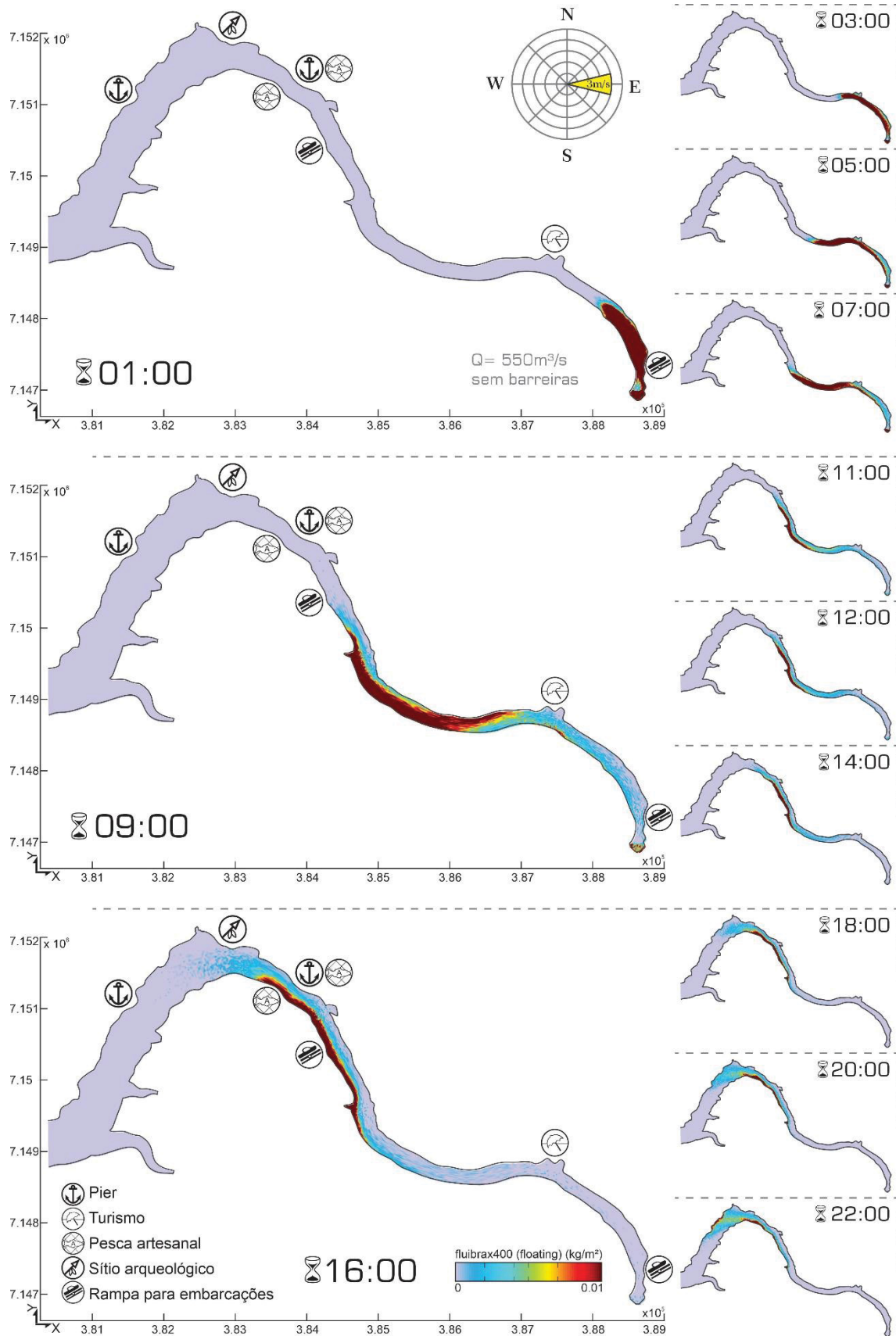




Figura 12 - Cenário A.4 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

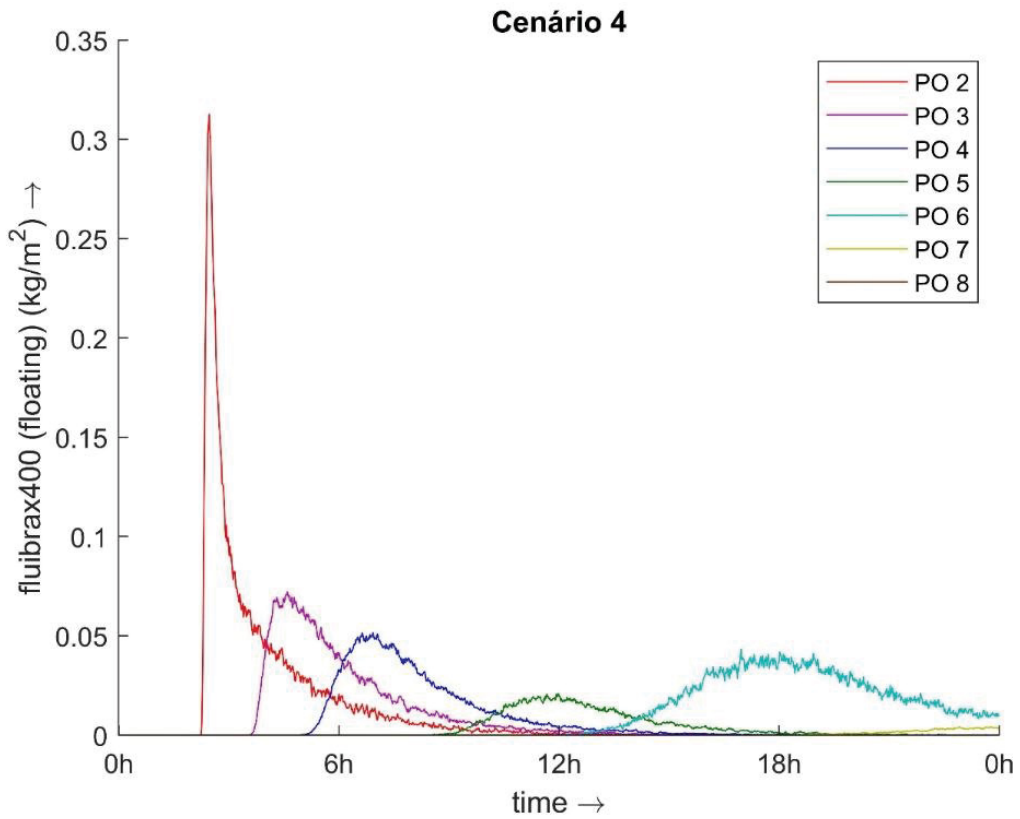


Figura 13 - Cenário A.4 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

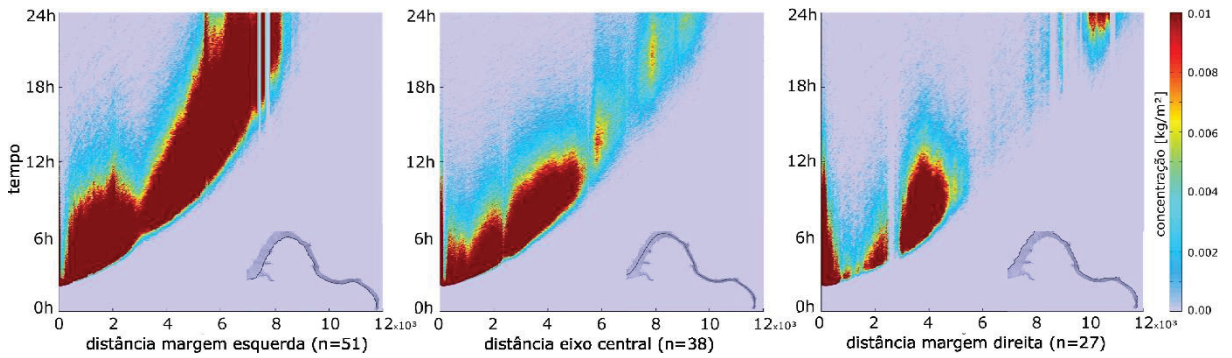


Figura 14 - Cenário A.5 - Redução para 600m³/s pelo vertedouro, 21000kg de óleo Fluibrax 400

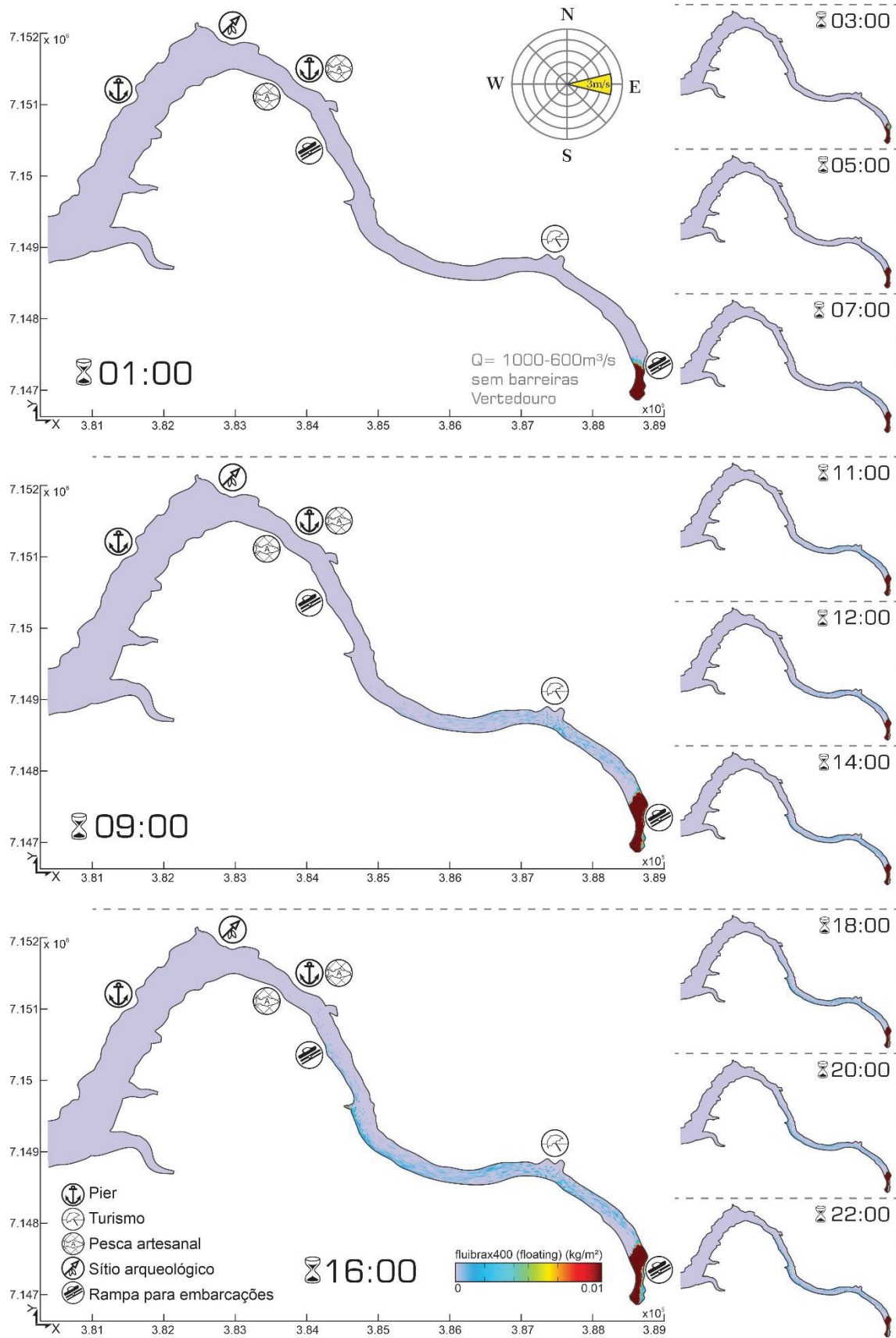


Figura 15 - Cenário A.5 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

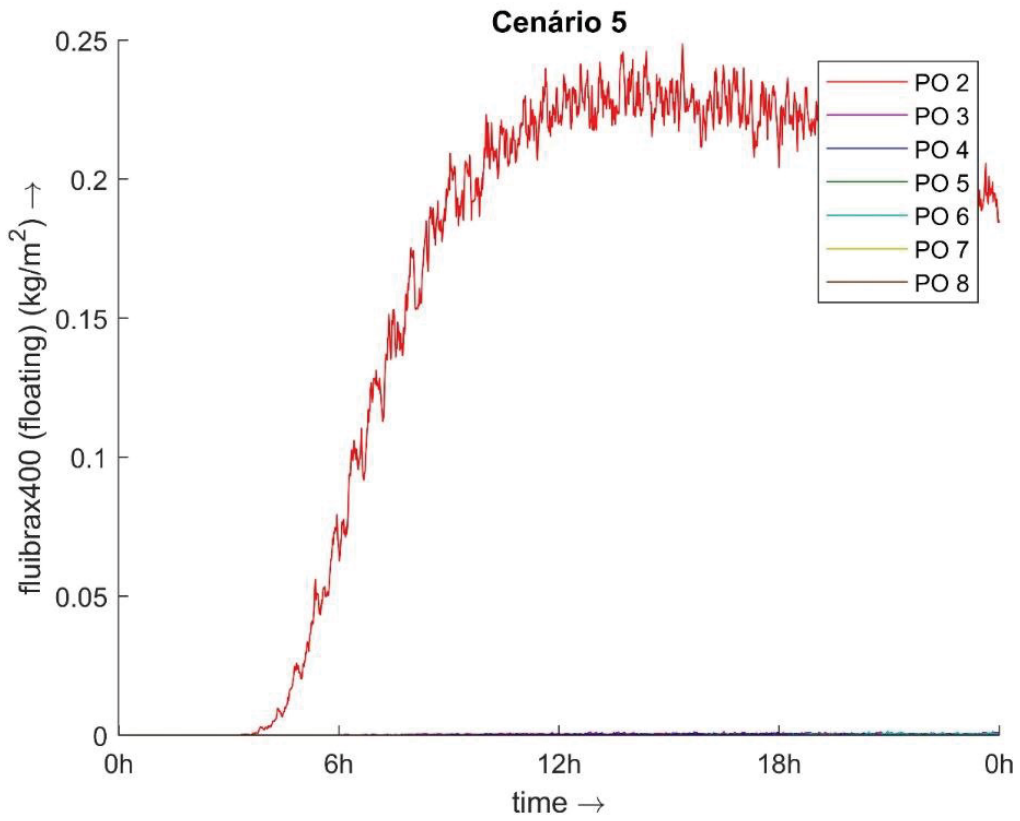


Figura 16 - Cenário A.5 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

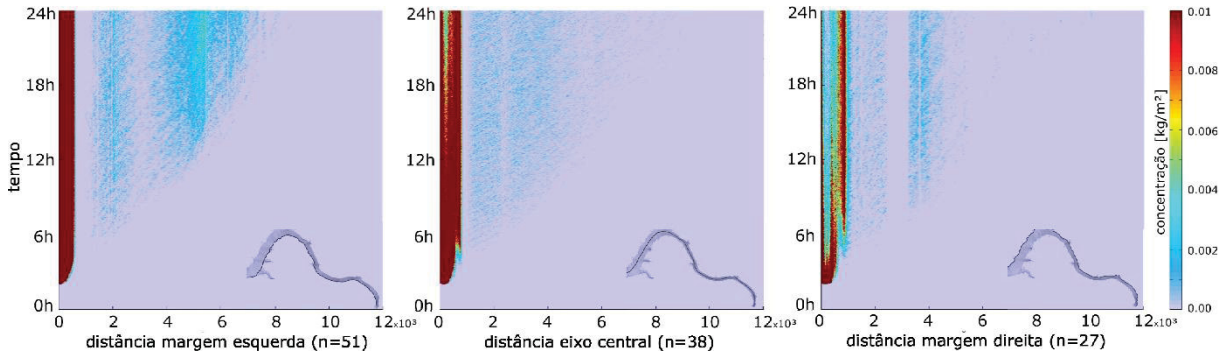


Figura 17 - Cenário A.6 - Redução para 100m³/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

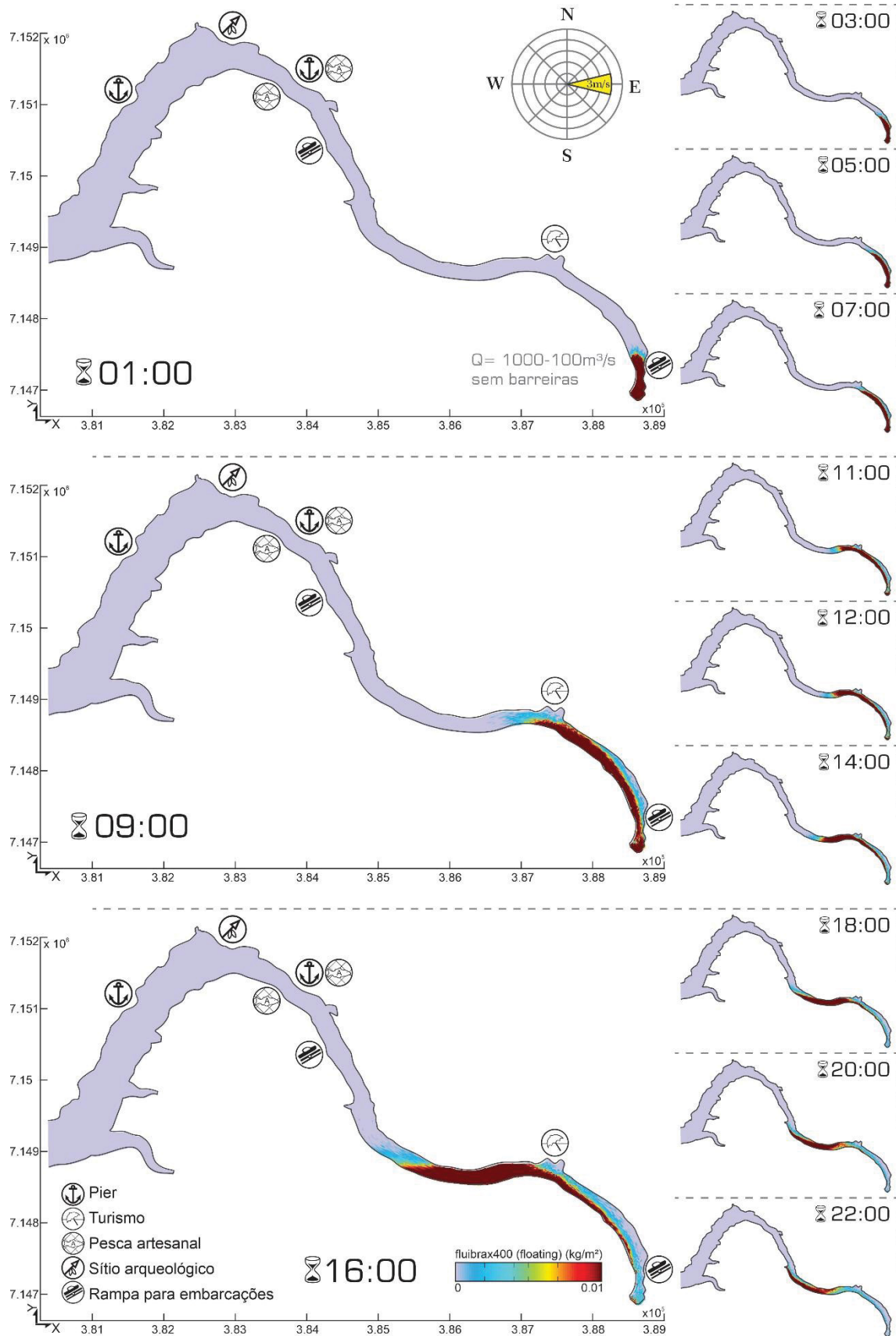


Figura 18 - Cenário A.6 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

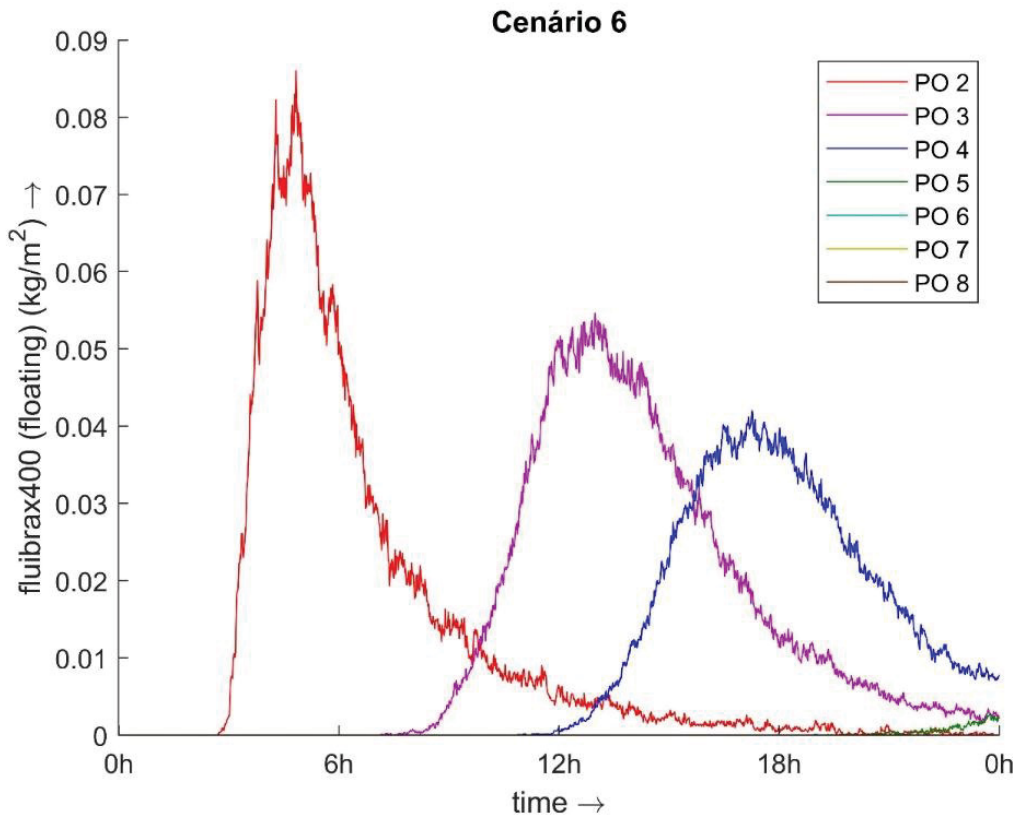


Figura 19 - Cenário A.6 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

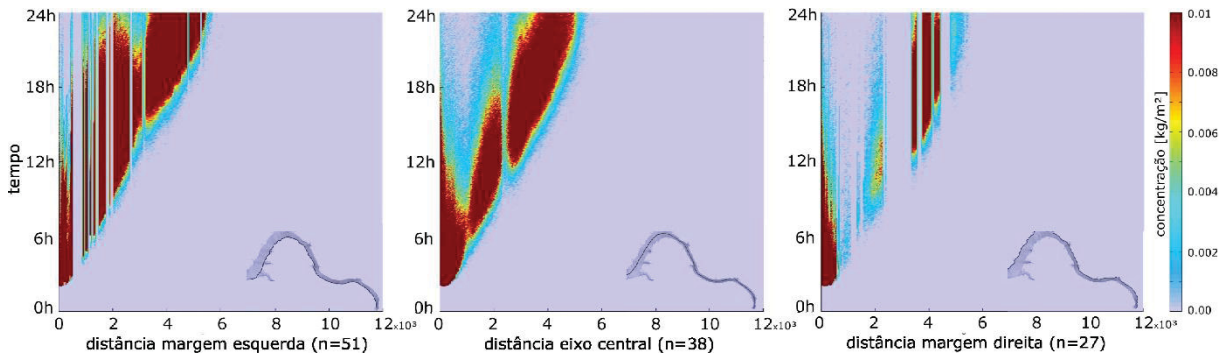


Figura 20 - Cenário A.6 - Status das partículas ao fim da simulação





Figura 21 - Cenário A.7 - Vazão constante de 1000m<sup>3</sup>/s, vazamento contínuo, 21000kg de óleo Fluibrax 400

