

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA TRIDIMENSIONAL DO
LAGO PARANOÁ PARA ANÁLISE DOS EFEITOS DA
OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO**

TADEU MENDONÇA DE NOVAIS TEIXEIRA

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM - 219/2019

BRASÍLIA/DF: JUNHO DE 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA TRIDIMENSIONAL DO
LAGO PARANOÁ PARA ANÁLISE DOS EFEITOS DA
OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO**

TADEU MENDONÇA DE NOVAIS TEIXEIRA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Sérgio Koide, Ph.D. (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Ricardo Tezini Minoti, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Fernando Luis do Rego Monteiro Starling, Ph.D. (Caesb)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, JUNHO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

TEIXEIRA, TADEU MENDONÇA DE NOVAIS

Modelagem hidrodinâmica tridimensional do Lago Paranoá para análise dos efeitos da operação do reservatório [Distrito Federal] 2019.

xvi, 143p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---|--|
| 1. Modelagem hidrodinâmica tridimensional | 2. Descargas rápidas (<i>flushing</i>) |
| 3. Delft3D | 4. Lago Paranoá |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TEIXEIRA, T. M. de N. (2019). *Modelagem Hidrodinâmica Tridimensional do Lago Paranoá para Análise dos Efeitos da Operação do Reservatório*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 219/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tadeu Mendonça de Novais Teixeira.

TÍTULO: Modelagem Hidrodinâmica Tridimensional do Lago Paranoá para Análise dos Efeitos da Operação do Reservatório.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tadeu Mendonça de Novais Teixeira
tadeumnteixeira@gmail.com

Dedico
ao meu querido avô, o sr. Vivaldo, pelos gestos
de carinho, gentileza e apoio, e por me ensinar a sorrir,
mesmo quando a vida parecer difícil.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força, paciência e ânimo, sem os quais este trabalho não teria sido desenvolvido, pelas incríveis pessoas que colocou no meu caminho e por me fornecer a coragem necessária para enfrentar os desafios que a vida me apresenta, sempre com a fé de que tudo ocorrerá bem.

Aos meus pais, pelo grande apoio e carinho que me forneceram desde que me mudei para o Distrito Federal, em janeiro de 2007, e que, apesar da distância, sempre se fizeram presentes em minha vida, ao meu irmão, Breno, pelo companheirismo e suporte, e aos meus avós, por toda a força e carinho.

Ao professor Sérgio Koide pelos inúmeros ensinamentos, suporte e pela oportunidade de desenvolver esse trabalho.

À CAPES, ANA, ADASA, FAPDF, FINEP, FUNAPE e FINATEC pelo financiamento da pesquisa e à ADASA, Caesb, CEB e INMET pelos dados cedidos.

Aos amigos da USP, em especial ao professor José Rodolfo Scarati e à Dra. Lais Ferrer Amorim pelo curso introdutório sobre o modelo Deflt3D, indispensável para o desenvolvimento desse trabalho, e pela gentileza e disponibilidade em nos receber.

Aos meus incríveis amigos de graduação, mestrado, trabalho e de vida, por todo o apoio, paciência e companheirismo, indispensáveis para que eu conseguisse concluir esse trabalho. Agradeço a cada um deles, por tudo que fizeram e representam em minha vida.

RESUMO

O Lago Paranoá, em Brasília, Distrito Federal, foi criado com o propósito de melhorar o microclima da região, possibilitar a produção energética e proporcionar opções de lazer à população da nova capital do Brasil. A proximidade com o Plano Piloto, contudo, tornou esse ambiente mais vulnerável a impactos provocados por modificações no uso do solo e pelo lançamento de cargas poluidoras, causando eventos de eutrofização ao longo da história do Lago. Faz-se necessário, portanto, que sejam avaliados mecanismos e procedimentos que promovam a melhoria da qualidade da água. Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a efetividade de descargas rápidas pelos vertedores ou tomada de água da barragem do Lago Paranoá na remoção da camada superficial de água, que contém a maior parcela da comunidade fitoplanctônica.

Neste trabalho foi utilizado o modelo Delft3D para construção de um modelo hidrodinâmico tridimensional do Lago Paranoá para a simulação do comportamento das linhas de fluxo sob determinadas condições de operação das estruturas hidráulicas da barragem. Para a construção do modelo, foram necessários dados morfométricos, hidrológicos, climatológicos e da estrutura e operação da usina hidrelétrica do Lago Paranoá, além de parâmetros físicos exigidos pelas rotinas de cálculos.

O modelo hidrodinâmico construído passou por uma etapa inicial de calibração, sendo aplicado, em seguida, nas simulações de condições reais observadas, cenários de rebaixamento rápido do nível de água, cenários de rebaixamento condicionados ao perfil vertical de temperatura, vazão efluente e padrões de vento e simulações de partículas traçadoras de fluxo.

As simulações conduzidas neste estudo indicaram que o modelo foi capaz de representar com boa precisão as variações de nível de água do Lago ao longo do período analisado. Pela análise dos perfis verticais de temperatura, percebeu-se que o melhor ajuste foi obtido nas camadas superficiais, durante todo o período. Conforme o aumento da profundidade, observou-se que os valores simulados e observados se distanciaram ainda mais após o período do inverno, onde as temperaturas das camadas profundas se mantiveram baixas.

A partir da análises das simulações de rebaixamento, verificou-se que a descarga pelos vertedores da barragem promovem uma maior remoção das camadas de água próximas à superfície e baixa ressuspensão do fundo, enquanto que a descarga pela tomada de água restringiria o fluxo a uma faixa intermediária estreita entre a superfície e as camadas mais profundas, ainda com reduzidas chances de ressuspensão de material dos sedimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidrodinâmica tridimensional, *flushing*, Lago Paranoá.

ABSTRACT

The Paranoá Lake, in Brasília, Federal District, was created with the purpose of improving the microclimate of the region, enabling energy production and providing recreation options to the population of the new Brazilian capital. The proximity to Plano Piloto, however, made this environment more vulnerable to impacts caused by changes in land use and release of pollutant loads, provoking eutrophication events throughout the Lake's history. It is, therefore, necessary to evaluate mechanisms and procedures that promote the improvement of water quality. In this context, the main objective of this work was to evaluate the effectiveness of rapid discharges by spillways or water intake of the Paranoá Lake dam in the removal of the superficial layer of water, which contains the largest part of the phytoplankton community.

In this work, the Delft3D model was used to construct a three-dimensional hydrodynamic model of Paranoá Lake to simulate the flow lines behavior under certain operating conditions of the dam's hydraulic structures. For the construction of the model, it was necessary to have morphometric, hydrological and climatological data, and information regard the structure and operation of the hydroelectric plant of Paranoá Lake, besides the physical parameters required by the calculation routines.

The hydrodynamic model constructed underwent an initial calibration step, followed by its application in observed conditions simulations, scenarios of rapid lowering of water level, lowering scenarios conditioned to the vertical profile of temperature, discharge and wind patterns, and flow tracer particle simulations.

The simulations conducted in this study indicated that the model was capable to accurately represent the variations of the Lake water level over the analyzed period. By analyzing the vertical profiles of temperature, it was noticed that the best adjustment was obtained in the superficial layers, during the whole period. As the deep increased, the simulated and observed values were further distanced after the winter, where the deep layers remained in lower temperatures.

Based on the analysis of the lowering water level simulations, it was verified that the discharge, or flushing, by the dam spillway would promote a greater removal of the layers closed to the surface and a lower resuspension of the bottom, while the discharge through the water intake would restrict the flow to a narrow intermediate range between the surface and the deeper layers, still with reduced chances of resuspension of sediment.

KEYWORDS: 3D hydrodynamic modeling, flushing, Paranoá Lake.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. ASPECTOS LIMNOLÓGICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA	5
3.1.1. Características de Lagos e Reservatórios	5
3.1.2. Estratificação Térmica	9
3.1.3. Constituição de Nutrientes e Oxigênio Dissolvido	11
3.2. PROCESSOS HIDRODINÂMICOS	12
3.2.1. Leis de Conservação	13
3.2.1.1. Conservação da Massa	13
3.2.1.2. Conservação do Momento	14
3.2.1.3. Conservação da Energia	15
3.2.2. Advecção e Dispersão	16
3.2.3. Balanço de Massa	17
3.2.4. Forçantes Externas e Circulação Vertical	17
3.2.5. Mecanismo de <i>Flushing</i>	20
3.3. MODELOS HIDRODINÂMICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA	20
3.3.1. Tipos de Modelos	21
3.3.2. Equações e Considerações Fundamentais	22
3.3.2.1. Aproximação de Boussinesq	23
3.3.2.2. Aproximação de Distribuição da Pressão Hidrostática	23
3.3.2.3. Condições Iniciais e de Contorno	24
3.3.2.4. Validação, Calibração, Verificação	24
3.3.3. Modelos Hidrodinâmicos Existentes	25
3.3.3.1. CE-QUAL-W2	27
3.3.3.2. MIKE 3 Flow Model FM	28
3.3.3.3. SisBaHiA	30
3.3.3.4. EFDC	31
3.4. MODELO DELFT3D	32
3.4.1. Módulo de Fluxo (D-Flow Flexible Mesh)	33
3.4.1.1. Especificações e Considerações do Modelo D-Flow	33
3.4.2. Aplicações do Modelo	35

3.5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	37
3.5.1. Aspectos Gerais.....	37
3.5.2. Aspectos Legais do Monitoramento de Nível do Lago Paranoá	39
3.5.3. Eutrofização e Medidas Mitigadoras.....	40
4. METODOLOGIA	43
4.1. BASE DE DADOS PARA ENTRADA NO MODELO	43
4.1.1. Dados Morfométricos.....	43
4.1.2. Dados Hidrológicos.....	46
4.1.2.1. Definição da Vazões Afluentes das Regiões Monitoradas.....	46
4.1.2.2. Definição da Vazões Afluentes das Regiões Não Monitoradas	48
4.1.3. Dados Climatológicos	50
4.1.4. Dados da Estrutura e Operação da Barragem	51
4.2. CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MALHA NUMÉRICA.....	53
4.3. ELABORAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	55
4.4. MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	63
4.4.1. Calibração para Condições Reais de Operação da Usina Hidrelétrica	64
4.4.2. Simulações de Rebaixamento Rápido do Lago Paranoá	65
4.4.3. Simulações de Rebaixamento Condicionado a Temperatura, Vazão e Vento.....	66
4.4.4. Simulação de Partículas Traçadoras de Fluxo	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1. MALHA NUMÉRICA DE DIFERENÇAS FINITAS	69
5.2. SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS	72
5.2.1. Calibração do Modelo Hidrodinâmico	73
5.2.2. Simulações de Rebaixamento Rápido do Nível de Água do Lago.....	84
5.2.3. Simulações de Rebaixamento Condicionado a Temperatura, Vazão e Vento.....	87
5.2.4. Simulação de Partículas Traçadoras de Fluxo	105
6. CONCLUSÕES	116
7. RECOMENDAÇÕES	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
APÊNDICE A	128

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Classificação de corpos de água conforme critérios utilizados em modelagem de qualidade da água (Chapra, 2008).	6
Tabela 3.2 – Alguns dos principais modelos hidrodinâmicos existentes.	26
Tabela 4.1 – Áreas de drenagem das regiões que compõem a bacia do Lago Paranoá.....	50
Tabela 4.2 – Dados de entrada para construção do modelo hidrodinâmico no D-Flow.....	56
Tabela 4.3 – Distribuição das camadas nos intervalos de profundidade.	58
Tabela 4.4 – Condição inicial do perfil de temperatura por camada.	60
Tabela 4.5 – Cenários de operação do barramento para eventos de rebaixamento rápido..	65
Tabela 4.6 – Cenários de operação do barramento sob diferentes condições temperatura, vazão efluente e padrão de vento.....	66
Tabela 5.1 – Taxa de rebaixamento do nível do Lago em termos da vazão efluente.....	86
Tabela 5.2 – Velocidade média das partículas traçadoras de fluxo para cada cenário.....	114

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Macrófitas aquáticas e localização das zonas pelágica, litorânea, eufótica e bentônica de um lago (Adaptada: Ji, 2008; Dodds, 2002).....	7
Figura 3.2 – Modelo esquemático dos compartimentos lacustre, fluvial e de transição de um reservatório (Adaptada: Ji, 2008).	9
Figura 3.3 – Distribuição das camadas verticais e perfil de temperatura em lagos com estratificação térmica (Elaborada pelo autor).	10
Figura 3.4 – Etapas da formação de circulação vertical num lago: (a) início a ação dos ventos, (b) situação de máxima tensão cisalhante sobre a termoclina e (c) padrão de circulação vertical estabilizado (Adaptada: Ji, 2008).	19
Figura 3.5 – Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá, com as subdivisões das UHs (Elaborada pelo autor).	38
Figura 3.6 – Gráfico comparativo da evolução dos valores das cotas máximas e mínimas estabelecidas em Resoluções pela Adasa e dos registros da CEB (Elaborada pelo autor)..	39
Figura 3.7 – Dados monitorados de clorofila, oxigênio dissolvido e temperatura de 1976 a 2012, em um ponto de monitoramento da Caesb próximo à barragem do Lago Paranoá (Minoti, 2019).....	42
Figura 4.1 – Levantamento topobatimétrico do Lago Paranoá (Adaptada: Convênio N° 01/2017 – Adasa-UnB).	44
Figura 4.2 – Padrão de entrada dos pontos altimétricos no Delft3D (Elaborada pelo autor).	45
Figura 4.3 – Recorte do levantamento batimétrico do Lago Paranoá (Adaptada: Convênio N° 01/2017 – Adasa-UnB).	45
Figura 4.4 – Localização das estações de monitoramento fluviométrico e climatológico, das ETEs e da barragem, incluindo a delimitação das UHs da bacia do Lago (Elaborada pelo autor).....	47
Figura 4.5 – Delimitação das áreas de contribuição das estações de monitoramento fluviométrico e das áreas não monitoradas da bacia do Lago Paranoá (Elaborada pelo autor).....	49
Figura 4.6 – Croquis originais do perfil do barramento (a), da planta baixa do sistema de vertedores (b) e do perfil das comportas (c) e (d) obtidas do acervo da CEB.	52
Figura 4.7 – Localização dos pontos de monitoramento de qualidade da água da Caesb no Lago Paranoá (Elaborada pelo autor).	59
Figura 4.8 – Posição inicial das partículas traçadoras de fluxo nas seções de referência (Elaborada pelo autor).	67
Figura 5.1 – Malha numérica de diferenças finitas do Lago Paranoá e detalhe do trecho próximo à barragem, gerado como dado de entrada do modelo Delft3D (Elaborada pelo autor).....	69
Figura 5.2 – Área superficial por célula da malha numérica para o Lago Paranoá e detalhe do trecho próximo à barragem, em m ² (Elaborada pelo autor).....	70
Figura 5.3 – Critérios de qualidade da malha numérica, <i>Aspect Ratio</i> (esquerda) e Ortogonalidade (direita) da malha numérica do Lago Paranoá (Elaborada pelo autor).	71

Figura 5.4 – Seção transversal da malha próxima à barragem do Lago Paranoá e perfil altimétrico do levantamento batimétrico (Elaborada pelo autor).	72
Figura 5.5 – Perfis de variação dos níveis de água observado e simulado do Lago Paranoá para o ano de 2017.	74
Figura 5.6 – Estimativa do erro médio entre as cotas observada e simulada do Lago Paranoá para o ano de 2017.	75
Figura 5.7 – Gráficos comparativos das séries de temperatura simulada e observada nas camadas do ponto de monitoramento da Caesb <i>Região Central</i>	77
Figura 5.8 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb <i>Ponte Gilberto Salomão</i>	78
Figura 5.9 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb <i>Entrada do Ribeirão do Torto</i>	78
Figura 5.10 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb <i>Minas Brasília Tênis Clube</i>	78
Figura 5.11 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb <i>Parque da QL 14</i>	78
Figura 5.12 – Comparativo da evolução do perfil vertical de temperatura no ponto de monitoramento C (<i>Área Central</i>) ao longo do ano de 2017.	80
Figura 5.13 – Temperaturas simuladas na camada superficial da malha em quatro momentos do ano de 2017 (Elaborada pelo autor).	81
Figura 5.14 – Temperaturas simuladas no perfil vertical da malha na linha do vertedor em quatro momentos do ano de 2017 (Elaborada pelo autor).	83
Figura 5.15 – Perfis de rebaixamento do nível do Lago Paranoá sob diferentes condições de vazão efluente pelas comportas do vertedor (Elaborada pelo autor).	85
Figura 5.16 – Detalhe das seções de referência para o lançamento das partículas.	88
Figura 5.17 – Cenário 2.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i>	89
Figura 5.18 – Cenário 2.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i>	90
Figura 5.19 – Cenário 2.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i>	91
Figura 5.20 – Cenário 5.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i>	92
Figura 5.21 – Cenário 3.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i>	93
Figura 5.22 – Cenário 3.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i>	94

Figura 5.23 – Cenário 3.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i> .	95
Figura 5.24 – Cenário 7.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i> .	96
Figura 5.25 – Cenário 7.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i> .	97
Figura 5.26 – Cenário 7.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i> .	98
Figura 5.27 – Cenário 10.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i> .	99
Figura 5.28 – Cenário 8.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i> .	100
Figura 5.29 – Cenário 8.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i> .	101
Figura 5.30 – Cenário 8.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i> .	102
Figura 5.31 – Cenário 11. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais <i>observadas de temperatura, vazão e vento</i> .	103
Figura 5.32 – Comparação entre os tempos de trajeto dos traçadores nos diferentes cenários para a condição <i>sem vento</i> . O valor zero indica que, para o referido cenário, nenhuma partícula foi eliminada do reservatório, durante todo o intervalo de tempo simulado.	107
Figura 5.33 – Cenário 2.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i> .	109
Figura 5.34 – Cenário 2.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i> .	109
Figura 5.35 – Cenário 2.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i> .	109
Figura 5.36 – Cenário 5.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i> .	110
Figura 5.37 – Cenário 3.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i> .	110
Figura 5.38 – Cenário 3.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i> .	110

Figura 5.39 – Cenário 3.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i>	111
Figura 5.40 – Cenário 7.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i>	111
Figura 5.41 – Cenário 7.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i>	111
Figura 5.42 – Cenário 7.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i>	112
Figura 5.43 – Cenário 10.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i>	112
Figura 5.44 – Cenário 8.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i>	112
Figura 5.45 – Cenário 8.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento contra o fluxo</i>	113
Figura 5.46 – Cenário 8.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento a favor do fluxo</i>	113
Figura 5.47 – Cenário 11. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais <i>observadas de temperatura, vazão e vento</i>	113
Figura A.1 – Cenário 1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 14 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i>	129
Figura A.2 – Cenário 2.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i>	130
Figura A.3 – Cenário 3.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i>	131
Figura A.4 – Cenário 3.5. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento lateral ao fluxo</i>	132
Figura A.5 – Cenário 4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 14 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i>	133
Figura A.6 – Cenário 5.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>condições observadas de vento</i>	134
Figura A.7 – Cenário 6. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 14 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i>	135

Figura A.8 – Cenário 7.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	136
Figura A.9 – Cenário 8.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	137
Figura A.10 – Cenário 9. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 14 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i> .	138
Figura A.11 – Cenário 10.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	139
Figura A.12 – Cenário 1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 14 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i> .	140
Figura A.13 – Cenário 2.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	140
Figura A.14 – Cenário 3.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	140
Figura A.15 – Cenário 3.5. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sentido de vento lateral ao fluxo</i> .	141
Figura A.16 – Cenário 4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 14 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i> .	141
Figura A.17 – Cenário 5.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>estratificada</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	141
Figura A.18 – Cenário 6. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 14 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>sem vento</i> .	142
Figura A.19 – Cenário 7.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	142
Figura A.20 – Cenário 8.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 50 m ³ /s pelo <i>Vertedor</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	142
Figura A.21 – Cenário 9. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 14 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>sem vento</i> .	143
Figura A.22 – Cenário 10.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura <i>uniforme</i> , vazão de 28 m ³ /s pela <i>Tomada de água</i> e <i>condições observadas de vento</i> .	143

Lista de Abreviaturas

Adasa	<i>Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal</i>
Caesb	<i>Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal</i>
CEB	<i>Companhia Energética de Brasília</i>
CH3D-WES	<i>Curvilinear Hydrodynamics in 3D – Waterways Experiment Station</i>
COPPE	<i>Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia</i>
DHI	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
DYNHYD5	<i>Dynamic Hydrodynamic Model</i>
EFDC	<i>Environmental Fluid Dynamics Code</i>
ELCOM	<i>Estuary and Lake COmputer Model</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETE	<i>Estação de Tratamento do Esgotos</i>
GDF	<i>Governo do Distrito Federal</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
IMB	<i>Inner Murchison Bay</i>
INMET	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
MDE	<i>Modelo Digital de Elevação</i>
MIKE 3	<i>Generalized Modeling Package – 3D – Water Quality Module</i>
PCH	<i>Pequena Central Hidrelétrica</i>
POM	<i>Princeton Ocean Model</i>
SADMET	<i>Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos</i>
SisBaHiA	<i>Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
UFRJ	<i>Universidade Federal do Rio de Janeiro</i>
UnB	<i>Universidade de Brasília</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
WASP5	<i>Water Quality Analysis Simulation Program</i>

1. INTRODUÇÃO

Os lagos e reservatórios podem ser importantes fontes de água doce e serem utilizados em diversos contextos, incluindo abastecimento humano de água potável, produção energética, navegação, irrigação e recreação, além de serviços ecossistêmicos, como controle de cheias, proteção ao ambiente natural e a manutenção de “ilhas de resfriamento” (Soullignac *et al.*, 2017).

Grandes centros urbanos ao redor do mundo desenvolveram-se nas proximidades de lagos e reservatórios com o intuito de usufruir do recurso natural nas mais diversas atividades. Já em outras cidades, como foi o caso de Brasília, o reservatório foi planejado e construído para que a cidade se desenvolvesse ao seu redor.

O Lago Paranoá foi criado a partir do barramento do rio Paranoá, iniciado em setembro de 1959, represando as águas do Riacho Fundo, do Ribeirão do Gama e do Córrego Cabeça de Veado, ao sul, e do Ribeirão do Torto e do Córrego Bananal, ao norte, além de outros pequenos tributários (Ferrante *et al.*, 2001). O propósito de criação do Lago Paranoá foi embasado no melhoramento do microclima da região, na disponibilidade de uma nova alternativa de produção energética para o abastecimento da nova capital e no fornecimento de opções de lazer à população (GDF, 2010).

Contudo, a proximidade com grandes centros urbanos, torna o ambiente lântico mais vulnerável a impactos provocados por modificações no uso do solo da bacia hidrográfica e pelo lançamento de cargas poluidoras. Em função de sua posição em relação ao Plano Piloto, o Lago Paranoá começou a ser impactado por ações antrópicas desde a instalação da capital e no início da década de 70 já era possível verificar sinais de eutrofização (Burnett *et al.*, 2001). Devido aos inúmeros problemas decorrentes dos eventos de eutrofização, incluindo deterioração da qualidade da água e mortandade de peixes, pesquisas têm sido desenvolvidas sobre o Lago Paranoá para identificar as principais fontes de cargas de nutrientes e avaliar medidas para mitigar o problema da eutrofização (Angelini *et al.*, 2008; Cavalcanti *et al.*, 1997).

Nesse contexto, em 1998 foi realizado o deplecionamento rápido do nível de água do Lago Paranoá por meio da descarga rápida da água (*flushing*) pelas comportas do vertedor, visando a remoção de parte da zona eufótica, que concentra a maior quantidade de fitoplâncton. Na literatura especializada existem diversos estudos que analisaram o comportamento da qualidade da água após a execução desse procedimento, havendo relatos

de monitoramento limnológico em que foram observadas a redução do grau de turbidez da água e das concentrações de fósforo e biomassa algal após a descarga rápida de água (Angelini *et al.*, 2008; Pereira, 2006). Vale destacar que existem discordâncias entre os órgãos do governo local sobre a conveniência da liberação desse grande volume de água pelas comportas, tendo em vista que representa um desperdício de potencial energético, do ponto de vista da concessionária de energia, ao mesmo tempo que uma potencial deterioração da qualidade da água incorria em maiores custos para a companhia de abastecimento público para realizar o tratamento da água.

Diante das incertezas associadas ao procedimento do *flushing* quanto aos efeitos na qualidade da água do Lago Paranoá, das dificuldades em realizar testes reais no corpo hídrico e dos custos envolvidos na construção de modelos físicos capazes de simular o comportamento real do Lago, a modelagem hidrodinâmica é uma alternativa para auxiliar na compreensão das influências dos diferentes procedimentos de operação do barramento nas correntes induzidas no reservatório e no eventual arraste da comunidade fitoplanctônica na camada superficial do espelho d'água.

Os programas de modelagem hidrodinâmica evoluíram expressivamente nas últimas décadas, agregando ferramentas mais sofisticadas para representar com fidelidade os fenômenos que se desenvolvem em escala real, tornando-se instrumentos essenciais para a gestão e o gerenciamento eficientes dos recursos hídricos. Dentre as diversas potencialidades dos programas, as simulações produzidas possibilitam analisar diversos cenários possíveis e identificar soluções mais adequadas para problemas específicos. Ressalta-se, porém, que, como são desenvolvidos para representar fenômenos naturais bastante complexos e com alto grau de interrelação entre si e o meio físico, os programas incluem em suas estruturas apenas equações simplificadas desses fenômenos, com um número limitado de variáveis, e analisam um grupo restrito dessas interrelações, seja em função da influência reduzida do fenômeno em uma determinada aplicação, seja decorrente da inexistência de equações que representem com fidelidade determinados processos. Outra limitação dos programas é a própria disponibilidade de dados específicos de entrada, nem sempre disponíveis em quantidade e qualidade suficientes para atender às exigências mínimas do modelo.

Visando analisar a eficácia do *flushing* na melhoria da qualidade da água do Lago Paranoá, tendo em vista a futura captação superficial permanente da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb) nas proximidades da barragem e os

riscos associados à captação de água contendo floração de cianobactérias, e iniciar os estudos de modelagem hidrodinâmica tridimensional com o intuito de fornecer uma base para o desenvolvimento futuro da modelagem completa do Lago, incluindo as parcelas físico-química e ecológica, este estudo buscou avaliar os efeitos de diferentes tipos de operação das estruturas hidráulicas do barramento para identificar os efeitos da forma de operação da descarga de água sobre as linhas de fluxo nas proximidades da barragem por meio da modelagem hidrodinâmica com a plataforma Delft3D.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Iniciar o desenvolvimento da modelagem tridimensional do Lago Paranoá com vistas a fornecer uma base para o desenvolvimento completo da modelagem tridimensional hidrodinâmica, físico-química e ecológica, como subsídio à gestão integrada das águas da bacia.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma modelagem hidrodinâmica tridimensional do Lago Paranoá utilizando o software Delft3D para a análise das linhas de fluxo.
- Avaliar o efeito do procedimento operacional das estruturas hidráulicas do reservatório (componentes das vazões turbinada e vertida) nas linhas de fluxo e possíveis efeitos na zona eufótica do corpo central do Lago.
- Simular a trajetória de partículas posicionadas na superfície do Lago sob condições específicas de descarga pelos vertedores e pela tomada de água, perfil vertical de temperatura e padrões de vento incidente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica referente ao presente trabalho incluiu os tópicos de aspectos limnológicos e de qualidade da água de lagos e reservatórios, processos e fenômenos hidrodinâmicos, observações sobre os fundamentos de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água e suas aplicações. Por fim, foi realizada a caracterização da área de estudo, incluindo aspectos gerais e legais, além da discussão sobre o histórico de eventos de eutrofização e medidas mitigadoras.

3.1. ASPECTOS LIMNOLÓGICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA

Lagos e lagoas são corpos hídricos continentais desprovidos de conexão direta com os oceanos e que detém reduzida concentração de íons, comparativamente às verificadas nos ambientes marinhos. De um modo geral, o funcionamento desses ambientes é controlado por diversos processos, como circulação e estratificação vertical, distribuição de microrganismos planctônicos e peixes e com interações envolvendo sedimento e água (Tundisi *et al.*, 2002).

Nos tópicos seguintes foram apresentadas informações sobre as principais características de lagos e reservatórios, caracterização e possíveis impactos do fenômeno de estratificação térmica e as influências da carga de nutrientes e oxigênio dissolvido no corpo hídrico.

3.1.1. Características de Lagos e Reservatórios

Os lagos e reservatórios constituem a maior fonte de água doce superficial do planeta e são utilizados em diversas finalidades, incluindo abastecimento humano de água potável, produção energética, navegação, irrigação e recreação (Lap e Mori, 2007), além de serviços ecossistêmicos, como controle de cheias, proteção ao ambiente natural e a manutenção de “ilhas de resfriamento” (Soulignac *et al.*, 2017).

A geomorfologia dos lagos está diretamente refletida em suas características físicas, químicas e biológicas, além de exercer controle sobre o metabolismo do lago, levando em consideração a influência dos fatores meteorológicos. A geomorfologia também é responsável por controlar a estrutura da drenagem, o aporte de nutrientes no lago e o tempo de renovação da água (Wetzel, 1975).

Em termos físicos, as principais características de um lago incluem seu comprimento, profundidade, área e volume. A partir dessas informações, é possível estabelecer relações hidráulicas importantes, incluindo o tempo de detenção hidráulico (t_d), definido pela razão entre o volume de água pela vazão (Thomann e Mueller, 1987). O t_d pode variar desde horas até milhares de anos, a depender das dimensões do lago, e é de grande relevância nas análises do tempo de permanência de poluentes em lagos e da influência das vazões afluentes de tributários (Doods, 2002), além de influenciar nos processos de estratificação térmica e fluxos de nutrientes do leito (Ji, 2008).

No âmbito da modelagem de qualidade da água, os corpos de água podem ser classificados conforme três principais características (Chapra, 2008), conforme descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação de corpos de água conforme critérios utilizados em modelagem de qualidade da água (Chapra, 2008).

Tipo	Origem	Forma	Dimensões	
			Tempo de Residência	Profundidade
Natural	Lagos	Tendência a serem menos alongados e mais circulares.		
Artificial	Represamentos ou Reservatórios	Tendência a serem alongados ou dendríticos, dado que são formados sobre os canais principais dos rios.	Curto (< 1 ano) Longo (> 1 ano)	Raso (< 7 m) Profundo (> 7m)

Outra classificação comumente aplicada a lagos refere-se à prevalência de determinadas comunidades biológicas, segmentando a coluna de água em três zonas biológicas, são elas as zonas *litorânea*, *pelágica* e *bentônica*, como ilustrado na Figura 3.1 (Doods, 2002).

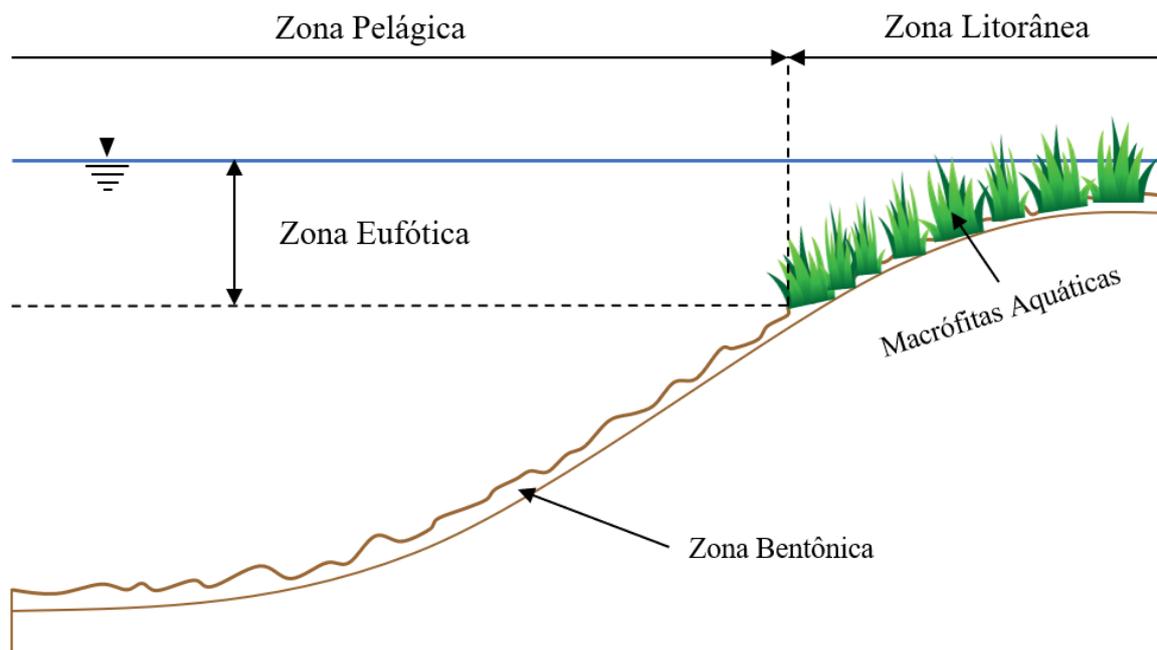


Figura 3.1 – Macrófitas aquáticas e localização das zonas pelágica, litorânea, eufótica e bentônica de um lago (Adaptada: Ji, 2008; Dodds, 2002).

A região classificada como zona litorânea é a parcela que margeia o lago e está em contato direto com o ambiente terrestre adjacente ao espelho de água. Em função da baixa profundidade, dois aspectos principais são característicos desta zona. O primeiro refere-se à penetração da luz solar em toda a extensão da coluna de água, atingindo o fundo e permitindo o desenvolvimento de vários nichos ecológicos e cadeias alimentares. O segundo aspecto é que esta região sofre grande influência de forçantes externas, como vento e descargas afluentes ao sistema, o que pode torna-la vulnerável à poluição. (Ji, 2008; Dodds, 2002; Esteves, 1988).

A zona pelágica de vida livre, ou limnética, por sua vez, é a região do lago em que a luz solar não consegue penetrar toda a coluna de água e atingir o leito. A camada superficial, denominada zona *eufótica*, estende-se da lâmina de água até a profundidade em que a intensidade da radiação solar se reduz a 1%. É nessa região que microrganismos aquáticos e plantas aquáticas são capazes de desempenhar a fotossíntese (Tundisi e Tundisi, 2008).

Por fim, a zona bentônica, ou profunda, é o habitat bentônico abaixo da zona pelágica que se estende até a superfície (Doods, 2002) e é caracterizada pela ausência de organismos fotossintetizantes, sendo completamente dependente da matéria orgânica advinda das zonas litorânea e pelágica (Esteves, 1988). Ela corresponde à uma fina camada de sedimentos no leito do lago que concentra diversos organismos bênticos, como invertebrados. A quantidade

e variedade de organismos presentes nessa região é fortemente influenciada pelos níveis de oxigênio dissolvido (Ji, 2008).

A ocorrência desses habitats é determinada tanto pelas dimensões quanto pela forma do lago (Doods, 2002), e podem ser suprimidas ou maximizadas conforme as características físicas do lago (Esteves, 1988). Outro aspecto importante é que, embora exista essa separação de regiões, os processos hidrodinâmicos que se desenvolvem no ambiente lântico encarregam-se de estabelecer conexões entre elas (Ji, 2008).

Os reservatórios, por sua vez, têm como principais funções a regularização da vazão a jusante do barramento, a construção de hidrelétricas e a reservação de água. A implantação do reservatório possibilita diversos usos para o corpo de água, incluindo controle de cheias, amortecendo o pico da onda e elevando controladamente a vazão efluente do sistema; transporte por navegação, tendo em vista que o volume armazenado, na maioria das situações, é suficiente para fornecer uma profundidade adequada para o transporte aquaviário; fornecimento de água para abastecimento humano e irrigação; e opções de recreação e turismo (Tundisi *et al.*, 2006).

Outro aspecto de grande relevância no estudo de reservatórios é a análise da taxa de acumulação de sedimentos ao longo do tempo. Em qualquer situação natural de operação, espera-se que o sedimento produzido pela ação de processos erosivos na bacia hidrográfica seja transportado pelos rios e posteriormente acumulado no reservatório. O acúmulo é maior na região onde o rio deságua no reservatório, tendo em vista que a velocidade do fluxo é bruscamente reduzida devido ao aumento da geometria da calha, o que, por sua vez, provoca a minimização da capacidade de transporte de sedimentos pela corrente. Como resultado, a capacidade de armazenamento de água é reduzida ao longo do tempo e os padrões de deposição dentro do reservatório são influenciados pela operação do reservatório e pelos grandes eventos de precipitação, que provocam o carreamento de cargas de sedimento pelos rios (Boeriu *et al.*, 2011).

Diferentemente dos lagos, não há um método genérico de classificação para reservatórios. Contudo, esses ambientes são considerados híbridos, compartilhando características tanto de lagos quanto de rios, apresentando aspectos exclusivos e únicos em termos de forma, variações hidrodinâmicas e de qualidade da água (Margalef, 1983).

Reservatórios também podem ser tipicamente separados em três zonas, ou compartimentos, distintas, são elas a fluvial, com características próximas as de um rio; a

lacustre, a qual se assemelha a de um ambiente lântico; e a de transição entre ambos (Ji, 2008), conforme ilustrado na Figura 3.2.

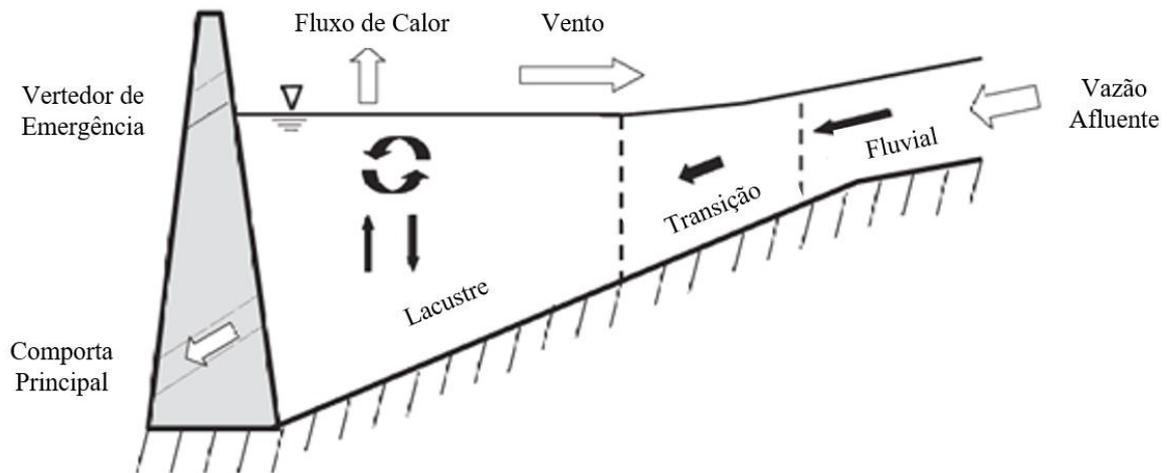


Figura 3.2 – Modelo esquemático dos compartimentos lacustre, fluvial e de transição de um reservatório (Adaptada: Ji, 2008).

3.1.2. Estratificação Térmica

A estratificação de um corpo de água refere-se ao rearranjo das massas de água em camadas horizontais com distintos valores de densidade. Essa separação em camadas se deve a diferenças de temperatura e sólidos suspensos, ou dissolvidos (Ji, 2008). A estratificação ocorre quando o aquecimento provocado pela radiação incidente do sol mantém a coluna de água estável, de modo que o efeito do vento na mistura da coluna de água é reduzido (Tuan *et al.*, 2009). Em termos de energia mecânica, o fenômeno da estratificação significa que grande quantidade de energia potencial está armazenada no corpo de água. Em lagos de regiões de clima temperado, essa mesma energia é responsável por estabilizar a coluna de água durante o período do verão, mantendo a estratificação em virtude da diferença de densidade da água (Imberger, 1985). Na maioria dos casos, a energia cinética induzida pelo atrito do vento na superfície da água é insuficiente para romper a estabilidade e provocar a circulação da coluna. A partir da proximidade com o período do inverno, contudo, o resfriamento da superfície reduz o gradiente de densidade, e desse modo, o atrito do vento torna-se capaz de promover a turbulência suficiente para misturar as camadas de água (Robarts *et al.*, 1982).

O nível de estratificação de lagos e reservatórios, seja ele horizontal ou vertical, pode exercer efeitos adversos na qualidade da água em decorrência do aprisionamento de compostos químicos em regiões do perfil de água que apresentem baixo grau de mistura. O perfil de oxigênio dissolvido (OD), como exemplo, é afetado pela estratificação térmica e

apresenta as menores concentrações de OD nos níveis mais baixos em função da reduzida troca com a parcela aerada na camada superficial (Thomann e Mueller, 1987).

A estratificação térmica em lagos e reservatórios é responsável pela formação de três camadas com temperaturas distintas, conhecidas como *epilímnio*, *metalímnio* ou *termoclina* e *hipolímnio* (Bronmark e Hansson, 2007). A primeira é a camada mais quente, de menor densidade e com maior grau de mistura, ocupando a região superficial da coluna de água. A segunda, localiza-se em uma região abaixo do epilímnio, sendo uma camada que apresenta forte variação de temperatura. Finalmente, o hipolímnio, desenvolvido na região mais profunda, é a camada mais fria, densa e com menor movimentação (Bocaniov *et al.*, 2014). A Figura 3.3 apresenta a disposição vertical das camadas conforme a situação de estratificação térmica.

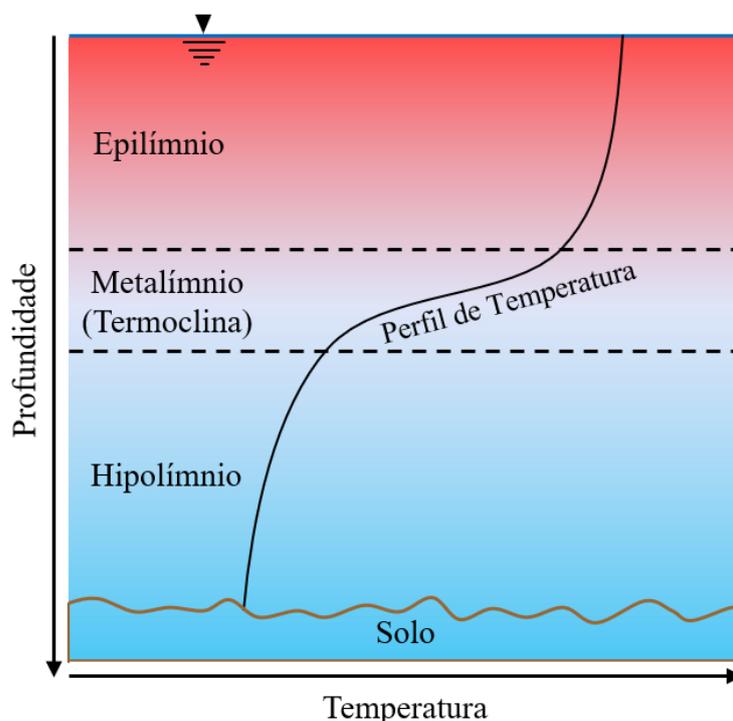


Figura 3.3 – Distribuição das camadas verticais e perfil de temperatura em lagos com estratificação térmica (Elaborada pelo autor).

A termóclina funciona como uma barreira física, separando o epilímnio do hipolímnio e limitando a mistura entre eles. Como consequência, o hipolímnio tende a reduzir sua concentração de oxigênio dissolvido, ao passo que sua carga de nutrientes aumenta. A região superficial, por outro lado, torna-se rica em oxigênio dissolvido, mas com baixas concentrações de nutrientes em função da absorção pelo fitoplâncton e a consequente subsidência para regiões mais profundas após a morte celular. Dado que a mistura entre as camadas é mínima devido ao gradiente de densidade, a taxa de reposição de nutrientes no

epilímnio é comprometida. Em termos de consequências ecológicas da estratificação térmica no verão, a depleção de nutrientes no epilímnio pode provocar, entre outros processos, a redução da produtividade primária na camada superficial, em decorrência da limitação de nutrientes (Bocaniov *et al.*, 2014). Em grandes lagos, é possível que a tensão provocada por ventos intensos induza a formação de fluxos de nutrientes de águas profundas para regiões superficiais, favorecendo a produtividade primária das comunidades fitoplanctônicas (Corman *et al.*, 2010).

3.1.3. Constituição de Nutrientes e Oxigênio Dissolvido

Em termos de concentração de nutrientes, os lagos são comumente classificados em *eutrófico*, definindo os ambientes ricos em nutrientes, e *oligotrófico*, os quais apresentam baixa concentração de nutrientes (Ruttner, 1953). Os lagos oligotróficos recebem continuamente cargas de nutrientes dos afluentes da bacia de drenagem, viabilizando o desenvolvimento de plantas e organismos aquáticos. No transcorrer do tempo, contudo, o aumento da produtividade biológica provoca o escurecimento da coluna de água em razão do acúmulo de fitoplâncton, ao passo que o processo de decomposição natural da matéria orgânica intensifica a depleção de OD. O lago, então, torna-se eutrófico. Conforme é mantido o carreamento de sedimentos e nutrientes para o lago, este torna-se cada vez mais raso e quente, e mais plantas se instalam na região litorânea, alterando a estrutura do lago e transformando-o em uma região pantanosa. Este último estágio pode levar até milhares de anos para ser visualizado no ambiente natural intocado. Em lagos e reservatórios próximos à centros urbanos ou que recebam influência direta de comunidades, em contrapartida, esse processo pode ser expressivamente acelerado (Masters, 1998).

Alterações nas características físicas nas bacias hidrográficas contribuintes ao lago ou reservatório, como desmatamento, aumento da densidade populacional e alterações no uso e cobertura do solo, aliadas à períodos de elevada precipitação, podem ocasionar a intensificação dos processos erosivos e o consequente carreamento de grande parcela dos sedimentos para o corpo hídrico receptor (Rosenmeier *et al.*, 2004). A depender do tipo de formação florestal predominante na bacia, é possível que este uso do solo seja um dos principais fornecedores de sedimentos em suspensão, nitrogênio e fósforo para os afluentes do reservatório. Por outro lado, em se tratando de bacias majoritariamente agrícolas, a carga de fertilizantes aplicada às culturas pode se transformar na principal fonte de nitrogênio e fósforo (Somura *et al.*, 2012), dependendo de como as práticas de manejo agrícolas são

implementadas. Diversos estudos indicam que o fósforo possa ser o elemento limitante no processo de eutrofização em sistemas naturais, e que o grau de limitação seja dependente da proporção entre as concentrações de nitrogênio e fósforo, tendo em vista que a comunidade fitoplanctônica exige uma quantidade de elementos químicos em proporções relativamente fixas e elevadas de macronutrientes para se reproduzir (Hecky e Kilham, 1988).

Em termos de oxigênio dissolvido, diversos fatores afetam sua disponibilidade em ambientes aquáticos naturais. Enquanto os processos de degradação da matéria orgânica, respiração dos organismos aquáticos e sedimentos consomem OD, a fotossíntese realizada pelas macrófitas aquáticas, algas e cianobactérias adiciona OD durante o dia e o consome durante a noite. A turbulência provocada pelas irregularidades das calhas dos rios também é um importante mecanismo de inserção de OD no fluxo de água (Masters, 1998). Entre os mecanismos que exercem maior influência nas variações de concentração de oxigênio dissolvido em lagos e reservatórios podem ser mencionados a estratificação térmica e o tempo de detenção hidráulica de matéria orgânica. Durante a estratificação térmica, o hipolímnio torna-se uma região isolada do contato com a atmosfera, de modo que as taxas de reaeração ficam severamente comprometidas (Thomann e Mueller, 1987), como pode ser observado na Figura 3.3. A produtividade primária de um lago, muitas vezes, pode ser estimada a partir da análise curva de concentração de oxigênio dissolvido.

3.2. PROCESSOS HIDRODINÂMICOS

Os processos hidrodinâmicos desempenham papéis fundamentais nos complexos sistemas de águas superficiais. A circulação das massas de água, desde pequena e até em grande escala, interferem na distribuição da temperatura, nutrientes e concentração de oxigênio dissolvido, além de afetarem os fluxos de sedimentos, contaminantes e microrganismos aquáticos (Ji, 2008).

Chanudet *et al.* (2012) afirmam que os processos hidrodinâmicos e termodinâmicos em grandes reservatórios são os principais responsáveis pela qualidade da água, de modo que, para se fazer uma análise fidedigna de qualidade da água, faz-se necessário o conhecimento acerca da temperatura da água e das correntes.

Com o intuito de fornecer o arcabouço conceitual sobre os principais fundamentos dos processos hidrodinâmicos, os capítulos seguintes discorrem sobre as Leis de Conservação (Massa, Momento e Energia), os processos de Advecção e Dispersão, o

Balço de Massa e Energia no corpo hídrico e as principais Forçantes Externas ao sistema lntico e o fenmeno de Circulaço Vertical na coluna de água.

3.2.1. Leis de Conservaço

As trs principais leis de conservaço que governam os processos hidrodinâmicos sã a conservaço da massa, a conservaço da energia e a conservaço do momento. Unidas, compõem a base teórica para os estudos de hidrodinâmica e qualidade da água. Nos modelos que fazem uso dos princípios da hidrodinâmica, as equaçes básicas sã frequentemente modificadas, simplificadas ou mesmo renomeadas. Contudo, todas advêm das mesmas equaçes fundamentais das leis de conservaço (Ji, 2008).

3.2.1.1. Conservaço da Massa

A lei de conservaço da massa estabelece que não é possível criar ou destruir matéria. Para um dado volume de controle (VC), a equaçõ do balanço de massa, ou equaçõ da continuidade, define que a massa que entra no VC menos a quantidade que sai do mesmo VC é equivalente à variaço da massa dentro os limites do VC (Çengel e Cimbala, 2007). Em termos de equacionamento (Eq. 3.1):

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (3.1)$$

onde \dot{m}_e e \dot{m}_s correspondem, respectivamente, aos fluxos de massa entrando e saindo do VC, e dm_{VC}/dt refere-se a taxa de variaço da massa dentro dos limites do VC.

Em se tratando de determinados poluentes, é possível que, em sistemas naturais, ocorram reaçes que promovam um incremento ou perda de parcela do composto. Nesses casos, um termo adicional deve ser inserido no lado esquerdo da Equaçõ 3.1 para computar essa parcela, denominada taxa de produço do poluente, \dot{m}_r . Caso outros compostos reajam e produzam o dado poluente, \dot{m}_r será positivo. Na situaço oposta, se o poluente reagir com outro composto e acarretar na perda de massa (do poluente), \dot{m}_r adquirirá um valor negativo (Ji, 2008).

Considerando apenas o balanço da massa de água, a equaçõ de conservaço de massa pode ser descrita como (Eq. 3.2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.2)$$

onde ρ corresponde à densidade da água, ∇ o operador divergente e \vec{v} a velocidade. A Equação 3.2 é também conhecida por *equação da continuidade* (Ji, 2008). No caso particular em que o fluido é incompressível, a parcela $\partial\rho/\partial t$ assume o valor zero e, portanto, a equação da continuidade torna-se (Eq. 3.3):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.3)$$

O termo remanescente apresentado na Equação 3.3 indica que o fluxo mássico que atravessa uma superfície fechada deve ser igual a zero. Convertendo a equação em termos de coordenadas Cartesianas (Eq. 3.4), temos o divergente de velocidades:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

onde os termos u , v e w representam os componentes de velocidade nas direções x , y e z , respectivamente.

3.2.1.2. Conservação do Momento

O *momento linear*, ou simplesmente *momento* do corpo, corresponde ao produto entre a massa do corpo (m) e pela sua velocidade (\vec{v}) (Çengel e Cimbala, 2007). A lei de conservação do momento é derivada da segunda lei de Newton, que estabelece (Eq. 3.5):

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (3.5)$$

onde \vec{F} é a força externa e \vec{a} a aceleração do objeto (Zárete e Sengers, 2005).

Em hidrodinâmica, além das forças externas atuantes no sistema, como o vento, existem outras três de grande relevância: a força gravitacional, o gradiente de pressão da coluna de água e as forças viscosas, atribuídas tanto à viscosidade intrínseca do fluido quanto à turbulência. Considerando essas influências, as equações de momento podem ser definidas como (Eq. 3.6):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \rho \vec{g} - \nabla p + \overrightarrow{f_{vis}} \quad (3.6)$$

onde $\overrightarrow{f_{vis}}$ representa a força viscosa, p a pressão da água e \vec{g} a aceleração da gravidade (Ji, 2008).

Para fluidos incompressíveis newtonianos, para os quais a tensão de cisalhamento relaciona-se linearmente à taxa de deformação de cisalhamento (Çengel e Cimbala, 2007), o termo da força viscosa pode ser escrito como (Eq. 3.7):

$$\overrightarrow{f_{vis}} = \nabla \vec{\tau} = \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (3.7)$$

em que $\vec{\tau}$ corresponde à tensão de cisalhamento, μ a viscosidade dinâmica (ou absoluta), e ∇^2 o operador Laplaciano (Ji, 2008), o qual leva a forma da Equação 3.8 quando utilizado o sistema de coordenadas Cartesiano.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.8)$$

Realizada a combinação dos termos da Equação 3.8 quando avaliada em cada uma das três direções, é possível definir a equação vetorial de Navier-Stokes (Eq. 3.9) para o caso de escoamento de fluido newtonianos incompressíveis com viscosidade constante (Kundu e Cohen, 2008).

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (3.9)$$

Uma forma mais completa de representar a Equação 3.9 é apresentada por Ji (2008), que inclui um termo referente à força de Coriolis ($-2\vec{\Omega} \cdot \vec{v}$) e outro termo referente a forças externas ($\overrightarrow{F_{fr}}$), como o vento. Dividindo a Equação 3.9 por ρ e adicionando os termos propostos por Ji (2008), tem-se a Equação 3.10:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{-\vec{\nabla}p}{\rho} + \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{v} - 2\vec{\Omega} \cdot \vec{v} + \overrightarrow{F_{fr}} \quad (3.10)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (gradiente de pressão) representa os efeitos da variação espacial de pressão da água, provocada por alterações na densidade e mudanças do nível de água superficial. O segundo termo inclui a influência da força gravitacional. O terceiro refere-se ao termo de difusão (ou de viscosidade), definindo o grau de amortecimento do movimento do fluido (Popescu, 2014; Ji, 2008).

3.2.1.3. Conservação da Energia

Os fluxos de energia se processam na forma de calor ou trabalho, e podem tanto entrar quanto sair de um sistema. O princípio da conservação de energia estabelece que a

variação de energia líquida num dado sistema é igual ao balanço entre o montante que entra e o que sai do sistema (Çengel e Cimbala, 2007).

Segundo Popescu (2014), a equação de energia deve levar em consideração as parcelas cinética e potencial de energia, sendo representadas pelo termo $\rho \left(e + \frac{\overline{u^2}}{2} \right)$. Dessa forma, a equação de conservação de energia assume a estrutura da Equação 3.11.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{\overline{u^2}}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{\overline{u^2}}{2} \right) \vec{u} \right] = \nabla(k\nabla T) - \nabla(\vec{u}p) + \nabla(\vec{u}\vec{\tau}) + \rho \vec{g}\vec{u} \quad (3.11)$$

onde e representa a energia potencial; $\vec{\tau}$ a tensão de cisalhamento; k um coeficiente relativo à temperatura; e T a temperatura.

3.2.2. Advecção e Dispersão

Uma carga poluidora, quando lançada em um corpo hídrico, sofre uma série de modificações de natureza química/biológica e hidrodinâmica. As reações químicas que se iniciam definem como a carga de poluentes se comportará no ambiente aquático. Os processos hidrodinâmicos, por sua vez, desempenham a função de transportar o material do local de geração (Ji, 2008). Nesse contexto, os mecanismos de *advecção* e *dispersão* estão entre os principais responsáveis por favorecer esse espalhamento do poluente.

O processo de advecção corresponde ao fluxo horizontal que não altera as propriedades da substância transportada. O princípio básico é mover o material de uma posição inicial para outra final sem, contudo, provocar sua diluição ou modificação (Chapra, 2008). Em contrapartida, o termo convecção indica o processo de transporte vertical de poluentes na coluna de água (Ji, 2008).

A dispersão, por sua vez, refere-se ao movimento aleatório das partículas de um dado material. No sentido físico, a ideia é que, ao longo do tempo, ocorra uma redução do gradiente de concentração do material, mas com reduzido deslocamento do seu centro de massa. Em termos de escala, a dispersão pode ser do tipo *molecular*, consequência do movimento Browniano, ou do tipo *turbulento*, devido à redemoinhos. No ambiente aquático, a dispersão ocorre com qualquer substância dissolvida (Chapra, 2008; Ji, 2008).

Conforme as dimensões do corpo de água, o grau de agitação ou mistura e os efeitos de forçantes externas, como vento e lançamentos de efluentes, os processos de advecção e

dispersão podem ser tanto mais atuantes quanto negligenciados, considerando os efeitos de outros agentes externos. Contudo, vale destacar que, em menor ou maior escala, esses processos hidrodinâmicos de transporte são atuantes e podem/devem ser incluídos nas modelagens de qualidade da água.

3.2.3. Balanço de Massa

Baseado no princípio de conservação da massa, a variação na concentração do constituinte pode ser calculada pela Equação 3.1, contabilizando entradas, saídas, reações e trocas no sistema, podendo ser representada, para o caso unidimensional, pela Equação 3.12.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S + R + QL \quad (3.12)$$

em que o C representa a concentração do reagente, t , o tempo, x , a distância, U , a velocidade de advecção no eixo x , D , o coeficiente de dispersão e mistura, o termo à esquerda representa a variação líquida da concentração no tempo (volume de controle), o primeiro à direita, a advecção, o segundo, a dispersão, S , a sedimentação, R , a taxa de reação, e QL , as cargas externas ao sistema (Ji, 2008).

3.2.4. Forçantes Externas e Circulação Vertical

Conforme definido por Ji (2008), os processos hidrodinâmicos são influenciados por três principais forçantes externas aos sistemas de lagos e reservatórios, são elas a troca de calor entre o corpo de água e a atmosfera, os fluxos afluentes e efluentes ao sistema e as correntes de vento. Nos últimos anos, a influência dos processos físicos de mistura em lagos e reservatórios tem sido reconhecidamente um dos principais fatores capazes de interferir nas características químicas e biológicas desses corpos de água (Reynolds, 1984 *apud*. Falconer *et al.*, 1991).

A temperatura da água é dependente de dois fatores principais: o fluxo de calor na superfície e o transporte de água para dentro e para fora do sistema. Os processos de maior relevância no balanço de temperatura dos corpos de água são as trocas de calor com a atmosfera, os quais podem ser radioativos, derivados do bombardeamento de ondas curtas oriundas do sol e ondas longas refletidas pela atmosfera, e por transferências turbulentas de calor, incluindo as provocadas pela evaporação (calor latente) e pela diferença entre as temperaturas da superfície de água e o ar adjacente (calor sensível) (Ji, 2008).

A evaporação é o principal mecanismo de perda de calor por um lago. Em razão do alto calor latente de vaporização (590 cal/g), a superfície líquida deve ceder grande quantidade de energia para permitir o desprendimento de partículas da água para o ar. Ressalta-se que esse processo ocorre apenas no topo da coluna de água e que a taxa de evaporação é estritamente dependente do gradiente de pressão de vapor na fronteira que separa o ar da massa de água. O fluxo de calor sensível, por sua vez, ocorre pela combinação dos processos de condução e convecção, e é controlado pela ação dos ventos e pela estabilidade do ar sobre a superfície de água. As trocas de calor por condução térmica entre o ar adjacente e a superfície da água, e vice-versa, só influenciam uma fina camada de água na superfície do lago. Abaixo dessa camada, o calor sensível é conduzido majoritariamente através de processos turbulentos e convectivos (Lerman, 1978).

Os fluxos de água afluentes aos lagos e aos reservatórios incluem rios, escoamento superficial, lançamentos de efluentes de estações de tratamento de esgoto e contribuição da água subterrânea. A densidade de cada tipo de afluente, influenciada pelos parâmetros temperatura, salinidade e sólidos em suspensão, impacta na forma como o fluxo reage ao atingir o reservatório. Caso não exista diferença de densidades entre o afluente e o corpo hídrico, as águas serão rapidamente misturadas. Do contrário, a mistura será comprometida e o fluxo entrará no corpo hídrico sob três maneiras possíveis, por sobre o nível de água (*overflow*), em uma posição intermediária (*interflow*) ou sob a coluna de água (*inflow*). Cada forma de afluência resulta em diferentes graus de mistura (Ji, 2008).

As correntes de vento incidentes sobre lagos e reservatórios, por sua vez, exercem tensões de cisalhamento na superfície, transferem momento do ar para a coluna de água e condicionam o movimento das ondas a terem a mesma direção do vento. Os efeitos sobre as massas de água dependem das dimensões do lago e, principalmente, da profundidade (Ji, 2008). A extensão da camada de água influenciada pela ação dos ventos é definida pela taxa de produção de turbulência e pelo empuxo provocado pelas trocas de calor na superfície (Haque, 2007). Em lagos rasos, os ventos podem provocar turbulência com intensidade suficiente para resuspender sedimentos do fundo para as outras camadas (Jin *et al.*, 2000). Os padrões verticais de movimentação das massas de água são de extrema importância para o ciclo de nutrientes nos lagos porque controlam o fornecimento de nutrientes para as plantas aquáticas e para os organismos na zona eufótica, além de determinarem as concentrações de oxigênio dissolvido no leito (Taub, 1984).

O processo de movimentação das massas de água induzida por ventos em um lago obedece ao padrão ilustrado na Figura 3.4. Inicialmente, a tensão provocada pelo vento conduz a lâmina de água superficial na direção incidente e promove a inclinação da superfície. A resistência exercida pela camada de sedimentos e macrófitas aquáticas promove a formação de um fluxo de direção contrária. A pequena inclinação na superfície da água tende a estabelecer um gradiente de pressão hidrostática para contrabalancear a tensão do vento. É possível que, como resultado da circulação do epilímnio, um outro fluxo com sentido contrário seja formado no hipolímnio (Ji, 2008)

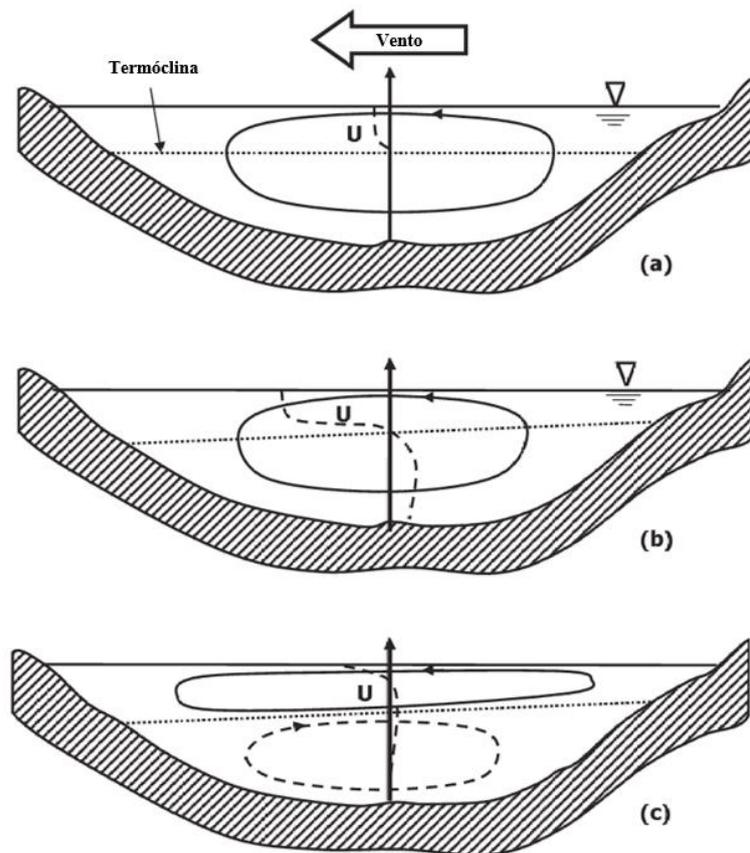


Figura 3.4 – Etapas da formação de circulação vertical num lago: (a) início a ação dos ventos, (b) situação de máxima tensão cisalhante sobre a termóclina e (c) padrão de circulação vertical estabilizado (Adaptada: Ji, 2008).