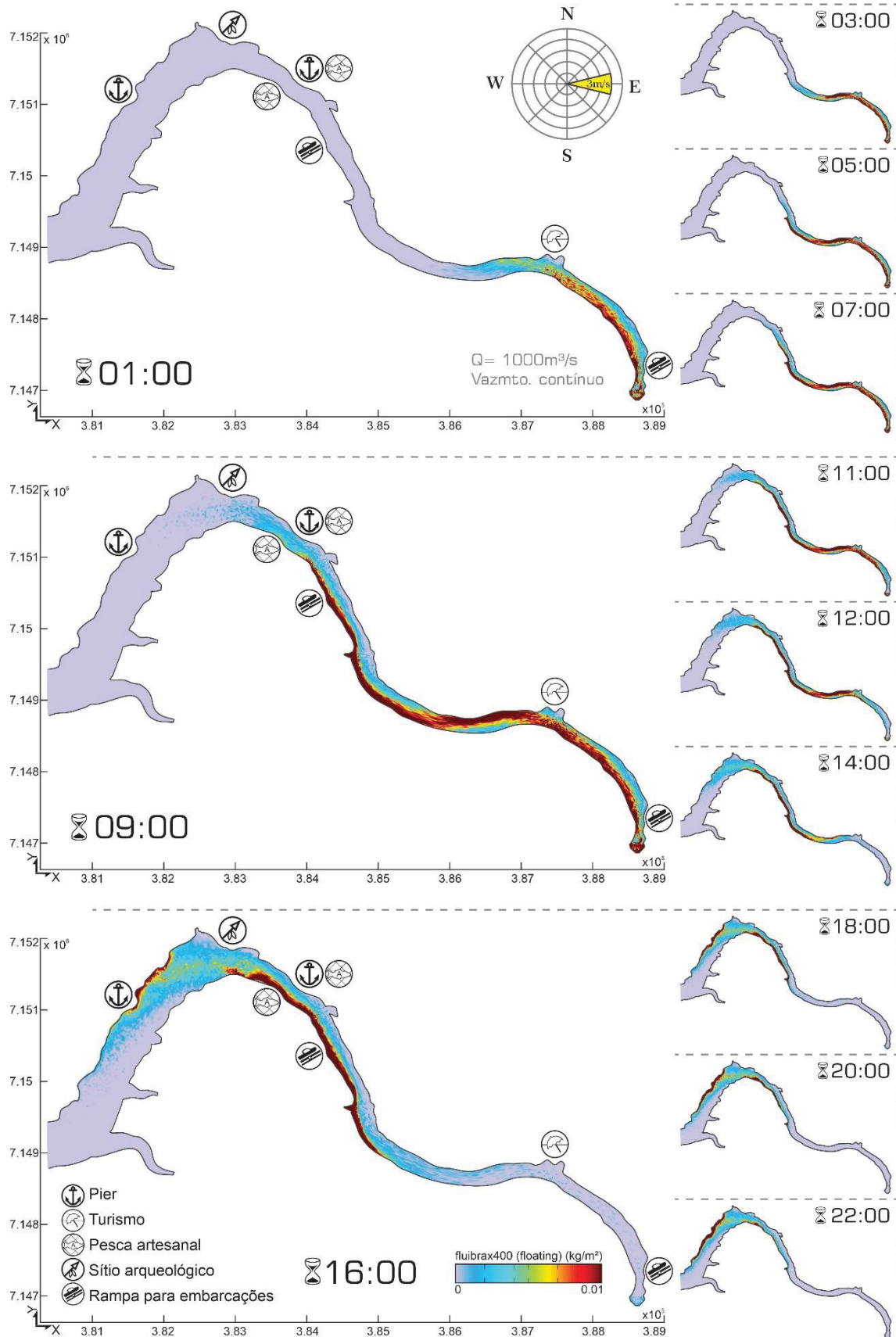




Figura 22 - Cenário A.7 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

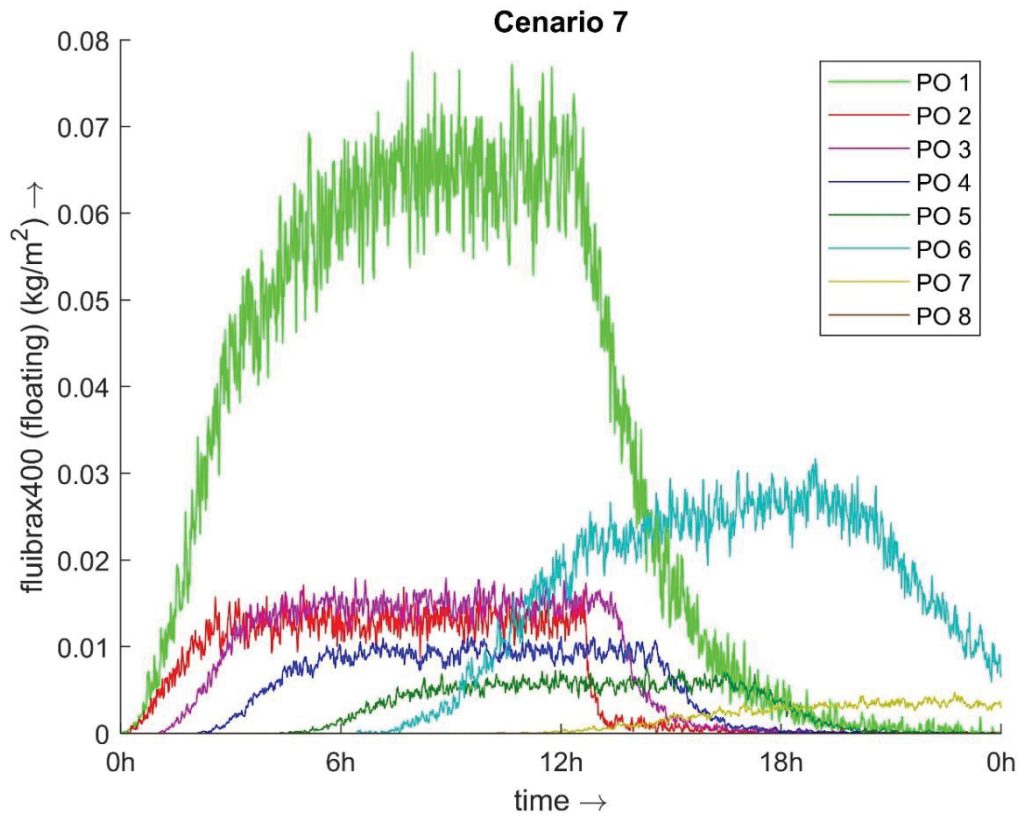


Figura 23 - Cenário A.7 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

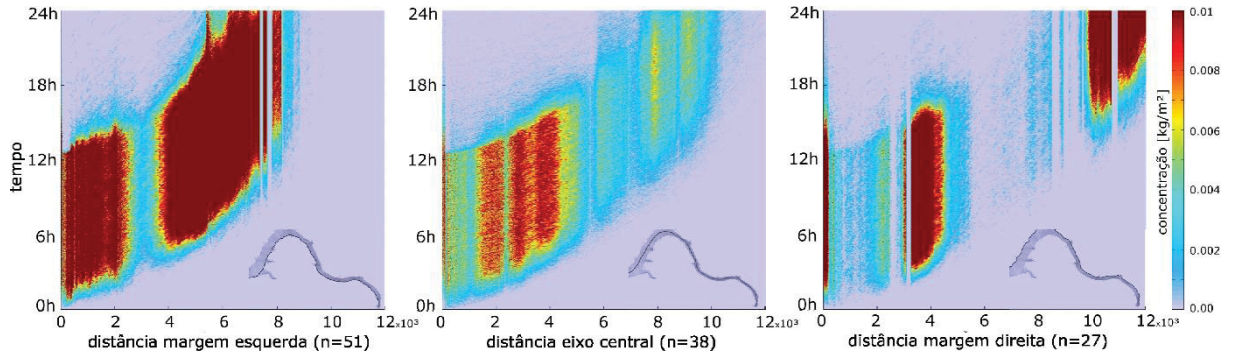


Figura 24 - Cenário A.7 - Status das partículas ao fim da simulação

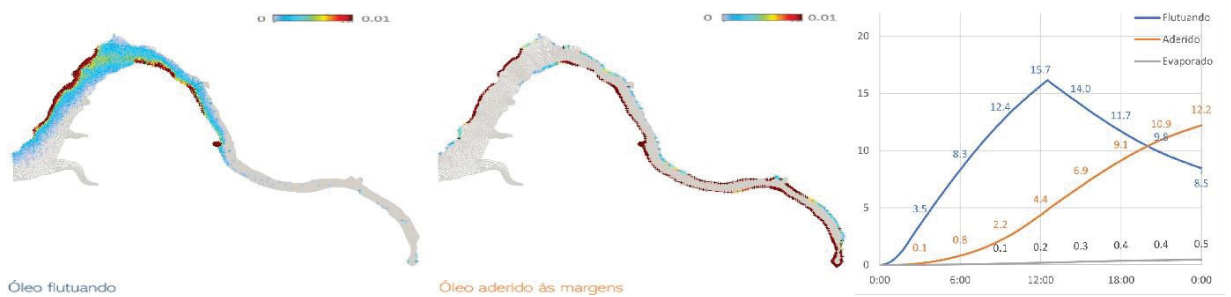


Figura 25 - Cenário B.8 - Vento 3m/s < S-N Vazão 1000m³/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

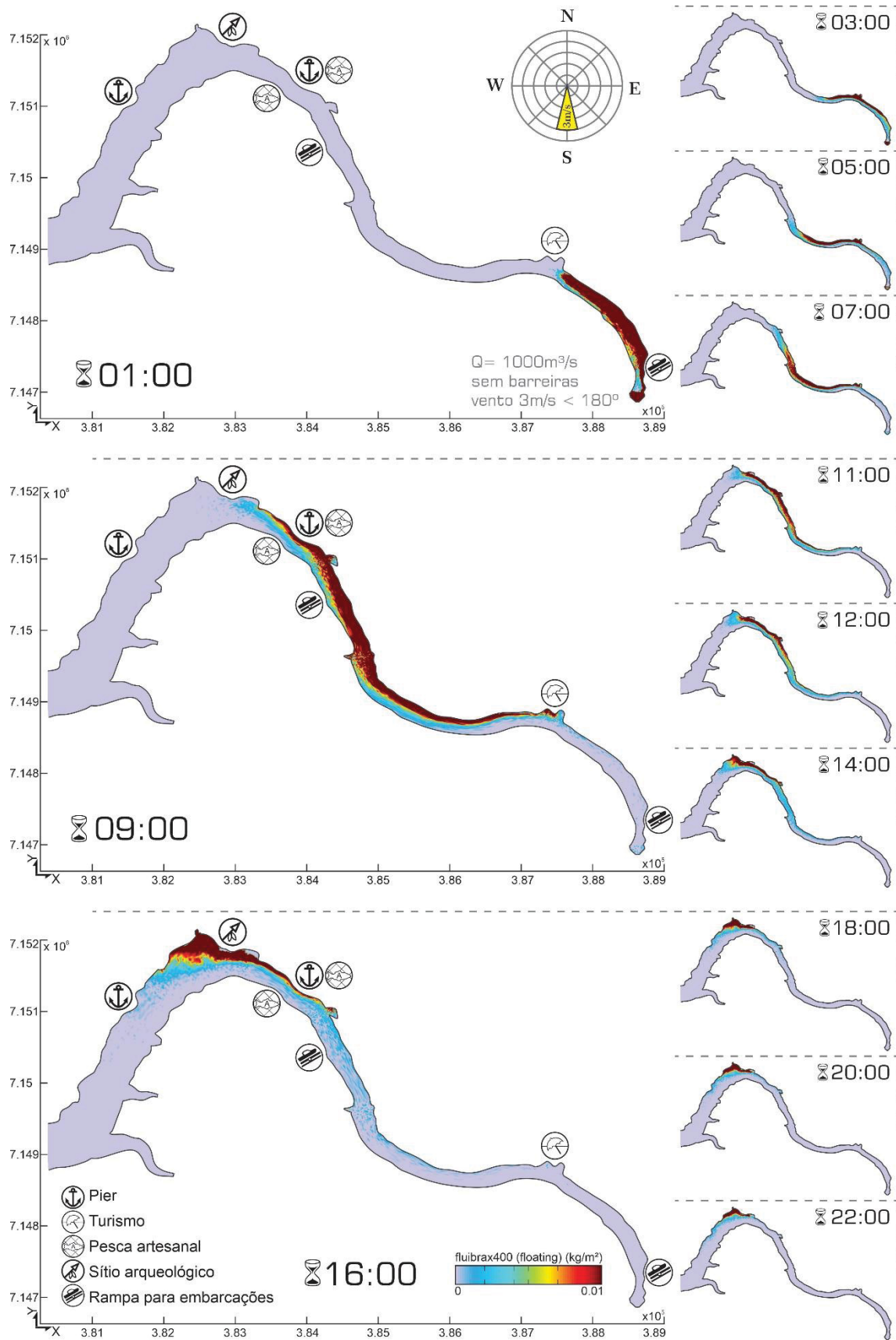


Figura 26 - Cenário B.8 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

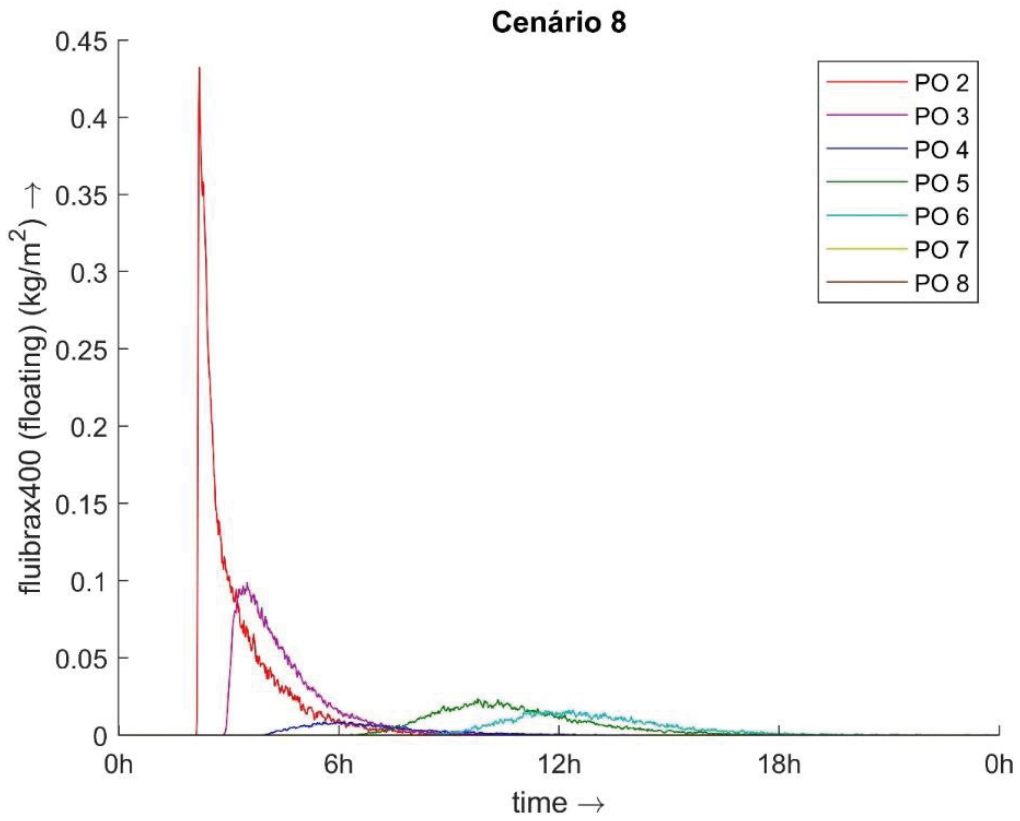


Figura 27 - Cenário B.8 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

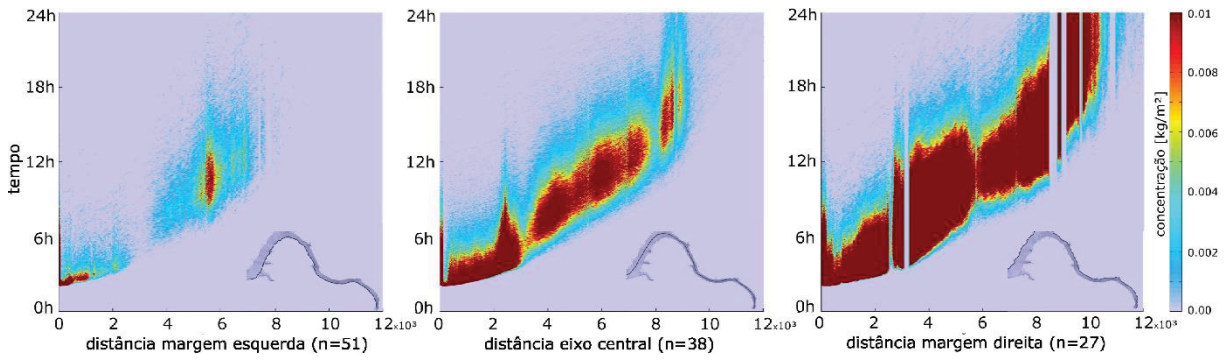


Figura 28 - Cenário B.9 - Vento 3m/s < W-E vazão 1000m³/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

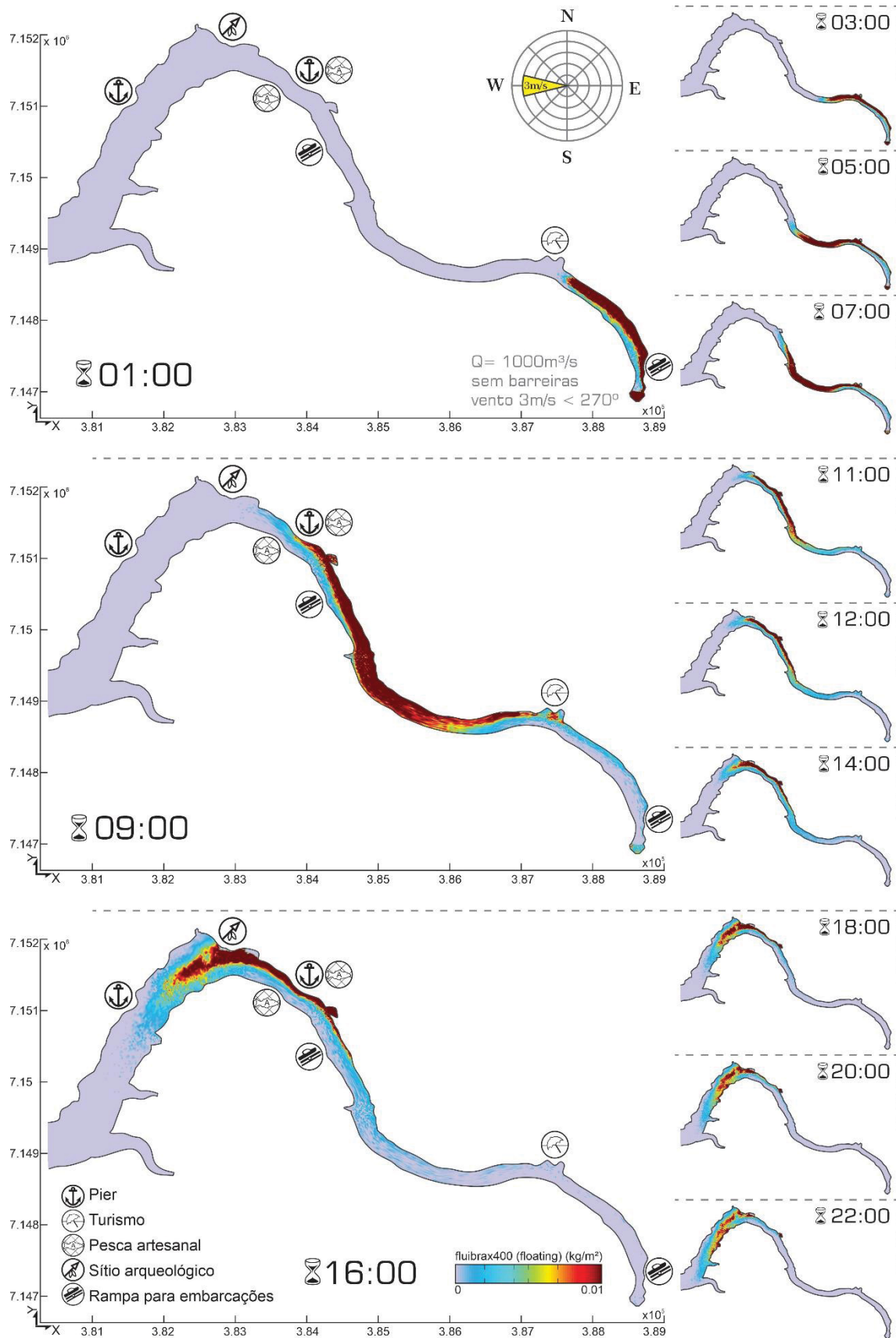




Figura 29 - Cenário B.9 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

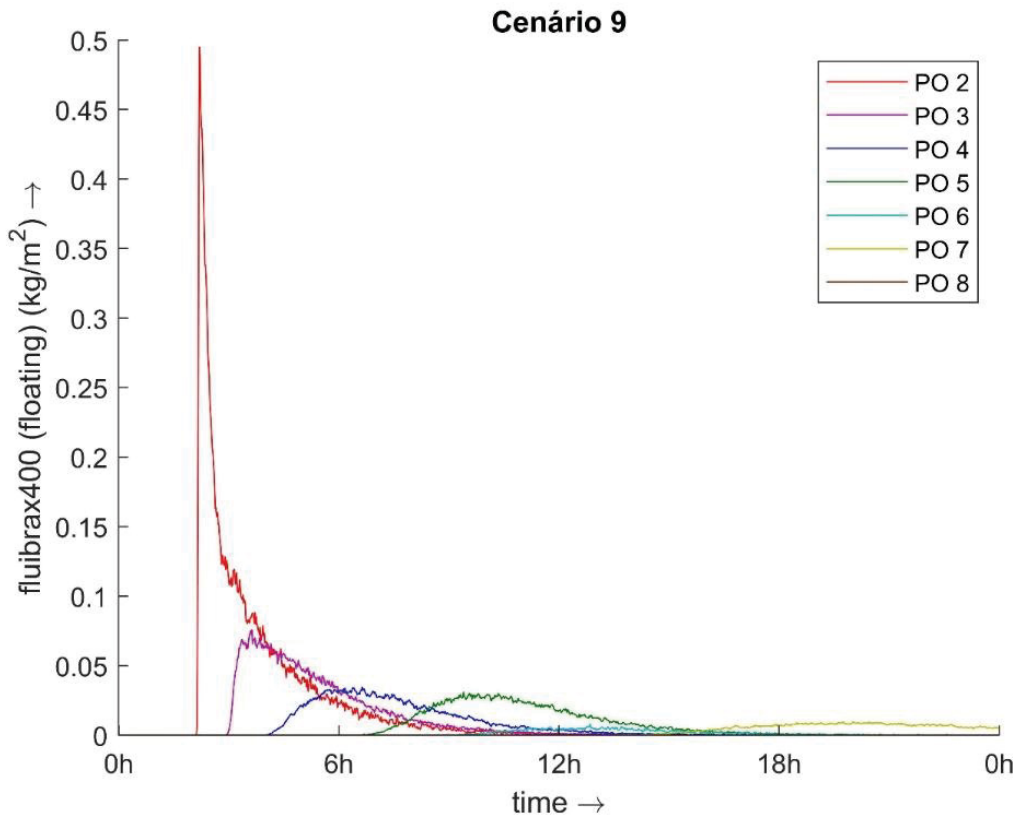


Figura 30 - Cenário B.9 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

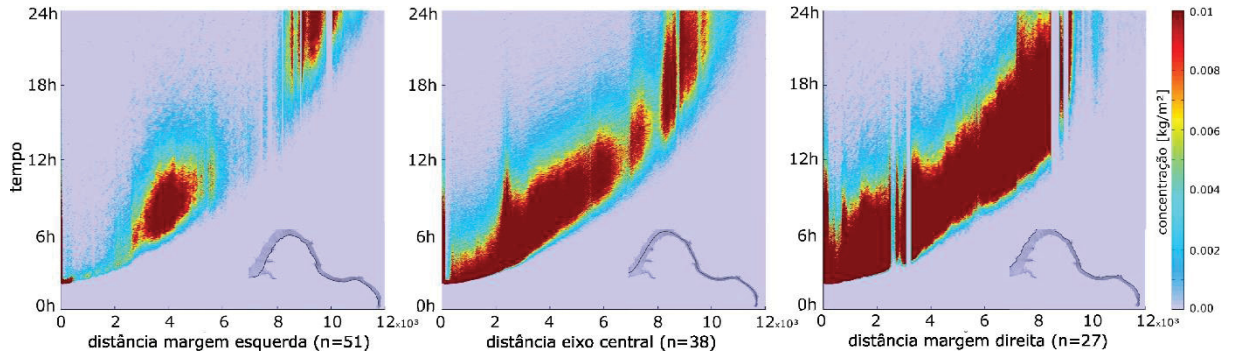


Figura 31 - Cenário B.10 - Vento 3m/s < N-S Vazão 1000m³/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