Os fluxos de vento incidentes na superfície dos corpos de água podem ser os principais responsáveis por promover a recirculação de massas de água ricas em nutrientes e auxiliar na dispersão de efluentes (George, 1981). A velocidade e direção das correntes de vento também desempenham papel fundamental na dinâmica da estratificação térmica em lagos. Embora o aquecimento da coluna de água resultante da radiação solar incidente seja a principal causa da estratificação térmica, a ação de ventos intensos, em determinados casos, pode se sobrepôr a esse processo e tornar-se o principal mecanismo de movimentação das

massas de água (Tuan *et al.*, 2009) e transferência de calor para as regiões mais profundas dos lagos e reservatórios (Lap e Mori, 2007).

3.2.5. Mecanismo de *Flushing*

O mecanismo de *flushing* é um processo hidráulico que consiste na remoção de materiais, principalmente poluentes, do corpo hídrico. Em termos ecológicos, o *flushing* pode ser um dos principais mecanismos responsáveis pela regulação da comunidade planctônica e, conseqüentemente, da qualidade da água em reservatórios. No estudo realizado por Reynolds *et al.* (2012), os autores verificaram que a concentração de clorofila-*a* relaciona-se inversamente à descarga do lago. De acordo a análise dos dados observados, foi percebido que a dinâmica de comunidade planctônica, quando o lago era submetido a baixas taxas de descarga, permitia o aumento da concentração e da variabilidade dos organismos, ao passo que, a elevadas taxas de descarga, a concentração de clorofila-*a* era substancialmente reduzida. Também foi verificado que o *flushing* produz diversos outros efeitos no corpo hídrico, incluindo efeitos na capacidade suporte, relativa à produção de fitoplâncton, na seleção de espécies, e no crescimento de comunidades estritamente dependentes de fatores sazonais. Resultados similares foram observados por Cañavate *et al.* (2015), que avaliaram a predominância de determinadas comunidades fitoplanctônicas quando submetidas a padrões sazonais de *flushing*.

Diante dos potenciais impactos causados pela proliferação de comunidades fitoplanctônicas em lagos e reservatórios, uma melhor compreensão dos efeitos que o mecanismo de *flushing* pode causar nas concentrações de nutrientes e nas comunidades fitoplanctônicas possibilita ao tomador de decisão estabelecer planos de operação do lago ou reservatório de modo a coibir o processo desenfreado de eutrofização.

3.3. MODELOS HIDRODINÂMICOS E DE QUALIDADE DA ÁGUA

Diante da complexidade das diversas interações envolvendo aspectos físicos, climáticos e hidrológicos em rios, lagos, reservatórios, estuários e zonas costeiras e dada a limitada disponibilidade de informações sobre variáveis atmosféricas, como umidade, temperatura ambiente e radiação solar, e outras relativas ao corpo hídrico, como vazão, turbidez e temperatura, os modelos numéricos surgem como uma ferramenta para auxiliar na compreensão do comportamento dessas variáveis e das interações realizadas com o meio aquático (Betancur-Pérez *et al.*, 2016).

A aplicação de modelos numéricos para simulação de sistemas aquáticos só é efetiva quando o usuário conhece os processos físicos que estão sendo modelados e compreende o modelo como um todo, principalmente em termos de limitações, conduzindo as etapas de calibração e verificação adequadamente. Os modelos hidrodinâmicos são comumente desenvolvidos com as características de multidimensionalidade e dependência temporal, além de incorporarem as análises de processos termodinâmicos, de mistura vertical e de superfície livre (Ji, 2008).

A seleção do modelo numérico mais adequado para simular uma dada situação, contudo, não é um processo muito simples, haja vista que existem diversos fatores diretamente envolvidos na seleção. De modo geral, a escolha do modelo apropriado para uma aplicação específica é guiada pelos questionamentos que o estudo se propõe a solucionar e por aspectos relativos às limitações do próprio modelo, da habilidade do modelo em trabalhar com determinado problema, da existência de informações para calibração e verificação, do tempo requerido para solucionar o problema, e de disponibilidade de recursos financeiros e computacionais (Wahl e Peeters, 2014; Betancur-Pérez *et al.*, 2016, Popescu, 2014).

3.3.1. Tipos de Modelos

No estudo de água superficiais, os modelos são comumente divididos em duas grandes categorias principais, são eles os modelos físicos e matemáticos. Os modelos físicos são desenvolvidos em uma escala previamente definida e utilizam a água para reproduzir o fluxo. No ambiente controlado do modelo, os parâmetros de interesse são mensurados e relacionados com o sistema hídrico de escala real. Os modelos matemáticos, por sua vez, propõem a representação dos processos a partir da resolução de equações matemáticas, as quais requerem, normalmente, o uso de métodos computacionais para serem resolvidas de maneira numérica. As duas categorias de modelos são complementares, embora nenhuma delas forneça representações idênticas ao ambiente natural, tendo em vista a complexidade dos sistemas aquáticos reais (Ji, 2008).

Segundo Ji (2008), os modelos matemáticos são fundamentados nos princípios físicos, químicos e biológicos que descrevem os fenômenos e as variações temporal e espacial dos sistemas aquáticos. Contudo, a proposta dos modelos não é constituir uma representação de todos os aspectos que compõe o ambiente, e sim incorporar nas análises os fenômenos e as características de maior interesse e relevância para um dado estudo.

Dentro do grande grupo de modelos matemáticos, existem diversas subcategorias de modelos formulados para a simulação de determinados fenômenos ou processos nos mais diversos ambientes naturais ou artificiais. Esses modelos normalmente adquirem a nomenclatura do tipo de estudo. Como exemplo podem ser mencionados os modelos hidráulicos, hidrodinâmicos, ecológicos, de qualidade da água, entre outros.

Atualmente, a estrutura de representação espacial dos modelos permite a simulação de processos e fenômenos em múltiplas dimensões, desde simples análises unidimensionais até complexas malhas em 3D (Wahl e Peeters, 2014). Os modelos matemáticos podem ser desenvolvidos em uma dimensão (1D), duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D), a depender do nível de acurácia requerida para analisar determinado processo e da complexidade do fenômeno em si (Boeriu *et al.*, 2011). Como exemplo, os modelos bi e tridimensionais são comumente empregados em simulações de grandes corpos de água, em que, nos sentidos horizontal e vertical, espera-se encontrar variações importantes nas características da água (Hamilton *et al.*, 1997).

Os modelos físicos desenvolvidos para representar fenômenos da natureza normalmente exigem muitos recursos para sua construção, principalmente quando se deseja construí-los em grande escala. Em contrapartida, modelos numéricos permitem a simulação de diversos cenários mais facilmente, comparativamente aos modelos físicos (Faghihirad *et al.*, 2010). No que se refere à representação dos processos de mistura em lagos e reservatórios, os modelos físicos são muito dispendiosos e não conseguem representar de forma realista as condições de contorno para a forçante atmosférica de vento e de leito, ou mesmo o mecanismo de transferência vertical de momento (Falconer *et al.*, 1991).

3.3.2. Equações e Considerações Fundamentais

As leis fundamentais que regem as equações dos balanços de massa, momento e energia compõem a base para o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos. Contudo, são equações bastante complexas para resolução de forma numérica, tornando-as inviáveis para aplicação em amplas regiões e/ou extensos períodos de análise. Neste contexto, faz-se necessária a aplicação de aproximações (Ji, 2008).

Nos tópicos seguintes serão abordadas as principais aproximações matemáticas utilizadas pelos modelos hidrodinâmicos que simplificam processos físicos e facilitam as operações matemáticas, resguardando um certo grau de fidelidade quanto aos fenômenos naturais.

3.3.2.1. Aproximação de Boussinesq

Na aproximação de Boussinesq, considera-se que a densidade do fluido é dependente apenas da temperatura, ignorando a influência da pressão (Zárete e Sengers, 2005). Conforme Drazin e Reid (1995), a fundamentação teórica para esta aproximação se deve ao fato que, em alguns fluxos, a variação de temperatura é mínima e, conseqüentemente, a densidade também varia pouco e, desse modo, a força de empuxo é a principal atuante no movimento. A formulação adquire a forma da Equação 3.13 quando há pequena diferença de densidade entre a superfície e o fundo da coluna de água.

$$\rho = \rho_0[1 - \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (3.13)$$

em que, ρ_0 é a densidade do fluido na temperatura θ_0 na parte inferior da coluna de água e α é o coeficiente de expansão volumétrica.

A aproximação de Boussinesq é comumente empregada na representação do empuxo em fluidos incompressíveis, particularmente nos casos onde a densidade independe da pressão da água (Ji, 2008).

3.3.2.2. Aproximação de Distribuição da Pressão Hidrostática

Em diversas aplicações nas áreas de hidrodinâmica, meteorologia e oceanografia, convencionou-se definir o gradiente de pressão na coluna de água como sendo oriundo apenas da pressão hidrostática, consideração decorrente da grande disparidade entre as escalas horizontal e vertical verificada na maioria dos corpos de água. A aproximação da pressão hidrostática considera que o gradiente vertical de pressão é equilibrado pela força de empuxo exercida pelo fluido. Essa premissa é válida considerando que a parcela de pressão devido à aceleração vertical assume valores significativamente menores, podendo então ser desprezada nos equacionamentos (Graebel, 2007; Ji, 2008).

Segundo Ji (2008), a equação do momento na vertical, derivada da equação de Navier-Stokes (Equação 3.10), pode ser escrita como:

$$\frac{dw}{dt} + g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

em que w representa a componente da velocidade na vertical, t o tempo, g a aceleração da gravidade, ρ a massa específica, p a pressão da água e z a coordenada vertical. Aplicando-se a aproximação de distribuição da pressão hidrostática, o termo dw/dt assume o valor zero, e, portanto, a Equação 3.14 adquire a forma da Equação 3.15.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (3.15)$$

Diversos modelos hidrodinâmicos disponíveis incluem a aproximação hidrostática na sua rotina de cálculos, partindo da premissa que a dimensão da profundidade do lago ou reservatório seja muito menor que a largura do espelho de água e que, portanto, a equação vertical do momento pode ser reduzida à aproximação da pressão hidrostática (Sisbahia-COPPE; DELTARES, 2014a; U.S. Environmental Protection Agency, 2007).

3.3.2.3. Condições Iniciais e de Contorno

Nas mais diversas aplicações, as equações hidrodinâmicas e de qualidade da água requerem condições iniciais e de contorno apropriadas para a representação dos fenômenos físicos, químicos e biológicos nos modelos hidrodinâmicos. Na resolução das equações de forma numérica, faz-se necessária a inserção dessas informações para estabelecer os limites e as condições iniciais dos fenômenos analisados (Zárate e Sengers, 2005; Ji, 2008).

As condições iniciais representam o estado em que se encontra o corpo hídrico no momento inicial da simulação, e os dados inseridos devem ser oriundos de outras fontes, não do resultado da própria simulação. Ressalta-se que as condições iniciais são necessárias apenas em simulações que consideram a dependência do tempo, dado que a evolução do sistema no tempo se dará conforme as condições impostas para o início do processo. As condições de contorno, por sua vez, referem-se às forçantes que condicionam a simulação do modelo, não sendo calculadas por ele, apenas afetando-o. As condições de contorno interferem em diversos processos hidrodinâmicos simulados pelo modelo, incluindo, correntes, taxas de mistura e transferência de calor (Ji, 2008).

3.3.2.4. Validação, Calibração, Verificação

Um modelo matemático selecionado para resolução de um determinado problema precisa ser avaliado por testes iniciais, calibração e verificação. Inicialmente, o modelo deve ser testado para simular um processo simples em pequena escala para qual os resultados sejam conhecidos, ou possam ser facilmente obtidos de forma analítica ou por medições. Esse processo assegura a adequabilidade do modelo em representar a situação em análise (Popescu, 2014). O modelo pode ser calibrado com dados experimentais e, em seguida, o desempenho do modelo é medido por meio da verificação.

Os processos de calibração e verificação são essenciais para o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água. Na etapa de calibração, o usuário deve selecionar um conjunto de valores para os parâmetros de interesse, estabelecendo uma amplitude aceitável de variação, com o intuito de minimizar as diferenças entre os resultados produzidos pelo modelo e os dados observados para uma determinada série de dados, definindo uma faixa mínima aceitável de acurácia. Na etapa subsequente, de verificação, um segundo conjunto de dados independentes é utilizado para avaliar a aptidão do modelo em representar o comportamento do corpo hídrico de forma realista (Tang *et al.*, 2017).

A qualidade da calibração é avaliada considerando um conjunto de critérios, os quais dependem dos objetivos propostos pelo modelador. Vale ressaltar que não é incomum que exista interdependência entre parâmetros, principalmente para modelos muito complexos, no sentido que a modificação de um deles repercute em outro, o que pode dificultar ou mesmo impedir a obtenção do conjunto de parâmetros ótimos. A verificação, por sua vez, deve ser objetiva e atender a diversos testes com o intuito de assegurar a validade das equações do modelo e do código computacional utilizados, considerando ainda as condicionantes do teste (Popescu, 2014).

3.3.3. Modelos Hidrodinâmicos Existentes

Nos últimos anos, diversos estudos foram desenvolvidos com modelos hidrodinâmicos uni, bi e tridimensionais de modo a avaliar os mais diversos fenômenos em rios, lagos, reservatórios, estuários e zonas costeiras, incluindo efeitos de estruturas hidráulicas nos processos hidrodinâmicos, morfológicos e de transporte de sedimentos (Faghihirad *et al.*, 2010), processos de flushing de reservatórios (Boeriu *et al.*, 2011; Omer *et al.*, 2017), modelagem da dinâmica de algas (Li *et al.*, 2014), qualidade da água (Wang *et al.*, 2014), padrões de circulação e estrutura térmica de reservatórios (Curtarelli *et al.*, 2014), entre outros.

Na Tabela 3.2 estão apresentados alguns dos principais modelos hidrodinâmicos disponíveis na atualidade, com uma breve descrição das características principais. Neste trabalho, optou-se por descrever com mais detalhes nos próximos tópicos os modelos MIKE 3, SisBaHiA, EFDC e Delft3D, sendo esse último o modelo selecionado para o desenvolvimento das simulações deste trabalho.

Tabela 3.2 – Alguns dos principais modelos hidrodinâmicos existentes.

Modelo	Nome Completo	Desenvolvedor	Características
CE-QUAL-W2	W2, Corps of Engineers, Quality Model for 2D Waterbodies	Portland State University	Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água bidimensionais para rios, lagos e estuários.
CH3D-WES	Curvilinear Hydrodynamics in 3D – Waterways Experiment Station	U.S. Army Corps of Engineers – WES (Chapman <i>et al.</i> , 1996)	Modelagem hidrodinâmica, de salinidade e de temperatura.
Delft3D		Deltares	Modelagem hidrodinâmica de fluxos, sedimentos, qualidade da água, processos ecológicos e outros.
WASP5/ DYNHYD5	Water Quality Analysis Simulation Program/Link-Node Dynamic Hydrodynamic Model	U.S. EPA (SCISOFTWARE)	Modelagem hidrodinâmica de ciclos variáveis de maré, vento e fluxo não-permanente.
EFDC	Environmental Fluid Dynamics Code	Tetra Tech / Virginia Institute of Marine Science (U.S. – EPA)	Modelagem hidrodinâmica de água superficial, qualidade da água em rios, lagos, reservatórios, estuários e wetlands.
ELCOM	Estuary and Lake COmputer Model	Centre for Water Research (CWR) – University of Western Australia (Laval e Hodges, 2000)	Modelagem hidrodinâmica acoplada a módulos termodinâmico e de transporte para a simulação do comportamento de corpos de água estratificados.
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System	U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2010)	Modelagem hidráulica de análise unidimensional de escoamento permanente e não permanente, transporte de sedimentos em canais e qualidade da água.
MIKE 3	Generalized Modeling Package – 3D – Water Quality Module	Dansk Hydraulisk Institut (Danish Hydraulic Institute) (MIKE, Powered by DHI)	Modelagem de fluxo em superfície livre, sedimentos ou qualidade da água.
POM	Princeton Ocean Model	Princeton University (Blumberg e Mellor, 1987)	Modelagem oceânica de processos costeiros de pequena escala até mudanças climáticas globais
SisBaHiA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) – UFRJ (SISBAHIA - COPPE)	Modelagem hidrodinâmica baseada em elementos finitos utilizado para previsão do escoamento e da qualidade das águas em corpos de água naturais

Conforme discutido anteriormente, a seleção do modelo mais adequado à uma dada situação deve ser guiada pelos questionamentos que o estudo se propõe a solucionar e por aspectos relativos às limitações do próprio modelo, da existência de informações para calibração e verificação, do tempo requerido para solucionar o problema, e de disponibilidade de recursos financeiros e computacionais (Wahl e Peeters, 2014; Betancur-Pérez *et al.*, 2016). Nesse contexto, e considerando ainda outros aspectos de relevância como disponibilidade de tutoriais, vídeos, fóruns e outras informações sobre forma de uso e aplicações do modelo, bem como a proposta de utilizar um modelo que se desenvolveu expressivamente nos últimos anos e que tem sido aplicado em diversas situações, apresentando bons resultados, foi selecionado o modelo hidrodinâmico Delft3D com o módulo de fluxo para o desenvolvimento do presente trabalho.

3.3.3.1. CE-QUAL-W2

Desenvolvido na *Portland State University* em parceria com a *U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station*, o CE-QUAL-W2 é um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água bidimensional, nas direções vertical e longitudinal. Tendo em vista que o modelo assume homogeneidade lateral nas simulações, é mais indicado para a representação de corpos hídricos com forma geométrica mais alongada e estreita, apresentando gradientes de qualidade da água nas direções vertical e longitudinal. O modelo tem sido aplicado em diversos tipos de corpos hídricos, incluindo rios, lagos, reservatórios e estuários, além de cenários baseados na combinação entre eles (Cole e Weels, 2015).

Na literatura especializada, diversos autores aplicaram o modelo na representação de corpos hídricos de interesse. No Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, Liporoni (2012) aplicou o CE-QUAL-W2 na representação do Lago Paranoá para avaliar a potencialidade do modelo nas simulações de qualidade da água e a aplicabilidade como ferramenta para auxílio na gestão de mananciais com usos múltiplos, incluindo diluição de efluentes tratados, abastecimento humano e atividades de recreação. O autor realizou uma análise de sensibilidade do módulo hidrodinâmico para identificar os parâmetros de maior influência, e em seguida conduziu as etapas de calibração e verificação. Dentre os resultados, o autor atestou a capacidade do modelo em representar satisfatoriamente as alterações nos dados de entrada e que o modelo poderia ser utilizado como auxílio na tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos do Distrito Federal.

Em outros estudos, foi avaliada a possibilidade de acoplar o modelo a outros programas, incorporando às análises outros processos que não são detalhadamente simulados pelo CE-QUAL-W2. No estudo desenvolvido por Debele *et al.* (2008), os autores integraram os modelos SWAT, modelo hidrológico de bacia hidrográfica, e o CE-QUAL-W2 para simular os processos combinados de quantidade e qualidade na bacia hidrográfica e no corpo de água. De modo a viabilizar a utilização de produtos do SWAT pelo CE-QUAL-W2, os autores desenvolveram um programa intermediário para extrair os resultados do SWAT e adequá-los aos padrões de entrada aceitos pelo CE-QUAL-W2. A área de estudo selecionada foi a bacia do reservatório *Cedar Creek*, no Texas (EUA). Os autores conduziram um conjunto de simulações para a calibração das parcelas hidrodinâmica e de qualidade da água. Por fim, os resultados indicaram que os modelos são compatíveis e que podem ser utilizados na avaliação e gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas complexas.

3.3.3.2. MIKE 3 Flow Model FM

Desenvolvido pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI), o modelo numérico MIKE 3 Flow Model FM (Flexible Mesh) é capaz de realizar diversos tipos de simulação em ambientes aquáticos em três dimensões, sendo primariamente projetado para a modelagens de aplicações complexas nas áreas oceanográfica, costeira e estuarina. Contudo, em virtude de ser um sistema de modelagem geral em múltiplas dimensões (bi e tridimensional) para fluxos em superfície livre, este também tem sido aplicado em estudos relativos a corpos hídricos continentais, como lagos e reservatórios, e inundações (MIKE Powered by DHI (b)).

O MIKE 3 é um modelo baseado em diferenças finitas que resolve as equações de Navier-Stokes considerando as aproximações de pressão hidrostática e de Boussinesq. Dessa forma, o modelo é constituído pelas equações de momento, temperatura, salinidade e densidade numa malha de coordenadas cartesianas (MIKE Powered by DHI (b)). O modelo também considera aspectos de variação de densidade, batimetria da região e forçantes externas, como elevações da superfície oceânica e aporte de fluxos de água doce (Leys, 2007).

Na literatura especializada, encontram-se relatos de aplicações do modelo numérico MIKE 3 em diversas áreas, como modelagem de fluxo tridimensional e transporte de sedimentos em regiões costeiras (Leys, 2007), de movimentação de plumas de

contaminação, incluindo de óleo (Elhakeem *et al.*, 2007), de eutrofização e de transporte de nutrientes (Rasmussen *et al.*, 2000).

Chen e Yan (2015) utilizaram o modelo MIKE 3 para realizar simulações numéricas dos impactos do lançamento de esgoto no ambiente marinho. As simulações foram direcionadas para avaliar os impactos dos compostos fenol volátil, cianeto e demanda química de oxigênio (DQO) no ambiente. Os resultados obtidos com o modelo indicaram que houve grandes mudanças nas concentrações dos poluentes em cada camada devido ao lançamento. Também foi notado que o lançamento de esgoto em regiões profundas provocou maiores impactos na camada de água adjacente e, conforme a aproximação com superfície, os efeitos eram gradualmente reduzidos. Por fim, percebeu-se uma boa aproximação entre os valores dos dados observados e os simulados pelo software, atestando a aplicabilidade do MIKE 3 para o caso em estudo.

No trabalho de Sokolova (2013), foi aplicado o modelo MIKE 3 para a simulação dos fluxos de água no lago Rådasjön e no rio Göta älv. A autora acoplou o MIKE 3 ao modelo microbiano de qualidade da água denominado ECO Lab, no intuito de realizar simulações de decaimento e transporte de contaminação de origem fecal. Os processos de calibração e verificação foram desenvolvidos para as simulações do lago e do rio. Entre as principais conclusões estabelecidas pela autora, destacaram-se a grande aplicabilidade dos modelos hidrodinâmicos na descrição e na predição da qualidade microbiológica da água em fontes de água potável; na capacidade de analisar fatores determinantes para o espalhamento da contaminação do corpo hídrico; na identificação da variabilidade microbiológica de qualidade da água nos âmbitos temporal e espacial; na previsão de curto prazo; e na avaliação de cenários hipotéticos.

Lowe *et al.* (2009) avaliaram os efeitos do resfriamento da pluma térmica lançada no rio *East River*, em Nova York, pela usina termelétrica de Charles Poletti, fazendo o uso do modelo MIKE 3. O *East River* conecta o porto de Nova York e o estuário de *Long Island Sound*, os quais são caracterizados por complexos comportamentos hidrodinâmicos. A malha numérica empregada no modelo foi baseada em elementos triangulares não-estruturados. Os autores obtiveram sucesso na etapa de calibração do modelo, utilizando os dados triaxiais de levantamento térmico de campo. Entre as principais conclusões do estudo, Lowe *et al.* (2009) sugeriram que, mesmo em cenários críticos, a pluma térmica produzida

pelo lançamento da usina de Charles Poletti não excederia os limites admissíveis pelas normas de regulação térmica.

3.3.3.3. SisBaHiA

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA) é um modelo computacional profissional desenvolvido pelo Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SiBaHiA). O SisBaHiA é um modelo numérico de elementos finitos que permite ao usuário a utilização de malhas numéricas ajustáveis aos contornos físicos da região estudada (Santos *et al.*, 2015). O modelo é constituído pelo modelo hidrodinâmico denominado FIST (*Filtered In Space and Time*), o qual é otimizado para corpos hídricos naturais, por modelos de qualidade da água e eutrofização, de transporte de sedimentos e evolução morfológica do fundo, de transporte Euleriano e Lagrangiano (Determinístico e Probabilístico), de geração e propagação de ondas e de análise e previsão de marés (Rosman, 2016).

O modelo tem sido aplicado em diversos trabalhos realizados no Brasil, incluindo análises relacionadas à estimativa de mudanças futuras em marés astronômicas (Barbedo *et al.*, 2014), simulações de impactos do lançamento de esgotos em ambientes aquáticos (Cunha *et al.*, 2006), estudo de processos hidrodinâmicos em regiões costeiras (Leite *et al.*, 2011), entre outros.

Santos *et al.* (2015) aplicaram o modelo hidrodinâmico SISBAHIA na modelagem do reservatório Água Preta, em Belém do Pará. A proposta dos autores foi simular as condições hidrodinâmicas do lago nas diferentes estações do ano com o intuito de identificar as regiões com maiores taxas de assoreamento. Constatou-se que a distribuição de velocidade do módulo manteve-se constante durante todos os meses do ano, independentemente da variação na direção predominante do vento. Vale destacar que em outros estudos, a influência exercida pelo vento foi muito mais expressiva nos modelos hidrodinâmicos.

Cunha *et al.* (2017) avaliaram o grau de dispersão de sementes no rio Maracá, no Baixo Amazonas, utilizando o modelo SisBaHiA. O transporte de sementes na água é condicionado pelas características das próprias sementes e por aspectos hidrodinâmicos do fluxo. A proposta dos autores foi avaliar até que ponto o modelo hidrodinâmico era capaz de estimar a dispersão das sementes. A partir das simulações realizadas com o SisBaHiA,

verificou-se que a distância de dispersão na estação chuvosa foi superior à distância na estação seca, indicando que o período de maior precipitação proporciona condições hidrológicas mais favoráveis para o transporte de sementes no rio Maracá. Por fim, os autores obtiveram resultados na mesma ordem de magnitude entre as médias das distâncias de dispersão observadas e as estimadas pelo SisBaHiA, indicando boa representatividade do modelo nesse tipo de simulação.

Cunha *et al.* (2006) também utilizaram o SisBaHiA na simulação de poluição produzida por lançamento de esgoto na baía de Sepetiba, próximo ao Rio de Janeiro. Nas simulações, os autores utilizaram as concentrações de oxigênio dissolvido (OD) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) como indicadores da presença de matéria orgânica no corpo de água e como parâmetros de avaliação da poluição ambiental. Eles também realizaram medições nos efluentes para identificar as concentrações lançadas de OD e DBO. Os resultados obtidos indicaram boa concordância entre os valores observados e simulados pelo SisBaHiA para as concentrações de OD e DBO. Os autores, contudo, salientam que, para uma melhor calibração do modelo, a série histórica de dados necessitaria ser mais extensa.

3.3.3.4. EFDC

Desenvolvido pelo *Virginia Institute of Marine Science*, o *Environmental Fluid Dynamics Code* (EFDC) é um modelo de domínio público, com código livre para acesso, desenvolvido para simulação de águas superficiais. O modelo disponibiliza os módulos hidrodinâmico, de sedimento, contaminantes e de qualidade da água, todos integrados em um código único (U.S. EPA).

O EFDC soluciona as equações tridimensionais de continuidade, movimento, pressão hidrostática na vertical (aproximação hidrostática), superfície livre e movimento turbulento para um fluido com densidade variável, considerando a aproximação Boussinesq. O modelo utiliza o sistema de coordenadas retangulares parametrizadas na vertical e cartesianas ou curvilíneas nas coordenadas horizontais. As equações de transporte para a energia cinética, salinidade e temperatura também são resolvidas pelo modelo. O EFDC possibilita a simulação de secagem e molhamento de áreas rasas, fazendo uso de um método conservativo de massa, além de disponibilizar alternativas para simulação de estruturas hidráulicas de controle de fluxo, como vertedores, comportas e galerias (U.S. EPA, 2007 e Park, 2005).

Nos últimos anos, o modelo EFDC foi aplicado em diversos estudos de modelagem de processos hidrodinâmicos (Wang *et al.*, 2014) e de qualidade da água (Tang *et al.*, 2017).

Wang *et al.* (2014) aplicaram o modelo EFDC para a simulação de processos hidrodinâmicos e de floração de algas no reservatório Miyun em Beijin, China. O reservatório Miyun é um dos maiores reservatórios da porção norte da China, sendo de grande importância para o fornecimento de água à população. Em razão da deterioração da qualidade da água verificada ao longo dos últimos anos, os autores realizaram a modelagem do comportamento hidrodinâmico e dos padrões de qualidade de água do reservatório. Os resultados indicaram que o EFDC foi capaz de gerar previsões aceitáveis dos padrões de qualidade da água, em que se pese a utilização de simplificações aplicadas no modelo.

Tang *et al.* (2017) utilizaram o modelo EFDC como suporte à decisão quanto ao controle de eutrofização no reservatório Shenzhen, na China. Os autores utilizaram o modelo para simular os processos físicos, químicos e biológicos que governam a dinâmica da eutrofização no reservatório. Os resultados obtidos indicaram que o modelo EFDC foi capaz de reproduzir com boa qualidade os padrões temporais e espaciais de qualidade da água do lago. Como conclusão, os autores sugeriram que, pela análise dos vários cenários desenvolvidos no estudo, seria difícil estabelecer um controle efetivo da eutrofização, tendo em vista que, para a redução da concentração de clorofila-*a*, seria necessária uma redução drástica na carga de nutrientes lançadas no reservatório ou um melhoramento nas condições hidráulicas das tubulações.

3.4. MODELO DELFT3D

A plataforma *Delft3D Flexible Mesh Suite* (Delft3D FM), desenvolvido pela Deltares, é constituída por modelos capazes de simular níveis de água e fluxo com precisão, correntes de ondas, transporte de sedimentos coesivos e não coesivos, processos de advecção e dispersão de poluentes, evolução de morfologia de leito, qualidade da água e processos ecológicos, além de analisar as interações entre esses processos nos âmbitos espacial e temporal, sendo comumente empregado na modelagem de ambientes costeiros, estuarinos e fluviais (Deltares; Deltares, 2014a).

O Delft3D é um programa de simulação multidimensional hidrodinâmica (e de transporte) que calcula fluxo não permanente e fenômenos de transporte resultantes de forçantes meteorológicas e de marés, em malhas retangulares ou curvilíneas. O modelo possibilita ao usuário trabalhar com malhas numéricas com refinado ajuste aos contornos do corpo hídrico, permitindo a representação apurada do ambiente aquático estudado. Entre outras características, o Delft3D soluciona as equações de conservação da massa e

quantidade do movimento e considera as aproximações hidrostática e de Boussinesq para a resolução de problemas hidrodinâmicos (Deltares, 2014a).

A plataforma de aplicativos Delft3D FM é constituída pelos módulos *D-Flow Flexible Mesh* (D-Flow FM), *D-Waves*, *D-Real Time Control*, *D-Particle Tracking*, *D-Morphology* e *D-Water Quality*, o qual inclui os módulos *D-Sediment Transport* e *D-Ecology*. A plataforma também disponibiliza ferramentas de pré-processamento como o RGFGRID, responsável por criar, modificar e visualizar malhas ortogonais e curvilíneas no módulo D-Flow FM, e o QUICKIN, desenvolvido para gerar a batimetria da área de estudo; e ferramentas de pós-processamento, incluindo os programas para análise e visualização de resultados QUICKPLOT e GPP (Deltares, 2014a; Deltares, 2014b; Deltares, 2014c).

O módulo a ser utilizado no presente trabalho será descrito a seguir. As informações sobre descrição conceitual do software foram obtidas dos manuais fornecidos pela Deltares.

3.4.1. Módulo de Fluxo (D-Flow Flexible Mesh)

O módulo D-Flow FM, componente central da plataforma, é um programa de simulação hidrodinâmica e de transporte, em malhas uni, bi e tridimensionais desenvolvido para o equacionamento de fluxos não-permanentes e fenômenos de transporte provocados pelo efeito das marés e forçantes meteorológicas, incluindo os fluxos causados pela diferença de densidade devido à não homogeneidade da distribuição de temperatura e salinidade. Este módulo é capaz de produzir malhas curvas que podem ser constituídas por triângulos, quadrados, pentágonos e hexágonos, permitindo a seleção dos sistemas de coordenadas Cartesiano ou esférico. O D-Flow FM é constituído pelas equações horizontais de movimento, pela equação da continuidade e pelas equações de transporte para elementos conservativos (Deltares, 2014a; Deltares).

3.4.1.1. Especificações e Considerações do Modelo D-Flow

O módulo hidrodinâmico D-Flow foi construído para resolver as equações tridimensionais de águas rasas em duas e três dimensões. O conjunto de equações é constituídos pelas equações de movimento (horizontal), continuidade e transporte para constituintes conservativos. Os sistemas de coordenadas suportados são o curvilíneo ortogonal e o esférico. Algumas das principais considerações e aproximações do modelo estão apresentadas a seguir. As informações foram retidas do manual do modelo D-Flow (Deltares, 2014a).

- O Delft3D possibilita ao usuário a utilização dos sistemas de coordenadas sigma (σ) ou Z no eixo vertical. No sistema sigma, considera-se que a profundidade do corpo hídrico é muito menor que a escala horizontal. Nesse contexto, torna-se válida a consideração de águas rasas, o que implica na redução da equação de momento vertical à relação de pressão hidrostática.
- O efeito produzido pela variável da densidade só é contabilizado no termo de pressão, tendo em vista a aproximação de Boussinesq.
- No sistema de coordenadas cartesiano, o efeito da curvatura da Terra é desconsiderado. Desse modo, o parâmetro de Coriolis é assumido como uniforme ao longo de toda a extensão do projeto, salvo em casos especificados pelo usuário.
- As equações implementadas no modelo Delft3D permitem a resolução das escalas turbulentas (*large eddy simulation*), embora as malhas hidrodinâmicas normalmente sejam muito grosseiras para resolver as flutuações. Desse modo, as equações básicas utilizadas são fundamentadas nas equações de tensão de Reynolds.
- No seu módulo de fluxo do Delft3D, os vórtices turbulentos são limitados pela profundidade da coluna de água. A contribuição desses mecanismos às trocas verticais de momento horizontal e de massa é modelada por meio dos coeficientes de viscosidade vertical turbulenta e de difusividade turbulenta. Considera-se que os coeficientes sejam proporcionais a escalas de profundidade e de comprimento. É possível que os coeficientes sejam determinados pelo usuário (valor constante) ou que sejam computados através dos modelos de turbulência algébrico do tipo $k - L$ ou $k - \varepsilon$, onde k representa a energia cinética turbulenta, L , o máximo comprimento de mistura e ε , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta.
- Em concordância com a razão aspecto para fluxo em águas rasas, a formação de turbulência fundamenta-se no gradiente vertical de fluxo horizontal.
- Considera-se que uma célula da malha seja “seca” quando os quatro pontos de velocidade circundantes também sejam “secos”, ou quando a profundidade da coluna de água no centro da célula está abaixo de zero (volume negativo).
- O fluxo de massa através dos contornos laterais e do fundo é considerado nulo.
- Caso não haja especificação prévia do usuário sobre o parâmetro de temperatura, as trocas de calor pela superfície livre são assumidas nulas. A perda de calor pelo fundo é sempre considerada zero.

3.4.2. Aplicações do Modelo

Na pesquisa bibliográfica conduzida neste trabalho, não foram encontrados relatos de aplicação do modelo Delft3D em simulações sobre os efeitos do procedimento de operação de reservatórios em relação às possíveis melhorias na qualidade da água, os quais serão objeto de estudo deste trabalho.

Diversos autores atestaram a aplicabilidade do modelo Delft3D em simular processos hidrodinâmicos e qualidade da água em vários ambientes. Chanudet *et al.* (2012) aplicaram o módulo Delft3D-Flow na avaliação da qualidade da água do novo reservatório de hidrelétrica Nam Theun 2 (volume máximo de 3,5 bilhões de m³), na República Democrática Popular do Lao. A escolha do modelo tridimensional se deveu à alta complexidade da forma, da batimetria, da variação sazonal do nível de água e da cobertura do solo, e teve por objetivo a análise hidrodinâmica e ecológica da qualidade da água. Como dados de entrada necessários às simulações, os autores incluíram informações meteorológicas, como temperatura do ar, velocidade e direção do vento, umidade relativa, radiação solar e precipitação, e dados de vazões afluentes e efluentes ao reservatório. Os resultados obtidos indicaram boa correspondência tanto entre os valores de temperatura observados e simulados quanto dos valores observados e simulados da velocidade das correntes.

No trabalho realizado por Wahl e Peeters (2014), foram avaliadas as implicações das mudanças climáticas no lago Constance utilizando a versão livre (*open-source*) do software Delft3D Flow. Segundo os autores, o modelo hidrodinâmico foi capaz de reproduzir satisfatoriamente a distribuição vertical de temperatura durante o período analisado de 50 anos. A boa concordância entre os dados observados e os simulados pode ser interpretado como um indicativo de que simulações de estratificação térmica com extensos períodos utilizando modelos tridimensionais são confiáveis e podem fornecer informações importantes para auxiliar nas análises de possíveis consequências das mudanças climáticas em processos térmicos de estratificação em lagos e em mecanismos hidrodinâmicos de mistura. Segundo os autores, este foi um dos primeiros trabalhos desenvolvidos na área em que se optou por aplicar um modelo hidrodinâmico tridimensional ao invés do modelo unidimensional, comumente empregado em estudos anteriores.

Akurut *et al.* (2017) utilizaram os módulos Delft3D-Flow e Delft3D-Water Quality na investigação dos processos hidrodinâmicos e de qualidade da água na *Inner Murchison Bay* (IMB), localizada em Uganda na parcela ao norte do Lago Victoria. Essa porção do lago

é afetada por diversos processos complexos, como poluição, aporte de rios afluentes, variações nos níveis de água e populações de fauna e flora residentes. A proposta dos autores foi acoplar ambos os módulos do Delft3D de modo a avaliar o comportamento dos processos relacionados ao oxigênio, tanto orgânico quanto inorgânico, e identificar as variações de oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e íon amônio (NH_4^+). Entre as principais conclusões do estudo, os autores observaram que, entre o período de 2001 a 2014, houve um aumento na concentração de nutrientes e matéria orgânica da IMB, particularmente DBO e NH_4^+ , que foi diretamente relacionada ao aumento da carga de poluição recebida pelos córregos afluentes nessa área. Outro aspecto identificado nas simulações foi a influência na deterioração da qualidade da água em virtude do longo tempo de residência no local.

No estudo desenvolvido por Pavlyukova (2014), foi produzido um modelo tridimensional do *Head of Passes and Bird's Foot Delta*, no rio Mississippi. O modelo, construído a partir do Delft3D, foi desenvolvido para simular os processos hidrodinâmicos e de transporte salino no delta *Head of Passes*. A proposta do trabalho foi calibrar, validar e utilizar o modelo para antever possíveis respostas do rio quando submetido a determinados estímulos, tais como obstruções, modificações e desvios de canais, intrusão de água salina e dragagem. Três diferentes cenários de simulação foram propostos. O modelo foi calibrado com sucesso e empregado nas simulações dos diferentes cenários.

Omer *et al.* (2017), por sua vez, acoplaram o Delft3D com a ferramenta de controle em tempo real RTC para avaliar os efeitos de diferentes padrões de abertura de comportas no reservatório Funagira, localizado no rio Tenryuu (Japão), na morfologia e na hidrodinâmica a jusante do barramento. O estudo tinha por objetivo central a melhora do processo de flushing e auxiliar na compreensão sobre como esse processo interfere na morfologia da região. No rio a jusante da barragem era possível verificar a presença de bancos de sedimentos e áreas erodidas em função do padrão de abertura das comportas em forma piramidal. Foram utilizadas como condições de contorno três hidrógrafas com diferentes picos. Os resultados do trabalho indicaram que houve pouca variação no padrão de erodibilidade e deposição entre os diferentes cenários de abertura das comportas e que o RTC é bastante recomendado para ser utilizado acoplado ao Delft3D na representação de barragens ou estruturas hidráulicas.

3.5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Lago Paranoá, localizado no Distrito Federal, foi o objeto de estudo do presente trabalho. Nesse contexto, uma breve caracterização do Lago e da bacia de contribuição foi apresentada em termos de seus aspectos físicos gerais, bem como um histórico de eutrofização e os procedimentos propostos/implementados para solução do problema.

3.5.1. Aspectos Gerais

O Lago Paranoá foi criado a partir do barramento do rio Paranoá, iniciado em setembro de 1959, represando as águas do Riacho Fundo, do Ribeirão do Gama e do Córrego Cabeça de Veado, ao sul, e do Ribeirão do Torto e do Córrego Bananal, ao norte, além de outros pequenos tributários (Ferrante *et al.*, 2001). O Lago Paranoá foi criado com o propósito de melhorar o microclima da região, possibilitar a produção energética para o abastecimento da nova capital e proporcionar opções de lazer à população (GDF, 2010).

A bacia hidrográfica do Lago Paranoá compreende uma área de aproximadamente 992 km², sendo constituída por cinco principais sub-bacias: do Ribeirão do Torto/Santa Maria e do Ribeirão Bananal, ao norte, do Riacho Fundo, do Ribeirão do Gama e do Córrego Cabeça de Veado, ao sul. Além desses principais afluentes, o Lago recebe a contribuição oriunda da área de drenagem direta da bacia do Lago Paranoá e de sub-bacias menores localizadas na porção leste. Na área da bacia estão localizadas as Regiões Administrativas (RAs) do Plano Piloto (Asa Norte e Asa Sul), Lago Sul, Lago Norte, Guará, Núcleo Bandeirante, Candangolândia, Cruzeiro, Setor de Indústrias, Octogonal, Setor Sudoeste, Riacho Fundo, Águas Claras e Areal (GDF, 2010). A Figura 3.5 apresenta o mapa de localização da bacia do Lago Paranoá juntamente com a delimitação das regiões de cada sub-bacia, ou Unidade Hidrográfica (UH).

Assim como na Figura 3.5, todos os demais mapas incluídos neste trabalho foram desenvolvidos com auxílio do software ArcGIS Desktop 10.5, da ESRI, e as camadas, ou *shapefiles*, das Unidade Hidrográficas, do Setor Censitário e da Hidrografia do Distrito Federal foram concedidas pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa) e, portanto, correspondem às informações oficiais aprovadas pelo Conselho de Recursos Hídricos e pelo Governo do Distrito Federal, até a data de elaboração do presente trabalho.

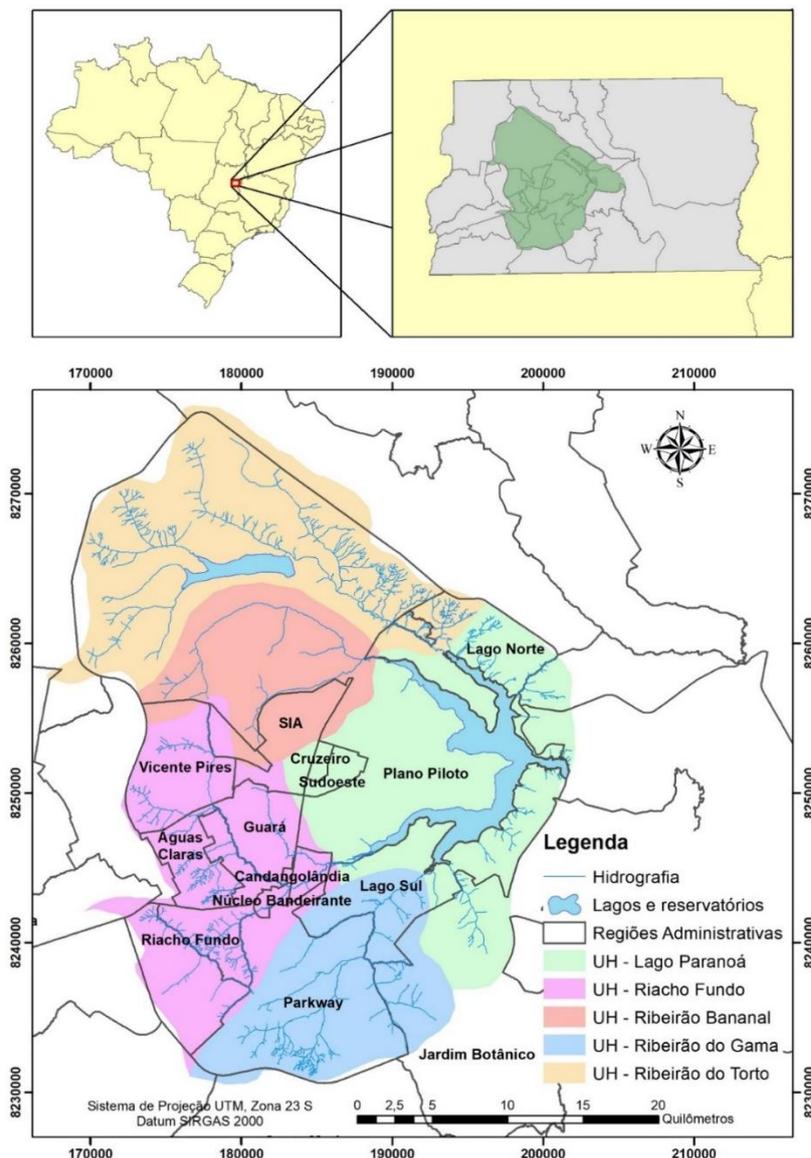


Figura 3.5 – Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá, com as subdivisões das UHs (Elaborada pelo autor).

O Lago também recebe os efluentes de duas principais Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) operadas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb). As ETEs Norte e Sul utilizam o processo de tratamento de Lodos Ativos modificados para remoção biológica de nutrientes, seguido de polimento químico por flotação para a remoção de fósforo (Caesb). Esse tratamento, a nível terciário, assegura a remoção de fósforo para controle da proliferação de algas. A ETE Riacho Fundo I também lança seus efluentes de tratamento em tributário do Lago Paranoá, com menores vazões.

Após o término de construção do barramento, ainda no ano de 1959, o Lago Paranoá atingiu sua cota máxima de 1000 m acima do nível do mar. Após o completo enchimento, o Lago contava com uma área superficial de aproximadamente 37,50 km², volume total de

498x10⁶ m³, profundidade máxima de 38 m e tempo de retenção de 299 dias, estando localizado nas coordenadas de Latitude 15° 46' 25" S e Longitude 47° 51' 38" W (Ferrante *et al.*, 2001). A Usina do Paranoá, instalada junto ao barramento, é considerada como usina a fio d'água e possui potência instalada de 30 MW e garantia física de 13 MW (CEB, 2015).

O clima predominante da região é classificado, segundo Köppen, de “tropical de Savana”, concentrando cerca de 84% da precipitação média, que varia de 1.200 mm a 1.700 mm, no período de chuvas, entre os meses de outubro e abril. A temperatura média anual da região oscila entre 18°C e 22°C (Ferrante *et al.*, 2001).

3.5.2. Aspectos Legais do Monitoramento de Nível do Lago Paranoá

A Adasa, no âmbito de suas atribuições, deu início em janeiro de 2011 ao controle sistemático das cotas do Lago Paranoá. Conforme disposto na Resolução Adasa nº 09/2010, em dezembro de cada ano, o Grupo de Acompanhamento dos Níveis Altimétricos do Lago Paranoá, constituído por instituições ligadas de forma direta ou indireta ao Lago, deve se reunir para estabelecer os níveis altimétricos do espelho de água a serem mantidos durante o ano subsequente. Desde o referido ano, a Agência disponibiliza relatórios de acompanhamento de nível para o Lago, apresentando os limites máximos e mínimos mensais para o ano, bem como o registro observado de cota realizado pela Companhia Energética de Brasília (CEB). Na Figura 3.6 é apresentada a evolução das definições de cotas máximas e mínimas com base nas resoluções produzidas ao longo dos anos pela Adasa, bem como as cotas registradas pelo monitoramento da CEB. Os valores observados para o ano de 2019 estão atualizados até a data de 6 de março de 2019.



Figura 3.6 – Gráfico comparativo da evolução dos valores das cotas máximas e mínimas estabelecidas em Resoluções pela Adasa e dos registros da CEB (Elaborada pelo autor).

É possível notar que houve uma manutenção das cotas altimétricas mínimas e máximas estabelecidas pela Adasa ao longo dos anos. Em 2019, contudo, o nível máximo

para a manutenção do espelho de água foi reduzido para 1.000,30, conforme disposto na resolução nº 33 de 13 de dezembro de 2018. A resolução estabeleceu ainda que fossem permitidas oscilações de no máximo 2 cm abaixo dos níveis altimétricos definidos, para casos de procedimentos operativos da PCH (Pequena Central Hidrelétrica), contanto que o nível seja reestabelecido aos patamares mínimos em, no máximo, 2 dias, sujeito à aplicação de penalidades à concessionária CEB em caso de descumprimento.

Em termos de vazão remanescente a jusante da barragem, a resolução nº 33 de 2018 estabeleceu a manutenção do regime mínimo de vazões em 700 L/s, durante o período de estiagem (maio a outubro), e de no mínimo 1.200 L/s durante o período chuvoso (novembro a abril), com o intuito de manter as condições ecológicas essenciais para a manutenção do ambiente lótico do trecho a jusante da barragem.

3.5.3. Eutrofização e Medidas Mitigadoras

Embora na bacia do Lago Paranoá exista várias áreas de preservação ambiental, o intenso processo de ocupação territorial verificados nas últimas décadas tem provocado significativos impactos ambientais, repercutindo negativamente na qualidade da água (GDF, 2010).

Em virtude de sua posição em relação ao Plano Piloto, o Lago Paranoá começou a ser impactado por ações antrópicas desde a instalação da capital, e no início da década de 70 já era possível verificar sinais de eutrofização. Posteriormente, estudos e pesquisas desenvolvidas sobre o Lago Paranoá constataram, entre outros aspectos, que o nitrogênio e o fósforo eram os elementos mais importantes no processo de eutrofização, sendo este último o elemento limitante no crescimento das algas; que o processo de eutrofização era reversível e alimentado por fontes externas; e que o principal aporte de nutriente no Lago era devido às cargas de esgotos sanitários, passíveis de controle (Burnett *et al.*, 2001).

No mês de novembro de 1978 foi registrado o maior desastre ecológico no Lago Paranoá, resultante do processo de crescimento descontrolado de microalgas, denominado floração. Diante da disponibilidade de nutrientes e condições climáticas favoráveis, a espécie de cianobactéria *Microcystis aeruginosa* teve um rápido e intenso crescimento, repercutindo em diversos impactos ambientais, incluindo a mortandade de peixes, que se repetiu outras vezes durante a década de 80. Já em 1982, um novo problema surge envolvendo o crescimento desenfreado de macrófitas aquáticas, também provocado pela grande concentração de nutrientes no corpo hídrico (Burnett *et al.*, 2001).

Nesse contexto, diversos programas e ações foram firmadas entre diferentes órgãos para solucionar o problema recorrente de eutrofização do Lago. Em 1976 foi iniciado um programa de monitoramento dos quatro grandes braços do Lago pela Caesb e do corpo central, visando melhorar a qualidade da água. O sistema de tratamento das ETEs Norte e Sul, antes alcançando apenas o nível secundário, com baixo grau de remoção de nutrientes, foi melhorado para reduzir o aporte de nitrogênio e fósforo no Lago. Outros procedimentos também foram testados com o intuito de evitar o processo de eutrofização, incluindo o lançamento de algicida (sulfato de cobre) para conter o crescimento das algas e a necessidade de abertura abrupta das comportas do reservatório para promover a descarga rápida da água (*flushing*).

No ano de 1998, durante uma floração de cianobactérias, foi realizado o deplecionamento rápido do nível de água do Lago (*flushing*), presumidamente removendo parcela da comunidade fitoplanctônica. No estudo realizado por Angelini *et al.* (2008), os autores avaliaram três intervenções realizadas no Lago, sendo elas o início da operação das ETEs Norte e Sul (01/1993), o pleno funcionamento das ETEs (01/1996) e o evento de *flushing* (11/1998). Os autores sugeriram que, embora as duas primeiras intervenções tenham promovido a redução de 70% no aporte de nitrogênio e fósforo ao Lago (Cavalcanti *et al.*, 1997), a melhora no tratamento, naquele momento, não foi suficiente para aumentar a transparência da água e reduzir a biomassa de fitoplâncton. A provável hipótese sugerida por eles baseia-se na ideia de que a abundância de fitoplâncton e fósforo presente no Lago era tamanha que o sistema conseguia se retroalimentar, de modo que a mortalidade das algas fornecia a carga de fósforo para o desenvolvimento de novas florações. Essa estabilidade da condição de eutrofia do Lago teria sido interrompida apenas com a terceira intervenção (*flushing*), que teria removido grande quantidade de biomassa fitoplanctônica e de fósforo do Lago Paranoá. Conforme verificado na época, os autores observaram que, para a maioria dos pontos de monitoramento analisados, a transparência da água após o procedimento do *flushing* aumentou em mais de um metro de profundidade, atingido quase dois metros na zona central do reservatório.

A Figura 3.7 ilustra a evolução dos registros monitorados pela Caesb de clorofila, oxigênio dissolvido e temperatura, ao longo dos anos de 1976 a 2012, para um ponto de monitoramento próximo à barragem do Lago Paranoá. Pelo gráfico, é possível observar houve um pequeno impacto na concentração de clorofila provocado pela operação das ETEs Norte e Sul, principalmente entre 1995 até o início de 1998. O maior impacto, contudo, é

claramente observado a partir do final de 1998, ano em que foi realizado o procedimento do *flushing*, liberando uma grande quantidade de água pelos vertedores. Após esse período, nota-se que foi estabelecida uma nova condição de trofia no Lago, em que a variação média anual da concentração de clorofila se reestabeleceu em patamares significativamente menores aos observados anteriormente.

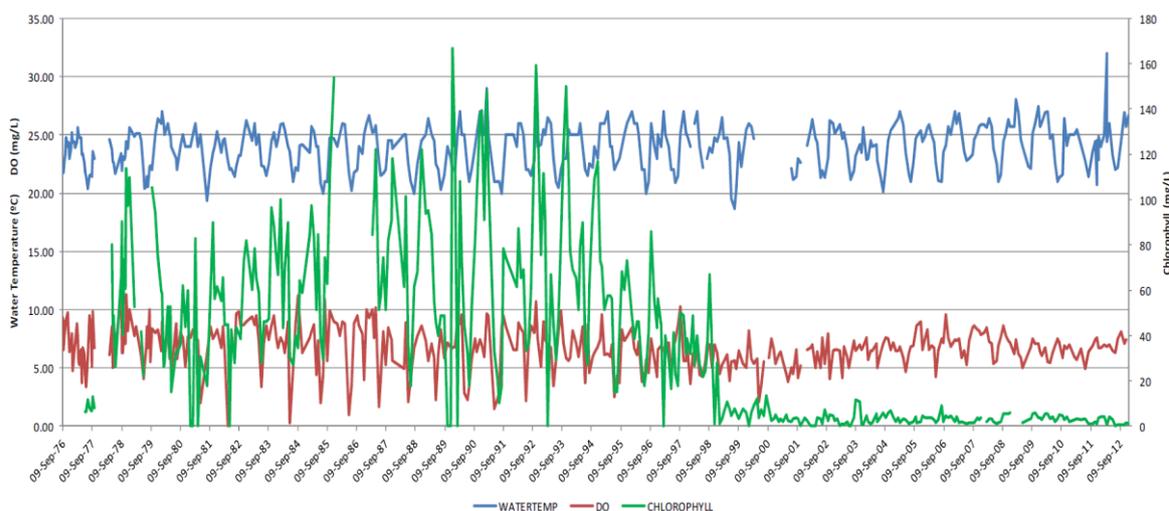


Figura 3.7 – Dados monitorados de clorofila, oxigênio dissolvido e temperatura de 1976 a 2012, em um ponto de monitoramento da Caesb próximo à barragem do Lago Paranoá (Minoti, 2019).

A partir dos resultados obtidos com o *flushing*, em termos da melhoria na qualidade da água no Lago Paranoá, iniciaram-se debates entre diversas instituições do Distrito Federal, incluindo Adasa, Caesb, CEB e UnB, acerca das possíveis implicações geradas na execução desse processo, incluindo conflitos de interesse entre as entidades governamentais.

Se por um lado a abertura das comportas promoveria a remoção da carga de nutrientes e biomassa do Lago, em que pese o pouco conhecimento sobre sua efetividade, reduzindo os riscos de floração de algas e cianobactérias, por outro lado a liberação da água por essa estrutura representa uma “perda” em termos de potencial hidráulico desperdiçado, tendo em vista que este poderia ter sido utilizado na geração de energia elétrica pelas turbinas. Outros questionamentos podem ser levantados sobre os impactos do *flushing*, tanto a montante quanto a jusante Lago, como inviabilizar, em algumas regiões, o uso recreacional do espelho d’água em virtude da baixa profundidade e eventuais danos às áreas às margens dos rios a jusante da barragem devido à onda de cheia.

4. METODOLOGIA

A metodologia para a realização da modelagem hidrodinâmica consistiu em quatro grandes etapas. Na primeira são descritas todas as informações de entrada necessárias para a construção do modelo no Delft3D, incluindo dados morfométricos, hidrológicos, climatológicos e da estrutura do barramento. Em seguida é apresentado o procedimento para a construção da malha numérica do reservatório, incluindo especificações quanto à qualidade do grid. Na terceira etapa são detalhados os procedimentos e dados utilizados para a construção do modelo hidrodinâmico no módulo D-Flow. Por fim, são apresentados os diversos cenários a serem simulados no modelo hidrodinâmico.

4.1. BASE DE DADOS PARA ENTRADA NO MODELO

As simulações desenvolvidas no Delft3D módulo D-Flow FM requerem a inserção de basicamente quatro tipos de dados de entrada no modelo, sendo eles: morfométricos (contorno e levantamento batimétrico do Lago), hidrológicos (vazões afluentes), climatológicos (cobertura de nuvens, umidade relativa, temperatura do ar, radiação solar, precipitação, evaporação e velocidade e direção do vento), e da estrutura e operação da barragem do Lago (vazões efluentes e cotas de nível de água).

Nesse contexto, a etapa inicial do desenvolvimento deste trabalho foi direcionada para a coleta de informações disponíveis em órgãos públicos Distritais e Federais. De posse dos dados, a etapa seguinte consistiu em estruturar as informações no padrão de entrada estabelecido pelo modelo, utilizando-as como condições iniciais e de contorno. Alguns dos dados também foram utilizados nas etapas de calibração e verificação, onde foram comparados com os resultados produzidos pelo modelo. Foi definido o ano 2017 como o referencial para a coleta de todas as séries de dados de entrada.

4.1.1. Dados Morfométricos

Os dados morfométricos do Lago Paranoá foram obtidos no âmbito do Convênio N° 01/2017 – Adasa – UnB, em estudo desenvolvido pelo Instituto de Geociência da Universidade de Brasília e coordenado pelo professor Henrique Llacer Roig. Esse levantamento topobatimétrico do Lago Paranoá foi finalizado no ano de 2018, resultando em uma malha de pontos com resolução espacial de 5x5 metros, gerados pelo programa Surfer. O modelo de elevação desenvolvido no levantamento integrou tanto a batimetria quanto a topografia do Lago Paranoá, incluindo regiões com altitudes superiores à cota 1.097 m,

conforme apresentado na Figura 4.1. A maior profundidade dentro do Lago está na cota 961,5 m e localiza-se numa região próxima ao barramento. Considerando que a cota máxima operacional do Lago atinja o valor de 1.000,80 m, o ponto mais profundo teria uma profundidade aproximada de 39,3 m

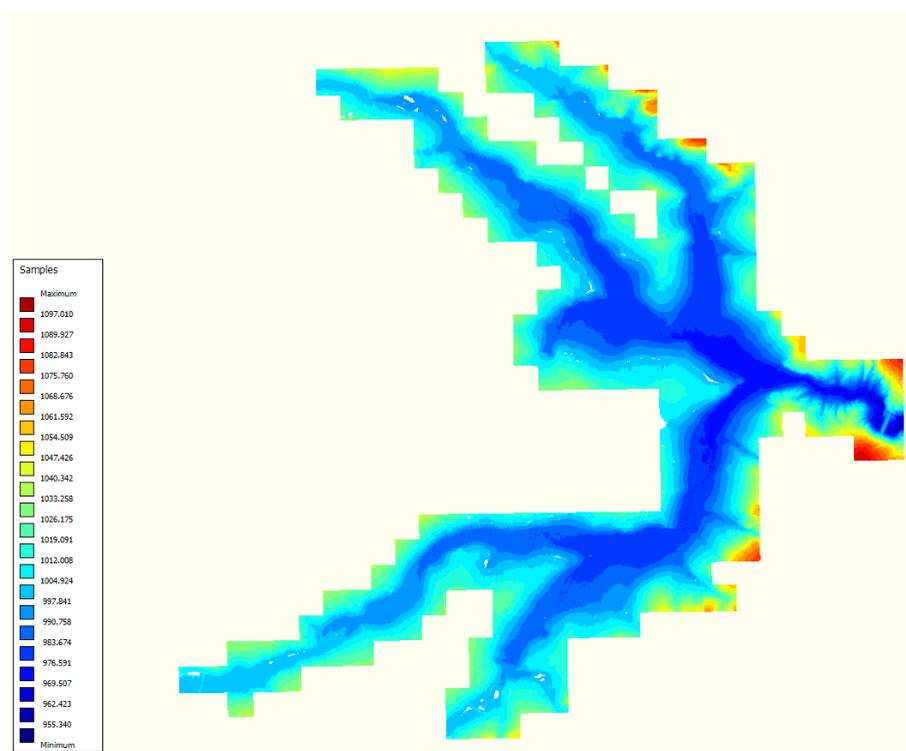


Figura 4.1 – Levantamento topobatimétrico do Lago Paranoá (Adaptada: Convênio N° 01/2017 – Adasa-UnB).