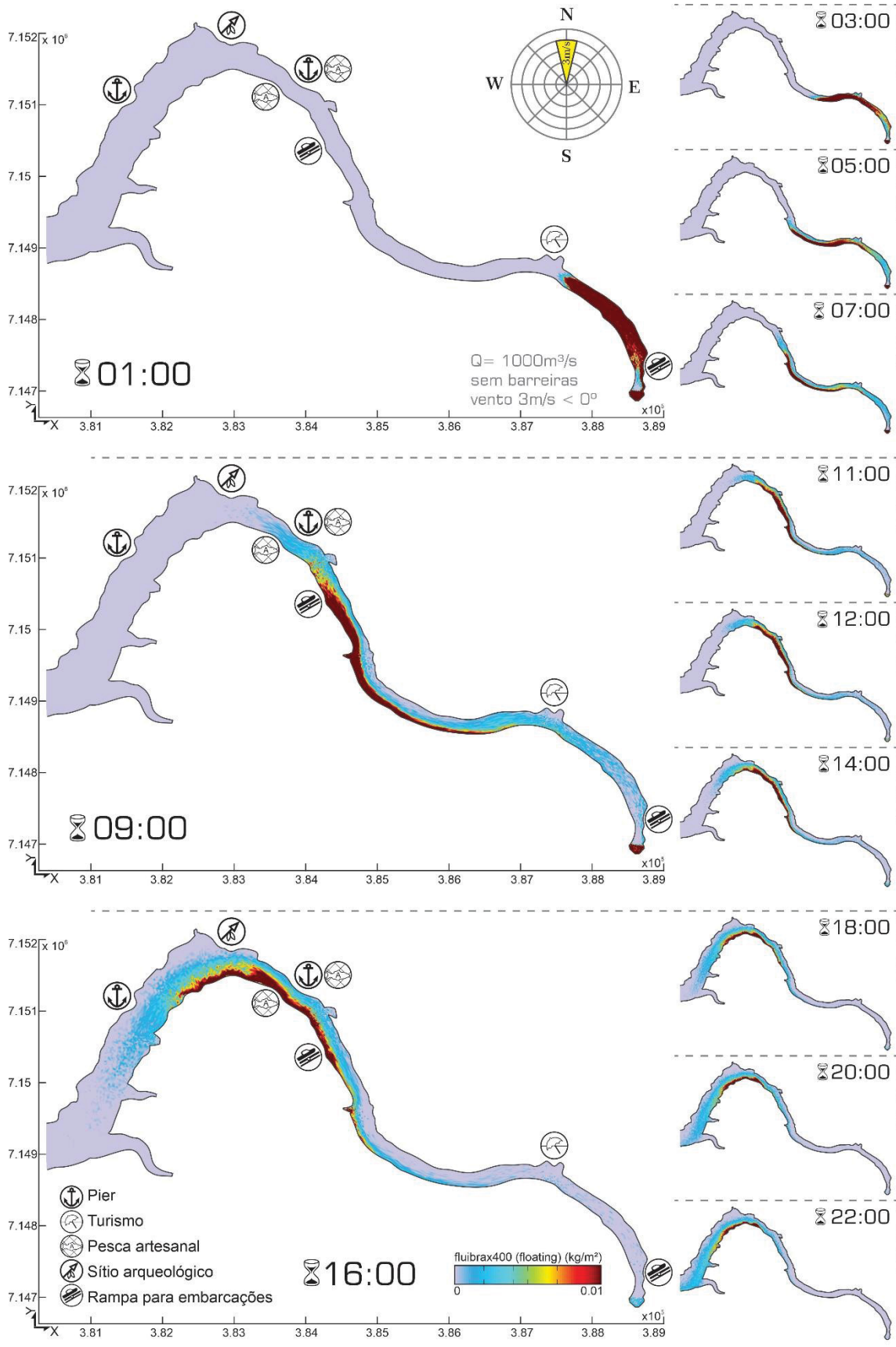




Figura 32 - Cenário B.10 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

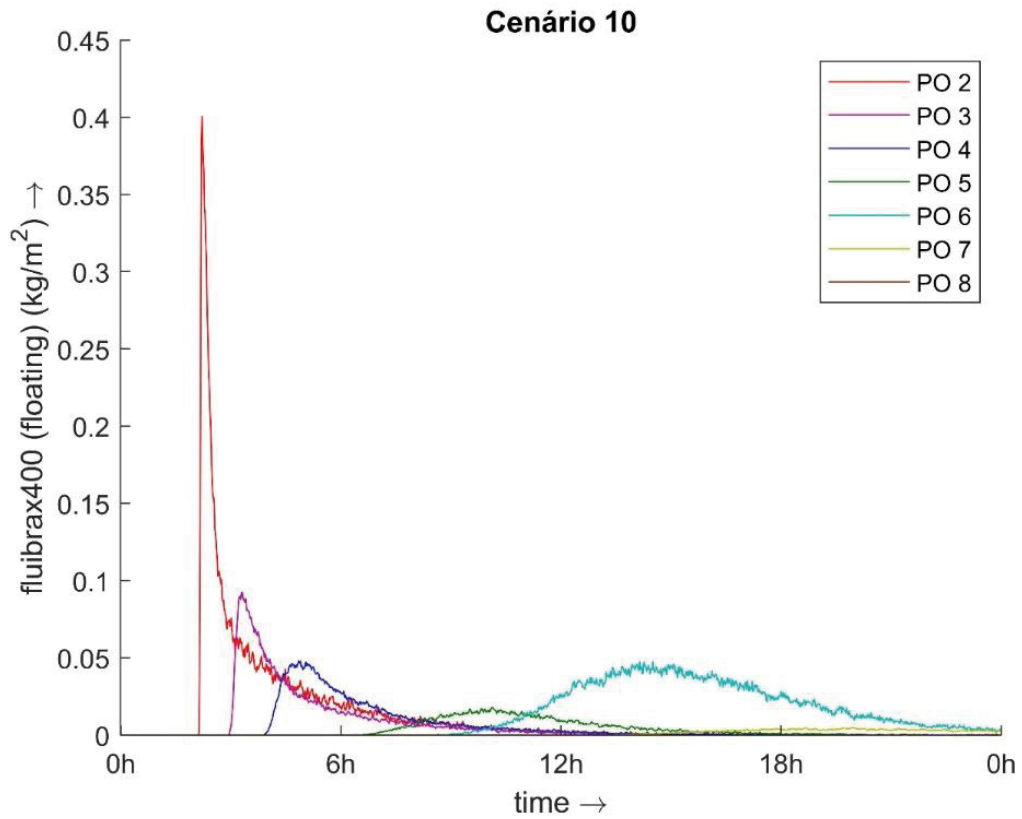


Figura 33 - Cenário B.10 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

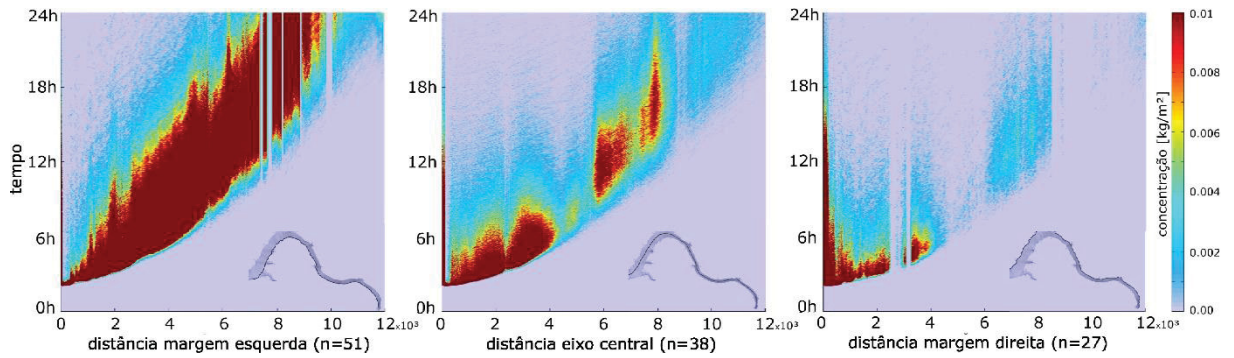


Figura 34 - Cenário B.10 - Status das partículas ao fim da simulação

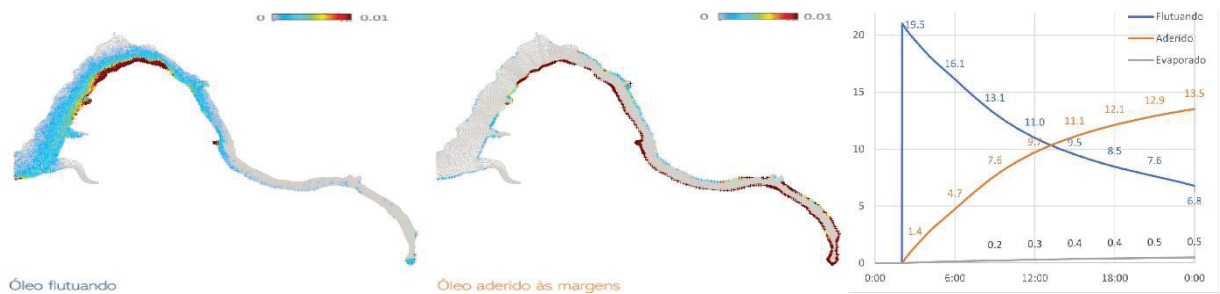


Figura 35 - Cenário B.11 - Vento 3m/s < E-W, com percentual de arraste 3%, vazão 1000m³/s, 21000kg de óleo Fluibrax 400