Tendo em vista que o foco do presente trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico do reservatório submetido a determinadas condições de operação do barramento, optou-se por remover a parcela de pontos altimétricos que estivesse acima de uma dada cota de referência, visando a diminuição do arquivo de batimetria e a consequente redução do tempo de processamento computacional. Assim, foram retirados da malha todos os pontos acima da cota 1.003 m, posição superior ao máximo admissível para a operação do reservatório, de 1.000,80 m.

Para a entrada no modelo Delft3D, os pontos do levantamento batimétrico devem ser convertidos para o referencial específico do modelo, em que a máxima altitude (1.003 m) assume o valor zero e aumenta proporcionalmente à diminuição da altitude, conforme disposto na Figura 4.2. O arquivo também deve estar no formato de extensão “.xyz”, contendo apenas as informações de longitude, latitude e altitude, respectivamente.

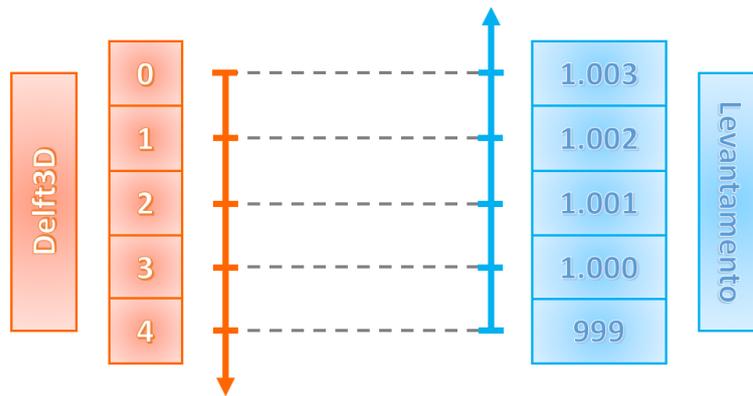


Figura 4.2 – Padrão de entrada dos pontos altimétricos no Delft3D (Elaborada pelo autor).

Como resultado final do modelo batimétrico do Lago, pode ser visualizado na Figura 4.3 o arquivo de entrada de pontos altimétricos do leito do Lago Paranoá, já em formato padrão para entrada no Delft3D. Ressalta-se que a região a jusante do barramento, incluída na Figura 4.3, não foi utilizada para a construção do modelo hidrodinâmico, sendo apenas ilustrada na Figura.

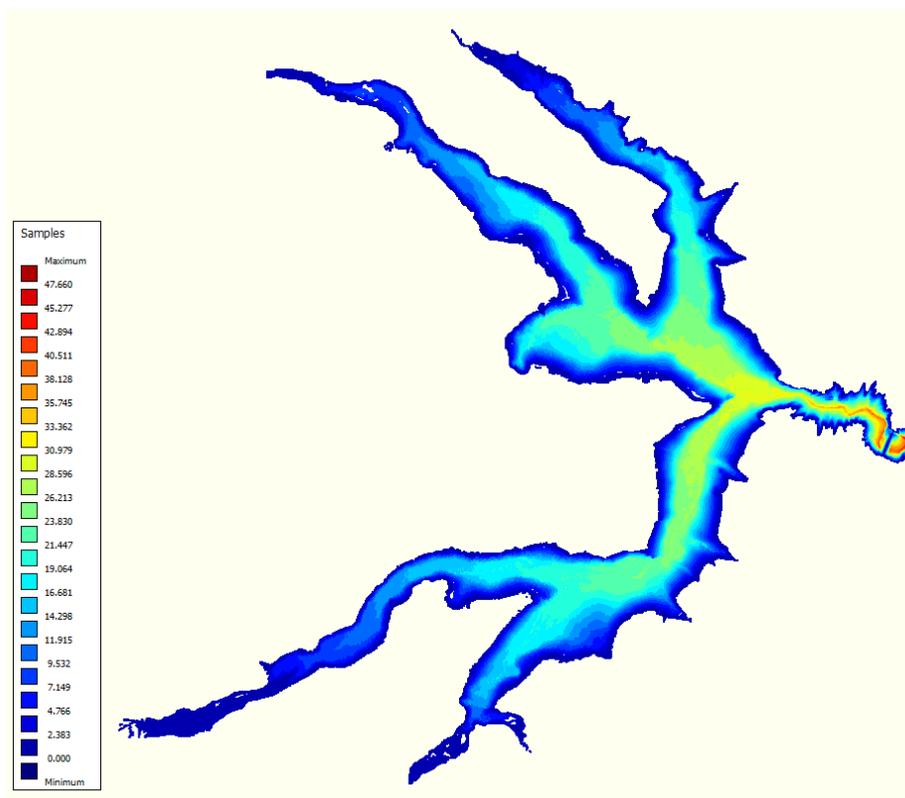


Figura 4.3 – Recorte do levantamento batimétrico do Lago Paranoá (Adaptada: Convênio N° 01/2017 – Adasa-UnB).

O contorno do Lago foi disponibilizado pela Adasa, sendo utilizado apenas como guia para a identificação dos limites do Lago dentro do levantamento batimétrico.

4.1.2. Dados Hidrológicos

As informações hidrológicas de vazões dos principais tributários do Lago Paranoá foram obtidas com a Caesb, tendo em vista que a Companhia é responsável por uma ampla rede de monitoramento hidrometeorológico em todo o Distrito Federal, dispondo de estações fluviométricas e pluviométricas na bacia do Lago. Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho foram obtidos no Portal Atlas Caesb (www.atlas.caesb.df.gov.br), plataforma de acesso livre e gratuito que disponibiliza, entre outras informações, séries históricas de fluviometria diária e relação cota-vazão de diversos rios em todo o DF.

4.1.2.1. Definição da Vazões Afluentes das Regiões Monitoradas

Os afluentes ao Lago que apresentam monitoramento fluviométrico contínuo correspondem aos principais córregos que deságuam no Lago e aos lançamentos das duas estações de tratamento de esgotos. Assim, foram selecionadas as seguintes séries de dados:

- Séries históricas de vazão dos principais rios afluentes ao reservatório:
 - Córrego Bananal (Estação Bananal – EPIA 003 / Código ANA 60477600 / fluviometria diária, com falhas);
 - Córrego Cabeça de Veado (Estação Cabeça de Veado – Dom Bosco / Código ANA 60478600 / fluviometria diária, com falhas);
 - Riacho Fundo (Estação Riacho Fundo - Montante Zoológico / Código ANA 60478200 / fluviometria diária, com falhas);
 - Ribeirão do Gama (Estação Gama – Base Aérea / Código ANA 60478500 / fluviometria diária, com falhas);
 - Ribeirão do Torto (Estação Torto – Lago (Montante Paranoá) / Código ANA 60477400 / fluviometria diária, sem falhas).
- Série histórica de vazão dos efluentes das ETEs Norte e Sul (fluviometria mensal, sem falhas).

As séries fluviométricas das estações Bananal e Gama apresentaram ausência de medições em diversos dias em todos os meses do ano de 2017, além de a segunda não apresentar medições no mês de dezembro do referido ano. Nesse caso, foi utilizada a vazão medida pela campanha de medição de cota na mesma estação (Gama), realizada no dia 15/12/2017. Este valor foi então extrapolado para todos os dias do mês de dezembro. As demais lacunas existentes nas séries de ambas as estações foram preenchidas de forma automática pelo Delft3D, por interpolação linear dos dados.

A série da estação Torto não apresentou falhas de medição diária no ano de 2017. As estações Cabeça de Veado e Riacho Fundo, por sua vez, não apresentam dados de medição para os meses de agosto e abril, respectivamente. Com o mesmo procedimento utilizado para a estação Gama, os meses com ausência de medições foram preenchidos com as medições de cota-vazão realizadas em 17/08/2017, na estação Cabeça de Veado, e em 07/04/2017, na estação Gama, extrapoladas para todos os dias dos referidos meses.

Os dados obtidos de vazão efluente das ETEs Norte e Sul correspondem a valores médios mensais de tratamento de esgotos. Nesse caso, a vazão média de cada mês foi replicada para todos os dias no respectivo mês, de modo a manter a mesma escala temporal que as séries fluviométricas dos afluentes do Lago.

A Figura 4.4 apresenta a localização das referidas estações de monitoramento, incluindo a delimitação das Unidades Hidrográficas (UHs) que compõem a Bacia do Lago Paranoá. A Figura foi elaborada no programa ArcGIS, da ESRI, utilizando os *shapefiles* da rede hidrográfica e as áreas das UHs, ambas aprovadas pelo Conselho de Recursos Hídricos (CRH) do DF e disponibilizadas na base de dados da Adasa.

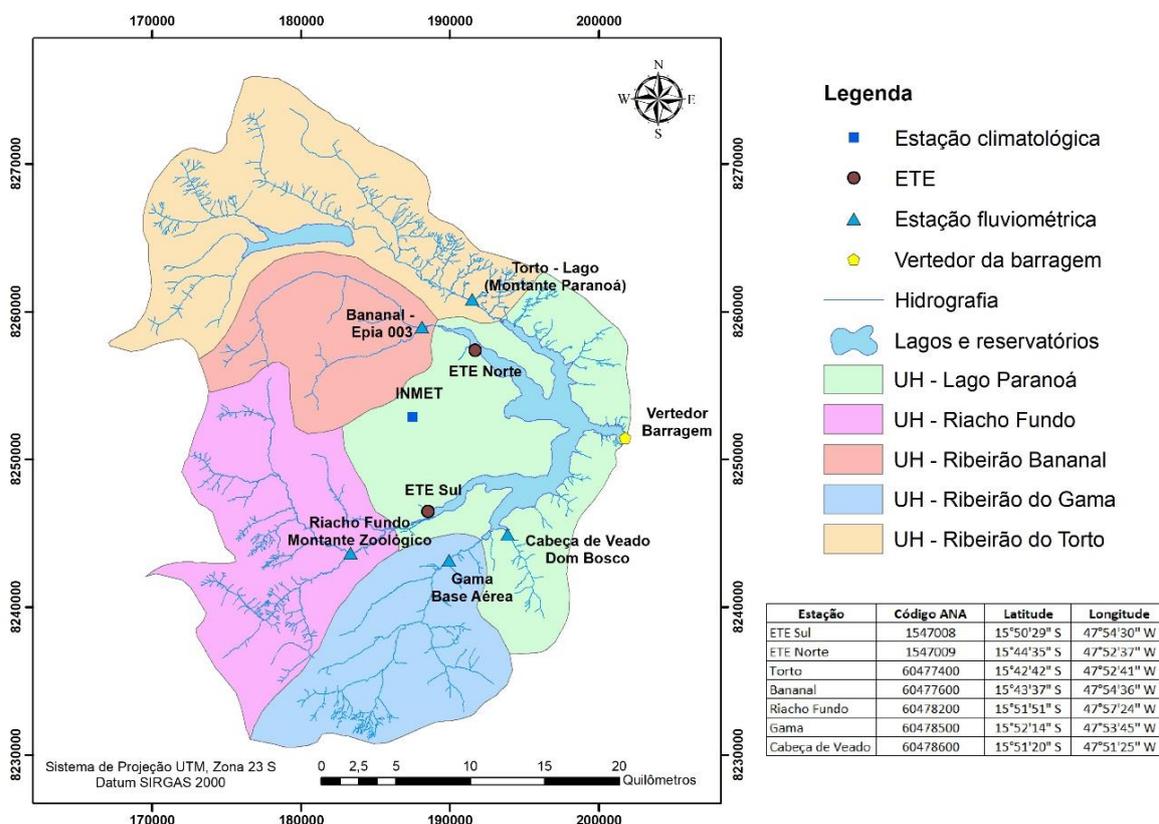


Figura 4.4 – Localização das estações de monitoramento fluviométrico e climatológico, das ETEs e da barragem, incluindo a delimitação das UHs da bacia do Lago (Elaborada pelo autor).

4.1.2.2. Definição da Vazões Afluentes das Regiões Não Monitoradas

Apesar da inclusão dos principais afluentes do Lago nesta análise de balanço hídrico, ainda se fez necessário adicionar a contribuição oriunda das áreas de contribuição direta, constituída pelas regiões do Plano Piloto, Lagos Norte e Sul, e da região Leste da bacia do Lago, áreas sem monitoramento fluviométrico para o período analisado e frequência compatível com as demais séries históricas de vazão. Conforme estudo desenvolvido por Nunes (2016), as contribuições mais significativas ao Lago correspondem às sub-bacias do Riacho Fundo e do Torto/Santa Maria. Contudo, foi verificado nas simulações que a área de contribuição direta também é responsável por valores expressivos de deflúvio afluente ao Lago, além de apresentar picos de vazão e velocidade de descarga mais elevados em virtude do alto grau de impermeabilização da região. A região Leste, por sua vez, também representa uma parcela significativa de contribuição ao Lago, sendo, em média, superior às contribuições das sub-bacias do Bananal e do Cabeça de Veado. Os valores de vazão estimados por Nunes (2016), para ambas as regiões, foram obtidos por simulação no modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

Em função da similaridade das áreas de drenagem direta da região central e da vertente leste do Lago Paranoá com outras regiões da bacia, optou-se por atribuir a essas áreas o mesmo padrão fluviométrico verificado em outros locais da bacia. A partir de critérios como grau de impermeabilização e ocupação do solo, foi possível extrapolar as vazões específicas de determinadas regiões para as áreas sem monitoramento. Para o caso deste estudo, e seguindo as mesmas considerações feitas por Nunes (2016), foi proposto que a série fluviométrica da região central fosse proporcional à série da sub-bacia do Riacho Fundo, enquanto que a série da vertente Leste fosse proporcional a da sub-bacia do Ribeirão do Gama. Em ambos os casos, a série original foi multiplicada pela razão entre as áreas das bacias de contribuição, de modo que a série fluviométrica da região não monitorada fosse linearmente proporcional à série original das sub bacias monitoradas.

Desse modo, utilizando ferramentas de geoprocessamento da extensão ArcHydro, do programa ArcGIS, e um Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido a partir de curvas de nível de 5 m de resolução, produzidas pela Terracap e disponibilizadas pela Adasa, as áreas de contribuição de cada trecho foram estabelecidas, tendo como exutórios as estações de monitoramento fluviométrico da Caesb. A Figura 4.5 ilustra o resultado final da delimitação de cada trecho, bem a indicação da rede de drenagem do CRH/DF.

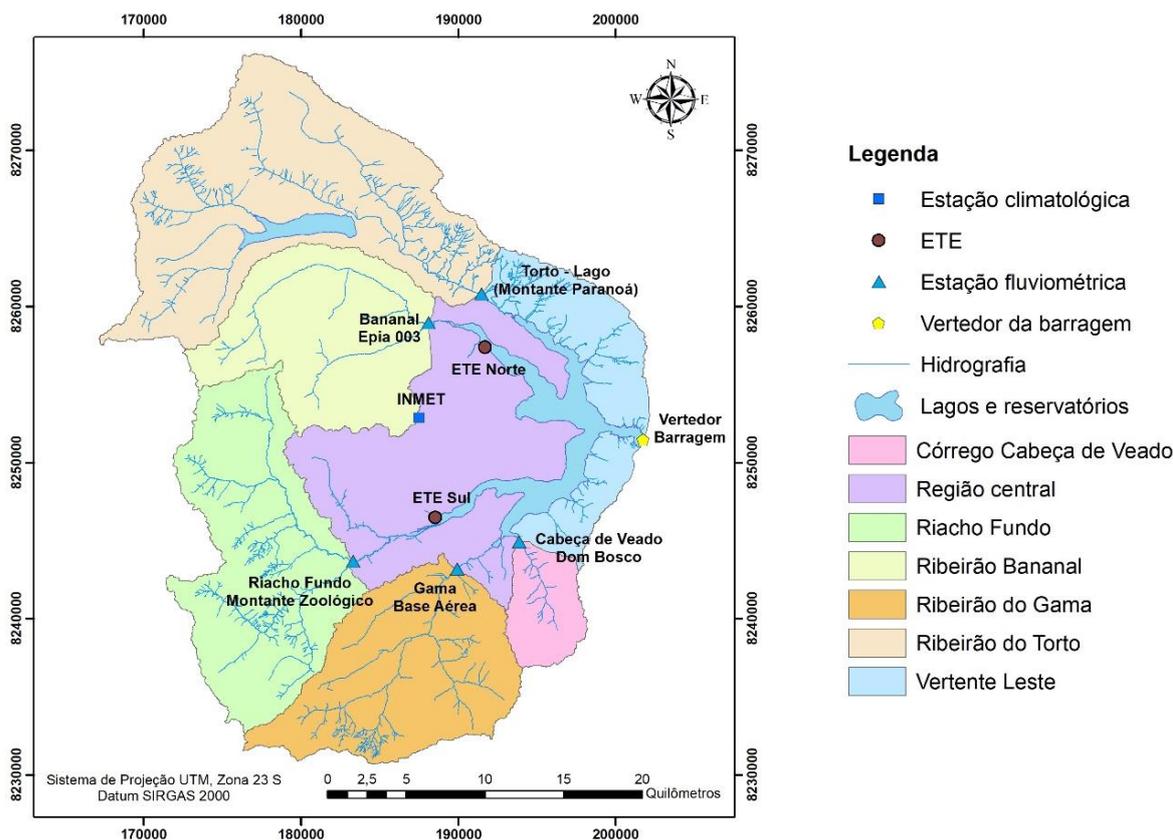


Figura 4.5 – Delimitação das áreas de contribuição das estações de monitoramento fluviométrico e das áreas não monitoradas da bacia do Lago Paranoá (Elaborada pelo autor).

Analisando a Figura 4.5, é possível notar que, como a estação de monitoramento no Riacho Fundo encontra-se bastante afastada do ponto de encontro com o Lago, a área de drenagem neste ponto de monitoramento torna-se menor que a real área de drenagem do rio, que se estende até o encontro com o Lago Paranoá. Tendo em vista esta particularidade, neste trabalho foi definido que parcela da bacia hidrográfica do Riacho Fundo estivesse incorporada à Região Central, contribuindo para a série de vazões desta região.

As áreas correspondentes a cada região, bem como a parcela de representatividade em relação à área total da bacia do Lago estão apresentadas na Tabela 4.1. A partir dessas informações, as séries fluviométricas das regiões Central e Vertente Leste foram construídas, baseando-se na proporção entre as áreas das regiões com características de uso e ocupação do solo similares. Conforme mencionado anteriormente, a incorporação de ambas as contribuições fornecidas por essas regiões completa o balanço hídrico geral do Lago Paranoá, em termos dos principais afluentes.

Tabela 4.1 – Áreas de drenagem das regiões que compõem a bacia do Lago Paranoá.

Nome da região	Área de drenagem	
	km ²	%
Sub-bacia do Córrego Cabeça de Veado	31,81	3,21
Sub-bacia do Ribeirão do Gama	135,80	13,69
Sub-bacia do Riacho Fundo	167,37	16,87
Sub-bacia do Córrego Bananal	129,42	13,04
Sub-bacia do Ribeirão do Torto	225,71	22,75
Vertente Leste	82,45	8,31
Região Central	181,09	18,25
Lago Paranoá	38,51	3,88
Área Total da Bacia do Lago Paranoá	992,15	100,00

4.1.3. Dados Climatológicos

Os dados climatológicos necessários ao desenvolvimento do estudo foram obtidos junto à Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos (SADMET) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As informações foram coletadas pela estação automática Brasília-A001, localizada a 15 km da barragem do Lago Paranoá, nas coordenadas Latitude 15°47'21.6" S e Longitude 47°55'32.7" W. A frequência de amostragem executada pela estação segue escala horária, fornecendo os seguintes dados:

- Temperatura do ar (°C);
- Umidade relativa do ar (%);
- Velocidade do vento (m/s);
- Direção do vento (graus);
- Precipitação (mm);
- Radiação solar (kJ/m²).

À exceção da radiação solar, todas as demais grandezas são fornecidas em unidades apropriadas para o Delft3D. Os dados de radiação solar tiveram que ser convertidos para a unidade W/m². Em todos os casos, foram utilizadas as séries históricas horárias para o ano de 2017.

A série de evaporação para o espelho de água do Lago foi fornecida pela Caesb. Os dados apresentam uma estimativa da altura média diária evaporada em tanque Classe A, em mm/dia, para cada mês do ano, compreendendo registros de setembro de 1993 até novembro de 2016. Tendo em vista que o potencial de evaporação não sofre grandes variações ao longo

dos anos, para um mesmo mês de referência, e que não haviam disponíveis registros com frequência diária, foi proposto que se utilizasse a média mensal da série histórica nas simulações deste estudo. Dado que os demais registros climáticos de entrada estão em escala horária, optou-se por converter os dados de evaporação, em mm/dia, para a escala horária, mm/h. Neste caso, de maneira simplificada, a taxa de evaporação foi assumida constante ao longo das 24h do dia, e o valor foi replicado para todos os dias do mês de referência.

4.1.4. Dados da Estrutura e Operação da Barragem

As informações sobre a usina hidrelétrica do Paranoá foram obtidas com a CEB, órgão responsável pela operação. A companhia disponibilizou o seguinte conjunto de dados, para o ano de 2017:

- Série de registros de cota do Lago (frequência diária);
- Série histórica das vazões turbinadas e vertidas (frequência diária);
- Informações e croquis detalhados do perfil construtivo e das estruturas hidráulicas da barragem.

Os registros históricos de cota e vazão diárias não apresentam falhas. As vazões turbinadas e vertidas foram utilizadas para o balanço hídrico, junto às séries das área de drenagem do Lago, e para viabilizar a construção do modelo hidrodinâmico do reservatório. A importância da análise dos registros de cota para o mesmo período de estudo se deve à necessidade de calibração do modelo a partir da comparação com a série de nível de água produzida.

As dimensões do barramento e das estruturas hidráulicas foram obtidas a partir dos croquis originais do “Arquivo Área Técnica UPA” da CEB. A Figura 4.6 mostra as especificações técnicas do projeto básico dos taludes do barramento (a), da planta baixa do sistema de vertedores (b) e do perfil em corte das comportas (c) e (d).

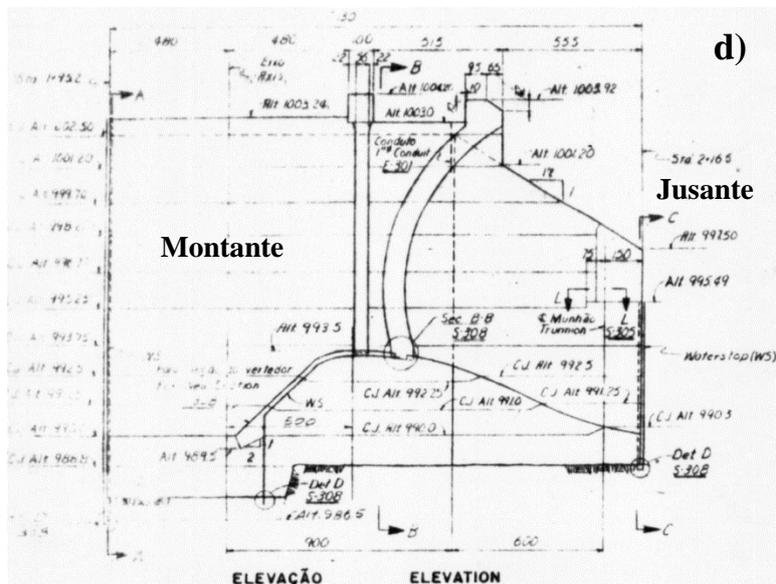
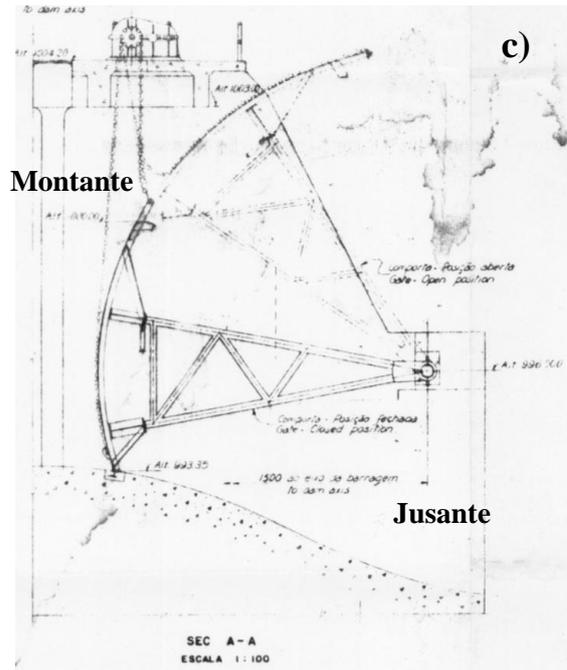
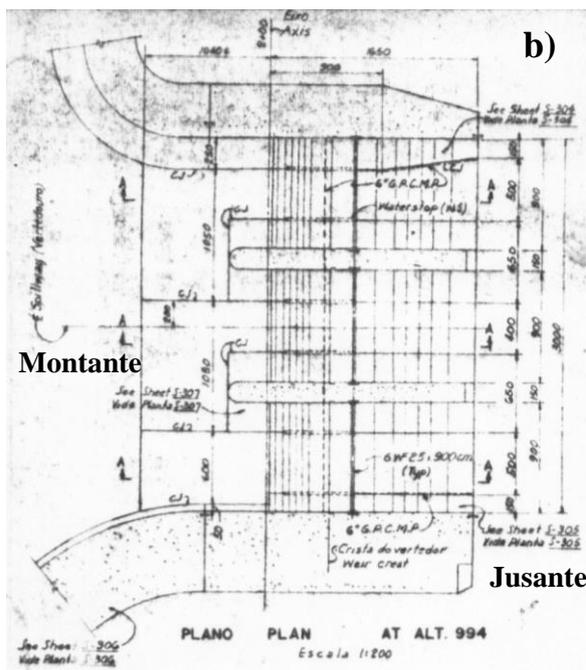
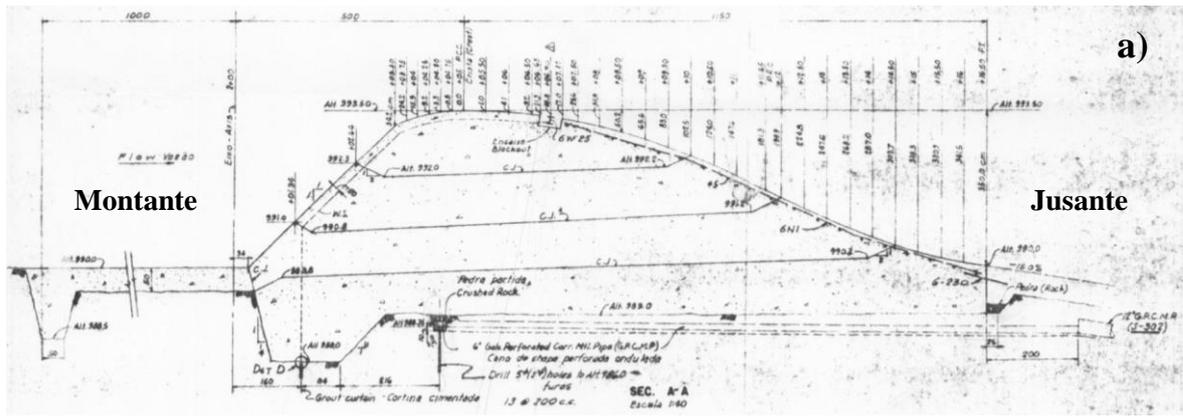


Figura 4.6 – Croquis originais do perfil do barramento (a), da planta baixa do sistema de vertedores (b) e do perfil das comportas (c) e (d) obtidas do acervo da CEB.

4.2. CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MALHA NUMÉRICA

Estabelecido o domínio (ou região) de interesse para a simulação, a etapa seguinte foi produzir e caracterizar a malha numérica de diferenças finitas. A plataforma do Delft3D disponibiliza os módulos RGFGRID, desenvolvido para gerar e editar malhas numéricas curvas para os módulos Delft3D-Flow e Delft3D-Wave, e o QUICKIN, utilizado para a geração, interpolação e manipulação de variáveis no espaço, como batimetria e condições iniciais do escoamento.

Inicialmente, foi necessário definir o sistema de coordenadas do projeto. O módulo RGFGRID disponibiliza duas opções, o sistema Cartesiano e o esférico. Para o contexto deste estudo, optou-se por utilizar o sistema Cartesiano, tendo em vista que a área de estudo não possui dimensões que justifiquem o uso do sistema esférico, recomendado para grandes corpos hídricos, como deltas de grandes rios.

Em seguida, o módulo permite que sejam adicionadas as fronteiras e a batimetria do Lago Paranoá, já condicionada ao padrão aceito pelo programa. Nessa etapa, as fronteiras do corpo hídrico têm a função de auxiliar na construção da malha, de modo a evitar que o usuário adicione células em regiões onde não existe lâmina de água.

O processo seguinte baseia-se na construção das *Splines*, que constituem a base para a criação do grid. Para a produção de qualquer seguimento do grid, é necessário que exista ao menos duas *splines* em cada direção, com a condicionante de que as mesmas se intersectem apenas uma vez e que não exista o auto cruzamento de uma *spline*.

Construída a malha de *splines*, o passo seguinte foi o de definição do refinamento do grid. O módulo RDFGRID disponibiliza uma ferramenta para converter a malha de *splines* em grid numérico. Para tanto, é realizada uma interpolação entre as *splines* paralelas entre si, replicando o contorno de ambas para a parte interna do polígono formado pelas *splines*.

O grid formado pode ser modificado para se ajustar ao contorno do Lago e incluir toda a região do espelho de água. As ferramentas de edição possibilitam a inclusão, a exclusão e a modificação da forma de células do grid, além do refinamento de regiões de interesse nas simulações, permitindo que o usuário represente com maior fidelidade a geometria da região.

Com o intuito de evitar a geração e propagação de ruídos, o módulo RGFGRID fornece mecanismos para verificar a qualidade e corrigir eventuais erros de truncamento na

malha. Assim, a construção do grid deve respeitar uma série de critérios para minimizar erros nas operações de diferenças finitas que são realizadas em cada célula. Os critérios de construção do grid são:

- Os limites do grid devem ser ajustados o mais próximo possível da fronteira entre solo e água da região a ser modelada;
- O grid precisa ser ortogonal, o que significa que as linhas que compõem as células do grid precisam se intersectar perpendicularmente entre si;
- O espaçamento entre as linhas deve variar de forma suave ao longo do grid, visando minimizar erros de imprecisão nas operações numéricas.

O manual do módulo RGFGRID recomenda faixas de valores para essas propriedades (Deltares, 2014b), sendo elas:

- Ortogonalidade: $\cos(\varphi) < 0,02$, onde φ corresponde ao ângulo entre linhas do grid;
- *Aspect ratio*: deve estar compreendido na faixa entre 1 até 2;
- Proporção das células adjacentes: deve ser inferior a 1,2 na área de interesse e 1,4 nas regiões mais afastadas.

A conferência quanto ao atendimento a esses critérios é realizada visualmente por meio dos gráficos sobrepostos ao grid. Cada critério pode ser visualizado separadamente, de modo que em cada célula é atribuído um valor para a propriedade. Assim, é possível fazer modificações locais e verificar simultaneamente se os critérios foram obedecidos.

Estando a malha com os valores dos parâmetros próximos aos sugeridos pelo manual, o processo seguinte é submeter o grid a operações numéricas para a interpolação dos pontos do levantamento batimétrico e a construção da malha com os valores de profundidade (extensão *.dep*). Neste contexto, o módulo QUICKIN disponibiliza ferramentas para geração e manipulação de parâmetros do grid, como batimetria, condições iniciais e rugosidade do leito.

Neste módulo, são adicionados o grid, construído na etapa anterior, a batimetria e o contorno do Lago. O manual do software sugere dois tipos de interpolação, selecionados com base na disponibilidade de amostras de pontos da batimetria. Nas regiões com alta densidade de pontos por célula de grid (superior a 4), é recomendado que se utilize a opção *Grid Cell Averaging*, procedimento que considera todos os pontos nas proximidades da

célula do grid e calcula valores médios entre os pontos, produzindo um volume mais preciso para a célula. Por outro lado, em regiões com baixa densidade de pontos (inferior a 4), o manual sugere que seja utilizada a opção *Triangular Interpolation*. Destaca-se que os processos são complementares entre si, não havendo a anulação ou sobreposição de um processo sobre o outro, caso sejam executados sequencialmente.

A proposta é que, após a realização do primeiro procedimento, restem poucas células sem informações de profundidade, sendo então preenchidas com a interpolação gerada pelo segundo procedimento. Caso ainda existam regiões do grid sem valores, há ainda uma terceira operação que preenche esses pontos dentro do domínio, denominada *Internal Diffusion*.

Como resultado dessas operações, é produzido o arquivo de profundidade (*.dep*) que, assim como o grid, também será utilizado na construção do modelo hidrodinâmico na etapa seguinte.

Ressalta-se que a malha numérica deve ser suficientemente refinada de modo a ser capaz de descrever as variações do contorno da região com realismo. Contudo, esse refinamento deve ser concentrado majoritariamente nos trechos de maior interesse, tendo em vista que o tempo de simulação pode aumentar significativamente. Assim, a região mais próxima da barragem foi descrita com uma malha refinada, enquanto a região mais afastada foi representada com uma malha numérica mais grosseira.

4.3. ELABORAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico do corpo hídrico foi construído no módulo D-Flow, do Delft3D. A plataforma permite a inserção do grid produzido no RGFGRID, da batimetria calculada pelo QUICKIN e de todas as séries de dados históricos fluviométricos e climatológicos, além de parâmetros e considerações iniciais necessárias para resolução das equações internas do modelo. Na Tabela 4.2 estão listados os conjuntos de dados e processos que foram especificados no módulo para que este executasse as simulações hidrodinâmicas, assim como a indicação das unidades e dos valores correspondentes a cada dado. A sequência apresentada na Tabela segue o mesmo padrão de entrada disposto na plataforma do D-Flow.

Destaca-se que diversos processos e dados definidos neste trabalho são de preenchimento obrigatório, enquanto outros são condicionados a ativação de determinados

tipos de simulação, e outros ainda são dispensáveis. A Tabela 4.2 apresenta apenas as informações utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, desconsiderando a existência de simulações não essenciais, como análises de sedimentos e salinidade.

Tabela 4.2 – Dados de entrada para construção do modelo hidrodinâmico no D-Flow.

Grupo de Dados	Subgrupo de Dados	Parâmetro / Dado / Condição / Descrição	Unidade	Valor
Domain	Grid parameters	Grid	-	Arquivo <i>.grd</i>
		Contorno do grid	-	Arquivo <i>.enc</i>
		Latitude da área	Graus	-15
		Orientação	Graus	0
		Número de camadas	-	20
	Bathymetry	Batimetria	m	Arquivo <i>.dep</i>
	Dry points	Pontos secos do grid	-	Arquivo <i>.dry</i>
Time Frame		Data de referência da simulação	Dia Mês Ano	01 01 2017
		Data de início da simulação	Dia Mês Ano Hora Min Seg	01 01 2017 00 00 00
		Data de fim da simulação	Dia Mês Ano Hora Min Seg	31 12 2017 23 59 59
		Passo de tempo	Min	1
		Zona horária (UTC)	Horas	-3
Processes	Constituents	Temperatura	-	-
	Physical	Vento	-	-
Initial Conditions	Water level	Condição uniforme	m	Arquivo <i>.ini</i>
	Temperature	Condição uniforme	°C	Arquivo <i>.ini</i>
	U-Velocity	Condição uniforme	m/s	Arquivo <i>.ini</i>
	V-Velocity	Condição uniforme	m/s	Arquivo <i>.ini</i>
Physical Parameters	Constants	Gravidade	m/s ²	9,81
		Densidade da água	kg/m ³	1000
		Densidade do ar	kg/m ³	1,03
		Salinidade	ppt	0
		Coeficientes de arraste do vento	-	Default
		Velocidades do vento	m/s	Default
	Roughness	Rugosidade do fundo (Manning)	m ^{1/3} .s	0,025
		Rugosidade das paredes laterais	-	Free (Default)
	Viscosity	Viscosidade Turbulenta Horizontal	m ² /s	0,1
		Difusividade Turbulenta Horizontal	m ² /s	0,001
		Viscosidade Turbulenta Vertical	m ² /s	1,00E-06 (Default)
		Difusividade Turbulenta Vertical	m ² /s	1,00E-06 (Default)
		Escala de comprimento Osmidov	m	0 (Default)
		Modelo 3D para turbulência	-	k-ε model
	Heat flux model	Tipo de modelo de fluxo de calor	-	Ocean
		Profundidade de Secchi	m	2
		Número de Dalton para fluxo de calor evaporativo	-	0,003
		Número de Stanton para convecção de calor	-	0,007
		Umidade relativa	%	Arquivo <i>.tem</i>
		Temperatura do ar	°C	Arquivo <i>.tem</i>
Cobertura de nuvens		%	Arquivo <i>.tem</i>	
Radiação solar		W/m ²	Arquivo <i>.tem</i>	
Wind		Velocidade do vento	m/s	Arquivo <i>.wnd</i>
	Direção do vento	Graus	Arquivo <i>.wnd</i>	

Grupo de Dados	Subgrupo de Dados	Parâmetro / Dado / Condição / Descrição	Unidade	Valor
Numerical Parameters		Verificação do nível de água da célula	-	Default
		Limiar de profundidade	m	0,05 (Default)
		Outros ajustes	-	Default
Operations	Discharges	Localização dos pontos com fluxo	-	Arquivo <i>.scr</i>
		Séries temporais de cada descarga	m ³ /s e °C	Arquivo <i>.dis</i>
		Tipo de descarga	-	Normal (Default)
Monitoring	Observations	Pontos de monitoramento	-	Arquivo <i>.obs</i>
	Drogues	Partícula traçadora de fluxo	-	Arquivo <i>.par</i>
Additional Parameters	Z-model	Seleção do sistema de coordenadas cartesiano	-	-
	Evaporation	Adição do processo de Evaporação	mm/h	Arquivo <i>.eva</i>
Output	Storage	Armazenamento de dados do grid	-	Arquivo <i>.trim</i>
		Histórico dos pontos de monitoramento	-	Arquivo <i>.trih</i>
		Histórico do trajeto dos Drogues	-	Arquivo <i>.trid</i>
		Arquivos para o módulo WAQ	-	Arquivo <i>.out</i>
		Intervalo de armazenamento de dados	Min	1440

O Grupo de Dados (*Data Group*) corresponde a um conjunto de parâmetros de entrada que juntos definem um determinado tipo de dado. Dentro de um mesmo grupo, podem ser inseridos/especificados todos os parâmetros e processos de interesse que são utilizados pelo modelo nas simulações hidrodinâmicas. Ainda dentro de cada grupo, existem subgrupos que reúnem os dados específicos para um determinado processo.

No Grupo *Domain* foram inseridos os arquivos de grid e batimetria produzidos na etapa de construção e caracterização da malha numérica, além de especificações quanto a região estudada. Neste grupo também foi determinado a quantidade de camadas (*layers*) que subdividem o perfil vertical do grid. Como se tratou da elaboração de um modelo tridimensional, o número de camadas precisou ser superior a 1. A plataforma disponibiliza campos para a determinação da espessura de cada camada, e o manual recomenda que a variação de espessura entre camadas adjacentes tenha um fator de proporcionalidade compreendido entre 0,7 e 1,4. Assim como o grid, quanto maior for o número de camadas verticais, melhor a representatividade do local e maior a exigência computacional para simulação. A definição das espessuras é em termos da porcentagem da variação total entre uma cota abaixo do ponto mais profundo e outra cota superior ao nível máximo de água, ambos os limites definidos no Grupo *Additional Parameters*. Neste trabalho, optou pela construção de 20 camadas, estando a mais profunda com 4% de espessura, a mais superficial com 6% e todas as demais com 5%, como apresentado na Tabela 4.3. Por fim, o subgrupo *Dry Points* refere-se a regiões do grid que, durante a simulação, encontram-se

permanentemente sem água. Neste caso, são células de borda que foram mantidas no grid, mas que se localizam em cotas superiores ao limite máximo do Lago.

Tabela 4.3 – Distribuição das camadas nos intervalos de profundidade.

Nº da Camada	Percentual de espessura (%)	Intervalos de profundidade (m)	Intervalos de cota (m)	Pontos de interesse
(Topo) 20	6,0	0,00 - 2,52	1002,0 - 999,5	Monitoramento Caesb (1 m)
19	5,0	2,52 - 4,62	999,5 - 997,4	
18	5,0	4,62 - 6,72	997,4 - 995,3	Monitoramento Caesb (5 m)
17	5,0	6,72 - 8,82	995,3 - 993,2	Crista do vertedor (cota 993,5 m)
16	5,0	8,82 - 10,92	993,2 - 991,1	Monitoramento Caesb (10 m)
15	5,0	10,92 - 13,02	991,1 - 989,0	
14	5,0	13,02 - 15,12	989,0 - 986,9	Monitoramento Caesb (15 m)
13	5,0	15,12 - 17,22	986,9 - 984,8	Tomada d'água (cotas 988 a 985 m)
12	5,0	17,22 - 19,32	984,8 - 982,7	
11	5,0	19,32 - 21,42	982,7 - 980,6	Monitoramento Caesb (20 m)
10	5,0	21,42 - 23,52	980,6 - 978,5	
9	5,0	23,52 - 25,62	978,5 - 976,4	
8	5,0	25,62 - 27,72	976,4 - 974,3	
7	5,0	27,72 - 29,82	974,3 - 972,2	
6	5,0	29,82 - 31,92	972,2 - 970,1	
5	5,0	31,92 - 34,02	970,1 - 968,0	
4	5,0	34,02 - 36,12	968,0 - 965,9	
3	5,0	36,12 - 38,22	965,9 - 963,8	
2	5,0	38,22 - 40,32	963,8 - 961,7	
(Fundo) 1	4,0	40,32 - 42,00	961,7 - 960,0	
Total	100,0	-	-	

O Grupo *Time Frame* possibilita ao usuário a definição do período de simulação, sempre vinculado a um determinado período no mundo real. Todos os dados de entrada dependentes da escala temporal foram ajustados para a data inicial de 1º de janeiro de 2017. A partir desse momento, as simulações são realizadas para cada passo de tempo, continuamente, até o término do período determinado. A magnitude do passo de tempo é dependente tanto da acurácia dos argumentos em reproduzir escalas espaciais no grid numérico, a qual pode ser mensurada pelo número de Courant-Friedrichs-Lewis (CFL), quanto da estabilidade numérica da simulação. O CFL é fornecido pelo D-Flow após a construção do grid e, normalmente, é recomendado que esse valor não exceda a 10 unidades.

Em *Processes* são selecionados quais processos serão levados em consideração e que podem exercer influência nas simulações hidrodinâmicas. Neste trabalho, apenas temperatura e vento foram considerados, mas também existem outras opções, como

salinidade, sedimentos e poluentes. Destaca-se que, nesta aba, os processos são apenas selecionados. A inserção das séries de dados é feita em outros Grupos.

No Grupo *Initial Conditions* são especificados os valores iniciais para as variáveis dependentes que estão sendo simuladas. A arquivo que reúne essas informações deve conter, em forma de matriz, os valores dos parâmetros em cada célula da matriz formada pelo grid, para cada camada vertical. Dado que a batimetria não é uniforme, cada camada vertical apresenta um número de células ativas (com presença de água) diferentes. No sentido da superfície para o fundo, cada camada possui uma disposição específica, reduzindo gradativamente o número de células ativas e aumentando a quantidade de células inativas, ou permanentemente sem água (solo do leito). A condição inicial para nível de água é a única que contém apenas uma matriz, com a camada mais superficial do grid, sendo atribuído o valor correspondente à cota medida do Lago Paranoá em 1º de janeiro de 2017. Para as condições iniciais das componentes de velocidade nas direções X e Y foram atribuídos o valor 0 (zero) em todas as células ativas e em todas as camadas. Já para a temperatura do Lago, foram atribuídos os valores do monitoramento de qualidade da água realizado pela Caesb, nos pontos apresentados na Figura 4.7, com frequência de amostragem mensal.

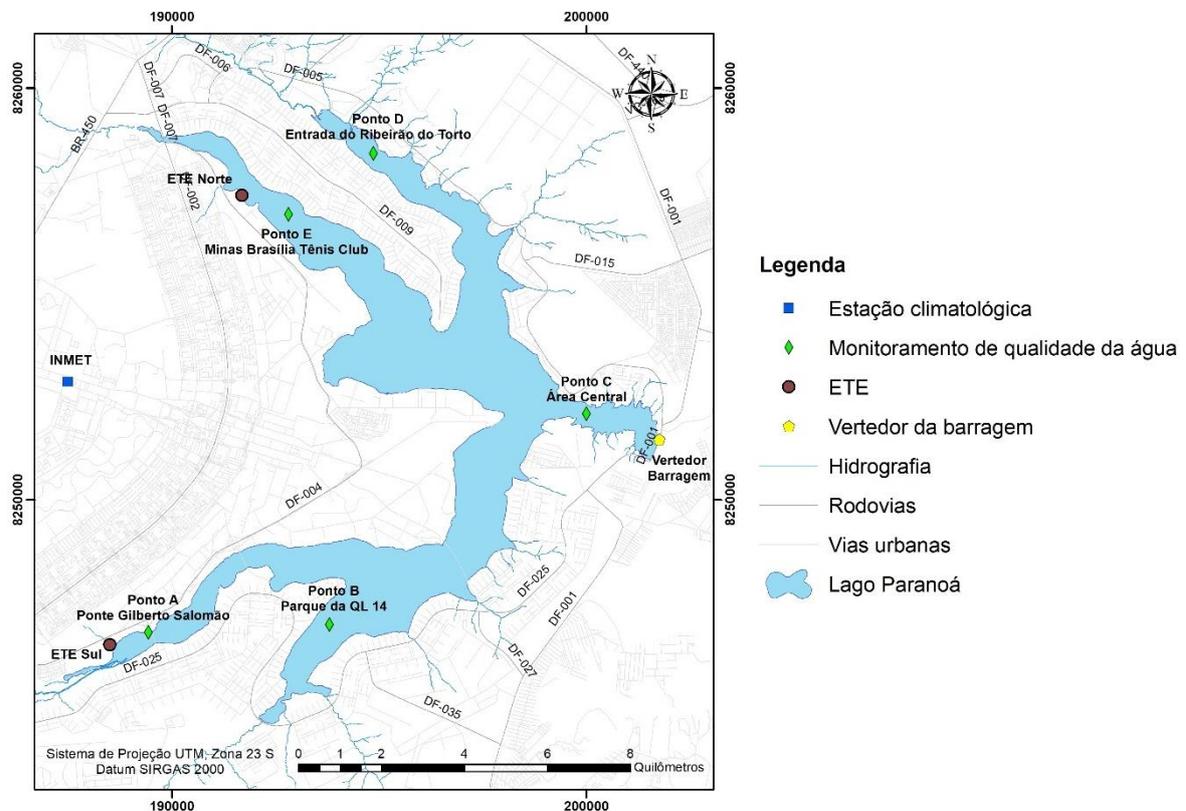


Figura 4.7 – Localização dos pontos de monitoramento de qualidade da água da Caesb no Lago Paranoá (Elaborada pelo autor).

Dos cinco pontos de monitoramento utilizados, apenas em um deles (Área Central) haviam registros de medição de temperatura em mais de uma profundidade. Nos demais, as medições eram realizadas apenas na profundidade de 1 m da superfície. Para a implementação no arquivo de entrada do modelo, foi determinada uma média entre os registros obtidos na mesma profundidade para o mês de janeiro, e o valor resultante foi aplicado em todas as células do grid, para a respectiva camada. Como se fazia necessária a especificação do valor de temperatura para todas as camadas verticais, foi feita uma interpolação linear entre os valores das camadas monitoradas e uma estimativa para as camadas mais profundas, resultando na condição inicial de temperatura por camada apresentada na Tabela 4.4. A Tabela apresenta ainda as espessuras das camadas verticais da malha numérica e os pontos e as profundidades monitoradas pela Caesb.

Tabela 4.4 – Condição inicial do perfil de temperatura por camada.

Nº da Camada	Intervalos de profundidade (m)	Temperatura média em janeiro 2017 (°C)	Pontos de monitoramento considerados
(Superfície) 20	0,00 - 2,52	26,4	A / B / C / D / E (1 m)
19	2,52 - 4,62	26,3	-
18	4,62 - 6,72	26,2	C (5 m)
17	6,72 - 8,82	26,1	-
16	8,82 - 10,92	26,0	C (10 m)
15	10,92 - 13,02	25,8	-
14	13,02 - 15,12	25,2	C (15 m)
13	15,12 - 17,22	25,1	-
12	17,22 - 19,32	24,9	-
11	19,32 - 21,42	24,8	C (20 m)
10	21,42 - 23,52	23,6	C (1 m do fundo)
9	23,52 - 25,62	23,0	-
8	25,62 - 27,72	23,0	-
7	27,72 - 29,82	23,0	-
6	29,82 - 31,92	23,0	-
5	31,92 - 34,02	23,0	-
4	34,02 - 36,12	23,0	-
3	36,12 - 38,22	23,0	-
2	38,22 - 40,32	23,0	-
(Fundo) 1	40,32 - 42,00	23,0	-

Em seguida, no Grupo *Physical Parameters* foram selecionados o conjunto de parâmetros relacionados às condições físicas para a área de interesse. No D-Flow, os parâmetros são subdivididos em classes, cada uma contendo informações específicas de uma determinada condição. Os subgrupos *Constants*, *Roughness* e *Viscosity* estão sempre habilitados pelo módulo. Os demais tornam-se visíveis caso determinadas condições de

simulação estejam acionadas. Neste trabalho, os dois subgrupos *Heat flux model* e *Wind* também foram especificados, dado que a temperatura e as condições de vento foram habilitadas no Grupo *Processes*. Os valores empregados para cada parâmetros estão dispostos na Tabela 4.2. Vale destacar que em algumas das grandezas foram utilizados os valores sugeridos pelo modelo (*Default*), enquanto outros foram sugeridos com base em outros trabalhos desenvolvidos para reservatórios. Caso determinada grandeza fosse sugerida por esses outros estudos, seria utilizada como valor inicial neste trabalho. Do contrário, seriam utilizados os valores pré-selecionados pelo modelo.

Em *Viscosity*, o modelo 3D escolhido (*k-ε model*) é um modelo de turbulência de segunda ordem. Neste caso, tanto a energia cinética de turbulência quanto a dissipação cinética de turbulência são descritas por uma equação de transporte.

Em *Heat flux model*, por sua vez, foi selecionado o modelo de fluxo de calor denominado *Ocean*, recomendado pelo manual para as simulações envolvendo grandes corpos hídricos. Este modelo permite que sejam inseridas as séries de umidade relativa, temperatura do ar, nebulosidade e radiação solar, todas disponibilizadas pelo INMET para a estação climatológica Brasília A-001 (estação INMET, Figura 4.5). Ainda neste subgrupo, foram propostos os valores dos números de Dalton, para fluxo de calor evaporativo, e Stanton, para convecção de calor.

Por fim, para o subgrupo *Wind*, foi inserida no modelo a série de medições de velocidade e direção do vento, também cedidas pelo INMET para a estação Brasília A-001.

No Grupo *Numerical Parameters* foram especificados parâmetros relacionados a secagem e inundação, além de outras opções avançadas para considerações acerca de aproximações numéricas. No âmbito deste estudo, optou-se por utilizar todos os valores *Default* sugeridos pelo o manual.

Em *Operations*, o módulo D-Flow permite ao usuário inserir todos os fluxos de entrada e saída do corpo hídrico, definidos pelas *Discharges*. Assim, para considerar os fluxos de entrada foram incluídas as séries de vazão e temperatura dos principais tributários do Lago Paranoá (Riacho Fundo, Ribeirão do Gama, Córrego Cabeça de Veado, Córrego Bananal e Ribeirão do Torto), as contribuições das ETes Norte e Sul e o aporte das regiões central e vertente leste, todas com escala de tempo diária. As vazões de ambas as regiões sem monitoramento fluviométrico foram inseridas em dois pontos de lançamento cada, visando simplificar a construção das séries. Em termos de fluxo de saída, foi considerado

apenas as descargas produzidas na barragem, pelo vertedor e pela tomada de água. As séries de temperatura correspondente a cada valor de vazão foram estimadas com base no monitoramento mensal realizado pela Caesb, próximo aos locais dos afluentes e da Barragem do Lago Paranoá.

Cada série de fluxo deve ser especificada e atribuída a uma célula do grid no plano e numa camada vertical. Para todas as entradas, foi considerado que o aporte de vazão fosse distribuído entre todas as células que compõe o perfil vertical da célula selecionada. Por outro lado, na célula do grid correspondente a barragem do Lago, foi definido que o fluxo ocorresse nas camadas que incluíssem a crista do vertedor (n° 17) e a tomada de água (n° 13).

No Grupo *Monitoring*, por sua vez, é possível acompanhar a evolução dos resultados ao longo do tempo de simulação em determinadas células. O módulo permite a definição de três formas de monitoramento, especificados nos subgrupos *Observations* e *Drogues*. No primeiro, são definidos os pontos de observação para monitorar o comportamento temporal, em uma região específica, de uma ou mais características simuladas, como nível de água e temperatura ao longo do perfil vertical. Neste trabalho, os pontos selecionados foram os mesmos que os pontos de monitoramento de qualidade da água da Caesb, acrescidos de um ponto adicional próximo ao vertedor da barragem, tendo em vista que as séries simuladas nestes locais serviram de base para a realização da etapa seguinte, de calibração do modelo.

No segundo subgrupo, *Drogues*, é simulado o trajeto percorrido por uma partícula, de posição inicial definida pelo usuário, no decorrer da simulação hidrodinâmica. O D-Flow estima o percurso da partícula devido ao transporte provocado pelas condições de velocidade do fluxo na camada superficial do grid. Não se considera, neste caso, a influência de processos difusivos ou de transporte aleatório. O vento e as correntes internas provocadas pela movimentação das massas de água são os principais agentes na definição da trajetória da partícula. Foram inseridas fileiras de partículas perpendiculares ao fluxo, em cinco seções transversais na região do canal final do Lago Paranoá.

O grupo seguinte, *Additional Parameters*, possibilita ao usuário inserir funções adicionais ao modelo, funções estas que não estão totalmente adaptadas à interface do D-Flow. Como o Delft3D está em constante evolução e aperfeiçoamento de suas funcionalidades, existem ferramentas que ainda não foram amplamente testadas e, portanto, implementadas por completo ao modelo, embora se tenha relatos de que produzam bons

resultados. Para o caso deste trabalho, foram adicionados o sistema de coordenadas cartesiano (*Z-model*), discutido na Revisão Bibliográfica, e a série estimada de evaporação para o Lago.

Por fim, em *Output* é possível especificar quais resultados se deseja armazenar para análises posteriores, bem como definir o intervalo de captura, ou armazenamento, dos resultados ao longo do período de simulação. Também é possível acionar, como neste trabalho, a opção de exportação dos dados como entrada para o modelo de qualidade da água (D-WAQ).

De posse de todos os dados, arquivos e considerações elencadas neste tópico, o modelo hidrodinâmico para o Lago Paranoá foi então construído, subsidiando a realização das diversas simulações propostas nos itens subsequentes. Vale ressaltar que a base de dados apresentada na Tabela 4.2 abrange o período de simulação correspondente a todo o ano de 2017, com condições reais de parâmetros monitorados, alguns dos quais com maior ou menor frequência e outros estimados a partir de interpolações lineares entre valores conhecidos. Nos tópicos seguintes, são discutidas diferentes condições de simulação para a obtenção de resultados específicos, mas todas fundamentadas na mesma base de informações apresentada neste tópico.

4.4. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A proposta de simulações hidrodinâmicas desenvolvidas neste estudo consistiu na análise do regime de operação da barragem em termos do comportamento altimétrico das cotas de nível de água, das linhas de fluxo e do perfil de temperatura, no intuito de avaliar os efeitos de diferentes padrões de operação das estruturas hidráulicas na coluna de água e na remoção de partículas em suspensão no corpo do Lago Paranoá.

Diante do exposto, foram conduzidos quatro conjuntos de simulações hidrodinâmicas neste trabalho. No primeiro deles (item 4.4.1) foi realizado a calibração do modelo para condições reais de operação do barramento durante um ano civil. No segundo (item 4.4.2), utilizando os valores dos parâmetros calibrados na etapa anterior, foram executadas simulações de rebaixamento rápido do Lago Paranoá pelos vertedores, dentro de condições seguras de vertimento pelas comportas. No terceiro conjunto (item 4.4.3), por sua vez, foram simulados processos de rebaixamento do Lago submetendo o modelo a condições reais e hipotéticas de perfil vertical de temperatura, vazão e padrões de vento incidente ao espelho de água. Por fim, no último conjunto (item 4.4.4), atrelado às simulações do item anterior,

foram simulados os trajetos percorridos por partículas lançadas na superfície da coluna de água de modo a avaliar as linhas de fluxo desenvolvidas na superfície quando as estruturas hidráulicas da barragem estão em operação.

4.4.1. Calibração para Condições Reais de Operação da Usina Hidrelétrica

Com a implementação do modelo numérico hidrodinâmico, constituído pela malha de diferenças finitas e submetido às condições iniciais e de contorno definidas para o período e região de análise, a etapa seguinte consistiu em avaliar a representatividade do modelo em simular condições reais no Lago Paranoá. Para tanto, foi realizada a calibração do modelo em termos do nível de água e da temperatura em determinados pontos no perfil vertical da coluna de água.

A calibração do modelo para o nível de água do Lago foi executada comparando-se os valores monitorados de nível próximo à barragem e os resultados da simulação hidrodinâmica para toda a série de 2017. A proposta foi avaliar se o balanço hídrico estimado para o Lago fosse obedecido pelo modelo, dado que os principais fluxos de entrada e saída foram contabilizados. Neste caso, as séries históricas de vazões das regiões não monitoradas foram as variáveis de calibração, tendo como valor inicial a série constituída com base em regiões com características similares na bacia, como discutido anteriormente.

Para a calibração em termos de temperatura, foram comparados os valores simulados pelo modelo e as temperaturas monitoradas nos pontos apresentados na Figura 4.7, para os perfis verticais conhecidos. As variáveis de calibração consideradas foram as viscosidades e as difusividades horizontal e vertical, e os números de Stanton e Dalton.

Com o intuito de avaliar o grau de ajuste dos resultados das simulações com os dados obtidos no monitoramento, tanto em termos de nível de água quanto de temperatura, foi aplicado o indicador de erro médio, conforme equação 4.1.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ dias}} \sqrt{(Cota_{sim_i} - Cota_{obs_i})^2}}{n^{\circ} \text{ dias}} \quad (4.1)$$

em que EM corresponde ao erro médio, neste caso, dado em metros, $Cota_{sim_i}$ e $Cota_{obs_i}$ correspondem aos dados de nível de água simulados e observados, respectivamente, e $n^{\circ} \text{ dias}$ refere-se ao número de dias em análise, neste caso, para cada mês do ano.

4.4.2. Simulações de Rebaixamento Rápido do Lago Paranoá

Com o objetivo de estabelecer o tempo de rebaixamento do nível do Lago em termos da vazão liberada, nesta etapa foram realizadas simulações de rebaixamento rápido.

Conforme estimativas de projeto do sistema de vertimento da barragem do Lago Paranoá, seria possível atingir patamares de vazões superiores a 400 m³/s. Embora sejam valores de projeto, a prática de tais condições de operação é bastante restrita, devendo considerar os possíveis impactos da onda de cheia a jusante do barramento, aspecto que não foi levado em consideração para a elaboração dos cenários apresentados neste trabalho. Cabe ressaltar, por outro lado, que, estando a soleira do vertedor a alguns metros abaixo do nível habitual de operação do Lago, é possível utilizar esta estrutura hidráulica para promover a liberação rápida de grandes volumes de água em casos de risco a integridade do barramento. Neste contexto, simulações de vertimento com vazões elevadas tornam-se justificáveis para se avaliar o tempo de rebaixamento do nível de água. Assim, neste trabalho optou-se por estabelecer os nove cenários de vertimento pelos vertedores apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Cenários de operação do barramento para eventos de rebaixamento rápido.

Cenários	Vazão vertida (m ³ /s)
1	20,0
2	30,0
3	40,0
4	50,0
5	75,0
6	100,0
7	125,0
8	150,0
9	200,0

O período de simulação proposto foi de 7 dias consecutivos e as condições iniciais foram as mesmas do dia 3 de outubro de 2017. A seleção do dia baseou-se na condição de nível máximo de água verificado no ano, o qual atingiu o patamar de 1.000,63 m. As condições iniciais de velocidade para todas as camadas foram consideradas iguais a zero, enquanto que as condições de temperatura seguiram o mesmo padrão das condições iniciais propostas para a simulação do ano de 2017, ou seja, admitiu-se que a temperatura observada na campanha de monitoramento da Caesb para o mês de outubro fosse a mesma para as condições iniciais no terceiro dia do referido mês.

A definição do período de simulação também considerou a não ocorrência de eventos de precipitação para esse período. Caso houvesse a influência de chuvas na simulação, o grau de rebaixamento devido a operação do barramento poderia ser diretamente afetado, tanto pela precipitação direta no espelho de água, quanto pelo incremento no escoamento superficial dos afluentes ao lago.

A partir dos resultados das simulações de rebaixamento rápido, foi estabelecida uma correlação entre o tempo de rebaixamento e a vazão vertida, com o intuito de estimar a taxa de variação de nível de água no reservatório. A partir dessa correlação, seria possível estimar o tempo necessário para rebaixar o nível de água do Lago Paranoá operando com uma determinada vazão.

4.4.3. Simulações de Rebaixamento Condicionado a Temperatura, Vazão e Vento

A partir da calibração do modelo, foi realizado um conjunto de simulações hidrodinâmicas hipotéticas em que foram modificadas quatro condicionantes principais de entrada no módulo D-Flow, sendo elas o perfil vertical de temperatura da coluna d'água, a estrutura hidráulica em operação do barramento, o regime de vazões dessa mesma estrutura e o padrão de vento aplicado sobre o espelho de água do Lago Paranoá. A Tabela 4.6 apresenta, com um “X” e o respectivo código, os cenários simulados no modelo sob as condições aplicadas ao reservatório. O cenário com as condições reais observadas também foi construído.

Tabela 4.6 – Cenários de operação do barramento sob diferentes condições temperatura, vazão efluente e padrão de vento.

Perfil vertical de temperatura	Componente hidráulico da barragem	Vazão simulada (m³/s)	Condição de Vento				
			Observado	Sem vento	Contra o fluxo	A favor do fluxo	Lateral ao fluxo
Estratificado	Vertedores	14		X (1)			
		28	X (2.1)	X (2.2)	X (2.3)	X (2.4)	
		50	X (3.1)	X (3.2)	X (3.3)	X (3.4)	X (3.5)
	Tomada de água	14		X (4)			
		28	X (5.1)	X (5.2)			
		50					
Uniforme	Vertedores	14		X (6)			
		28	X (7.1)	X (7.2)	X (7.3)	X (7.4)	
		50	X (8.1)	X (8.2)	X (8.3)	X (8.4)	
	Tomada de água	14		X (9)			
		28	X (10.1)	X (10.2)			
		50					
Observado (Estratificado)	Tomada de água e vertedores	Série observada	X (11)				

No conjunto de simulações com perfil vertical de temperatura estratificado foi utilizada a distribuição por camada conforme a Tabela 4.4. Já para o perfil uniforme, foi utilizada a temperatura de 21,7 °C, valor obtido pela média simples de todos os pontos monitorados no dia 27/09/2017, medição mais próxima da data de início da simulação.