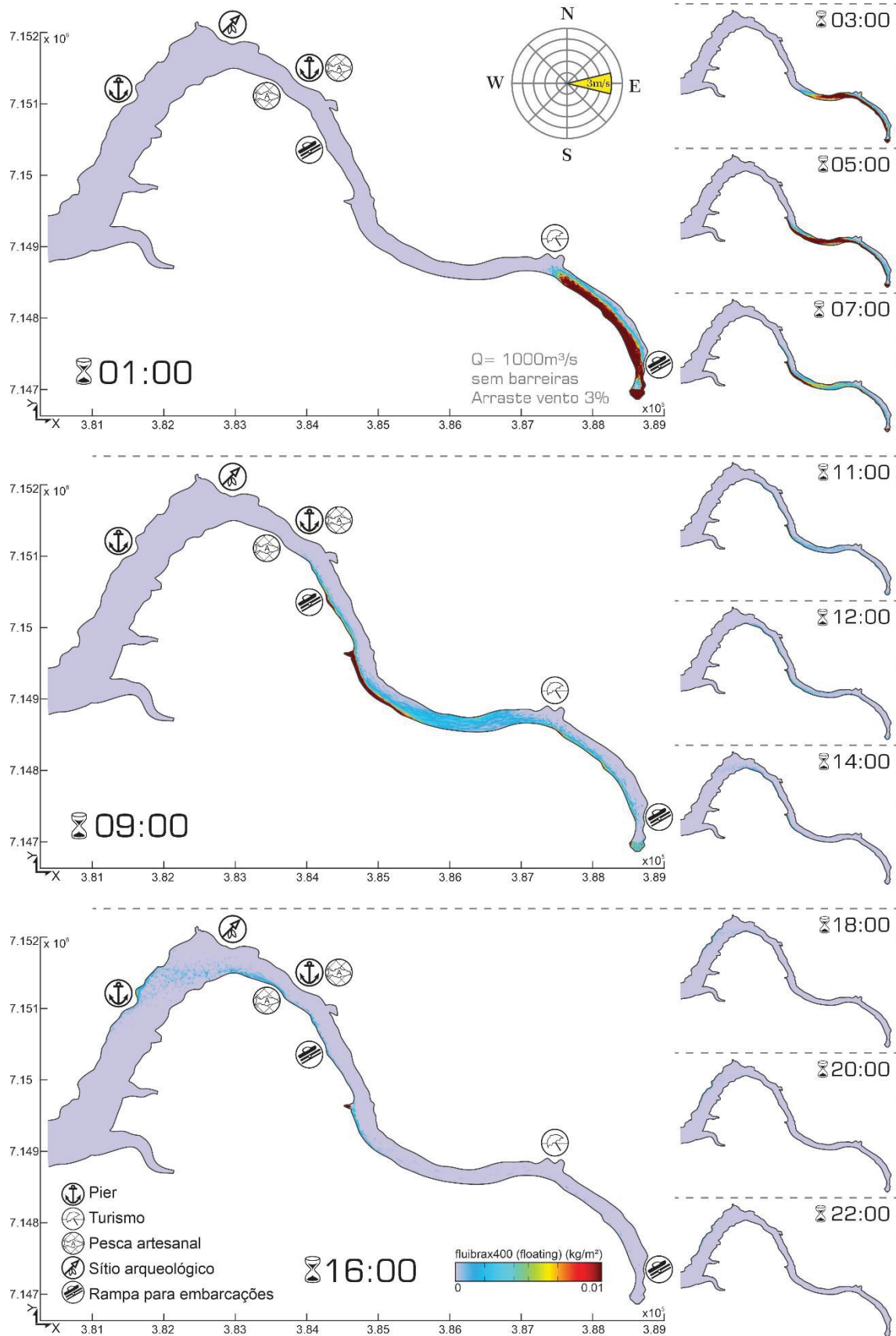


Figura 36 - Cenário B.11 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

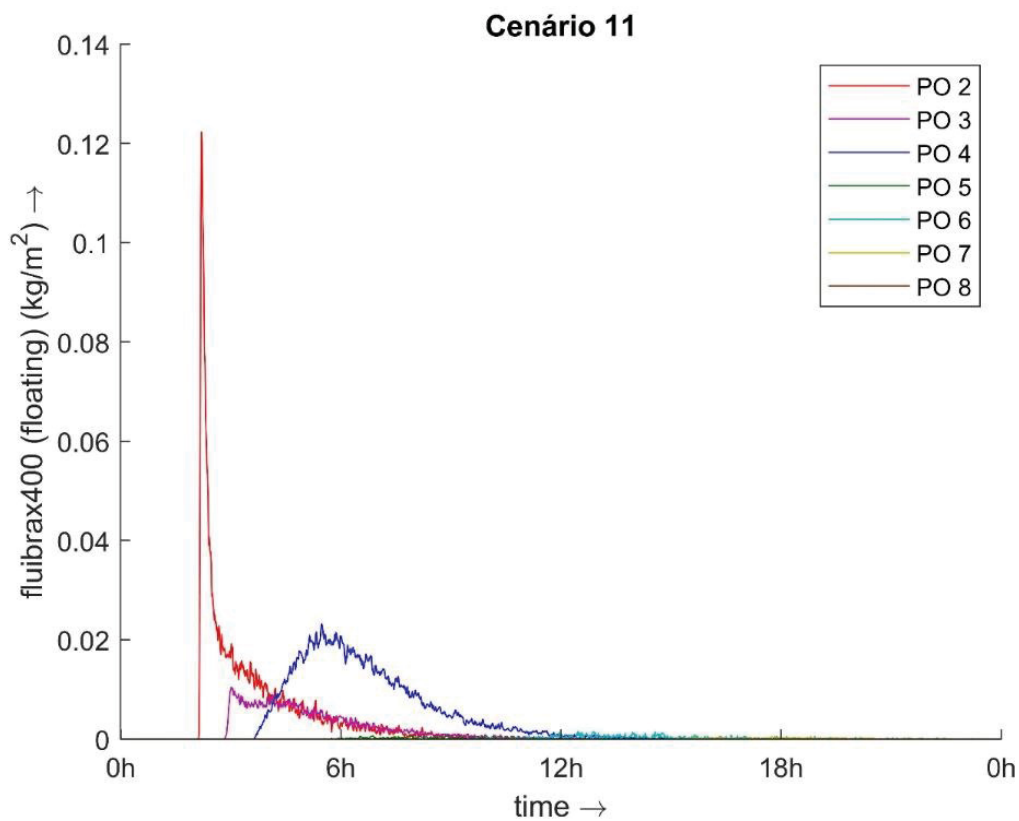


Figura 37 - Cenário B.11 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

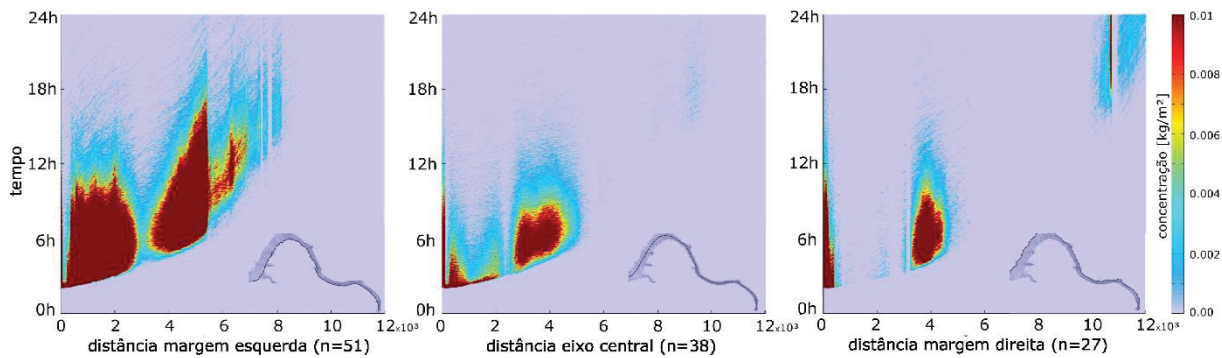


Figura 38 - Cenário C.12 - Vazão 1000m³/s, 2760kg de óleo Fluibrax 400

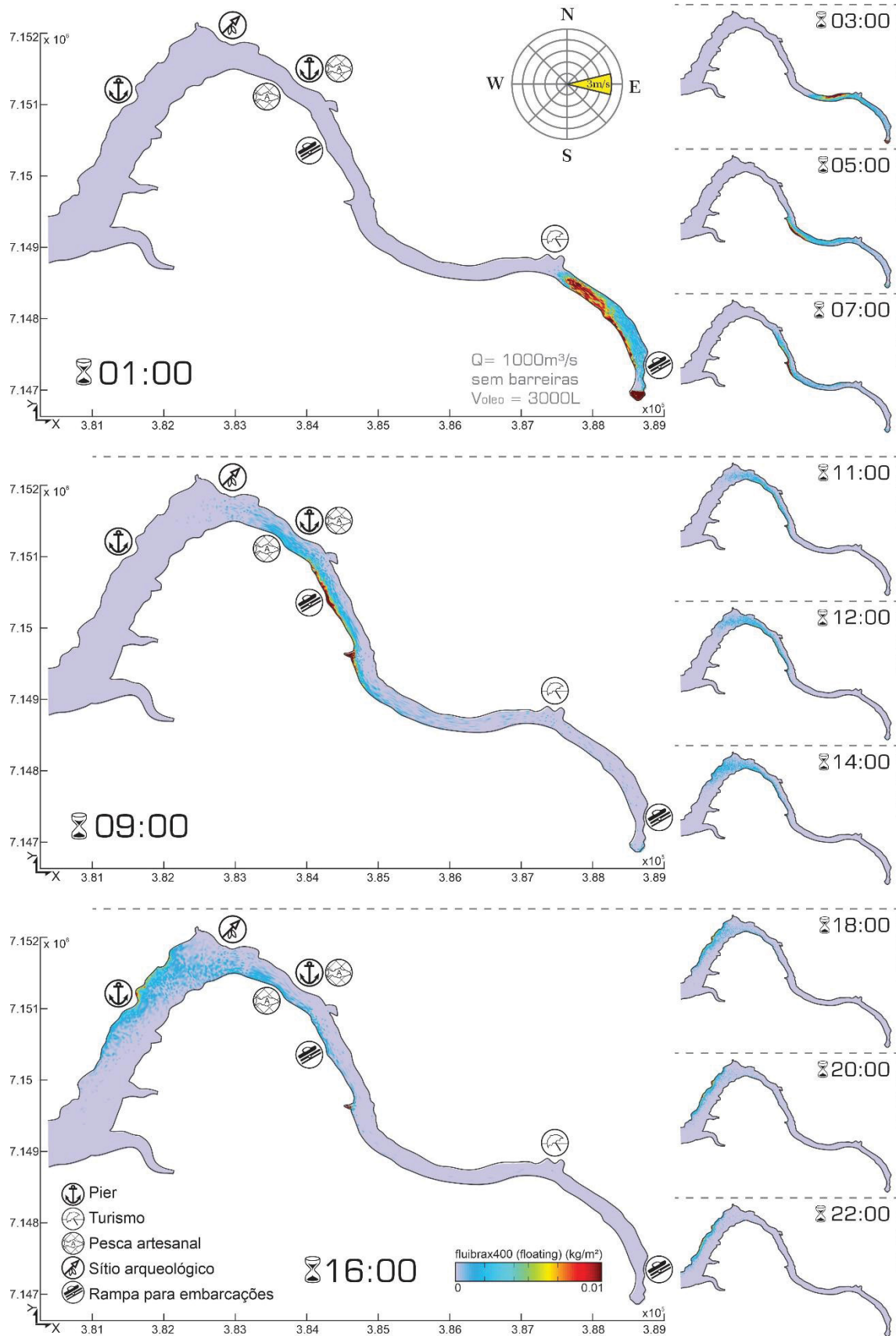


Figura 39 - Cenário C.12 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

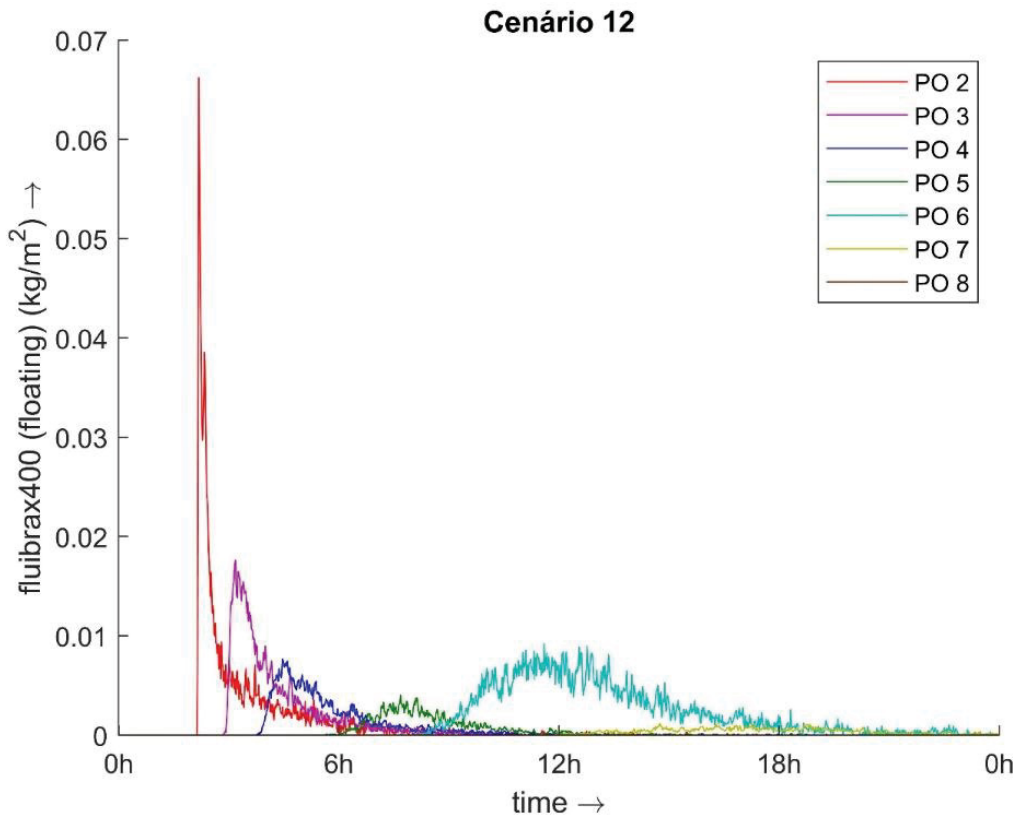


Figura 40 - Cenário C.12 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

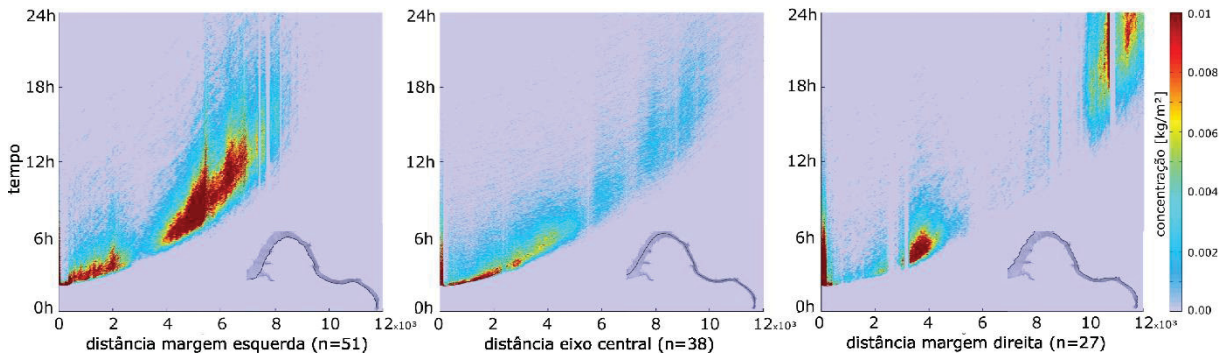


Figura 41 - Cenário C.12 - Status das partículas ao fim da simulação

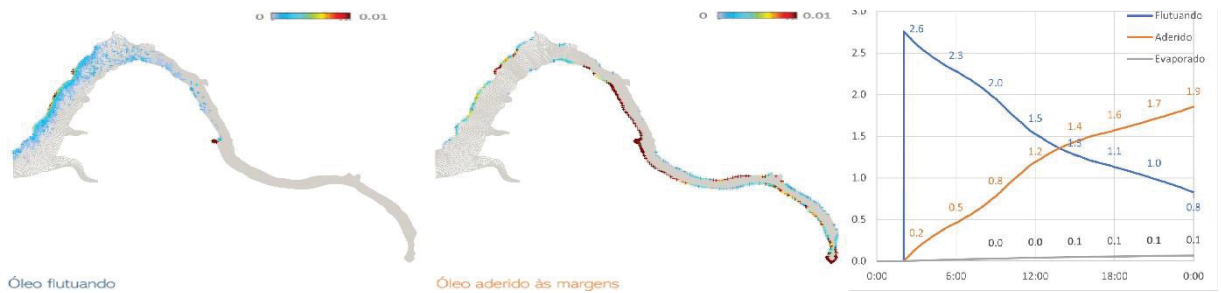




Figura 42 - Cenário C.13 - Vazão 1000m³/s, 7360kg de óleo Fluibrax 400

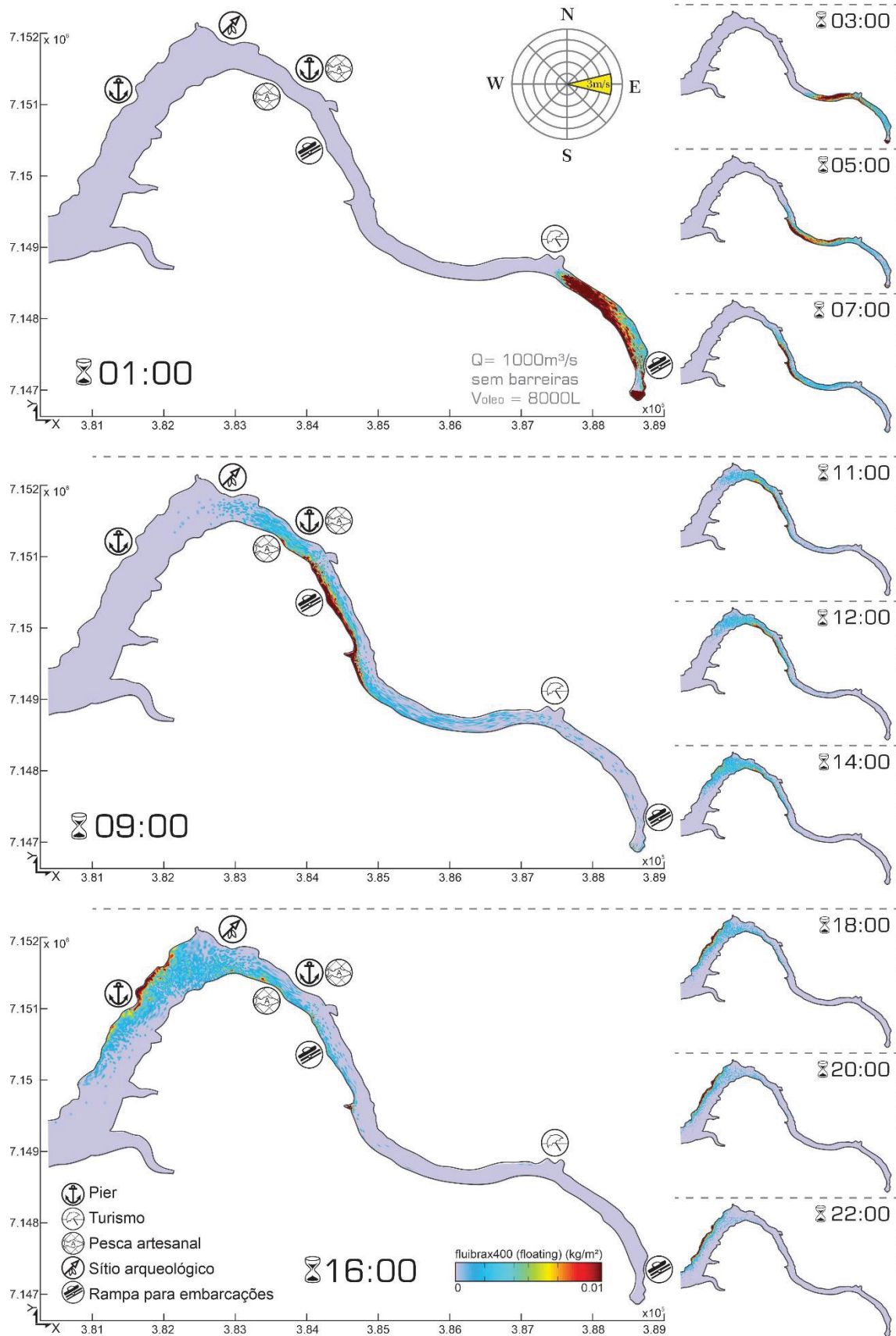




Figura 43 - Cenário C.13 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

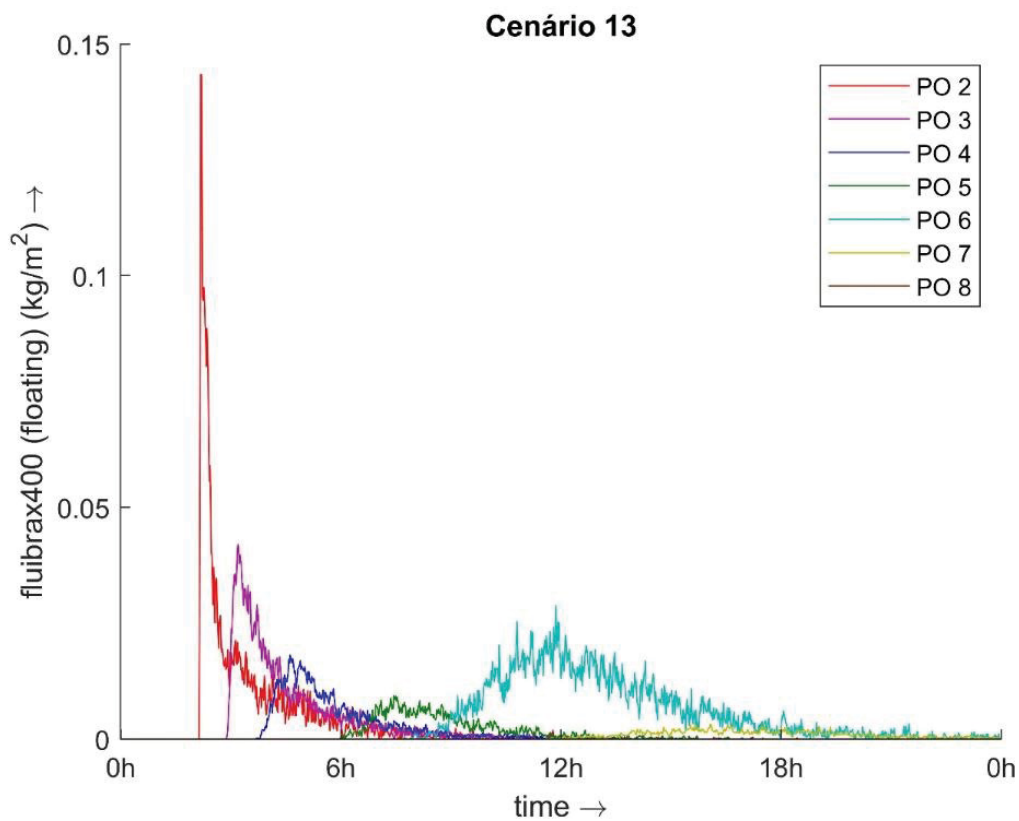


Figura 44 - Cenário C.13 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

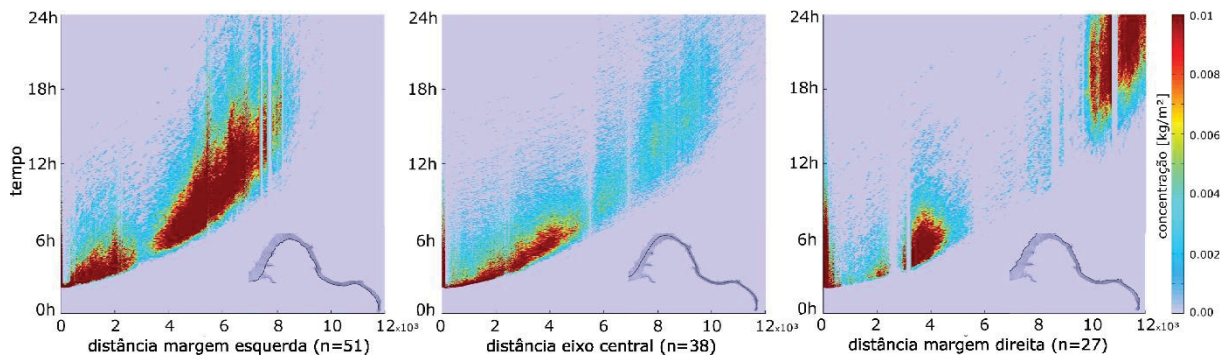


Figura 45 - Cenário D.14 - Vazão 1000m³/s, 21000kg de óleo HFO –  $D_h$  manual

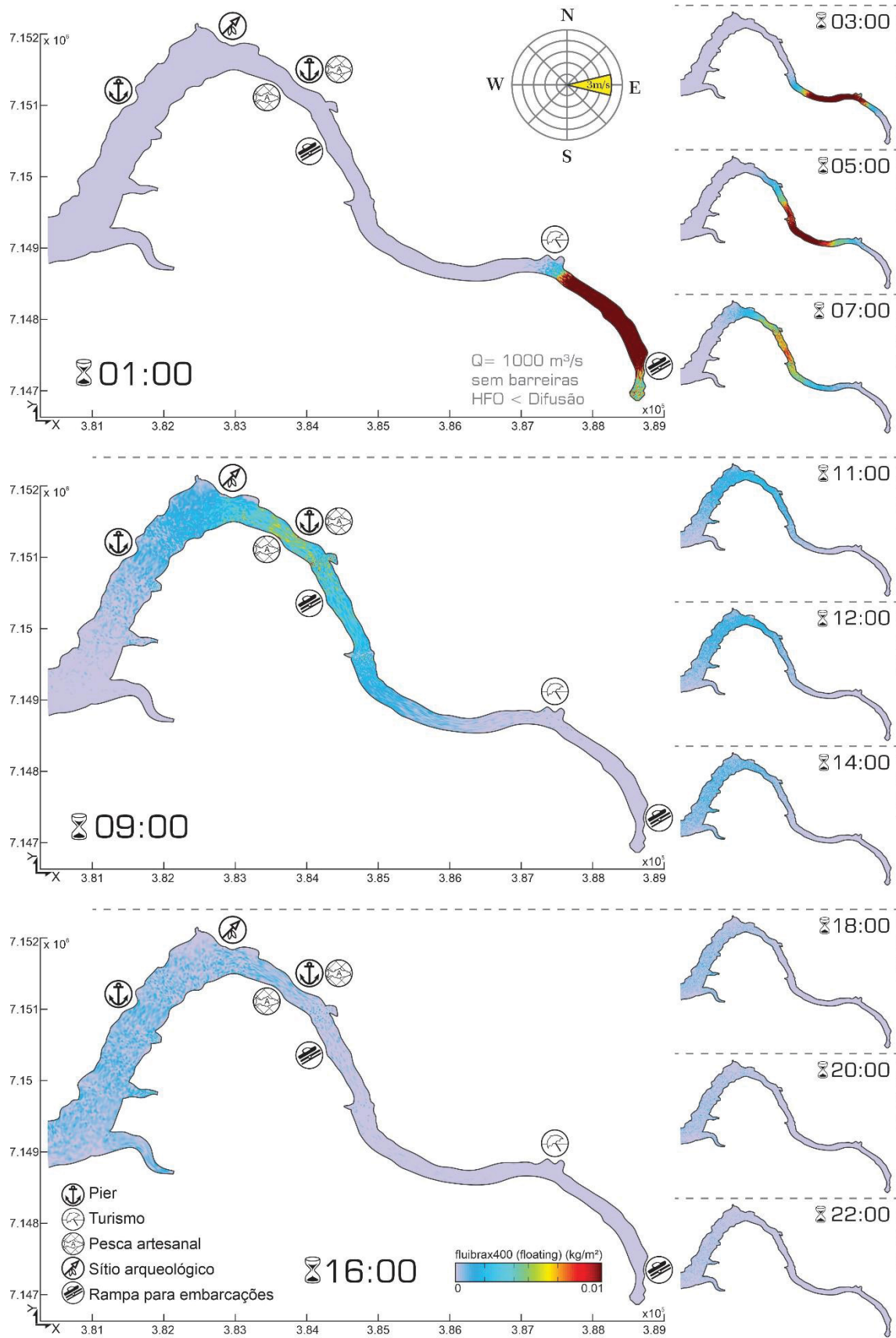


Figura 46 - Cenário D.14 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

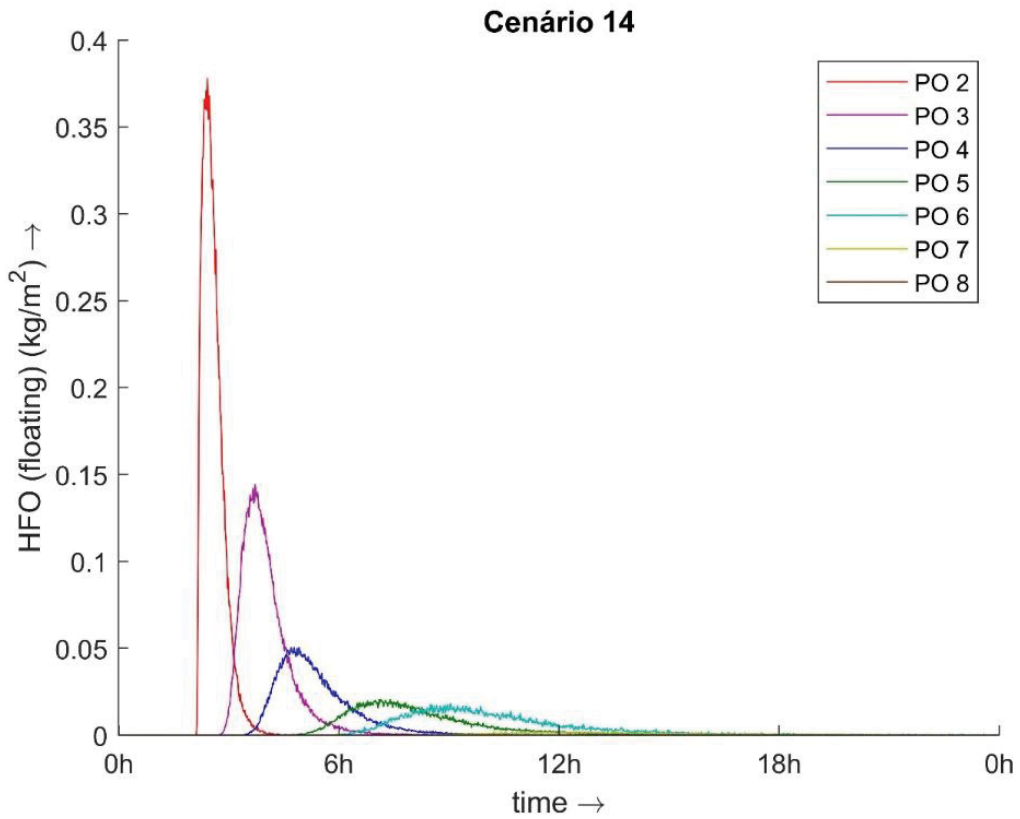


Figura 47 - Cenário D.14 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

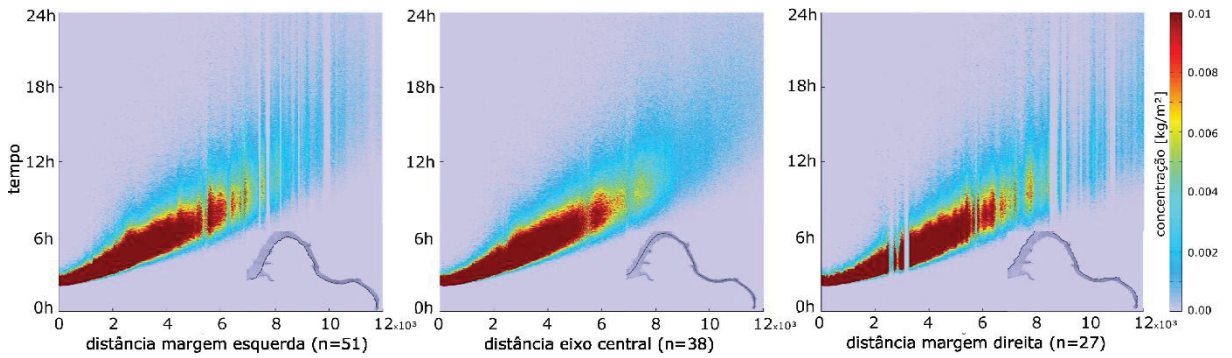


Figura 48 - Cenário D.14 - Status das partículas ao fim da simulação

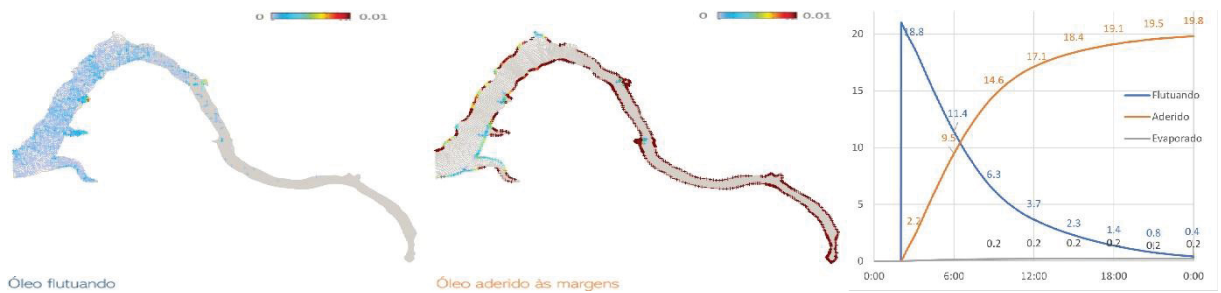


Figura 49 - Cenário D.15 - Vazão 1000m<sup>3</sup>/s, 21000kg de óleo Ekofisk -  $D_h$  manual

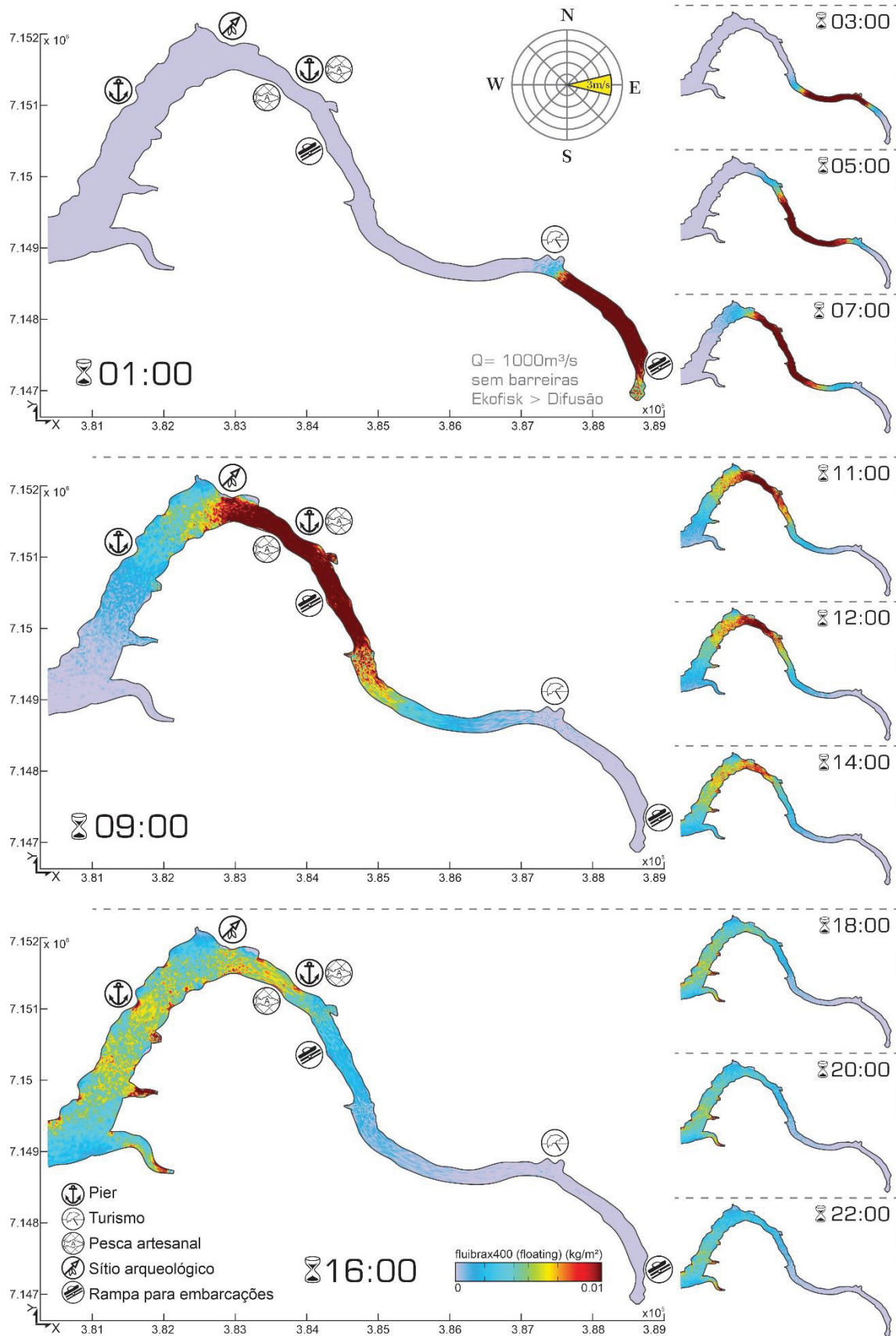




Figura 50 - Cenário D.15 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície

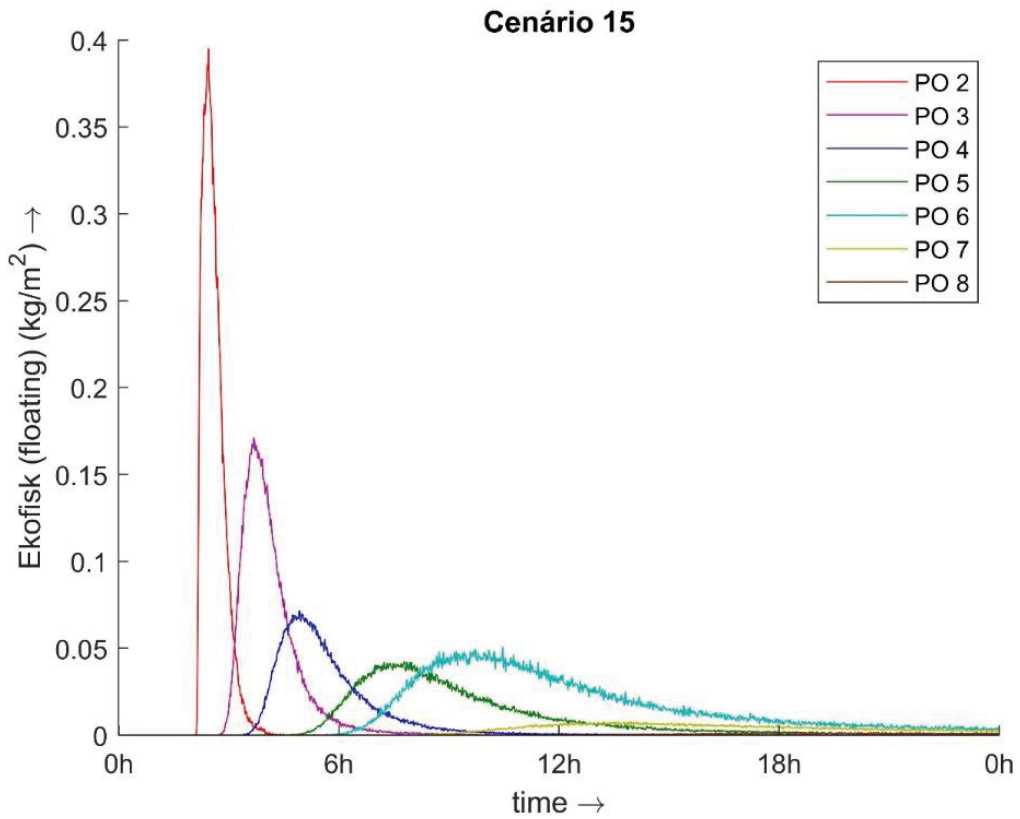


Figura 51 - Cenário D.15 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

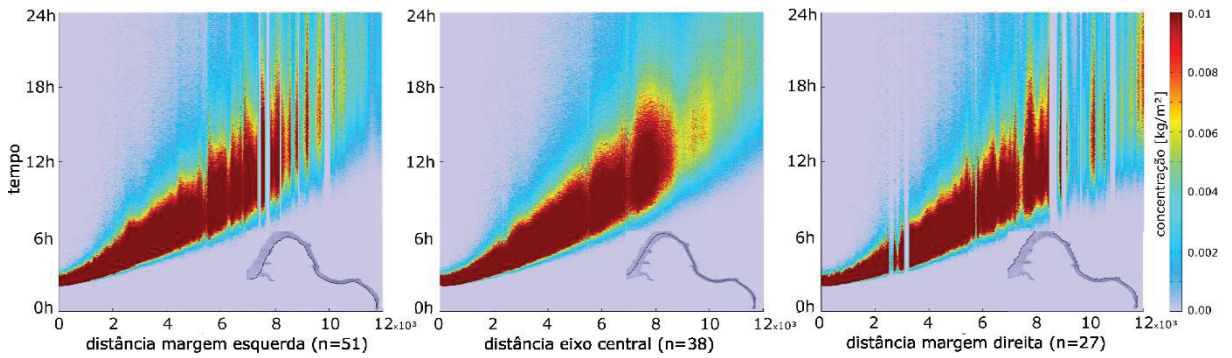


Figura 52 - Cenário D.15 - Status das partículas ao fim da simulação



Figura 53 - Cenário D.16 - Vazão 1000m<sup>3</sup>/s, 21000kg de óleo HFO – D<sub>h</sub> modelo

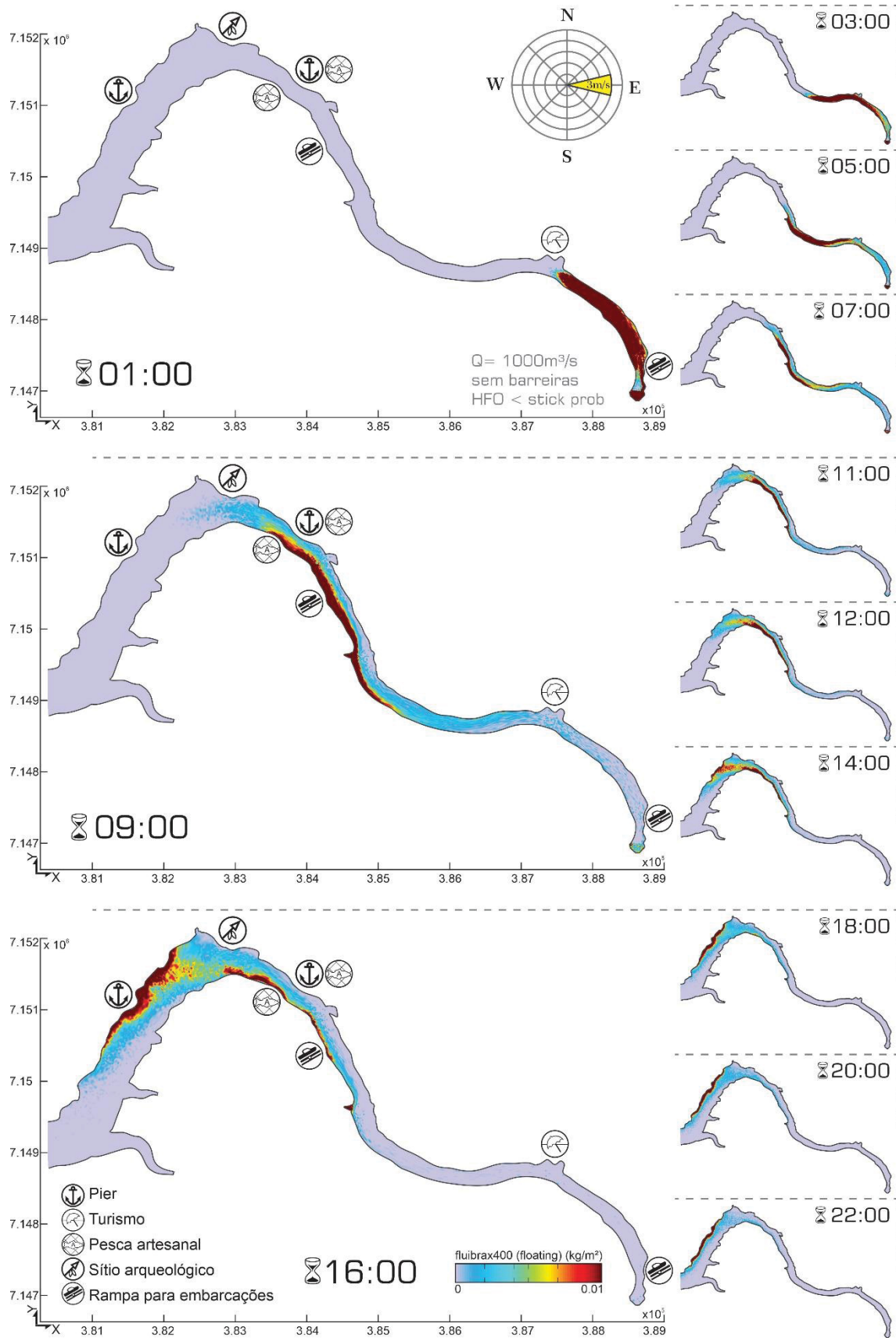




Figura 54 - Cenário D.16 - Concentração nos pontos de monitoramento – superfície

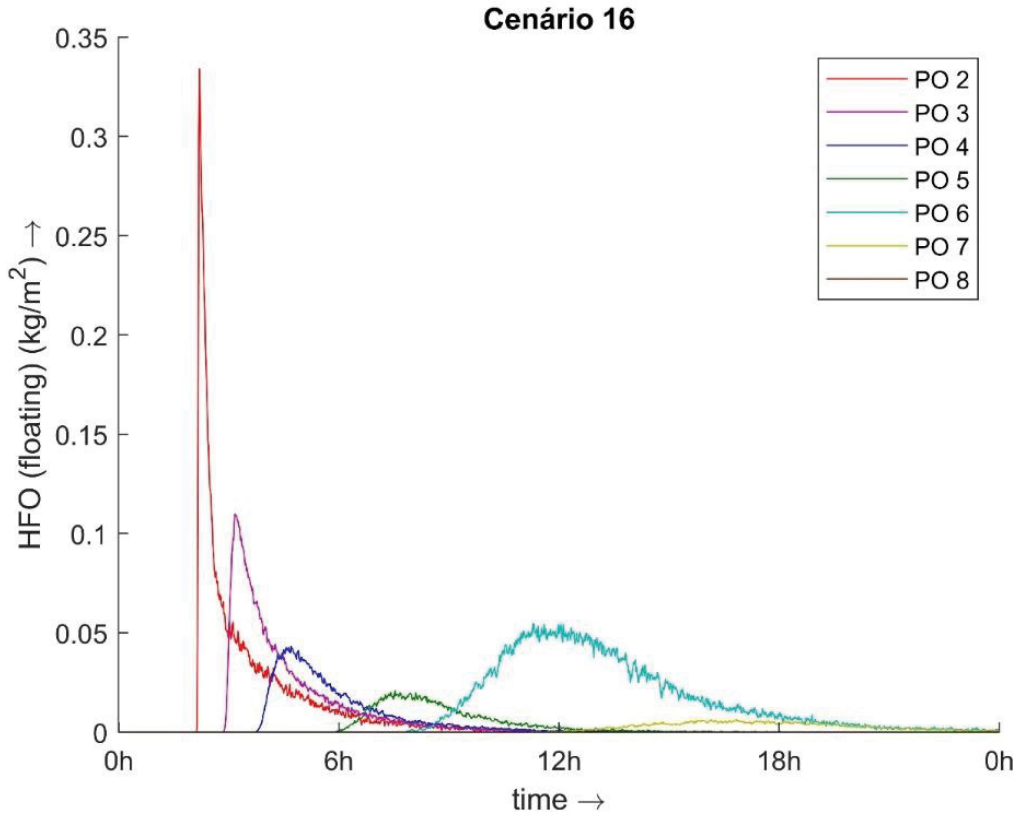


Figura 55 - Cenário D.16 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

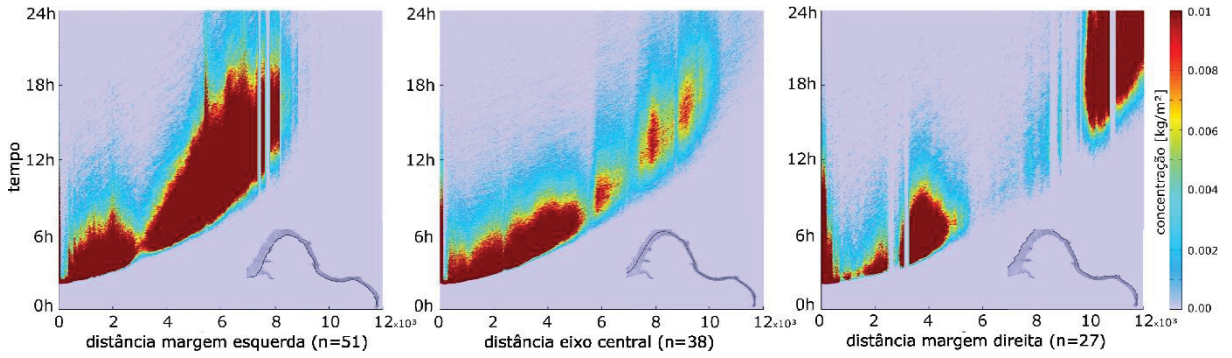


Figura 56 - Cenário D.17 - Vazão 1000m<sup>3</sup>/s, 21000kg de óleo Ekofisk – D<sub>h</sub> modelo