Embora as simulações desenvolvidas no modelo D-Flow forneçam resultados de diversos parâmetros, neste trabalho foram analisados apenas os perfis de velocidade em seções transversais e longitudinais em regiões de interesse, além de vistas em planta da camada superficial e das camadas que incluem os vertedores e a tomada de água. A proposta ao selecionar os perfis de velocidade foi analisar o comportamento das massas de água quando submetidas às condições apresentadas na Tabela 4.6, de modo avaliar a efetividade de determinadas condições de operação no arraste e na remoção de partículas nas camadas do epilímnio, metalímnio e hipolímnio, bem como na ressuspensão de sedimentos do fundo.

4.4.4. Simulação de Partículas Traçadoras de Fluxo

Atrelado às simulações de rebaixamento do Lago, para as condições de operação do barramento e de dados de entrada definidos no item anterior (4.4.3), foram realizadas simulações de acompanhamento da trajetória do fluxo na camada superficial do espelho de água. Como discutido no tópico 4.3, foram inseridas, em várias regiões do Lago, “partículas” (*Drogues*) que permitem monitorar o percurso desenvolvido pelas linhas de fluxo na camada superficial. A Figura 4.8 ilustra a disposição dos *Drogues* ao longo das cinco seções de referência do trecho de canal final do Lago Paranoá.

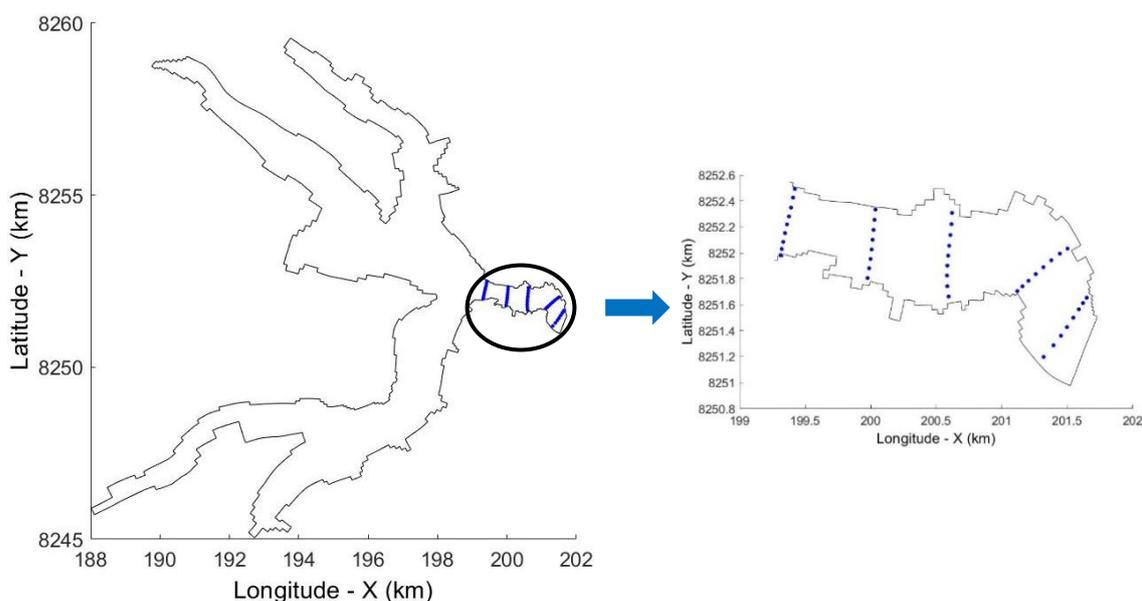


Figura 4.8 – Posição inicial das partículas traçadoras de fluxo nas seções de referência (Elaborada pelo autor).

O lançamento das partículas no reservatório, considerando as vazões simuladas nos cenários apresentados na Tabela 4.6, foi programado para o momento em que o reservatório atingisse uma determinada cota, independentemente da vazão de operação. Assim, como a taxa de rebaixamento provocado pela liberação de 14 m³/s é menor que a de 50 m³/s, o início da simulação dos traçadores na condição de menor vazão é posterior ao início da simulação na condição de maior vazão.

O módulo D-Flow não permite que sejam inseridos traçadores em camadas inferiores à superficial, nem realiza simulações que envolvam a subsidência ou a ascensão dos traçadores através das camadas verticais da malha numérica. Assim, as análises desenvolvidas neste tópico se concentraram apenas na camada superficial de água.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados alcançados neste trabalho, bem com as discussões relevantes a cada tópico. A disposição das análises seguiu a mesma sequência da Metodologia, apresentando a malha numérica produzida, as simulações hidrodinâmicas desenvolvidas, incluindo os resultados da calibração de nível e temperatura, as simulações de rebaixamento rápido e rebaixamento condicionado à temperatura, vazão e padrões de vento e as simulações com os traçadores de fluxo na superfície.

5.1. MALHA NUMÉRICA DE DIFERENÇAS FINITAS

A execução dos procedimentos descritos na etapa 4.2 deste trabalho permitiu a construção de uma malha numérica de diferenças finitas, apresentada na Figura 5.1, que abrange toda a área do espelho de água do Lago Paranoá e parcelas de terra nas bordas. A Figura apresenta ainda um zoom com o detalhamento do trecho referente ao canal de afluência da barragem.

A definição dos limites do grid foi baseada na malha de pontos altimétricos do Lago, incluído regiões com elevação até 1.003 m, conforme estabelecido no item Metodologia.

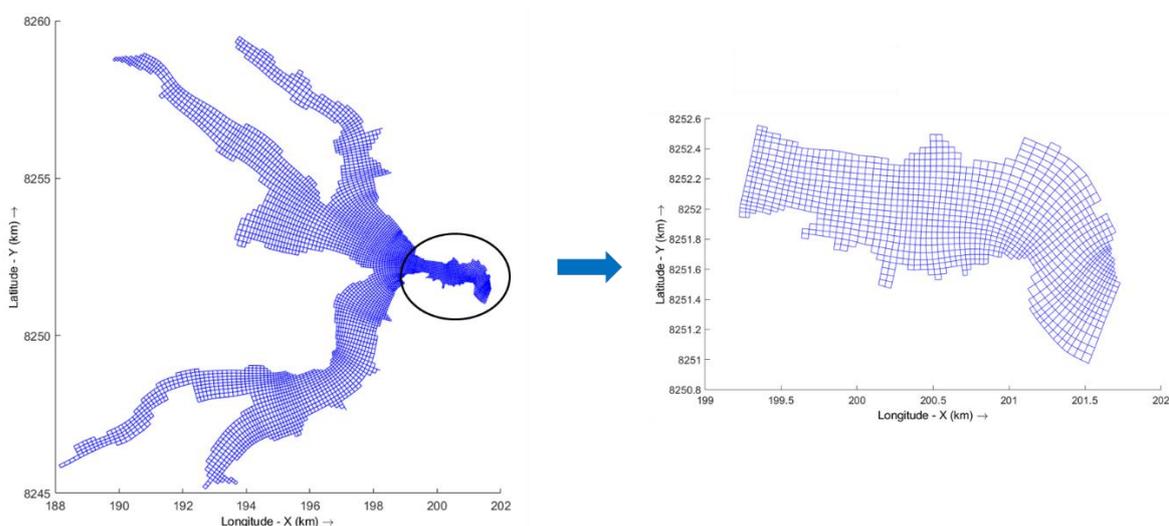


Figura 5.1 – Malha numérica de diferenças finitas do Lago Paranoá e detalhe do trecho próximo à barragem, gerado como dado de entrada do modelo Delft3D (Elaborada pelo autor).

Na Figura 5.2, por sua vez, é apresentada a malha numérica com as dimensões estimadas de cada célula. Regiões com tons mais intensos de vermelho indicam áreas maiores, enquanto que regiões com coloração azulada mais intensa representam células com área superficial menor, considerando uma mesma escala de cores.

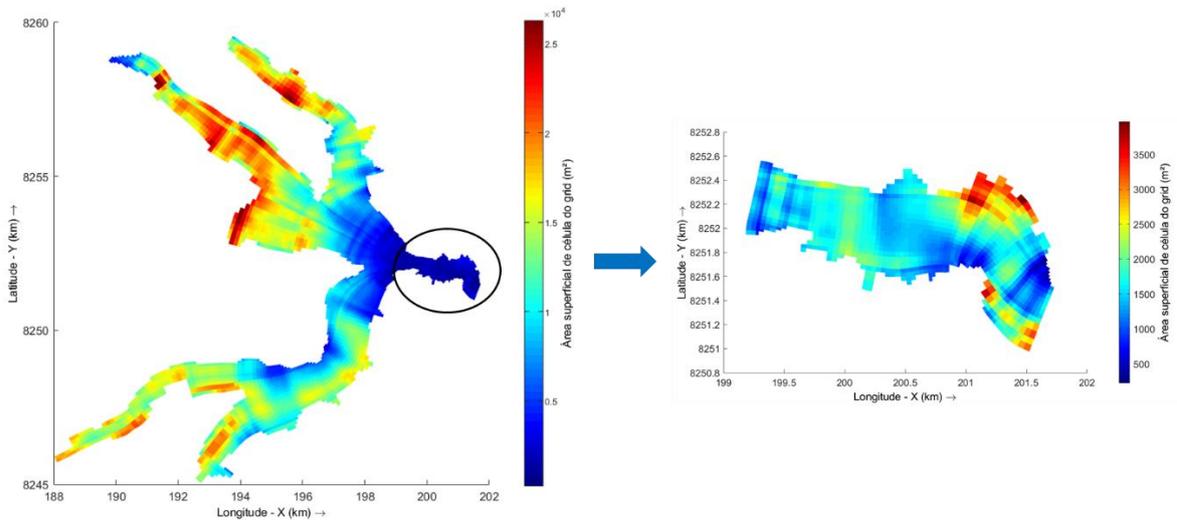


Figura 5.2 – Área superficial por célula da malha numérica para o Lago Paranoá e detalhe do trecho próximo à barragem, em m² (Elaborada pelo autor).

A área superficial total da malha atingiu o valor aproximado de 41,8 km², superior à área descrita na literatura, considerando o momento final de enchimento do Lago. Essa variação pode ter sido ocasionada pelas aproximações das células de borda da malha, que incluíram parcelas de terra em cota superiores ao limite máximo operacional do reservatório. Vale destacar que, nas simulações hidrodinâmicas, a cota máxima foi definida previamente, estando em posição compatível ao nível operacional regular do Lago.

Na construção da malha numérica, foi observado o atendimento quanto a critérios de qualidade da forma da estrutura, de modo a viabilizar a estabilidade numérica do modelo e permitir a rotina de cálculos. Nesse sentido, as imagens apresentadas na Figura 5.3 apresentam os valores de *Aspect Ratio* e ortogonalidade para cada célula da malha. É possível notar que existem regiões onde os limites máximos recomendados pelo manual (2 e 0,02, respectivamente) foram excedidos. Em decorrência da complexidade da estrutura da malha, principalmente em regiões do Lago em que existem variações abruptas na geometria, existem células que podem apresentar valores de *Aspect Ratio* e ortogonalidade um pouco acima do esperado, mas que não implicam necessariamente em geração de erros ou ruídos nas simulações. Em termos de ortogonalidade, normalmente, os valores acima do limite encontram-se em células de borda ou em regiões mais afastadas do barramento, locais que exercem menores efeitos na região próxima das estruturas hidráulicas.

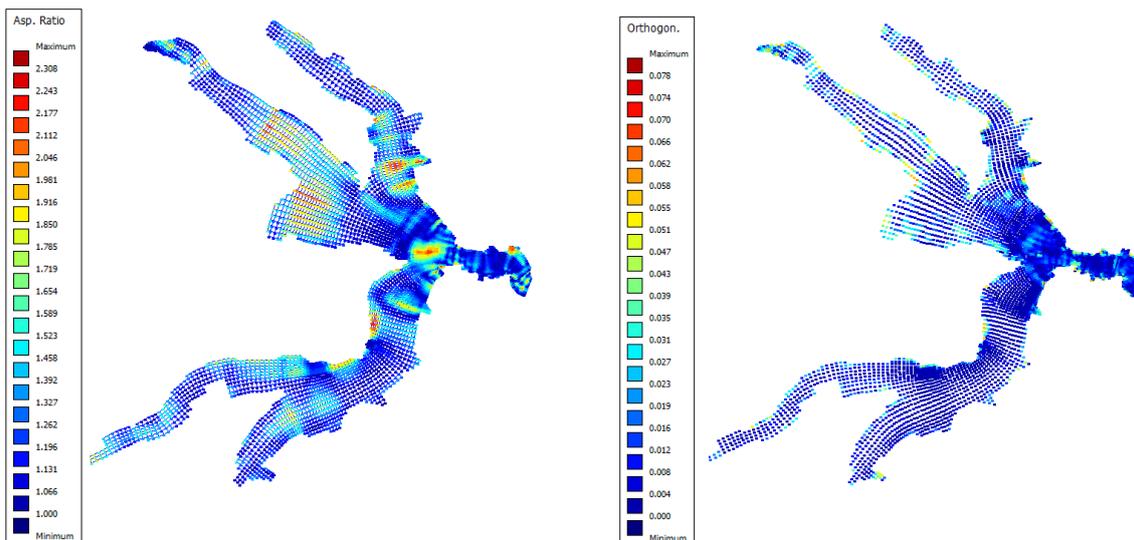


Figura 5.3 – Critérios de qualidade da malha numérica, *Aspect Ratio* (esquerda) e Ortogonalidade (direita) da malha numérica do Lago Paranoá (Elaborada pelo autor).

Quanto a seções transversais de interesse, a Figura 5.4 ilustra o perfil vertical em escala deformada da camada de malha mais próxima à barragem, correspondente à seção 0 de monitoramento. Nesse perfil são mostradas as posições alocadas para as comportas do vertedor e para a tomada de água. O eixo das abcissas corresponde a extensão lateral das células da malha, assumindo um referencial arbitrário. Já o eixo das ordenadas refere-se à profundidade da coluna de água, estando o zero (0) no referencial de cota altimétrica 1.000 m. A profundidade das células no plano visualizado na Figura é de aproximadamente 35 m na região próxima ao vertedor (direita da imagem), aumentando até aproximadamente 60 m na região oposta (esquerda da imagem). Na mesma Figura pode ser visualizado um perfil altimétrico de uma seção do levantamento topobatimétrico do Lago, retirado da mesma região do perfil vertical ilustrado. Vale salientar que a profundidade da coluna vertical da malha numérica é obtida a partir de uma estimativa média dos pontos do levantamento topobatimétrico internos à célula da malha. Assim, o contorno da malha tem uma pequena discrepância em relação à seção do levantamento apresentado para a mesma região.

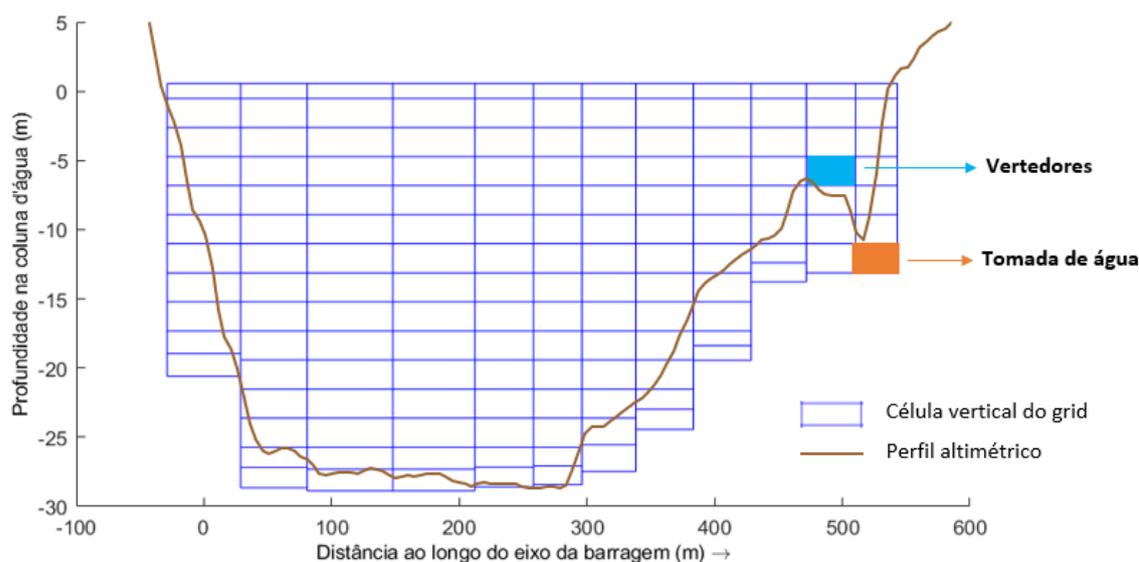


Figura 5.4 – Seção transversal da malha próxima à barragem do Lago Paranoá e perfil altimétrico do levantamento batimétrico (Elaborada pelo autor).

As estruturas hidráulicas do barramento estão representadas pelas células em azul e laranja na Figura 5.4. O módulo D-Flow não possui opções para a inserção de estruturas com formas distintas às células da malha, de modo que nas simulações hidrodinâmicas, os vertedores e a tomada de água são considerados como células inteiras e, portanto, o fluxo atravessa toda a extensão das células. Tendo em vista que este trabalho faz a análise do Lago completo, os efeitos dessas considerações em relação às linhas de fluxo são dissipados ao longo da malha numérica. Conforme pode ser visualizado na Figura 5.1, houve um esforço para aumentar o detalhamento da malha numérica na região próxima à barragem. Contudo, um maior aumento do refinamento de apenas determinadas regiões provocaria a piora nos critérios de qualidade da malha, podendo inviabilizar as simulações hidrodinâmicas.

A posição da tomada de água, diferentemente da apresentada na Tabela 4.3, foi posicionada uma camada acima do previsto, dado que na interpolação da malha a camada nº 13 não existiu na seção apresentada na Figura 5.4, e, portanto, foi atribuída na camada adjacente em posição superior, de número 14.

5.2. SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS

Neste tópico são apresentados as considerações e os resultados da etapa de calibração do modelo hidrodinâmico para nível de água e temperatura simulados no módulo D-Flow, das simulações de rebaixamento rápido pelas comportas dos vertedores, quando submetidas à determinadas vazões de operação, das simulações de rebaixamento condicionadas a temperatura, vazão e vento e das simulações com partículas traçadoras de fluxo.

5.2.1. Calibração do Modelo Hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrodinâmico em termos de nível de água simulado, conforme discutido na Metodologia deste trabalho, utilizou como parâmetros de calibração as séries de vazões das áreas não monitoradas, divididas entre Região Central e Vertente Leste. Em decorrência da similaridade dessas regiões com outras sub bacias do Lago Paranoá, e da necessidade de adicionar a contribuição dessas áreas no balanço hídrico, optou-se por produzir uma série de vazões afluentes para cada trecho baseando-se nas séries históricas de estações de monitoramento fluviométrico na bacia. Neste estudo, como suposição inicial, foi proposto que a série fluviométrica da Região Central fosse proporcional à série da sub bacia do Riacho Fundo, enquanto que a série da Vertente Leste fosse proporcional a da sub bacia do Ribeirão do Gama, conforme discutido no item 4.1.2.2. As séries de vazões das regiões não monitoradas foram construídas com a mesma frequência de registros das regiões monitoradas, visando padronizar a entrada de dados no modelo.

É importante destacar que existem fatores de erro associados à estimativa de vazão efluente dessas regiões, particularmente no período de estiagem. Como toda a série do Riacho Fundo foi considerada para a construção da série da Região Central, mesmo no período de estiagem foram atribuídos valores de vazão proporcional a área de contribuição.

Diversas simulações foram conduzidas como o intuito de avaliar o grau de ajuste do nível de água observado com o produzido pelo modelo, para o ano de 2017. As alterações nas séries de vazões das regiões não monitoradas foram definidas em termos percentuais, para mais ou para menos, dos valores originais, baseando-se nos resultados produzidos. Em caso de subestimação do nível durante um certo período, foi proposto o aumento das vazões afluentes naquele período. O inverso foi aplicado caso o nível fosse superestimado.

Apesar de melhoras no ajuste em determinados períodos do ano, percebeu-se que não havia uma relação direta entre o aumento, ou diminuição, percentual de trechos da série das regiões não monitoradas e a melhora global no ajuste do nível de água simulado para o Lago. Embora diversas combinações de variações percentuais ao longo da série tenham sido implementadas, não houve uma melhora significativa em termos de ajuste com o nível de água observado. Assim, a melhor simulação foi produzida com base na série fluviométrica originalmente proposta, considerando apenas a proporção direta entre as áreas das regiões monitoradas e não monitoradas. A Figura 5.5 apresenta o gráfico onde são comparados os registros da CEB e os níveis simulados pelo módulo D-Flow, para as condições apresentadas.

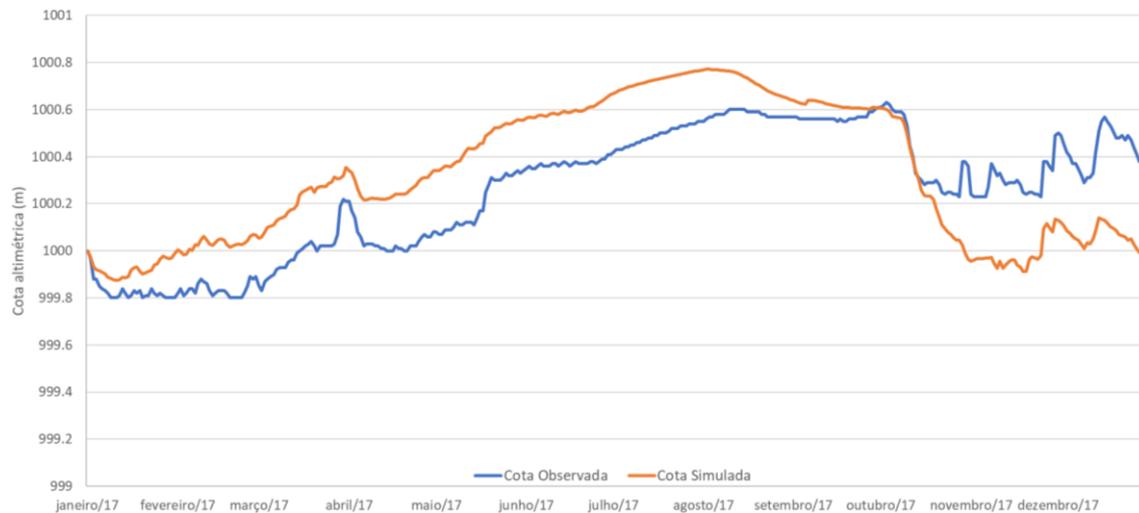


Figura 5.5 – Perfis de variação dos níveis de água observado e simulado do Lago Paranoá para o ano de 2017.

No período compreendido entre janeiro e agosto, nota-se uma superestimação do nível simulado, divergindo, em alguns momentos, do nível observado em até 30 cm. Já em meados de agosto até final de dezembro, o nível simulado sofre um deplecionamento mais acentuado que o verificado nas régua de monitoramento, atingindo valores de variação superiores a 40 cm em alguns pontos. Durante todo o período, contudo, o nível simulado apresentou tendências de crescimento e de deplecionamento similares às dos registros observados, indicando que, de modo geral, o modelo foi capaz de reproduzir satisfatoriamente o comportamento altimétrico do nível de água do Lago Paranoá. Em termos estatísticos, os valores do erro médio (EM) mensal entre as séries de dados observados e simulados para o ano de referência estão apresentados na Figura 5.6. Na média do período simulado, o EM foi de 0,20 m.

Pode-se observar na Figura 5.6 que o EM no período de estiagem, principalmente os meses de agosto, setembro e outubro, apresentou valores menores que nos meses chuvosos. Após o *flushing* realizado no meio de outubro (Figura 5.5), verifica-se que o nível simulado nos meses seguintes (novembro e dezembro) atingiu valores abaixo dos níveis observados. Os efeitos dessas diferenças no EM são mostrados na Figura 5.6, em que se nota o aumento do erro após o evento de *flushing*.

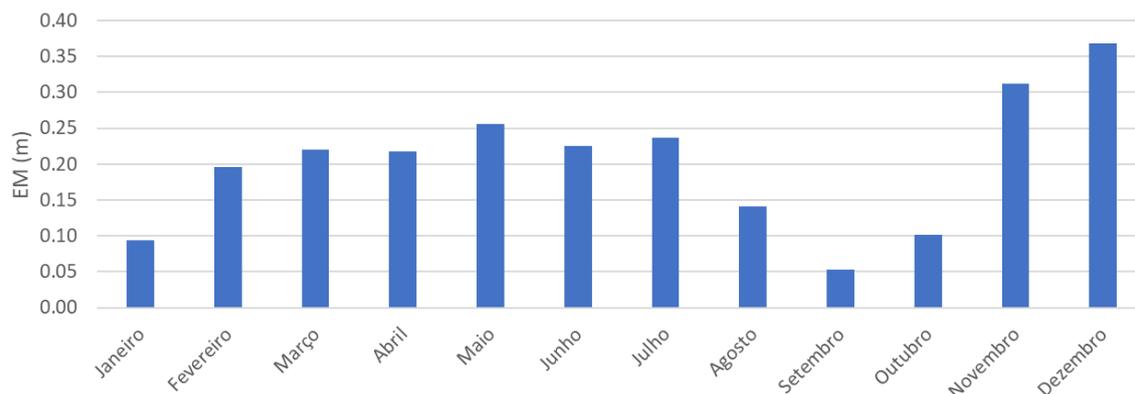


Figura 5.6 – Estimativa do erro médio entre as cotas observada e simulada do Lago Paranoá para o ano de 2017.

Entre as possíveis razões para as divergências entre os níveis, podem ser mencionados o desconhecimento das vazões afluentes de trechos contribuintes importantes para o balanço hídrico, representados neste trabalho como as regiões Central e Vertente Leste, a consideração dos valores estimados de evaporação para o Lago Paranoá, a influência da contribuição do fluxo de base, e possíveis erros sistemáticos introduzidos pelas curvas-chave dos rios e na estimativa real das vazões turbinadas e vertidas pelo barramento, além de erros relativos ao grau de precisão da malha numérica desenvolvida. Ressalta-se ainda que não há equipamentos para medição da vazão turbinada nem uma equação aferida que relacione cota-descarga dos vertedores. Quanto às vazões turbinadas, a estimativa dos valores é feita com base na série de geração de energia elétrica pela estação da CEB.

A calibração do modelo quanto a temperatura ao longo do perfil da coluna de água foi baseada na modificação dos valores das viscosidades e das difusividades horizontal e vertical, e dos números de Stanton e Dalton. A proposição da magnitude desses parâmetros foi fundamentada na escolha de valores recomendados pelo manual do D-Flow e por outros estudos de análise hidrodinâmica desenvolvidos na USP, no âmbito do projeto de pesquisa Modelagem de Mananciais Metropolitanos (MoMa-SE).

Embora tenha-se utilizado diversos conjuntos distintos de valores desses parâmetros nas simulações hidrodinâmicas, não foram verificadas alterações significativas nos perfis de temperatura simulada nas camadas monitoradas. Assim, os valores finais dos parâmetros utilizados para a calibração foram os mesmos apresentados na Tabela 4.2. É importante destacar que, para um melhor ajuste de temperatura no início da simulação, seria necessária uma maior quantidade de pontos e profundidades monitoradas para representar com maior precisão as condições iniciais do corpo hídrico.

De modo a permitir a comparação entre as temperaturas observadas nos pontos de monitoramento da Caesb, apresentados na Figura 4.7, e as temperaturas simuladas pelo modelo, as Figuras 5.7 a 5.11 dispõem os gráficos comparativos de temperatura para as camadas e regiões que apresentam monitoramento. Os gráficos ilustram o comportamento térmico ao longo do ano de referência.

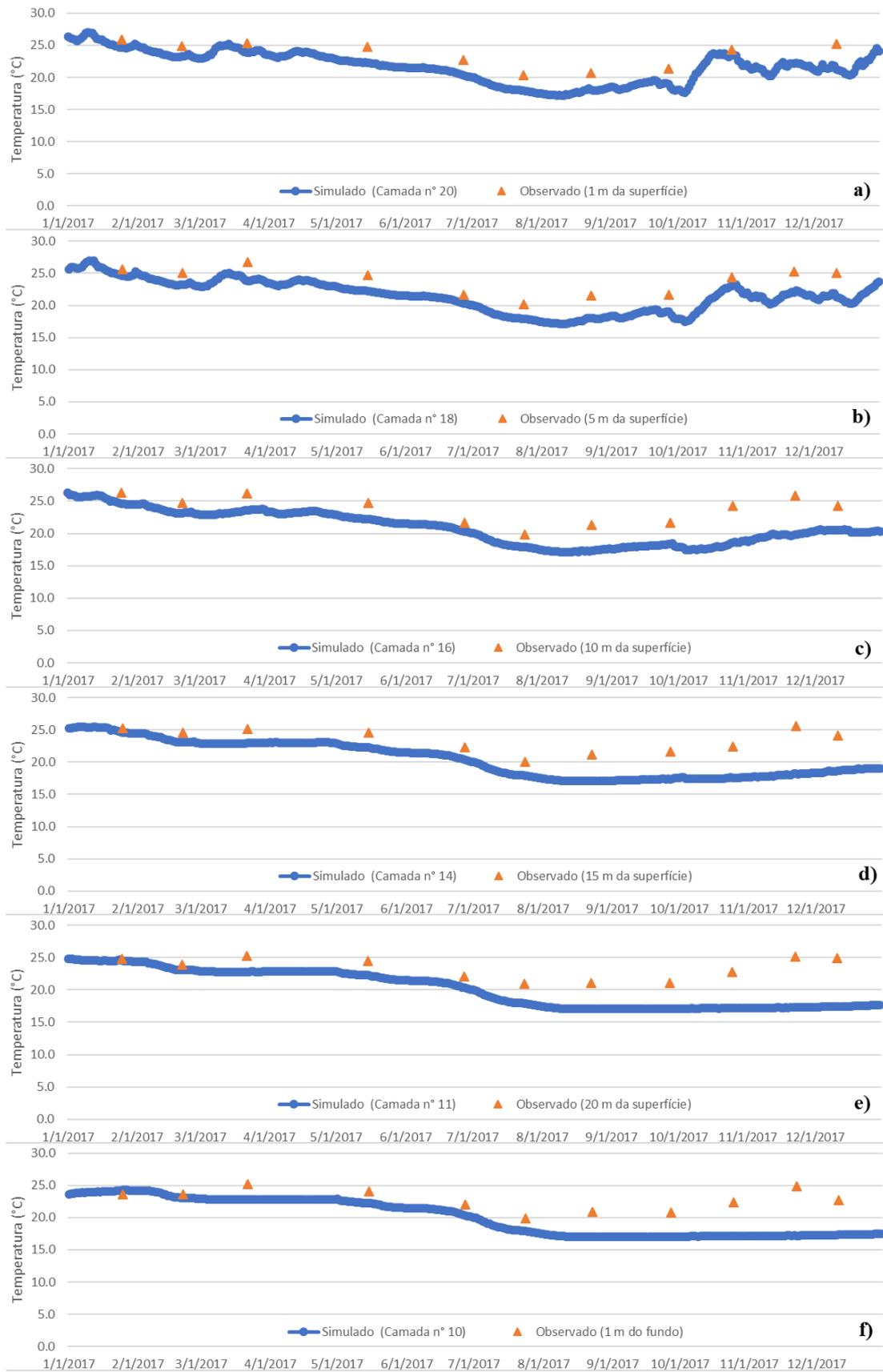


Figura 5.7 – Gráficos comparativos das séries de temperatura simulada e observada nas camadas do ponto de monitoramento da Caesb Região Central.