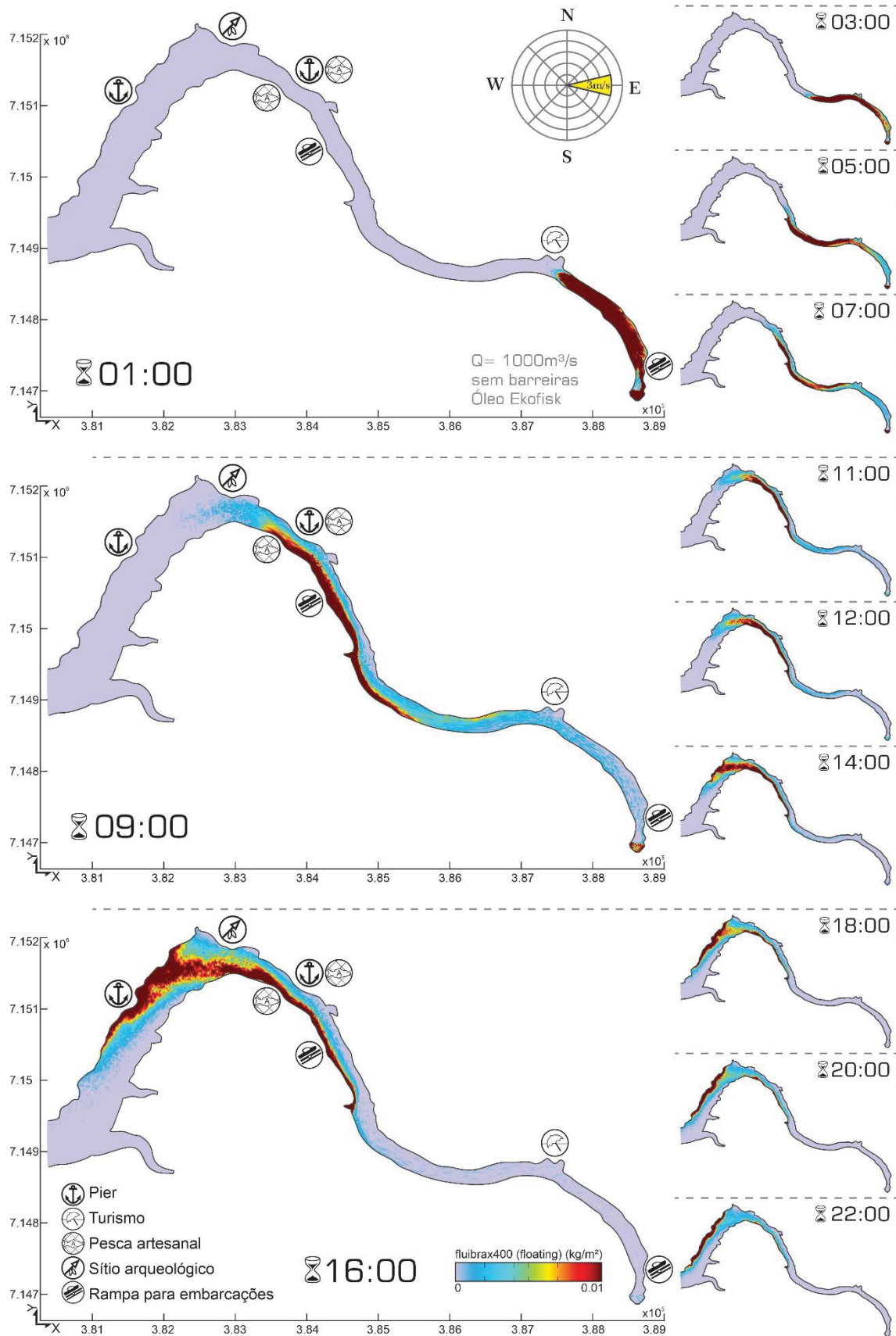


Figura 57 - Cenário D.17 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

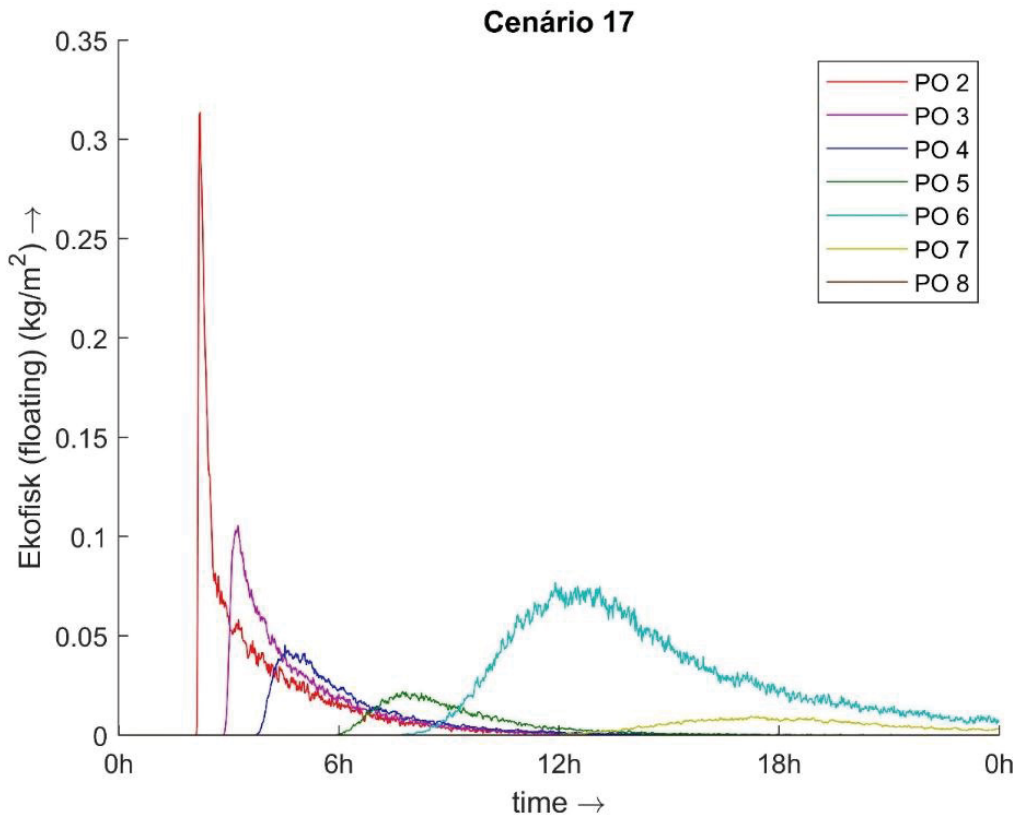


Figura 58 - Cenário D.17 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

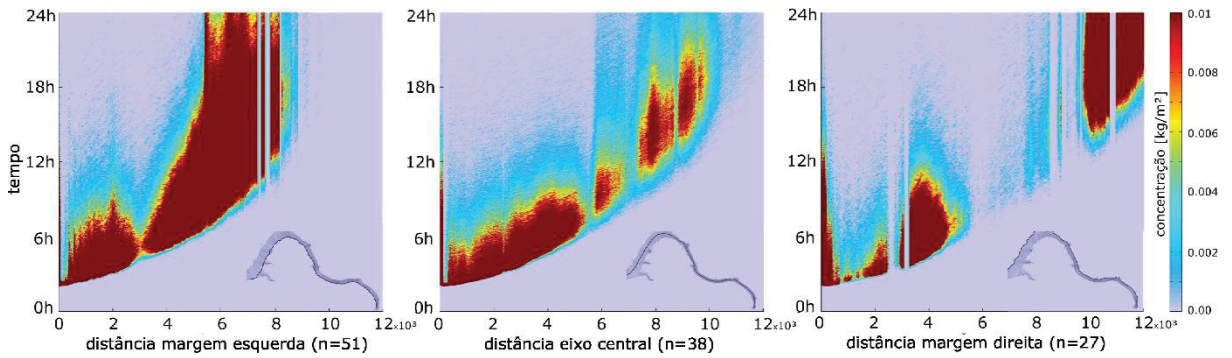


Figura 59 - Cenário D.17 - Status das partículas ao fim da simulação



Figura 60 - Cenário E.18 - 2 barreiras em B e C, resposta lenta

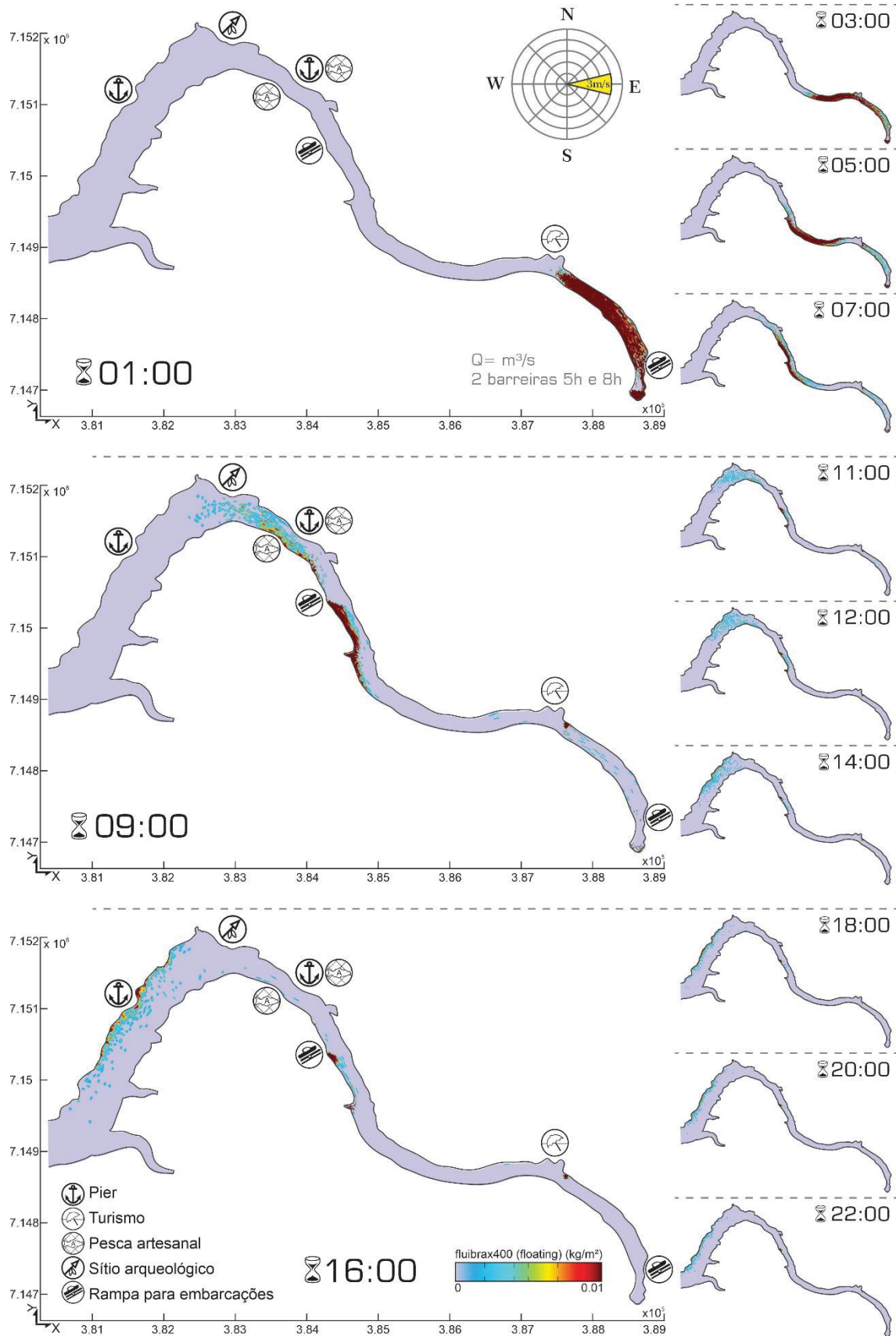


Figura 61 - Cenário E.18 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

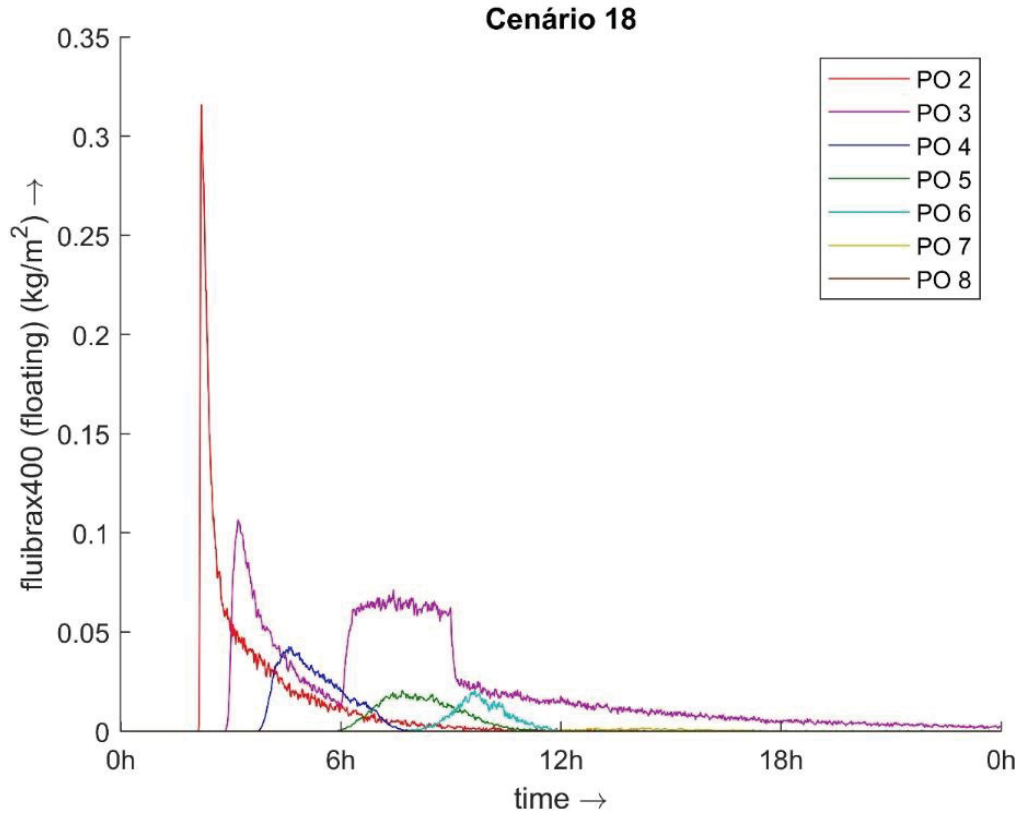


Figura 62 - Cenário E.18 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

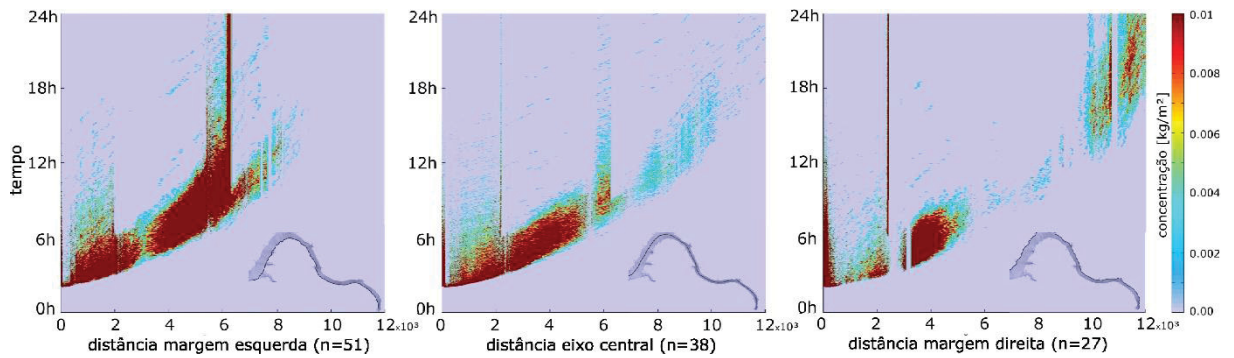


Figura 63 - Cenário E.18 - Status das partículas ao fim da simulação





Figura 64 - Cenário E.19 - 2 barreiras em B e C, resposta rápida

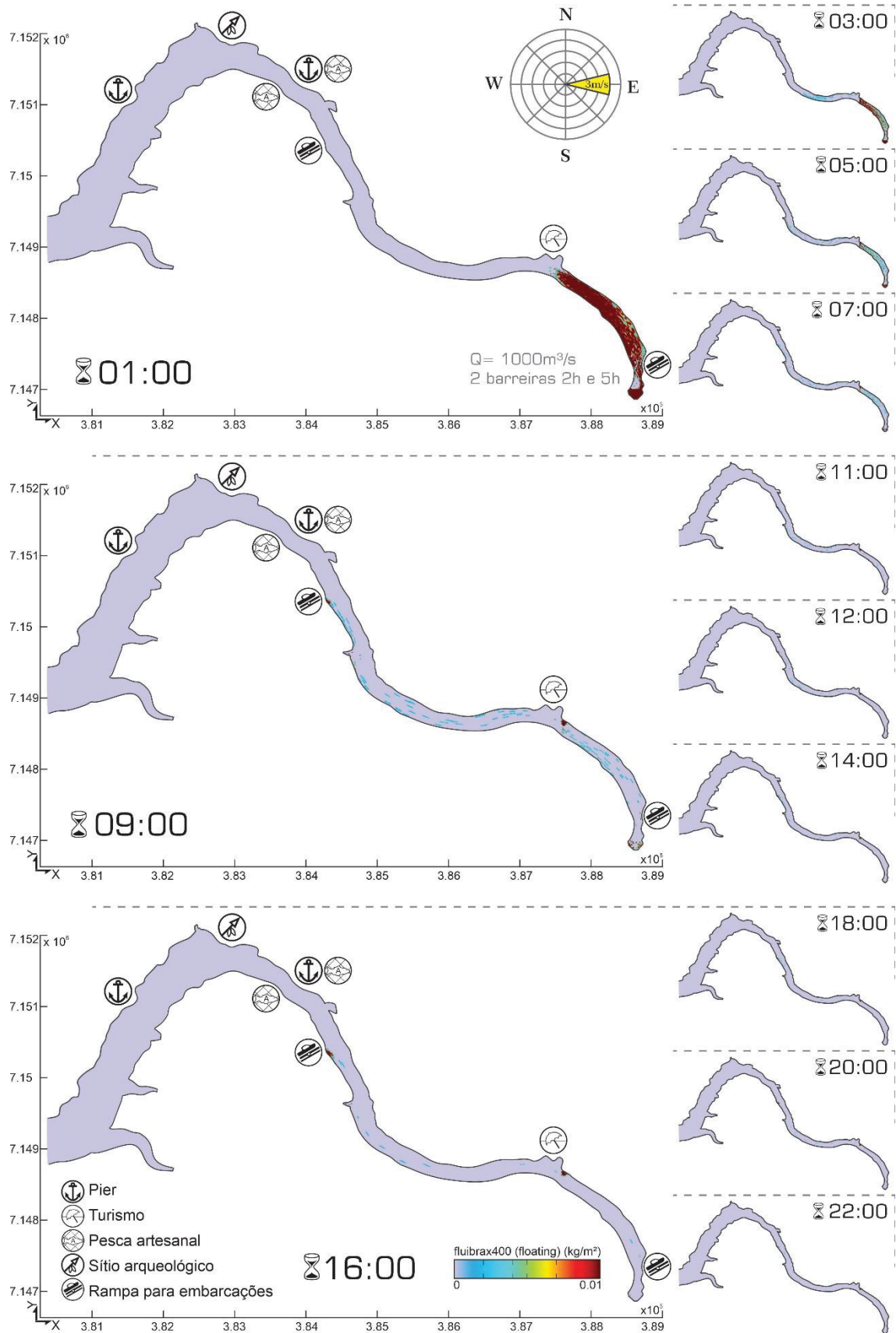




Figura 65 - Cenário E.19 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

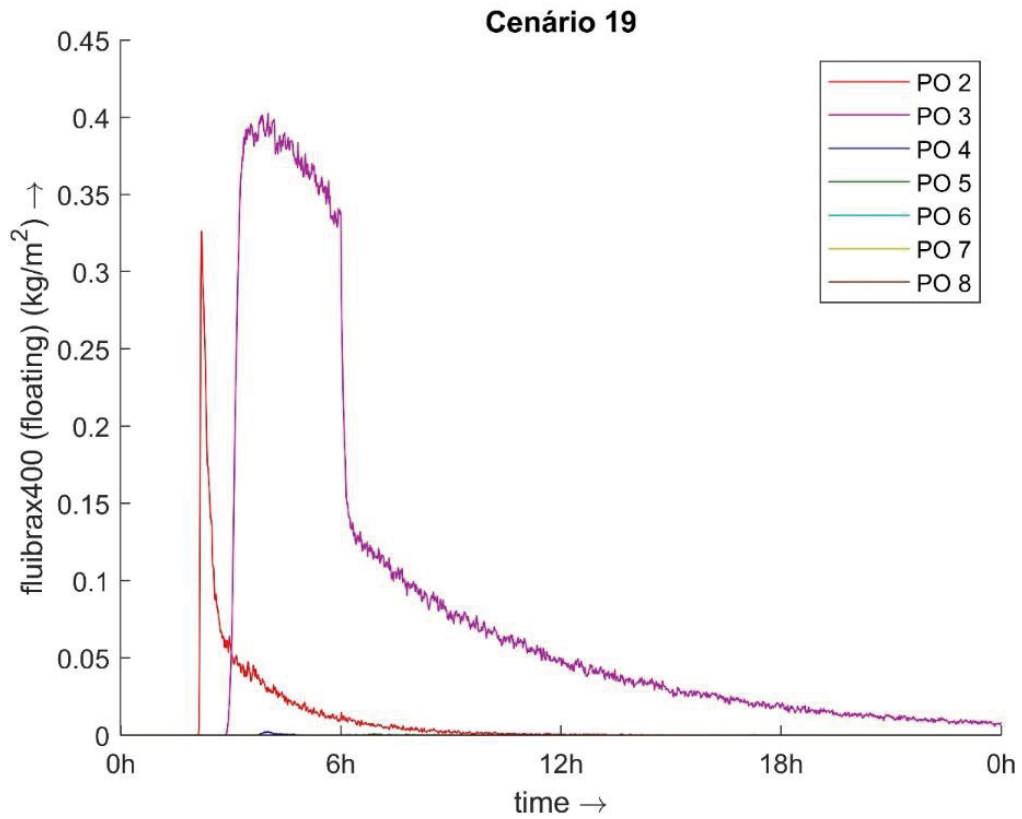


Figura 66 - Cenário E.19 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

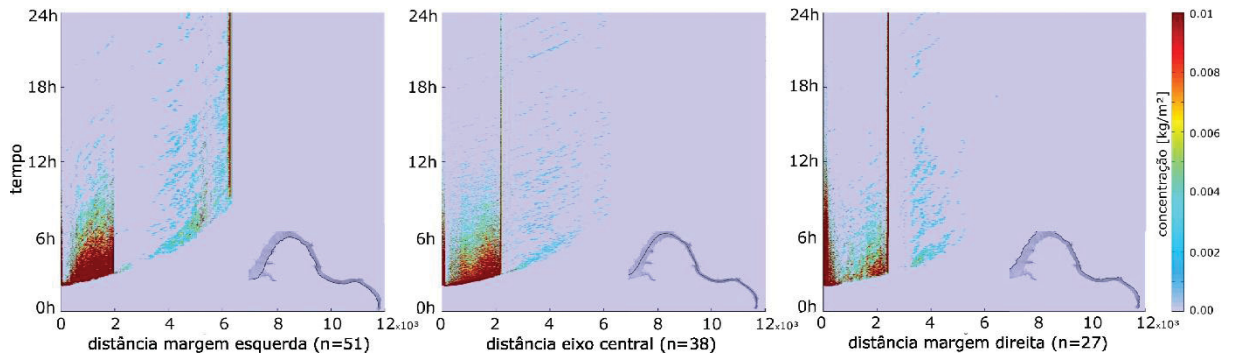


Figura 67 - Cenário E.19 - Status das partículas ao fim da simulação



Figura 68 - Cenário E.21 - Vento 3m/s < S-N, 2 barreiras em B e C, resposta rápida

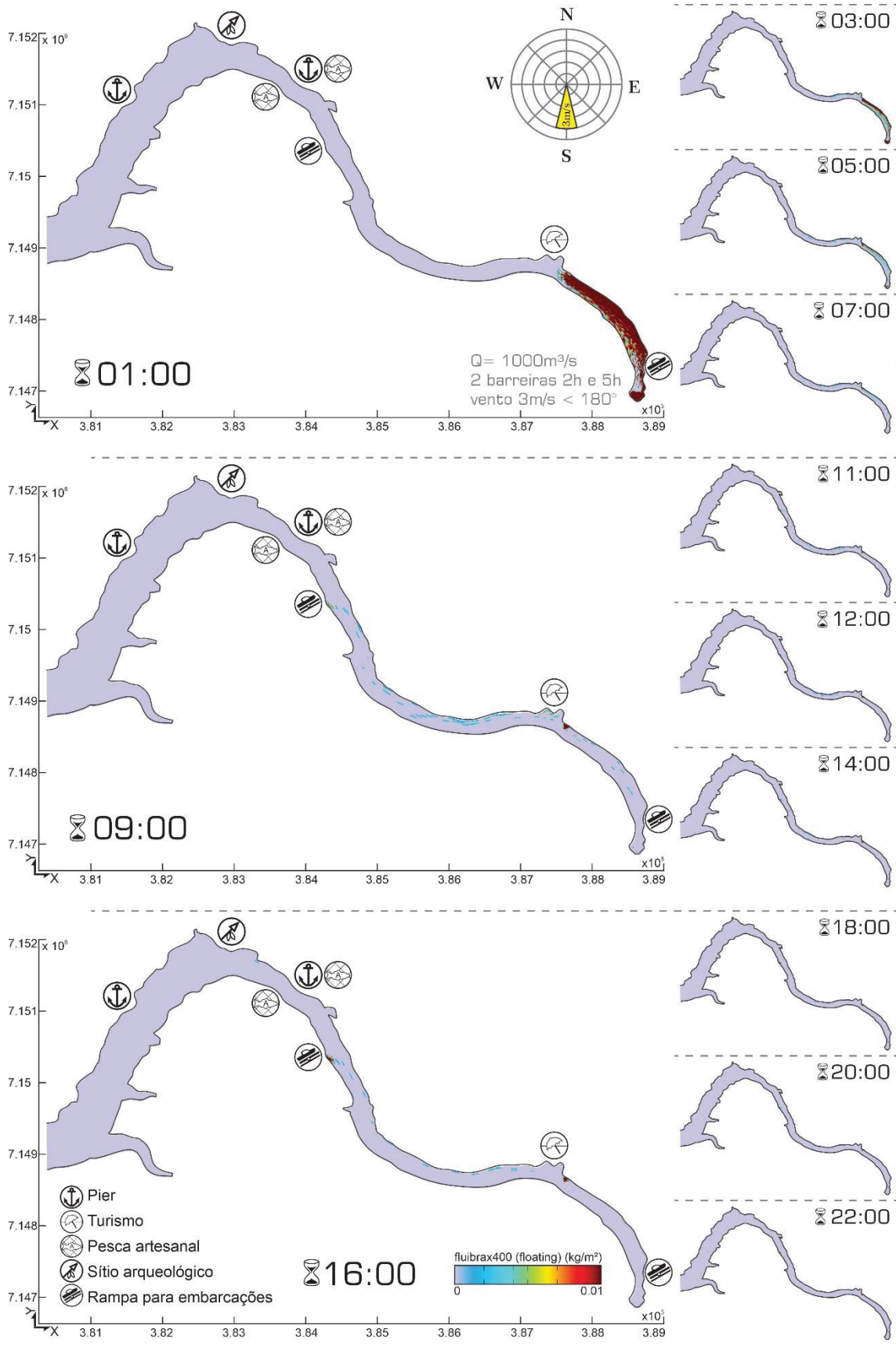


Figura 69 - Cenário E.21 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

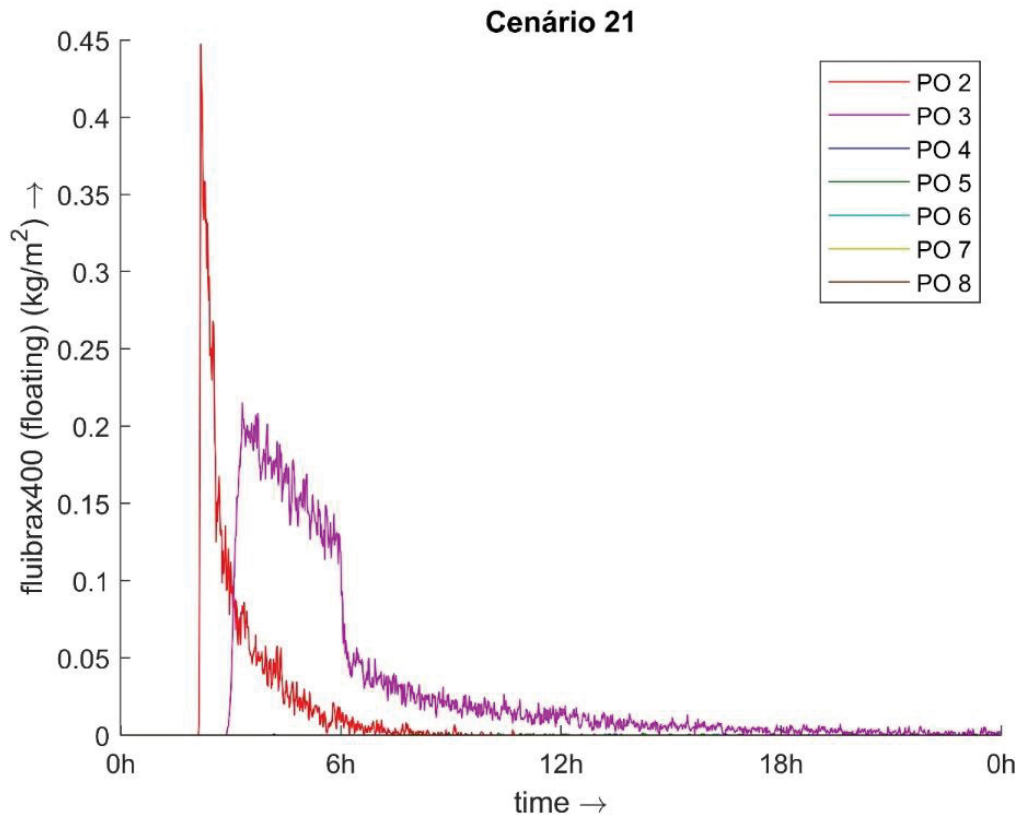


Figura 70 - Cenário E.21 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

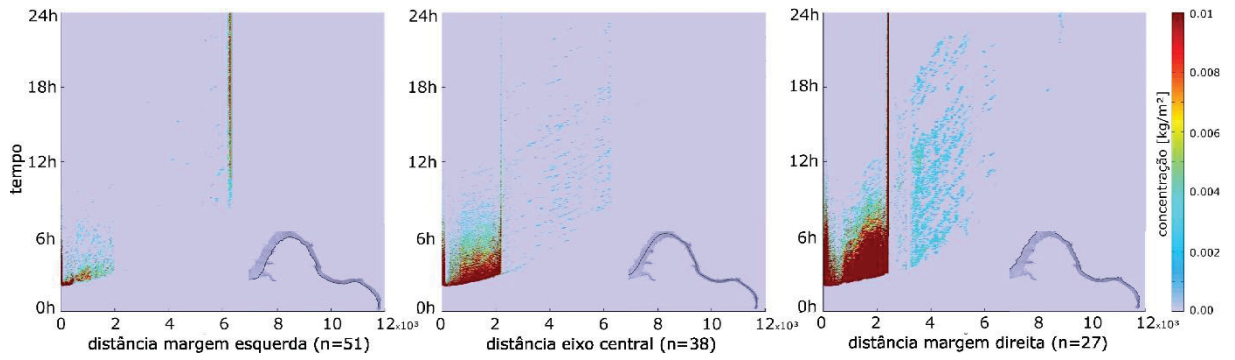


Figura 71 - Cenário E.22 - Vento 3m/s W-E, 2 barreiras em B e C, resposta rápida

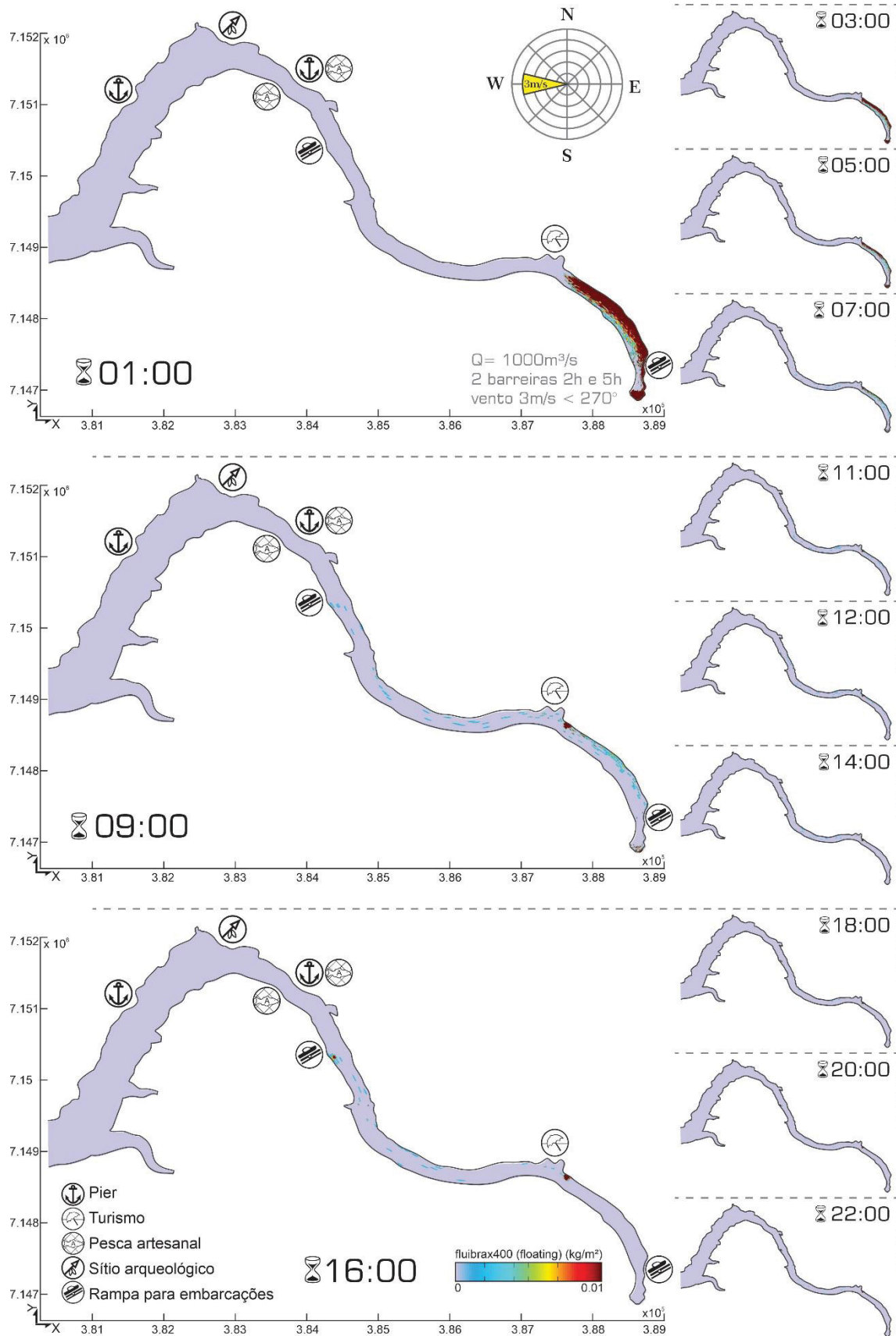


Figura 72 - Cenário E.22 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

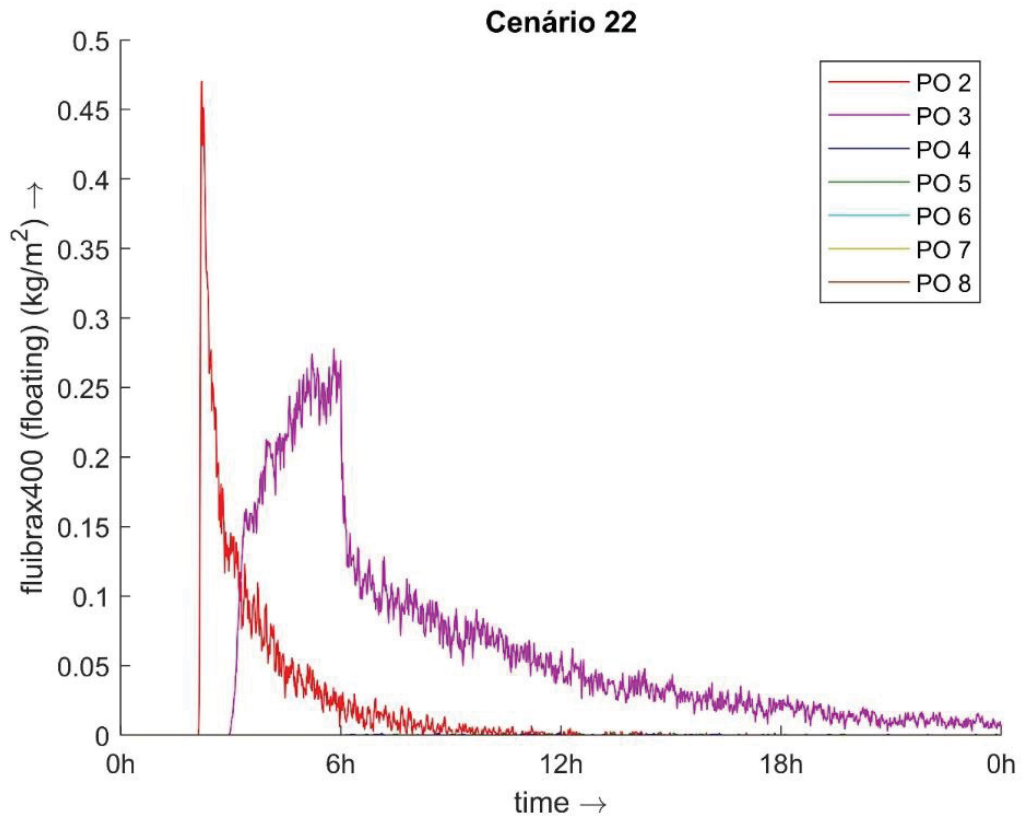


Figura 73 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

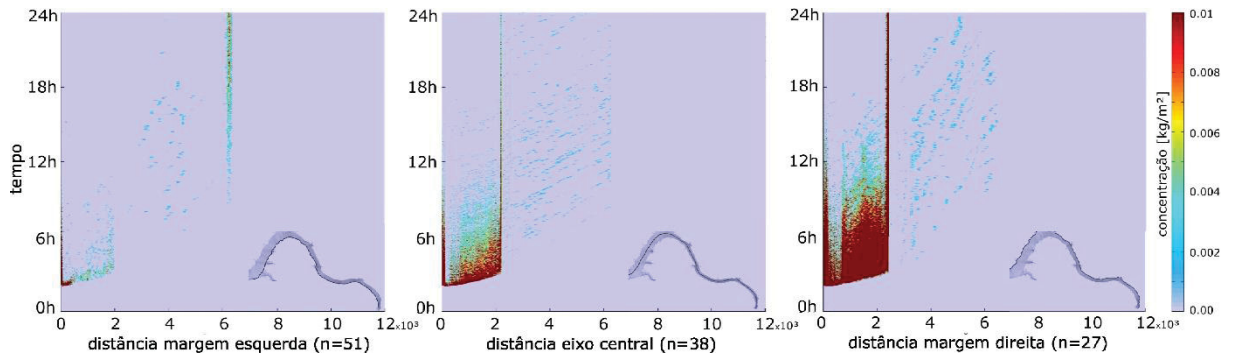




Figura 74 - Cenário E.23 - Vento 3m/s < N-S, 2 barreiras em B e C, resposta rápida

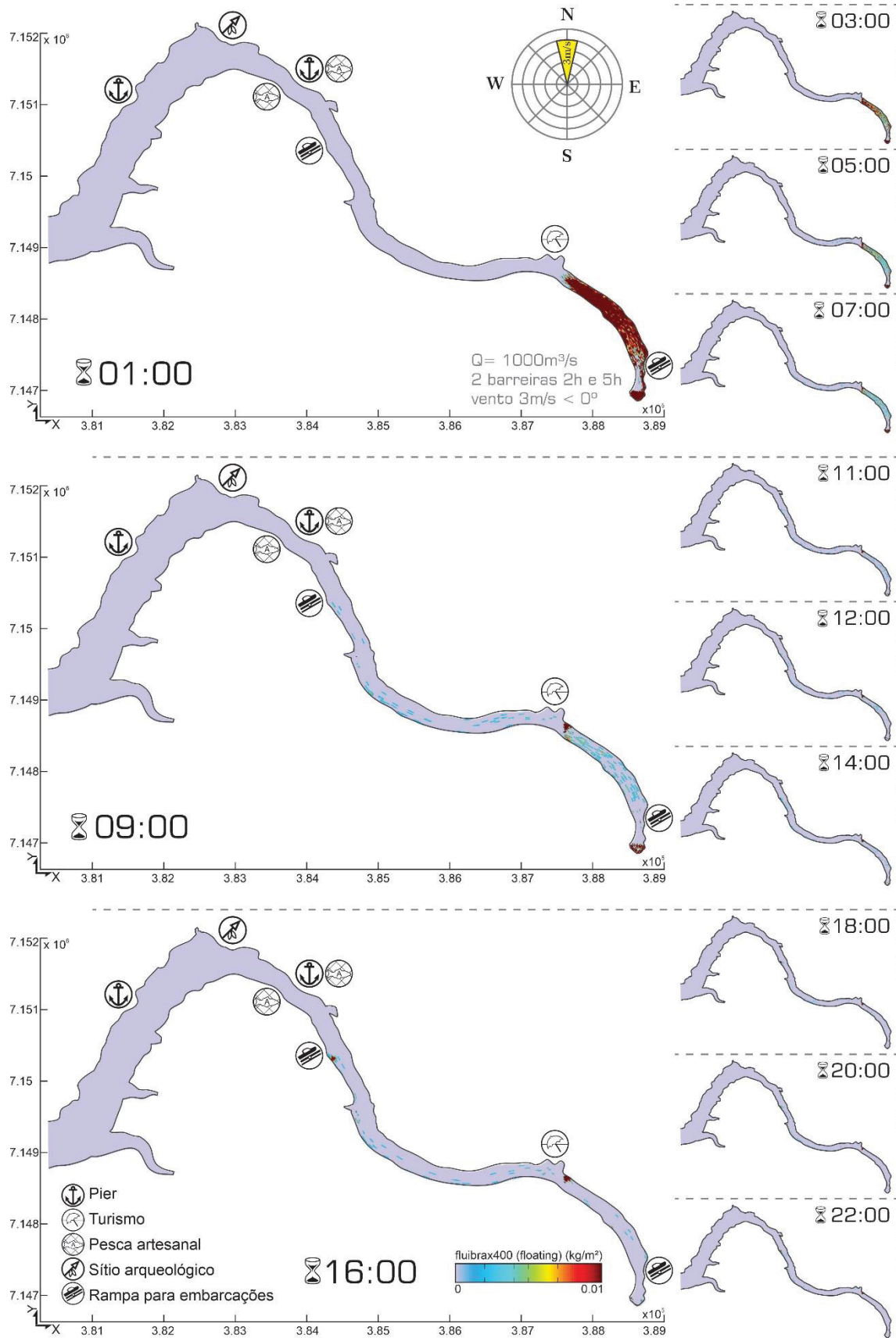




Figura 75 - Cenário E.23 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

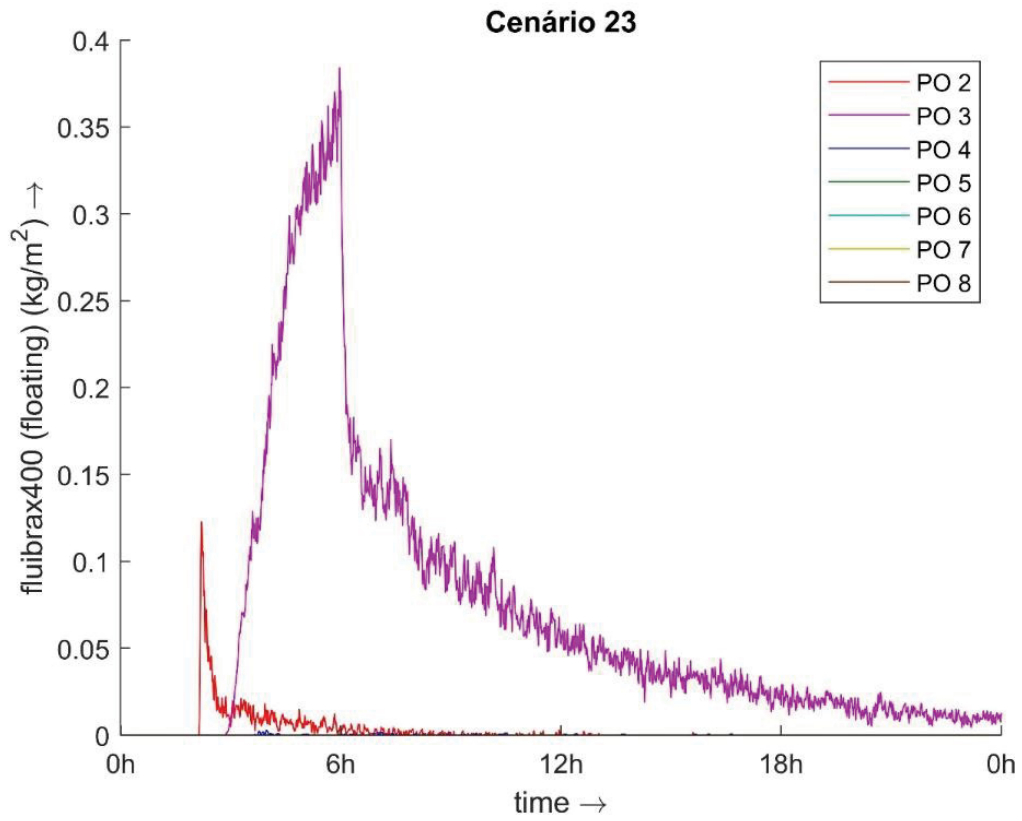


Figura 76 - Cenário E.23 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

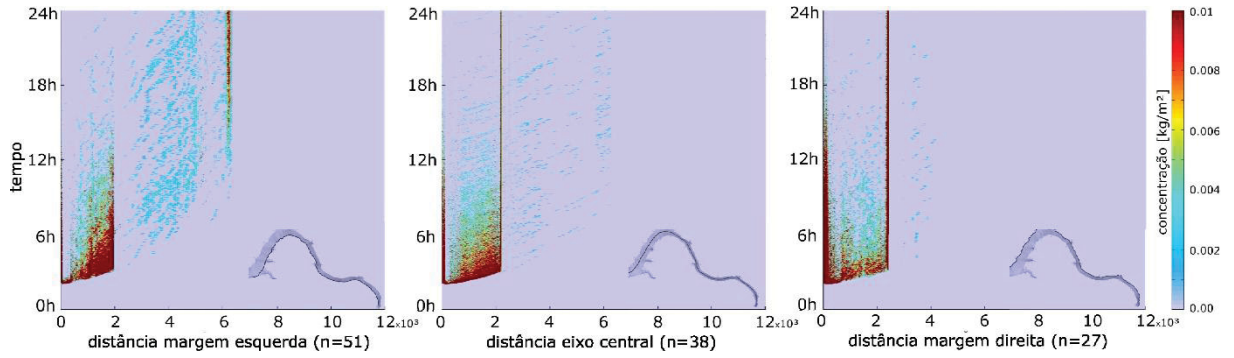


Figura 77 - Cenário E.24 - Vazão reduzida a 100m³/s, 2 barreiras em B e C, resposta lenta

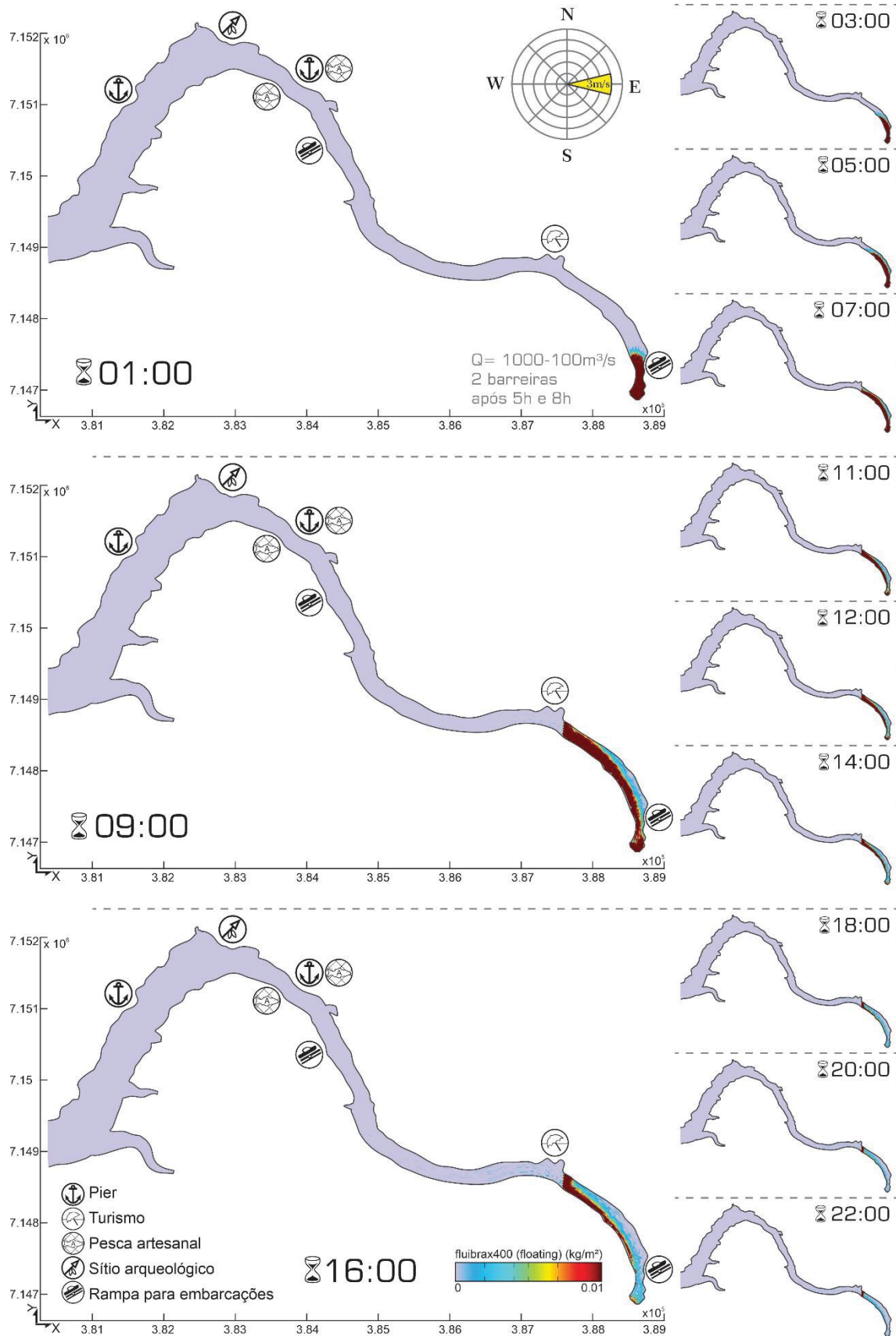


Figura 78 - Cenário E.24 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

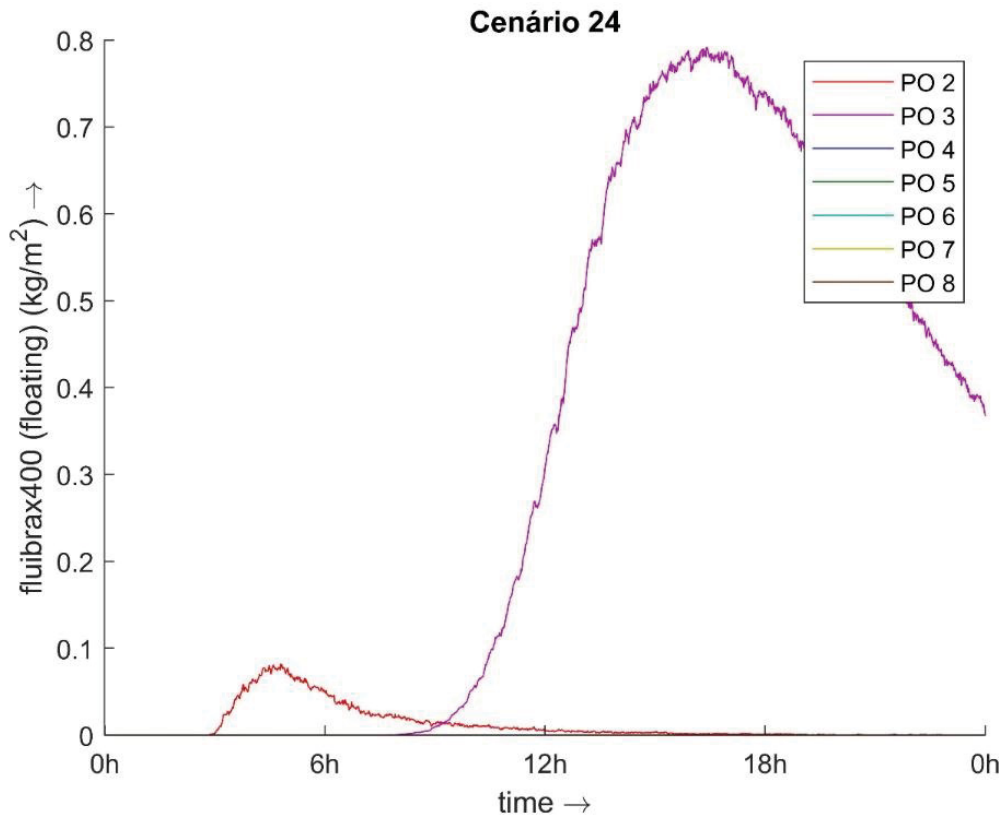


Figura 79 - Cenário E.24 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

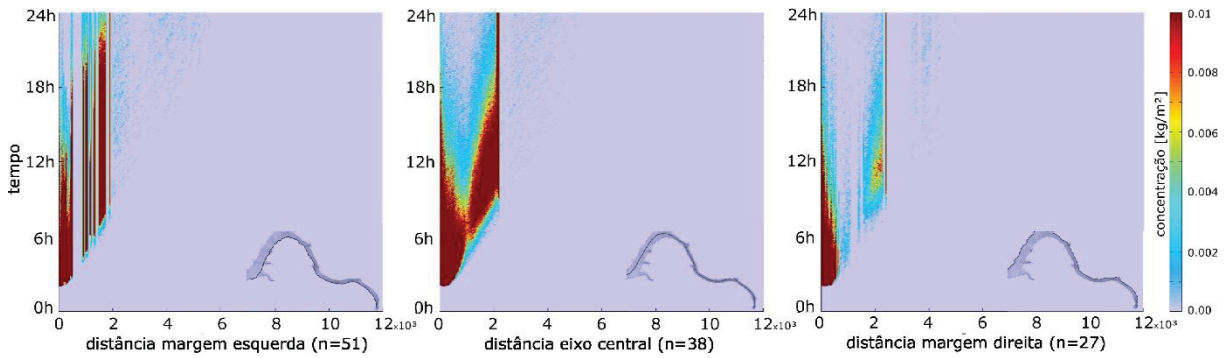


Figura 80 - Cenário E.24 - Status das partículas ao fim da simulação



Figura 81 - Cenário E.25 - Vazão reduzida a 100m³/s, 2 barreiras em B e C, resposta rápida

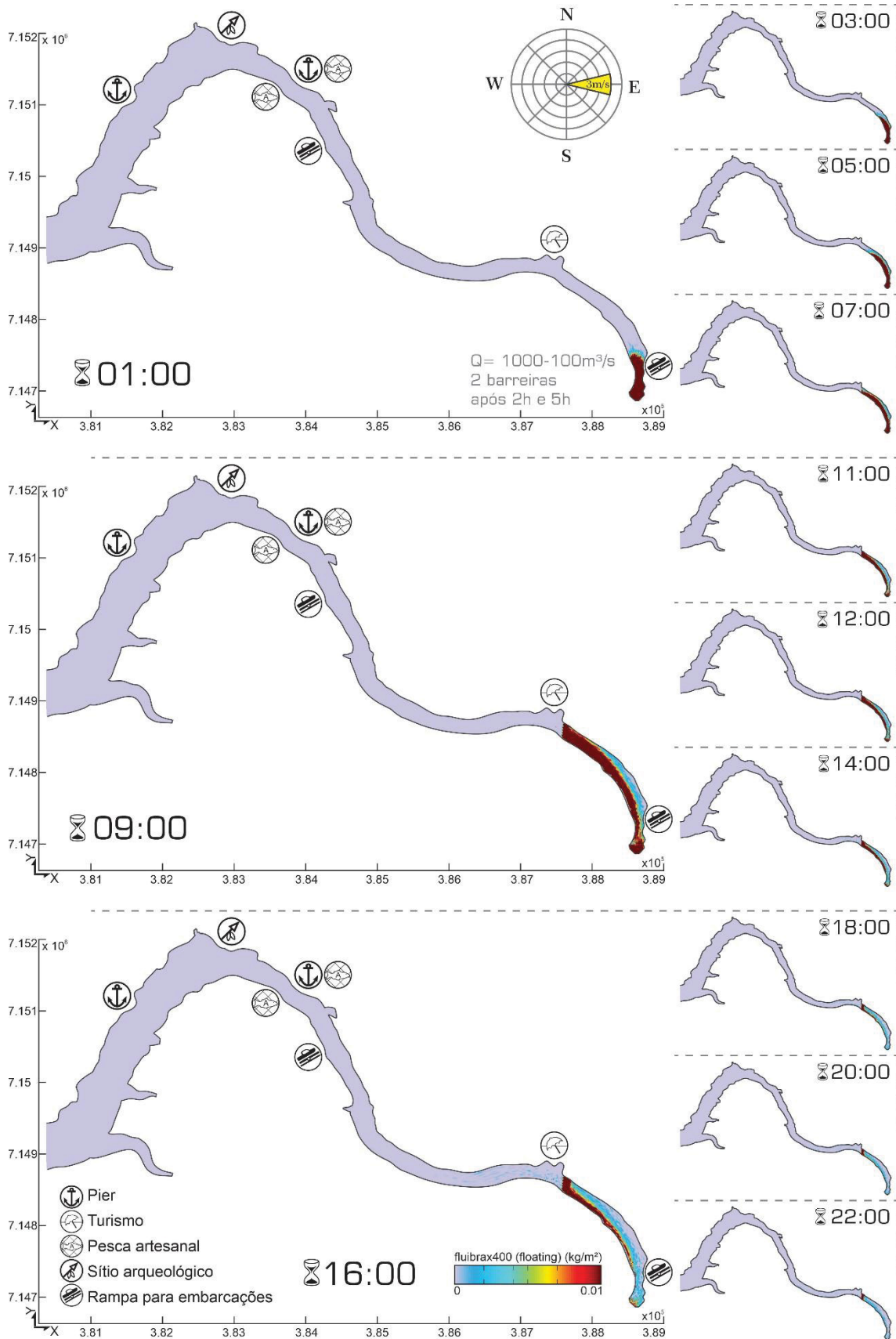


Figura 82 - Cenário E.25 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

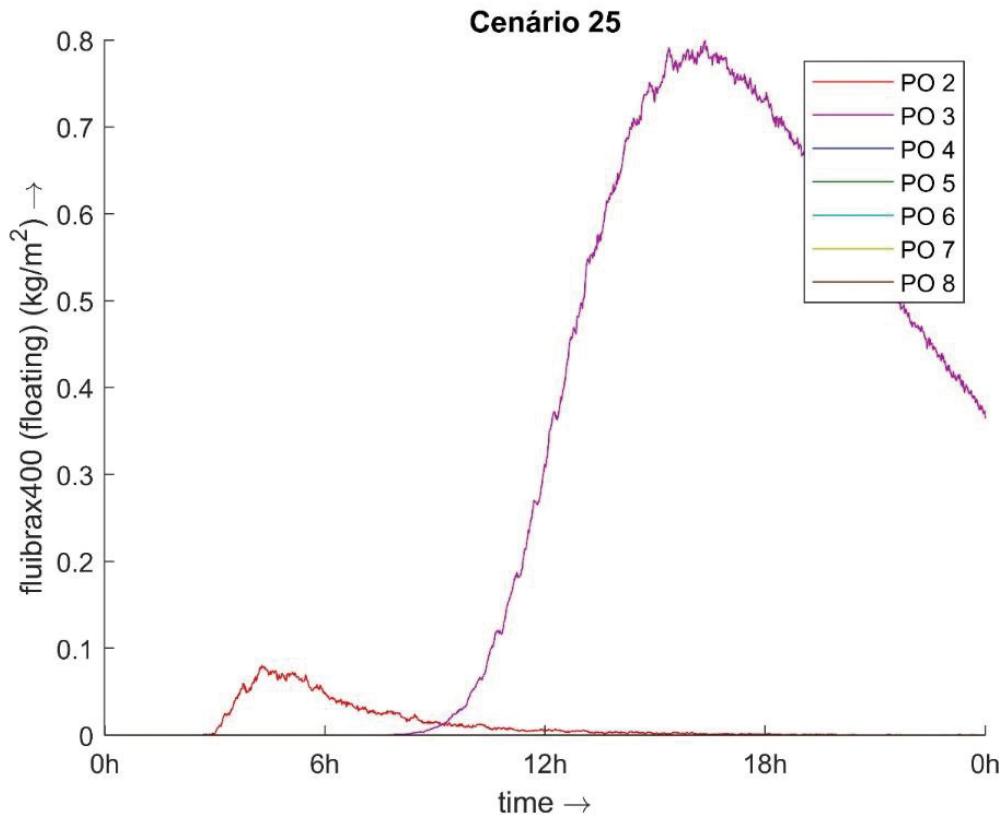


Figura 83 - Cenário E.25 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

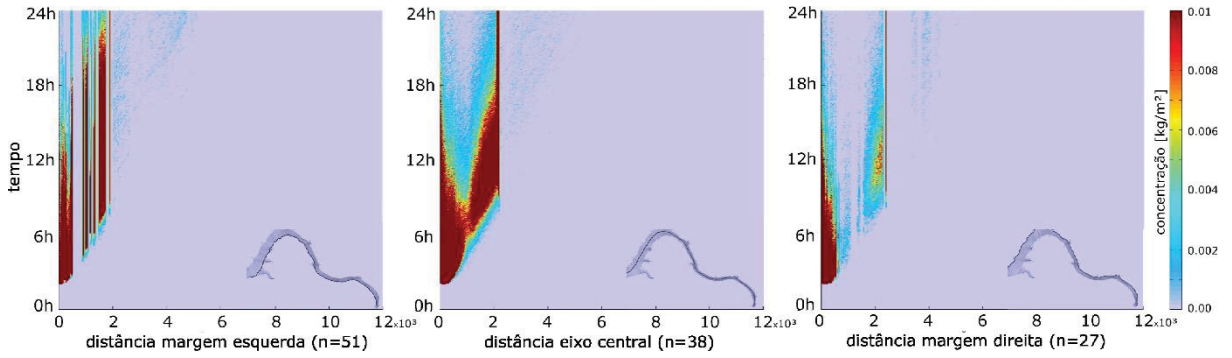




Figura 84 - Cenário E.26 - Vazão reduzida a 100m<sup>3</sup>/s, 1 barreira em A, resposta imediata

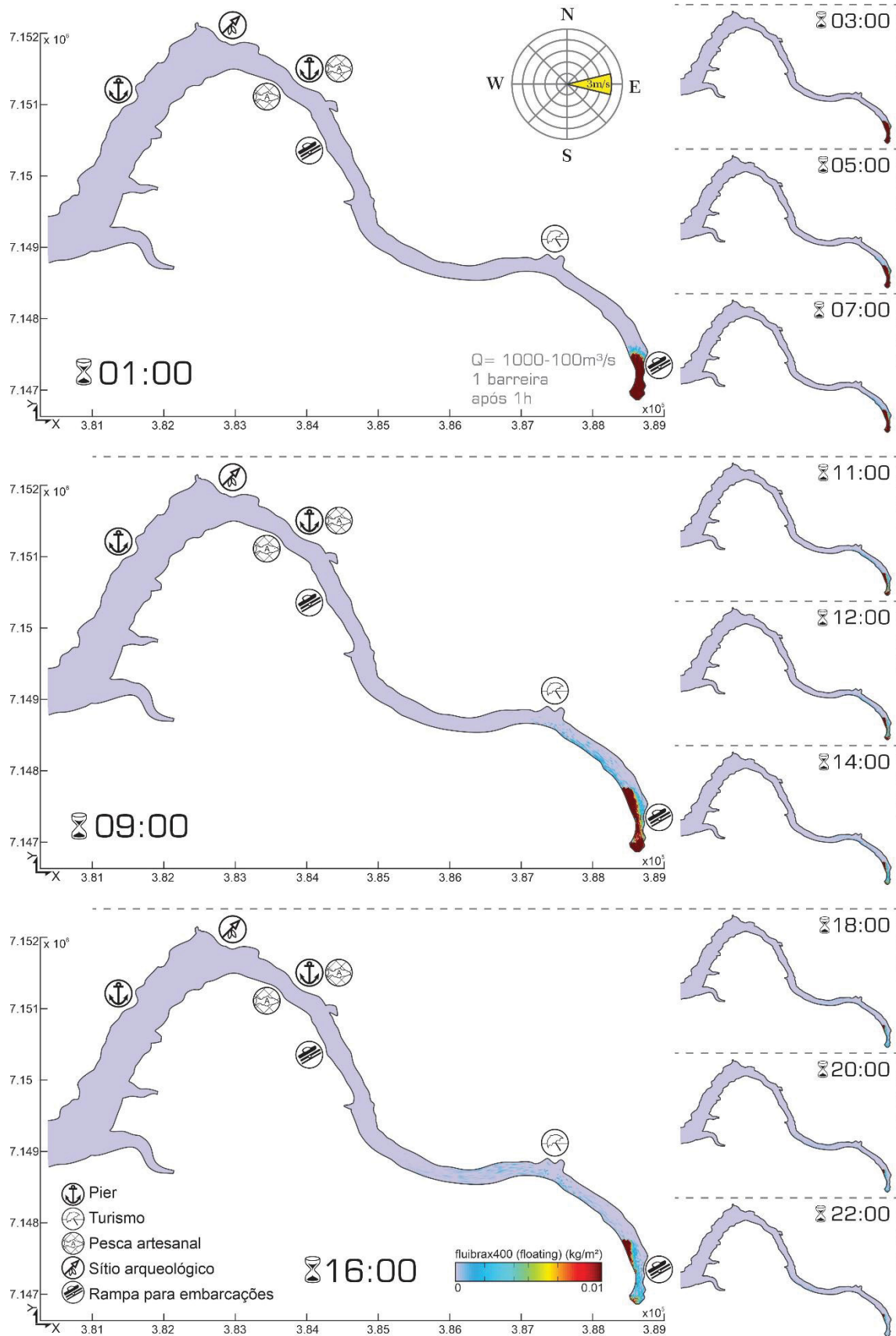




Figura 85 - Cenário E.26 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

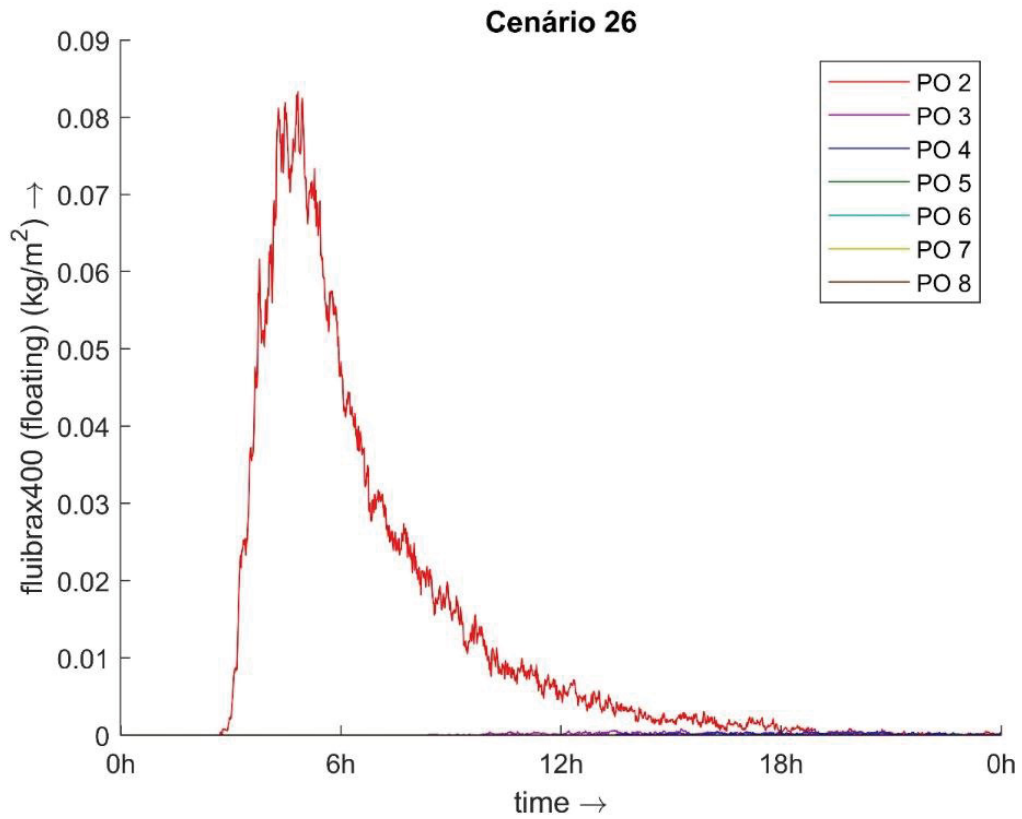


Figura 86 - Cenário E.26 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

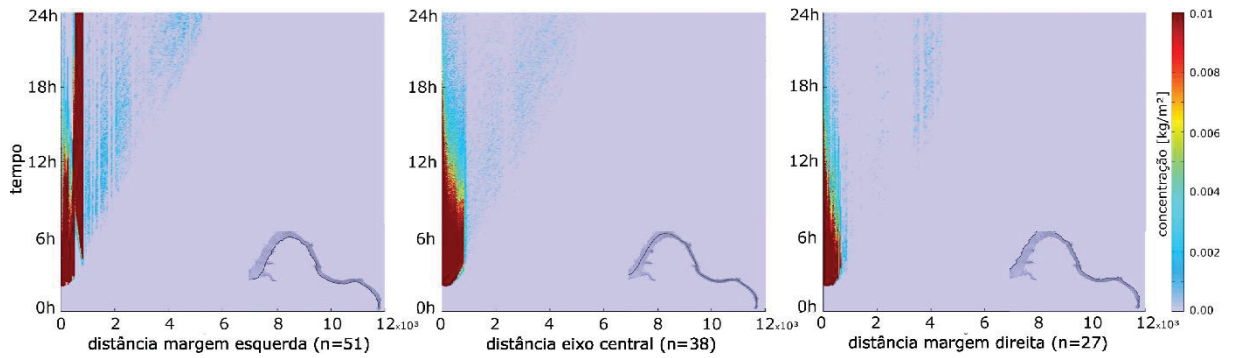


Figura 87 - Cenário E.26 - Status das partículas ao fim da simulação

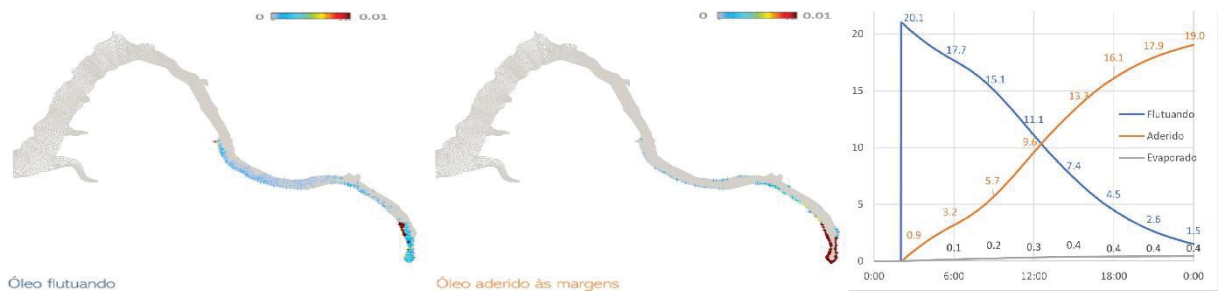


Figura 88 - Cenário E.27 - Vazão constante 550m³/s, 2 barreiras em B e C, resposta lenta

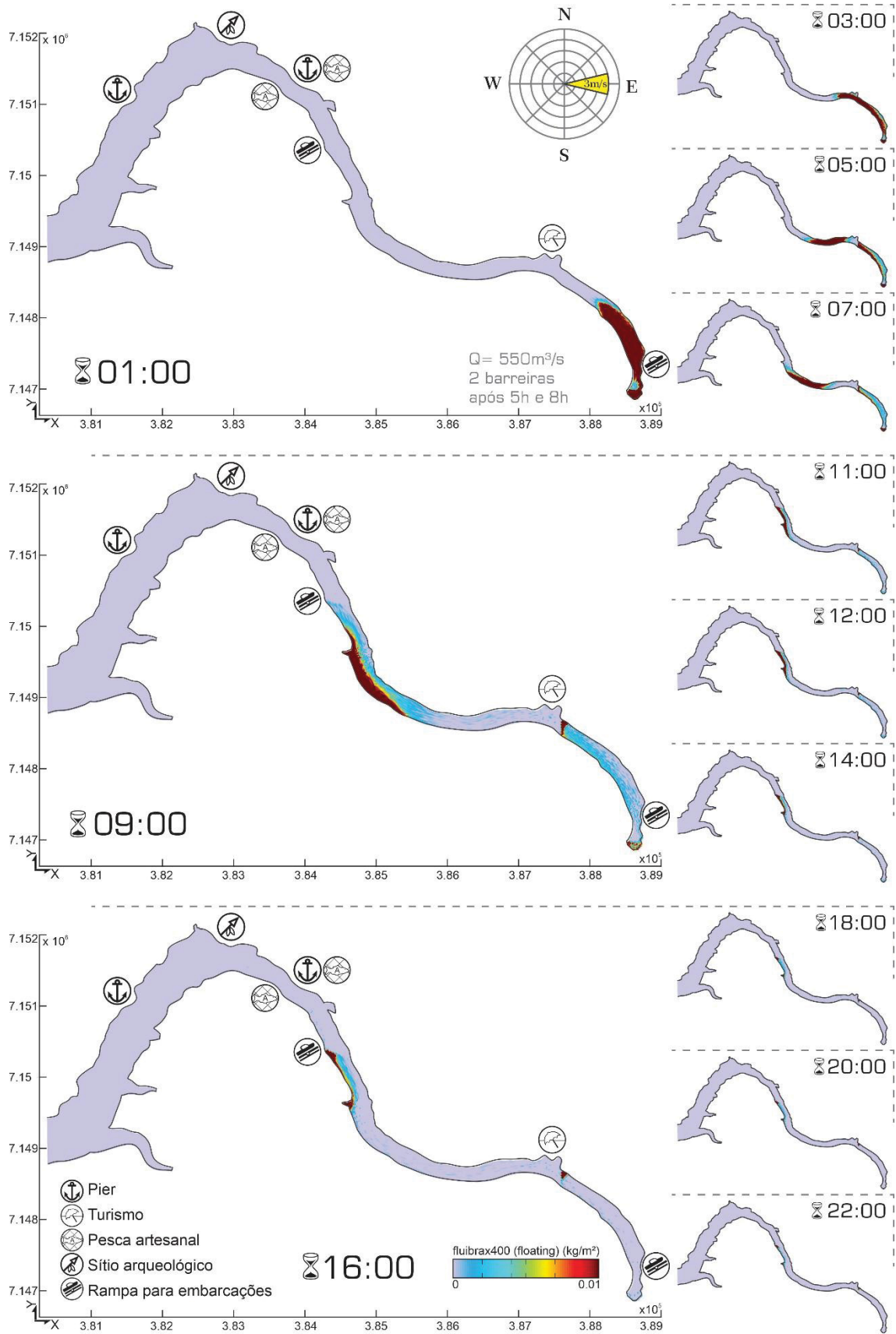


Figura 89 - Cenário E.27 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

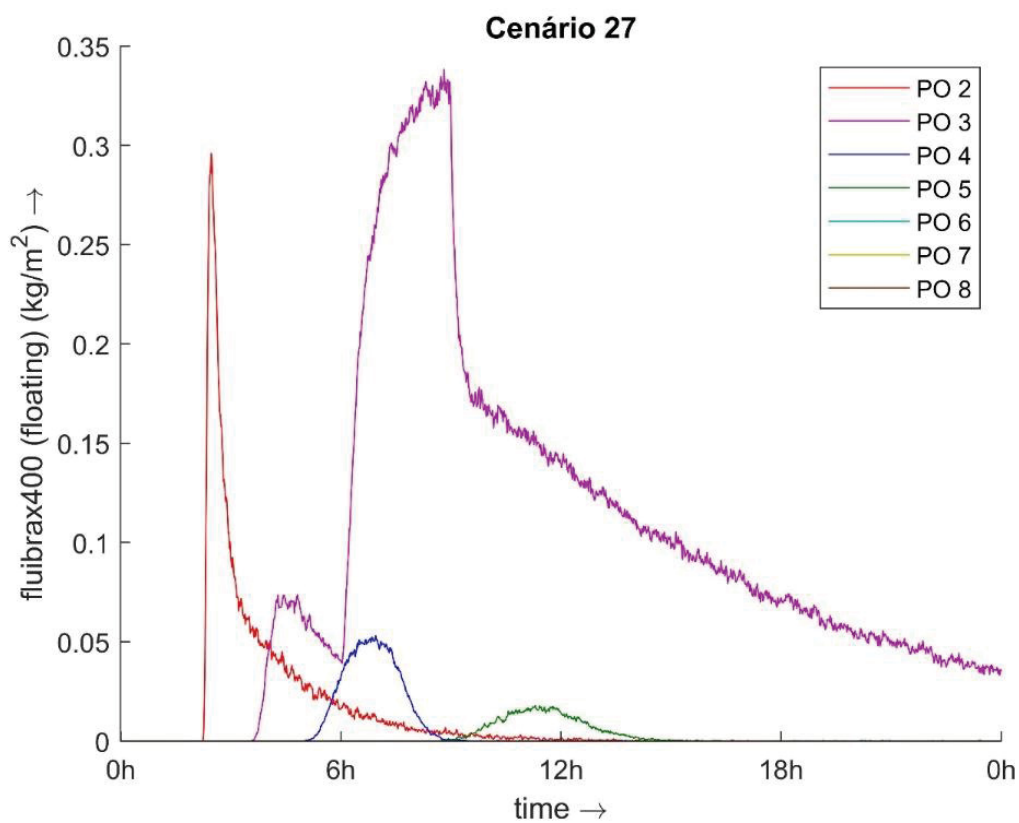


Figura 90 - Cenário E.27 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

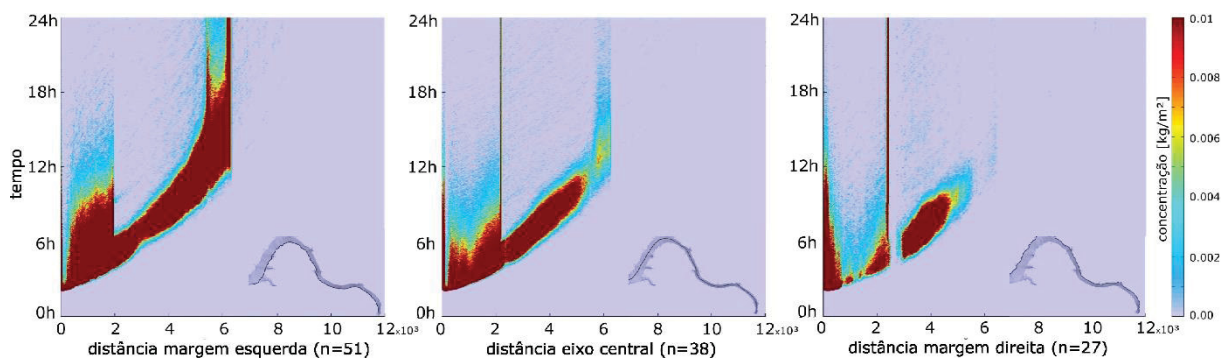


Figura 91 - Cenário E.28 - Vazão constante 550m³/s, 2 barreiras em B e C, resposta rápida

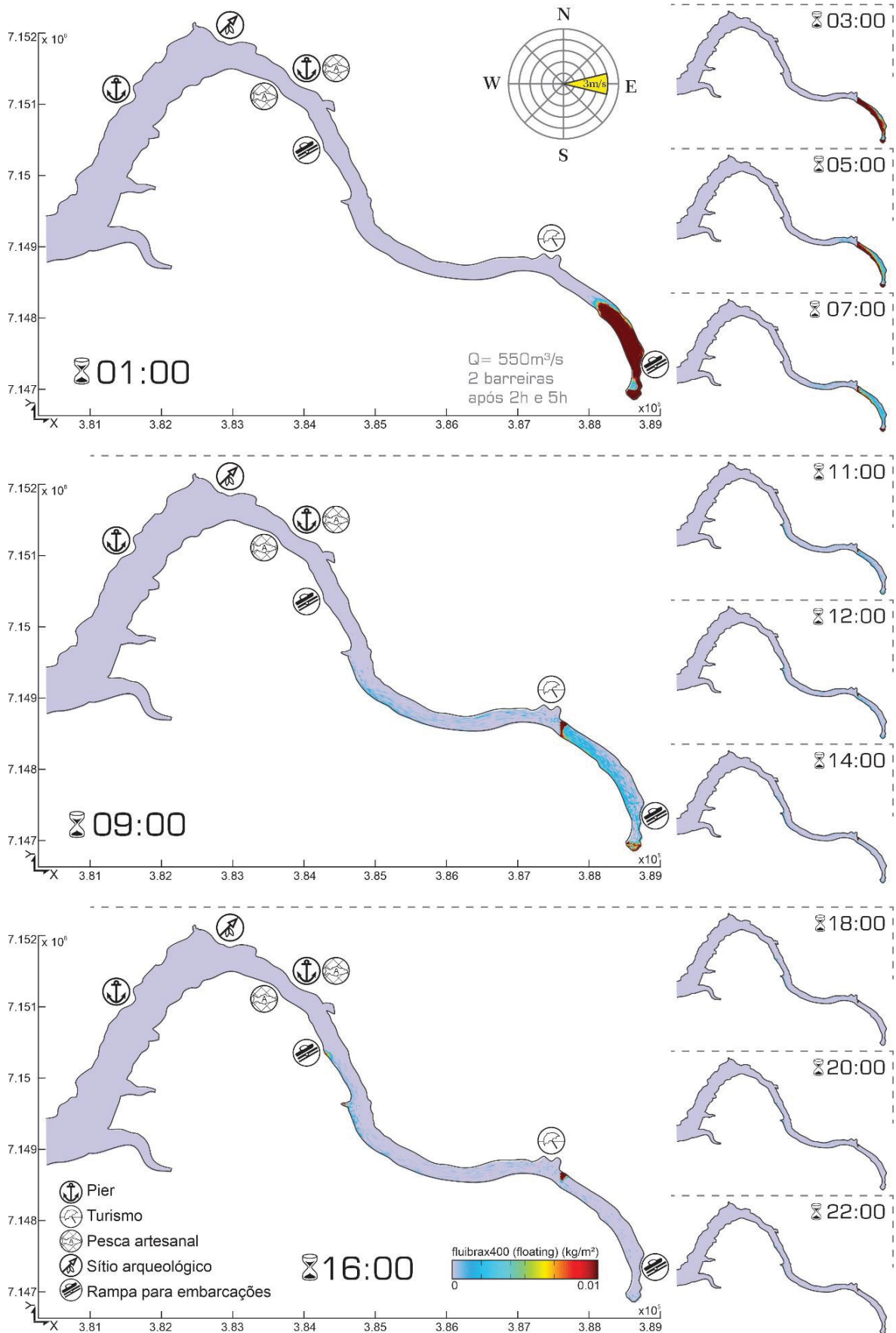


Figura 92 - Cenário E.28 - Concentração nos pontos de monitoramento - superfície

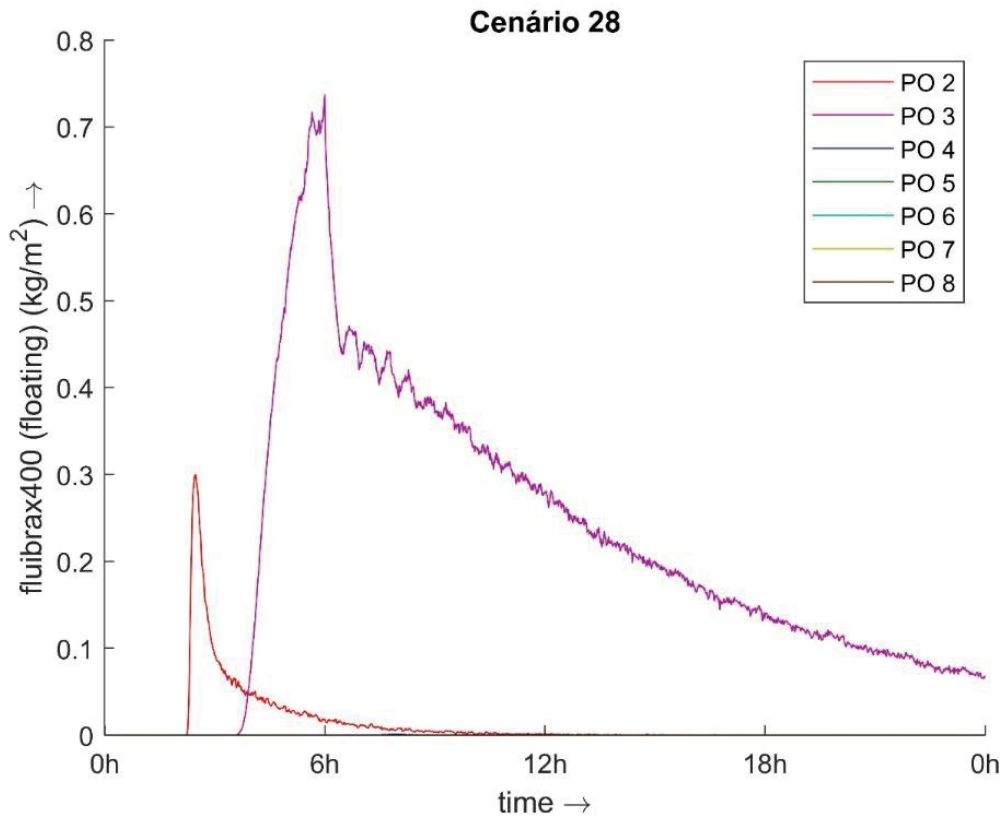


Figura 93 - Cenário E.28 - Concentração nas seções longitudinais n = 27, 38 e 51