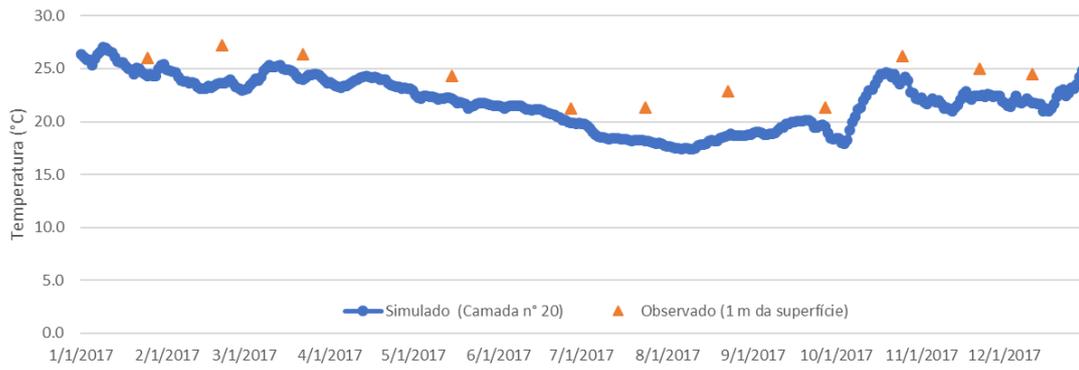


Figura 5.8 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb *Ponte Gilberto Salomão*.

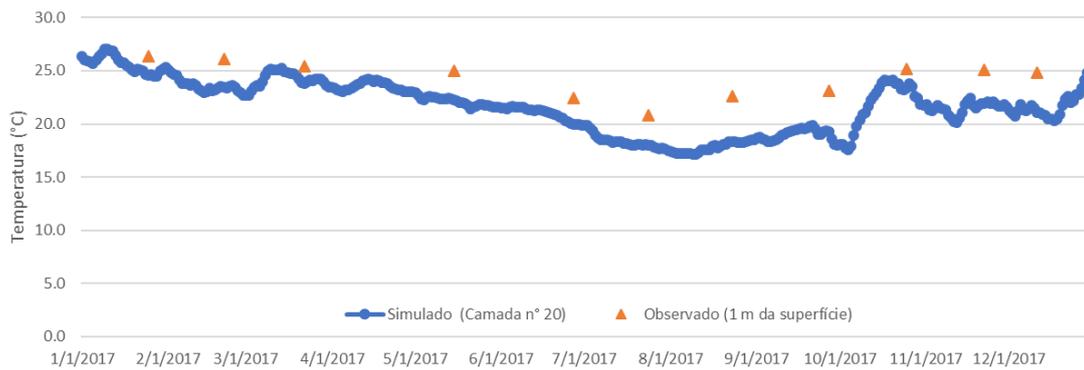


Figura 5.9 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb *Entrada do Ribeirão do Torto*.

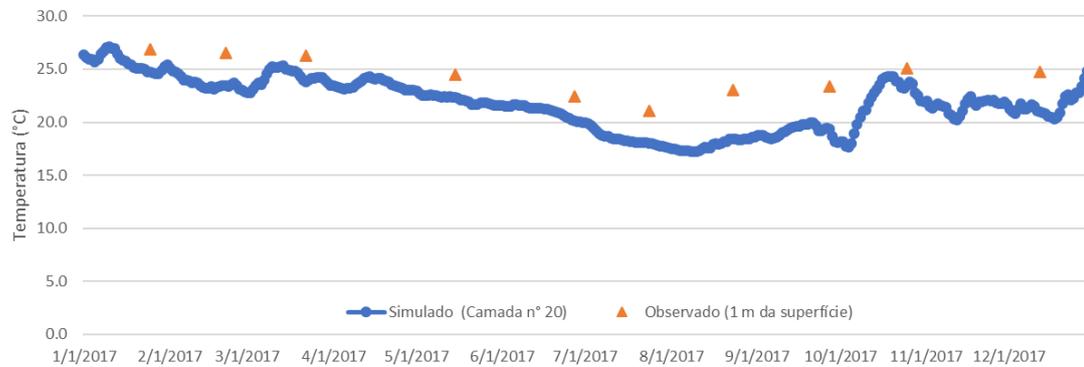


Figura 5.10 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb *Minas Brasília Tênis Clube*.

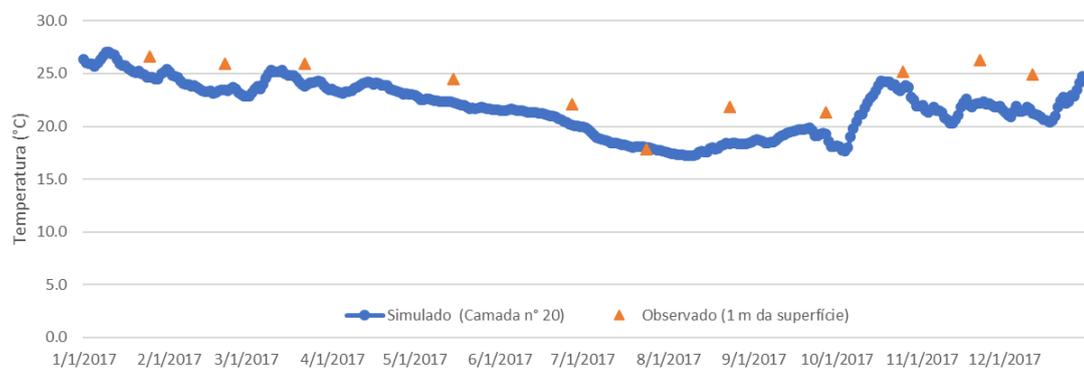


Figura 5.11 – Gráfico comparativo das séries de temperatura simulada e observada na camada superficial do ponto de monitoramento da Caesb *Parque da QL 14*.

Pela observação das Figuras, nota-se que as temperaturas simuladas pelo modelo, na quase totalidade dos pontos monitorados, apresentaram valores inferiores aos observados. Nota-se também que o erro tende a aumentar no período seco e frio, entre os meses de junho a setembro, período em que a estratificação térmica é rompida e ocorre a circulação da coluna de água. Nas camadas superficiais, embora com valores menores, a temperatura simulada apresentou tendências de queda e elevação próximas às da série de temperatura observada para todo o período de simulação, indicando boa representatividade do modelo para estimativa de temperatura nas regiões próximas à superfície, em que se pese que a frequência de monitoramento da temperatura é de ordem mensal e os resultados do modelo são de ordem diária. As divergências com os valores observados podem estar atribuídas, entre outros fatores, à turbulência provocada pelo vento, aos parâmetros de calibração utilizados nas simulações, ao momento de captura da informação simulada (10h da manhã) e às simplificações do modelo no transporte de calor pelas camadas.

Nas camadas inferiores, unicamente representadas pelo ponto de monitoramento *Região Central* (Figura 4.7), verifica-se a mesma tendência de redução da temperatura entre os valores simulados e observados no período entre os meses de janeiro e agosto. Nos meses subsequentes, contudo, nota-se que o modelo não eleva a temperatura nas camadas mais profundas, de modo a acompanhar a tendência de aquecimento observada. Esse pode ser um indicativo de que o D-Flow, com os parâmetros adotados e para as condições apresentadas neste trabalho, não obteve simulações satisfatórias quanto a transferência de calor entre as camadas superficiais para as camadas mais próximas ao fundo do Lago.

A temperatura no perfil de profundidade no ponto de monitoramento *Região Central* é mostrada na Figura 5.12, com os perfis verticais de temperatura nos meses com dados observados e os respectivos valores simulados. Em decorrência da indisponibilidade de dados observados para o mês de abril do referido ano, este mês não foi incluído no comparativo de imagens apresentado na Figura 5.12. Nessa Figura, reitera-se, na simulação, o estabelecimento de uma condição de estratificação térmica mais acentuada, principalmente nos meses de outubro a dezembro. Já em meses onde os registros indicam que não há estratificação térmica, como fevereiro, pôde-se observar que o modelo considerou que havia sido estabelecida uma condição de uniformidade térmica ao longo do perfil vertical da coluna de água. Percebe-se ainda que, no decorrer dos meses, ocorre um distanciamento entre os valores observados e simulados, reduzindo a acurácia do modelo após o período mais frio do ano, entre os meses de maio e setembro. Em praticamente todas as

profundidades e meses monitorados, os valores estimados nas simulações foram inferiores aos registros da Caesb. A partir de todas essas considerações, foi possível concluir que o modelo, para as condições propostas, não conseguiu representar satisfatoriamente o padrão de circulação da coluna de água. As simulações desenvolvidas neste trabalho foram realizadas para o período de um ano e os resultados mostrados exigem ainda um esforço de calibração e ajustes.

É importante comentar que a definição dos valores para os parâmetros de calibração, como os números de Dalton e Stanton, levou em consideração um pequeno grupo de simulações anuais executadas neste trabalho, de modo que não se foi testada toda a amplitude de variação desses parâmetros, e sim tomou-se como ponto de partida valores sugeridos pelo manual e por outros trabalhos. Assim, é possível que valores mais distantes dos sugeridos inicialmente possam fornecer resultados melhores.

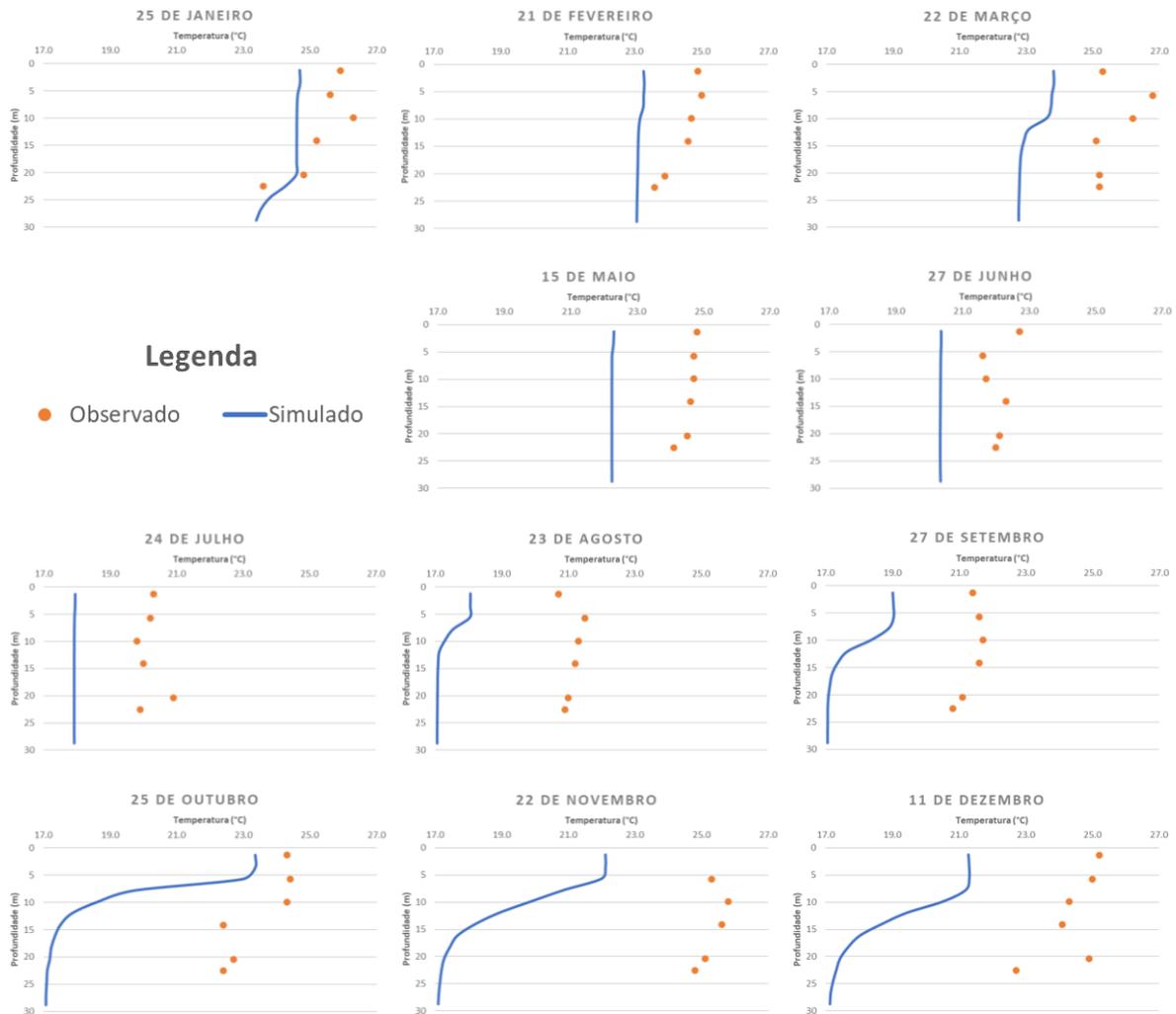


Figura 5.12 – Comparativo da evolução do perfil vertical de temperatura no ponto de monitoramento C (*Área Central*) ao longo do ano de 2017.

Outro produto que pode ser gerado pelo modelo é a temperatura simulada por célula da malha, tanto no plano horizontal quanto em seções transversais na vertical, e para intervalos regulares de armazenamento de resultados, conforme estabelecido no Grupo *Output* (Tabela 4.2). Neste trabalho, embora as simulações tenham sido executadas com passo de tempo da ordem de minuto, optou-se por exibir apenas os resultados diários de temperatura simulada às 10h da manhã, de modo a reduzir a dimensão dos arquivos gerados. O modelo fornece ainda a possibilidade de construção de animações para o acompanhamento das oscilações de temperatura ao longo do período desejado, para todas as camadas da malha.

A Figura 5.13 apresenta a evolução temporal dos perfis de temperatura no espelho do Lago Paranoá apenas para os meses de solstício e equinócio de 2017. De modo geral, a temperatura superficial apresentou-se uniforme em toda a extensão do Lago. Em outros momentos, neste caso representado apenas pelo mês de setembro, percebeu-se uma graduação de cores mais acentuada no sentido Leste-Oeste, que pode ter sido provocada tanto pelo aquecimento diferencial da coluna de água quanto pelos efeitos do vento.

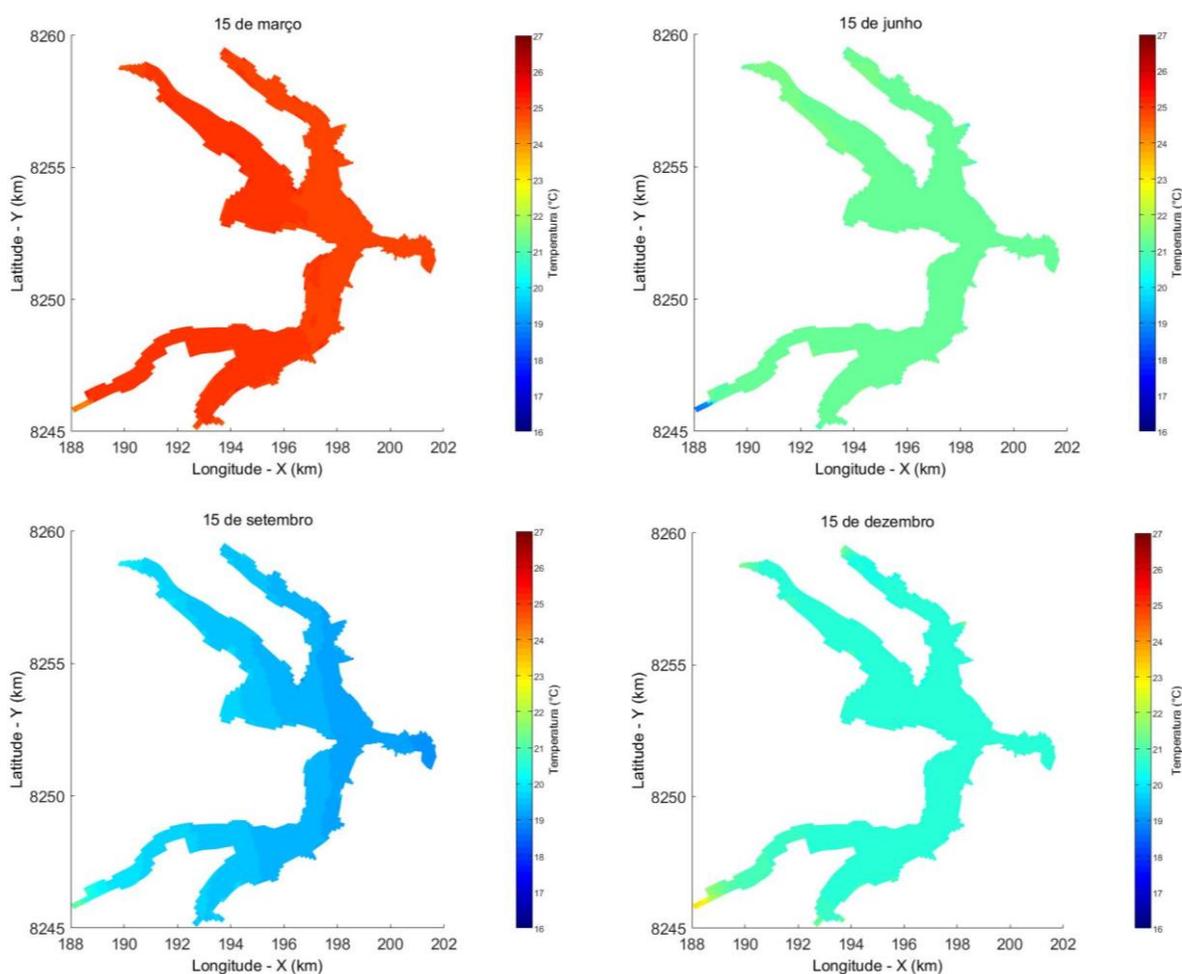


Figura 5.13 – Temperaturas simuladas na camada superficial da malha em quatro momentos do ano de 2017 (Elaborada pelo autor).

A Figura 5.14, por sua vez, ilustra, para os mesmos meses, os perfis verticais de temperatura para a seção longitudinal em que se encontra o vertedor. Embora esteja apresentado apenas quatro dias dentro do intervalo de simulação, é possível notar a evolução gradual da condição de temperatura estratificada para uniforme e em seguida novamente para estratificada, mas esta última com menor temperatura. As três primeiras imagens situam o segmento de malha selecionado, ilustrado nas outras quatro imagens em termos do perfil de temperatura simulado. Na Figura ainda estão apresentadas as localizações das células que representam os vertedores e a tomada de água.

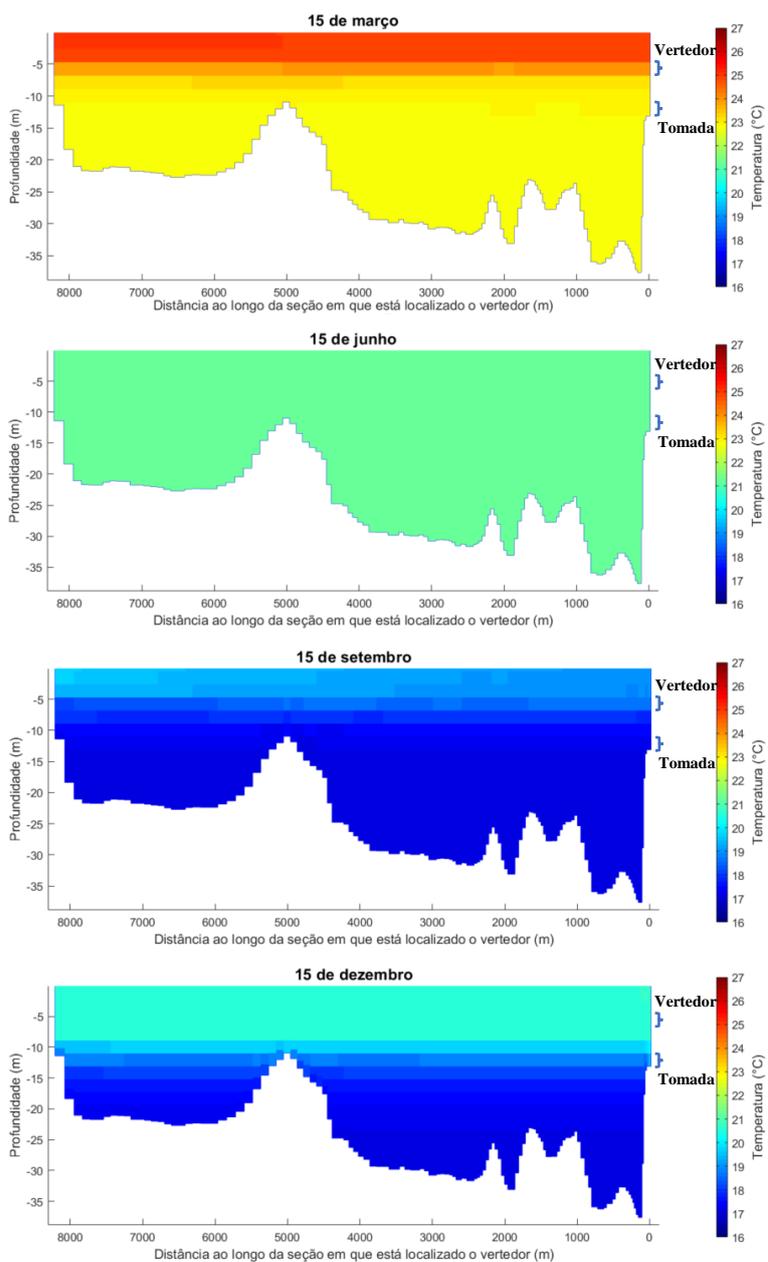
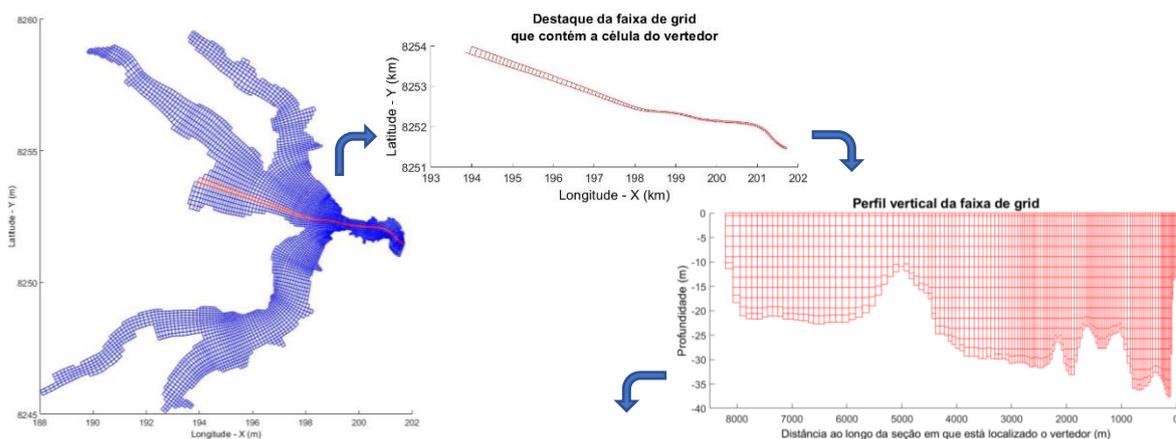


Figura 5.14 – Temperaturas simuladas no perfil vertical da malha na linha do vertedor em quatro momentos do ano de 2017 (Elaborada pelo autor).

No primeiro perfil vertical da Figura 5.14, referente ao dia 15 de março, as camadas abaixo da linha da tomada de água encontram na temperatura de 23 °C, mesmo valor estabelecido como condição inicial de simulação, em 1° de janeiro. Conforme definido na Tabela 4.4, a temperatura inicial para as camadas mais profundas (de 9 a 1) foi estimada a partir dos valores registrados nas camadas superiores, tendo em vista que não se tinham disponíveis registros de monitoramento nessas regiões. Há, portanto, um fator de erro associado a essa estimativa de perfil térmico, que pode vir a afetar a evolução da temperatura no decorrer do ano simulado.

Outra simplificação sugerida neste trabalho foi a de replicar os valores observados e interpolados das camadas de número 1 a 19 do ponto *Região Central* (Figura 4.7) para todas as demais células da malha, fazendo a correspondência com as respectivas camadas. Essa consideração, embora com certo grau de imprecisão e erro, se fazia necessária para fornecer ao modelo as condições iniciais de temperatura. Para a camada superficial, por outro lado, foram utilizados os 5 pontos de monitoramento da Caesb, pois todos apresentam registros de temperatura.

Vale ressaltar ainda que a simplificação sugerida para a série de evaporação, admitindo mesmo potencial tanto de dia quanto de noite, pode ter interferido na propagação de calor nas camadas da malha, resultando no aumento da diferença entre os registros observados e os resultados da simulação.

De modo a minimizar as fontes de erro referentes às condições iniciais de temperatura, seria necessário monitorar mais pontos e profundidades em várias regiões do espelho do Lago e reduzir as simplificações e interpolações dos valores de temperatura para as camadas da malha. A série de potencial de evaporação também poderia ser ajustada para considerar a variabilidade horária ao longo do dia, e assim melhorar a estimativa da taxa de evaporação. Por se tratar de um modelo tridimensional e com muitas opções para simulação de processos e constituintes, o Delft3D exige uma grande quantidade de dados para representar com fidelidade toda a extensão do corpo hídrico em estudo.

5.2.2. Simulações de Rebaixamento Rápido do Nível de Água do Lago

Neste tópico são apresentados os resultados do comportamento do nível do Lago quando este foi submetido a operações de *flushing*, exibindo um gráfico comparativo entre possíveis vazões efluentes nas comportas do vertedor da barragem e uma correlação entre vazão vertida, rebaixamento de nível e tempo de operação das comportas.

No gráfico apresentado pela Figura 5.15 estão dispostas as curvas de rebaixamento de nível de água para os cenários de vazão efluente pelas comportas do vertedor da barragem, bem como a curva que representa o nível observado para a operação real do vertedor durante o período de 3 a 10 de outubro de 2017, disposto em horas de operação, para a condição inicial de nível de água em 1.000,63 m. Para todos os cenários simulados, foram mantidas as mesmas condições de vazões de entrada no Lago para o período. Os demais dados de entrada, como séries de vento, pluviometria, radiação solar, evaporação e os parâmetros físicos do modelo, foram os mesmos da etapa de calibração (item 4.4.1).

A observação da Figura 5.15 permite determinar o tempo estimado de operação das comportas para que o nível do Lago seja rebaixado até uma determinada cota, visando assegurar as condições de usos múltiplos ou limitar a operação do barramento até que seja atingido o nível mínimo admitido para eventos de *flushing*.

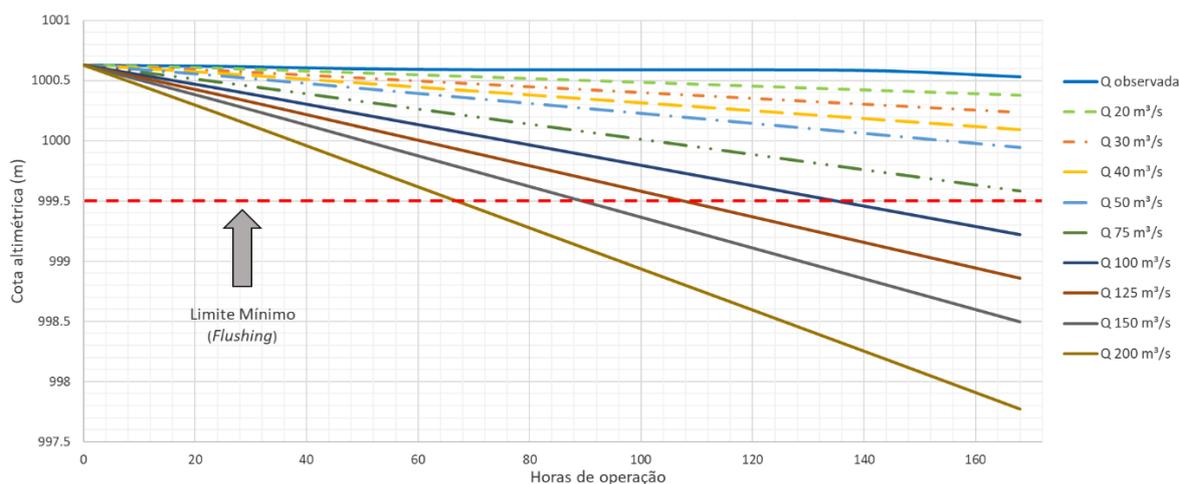


Figura 5.15 – Perfis de rebaixamento do nível do Lago Paranoá sob diferentes condições de vazão efluente pelas comportas do vertedor (Elaborada pelo autor).

A comparação entre os valores simulados e a condição real de nível observado é possível quando se analisa o grau de rebaixamento produzido no Lago devido a uma determinada condição de operação das estruturas hidráulicas do barramento. Assim, ao dividir a variação de nível durante um determinado período pela vazão média efluente da barragem no mesmo período, torna-se possível comparar as respostas das simulações com a resposta do reservatório numa situação real de operação. Neste contexto, a Tabela 5.1 dispõe a taxa de rebaixamento (TReb) de nível de água para cada condição apresentada nos cenários de 1 a 9 e para a série observada no mesmo período, a qual inclui tanto a vazão turbinada quanto a vertida. A equação apresentada para fornecer essas taxas utiliza a área total da malha numérica (41,8 km²) e o fator de conversão de dias para segundos (1 d / 86.400 s).

A principal limitação quanto à utilização desta abordagem reside no fato de que as vazões observadas possuem apenas uma medição por dia. Como podem existir grandes variações de vazão de um dia para o outro, a vazão média real para um período entre dois dias pode ser diretamente influenciada e, conseqüentemente, induzir a valores de TReb diferentes da real.

Tabela 5.1 – Taxa de rebaixamento do nível do Lago em termos da vazão efluente.

Período	Vazão obs. média (m ³ /s)	Taxa de rebaixamento* (x10 ⁻¹)									
		Q _{obs}	Q ₂₀	Q ₃₀	Q ₄₀	Q ₅₀	Q ₇₅	Q ₁₀₀	Q ₁₂₅	Q ₁₅₀	Q ₂₀₀
3 a 4/10/2017	10,017	4,83	6,02	7,35	8,01	8,41	8,95	9,21	9,37	9,48	9,62
4 a 5/10/2017	12,153	7,96	8,86	9,24	9,43	9,55	9,70	9,77	9,82	9,85	9,88
5 a 6/10/2017	7,114	6,80	9,01	9,33	9,49	9,59	9,72	9,79	9,84	9,86	9,90
6 a 7/10/2017	2,083	0**	9,06	9,37	9,52	9,62	9,74	9,81	9,85	9,87	9,90
7 a 8/10/2017	2,083	0**	9,14	9,43	9,57	9,65	9,76	9,82	9,86	9,88	9,91
8 a 9/10/2017	6,719	7,20	9,18	9,45	9,59	9,67	9,78	9,84	9,87	9,89	9,94
9 a 10/10/2017	19,734	12,3	9,21	9,47	9,61	9,70	9,81	9,85	9,87	9,90	9,99
Médio	-	7,81	8,64	9,09	9,32	9,46	9,64	9,73	9,78	9,82	9,88

* Taxa de rebaixamento $\rightarrow TReb = \frac{\Delta Nível \cdot Área_{Lago}}{\Delta Q \cdot 0,5 \cdot dia} = \frac{(N_i - N_{i+1})}{(Q_i + Q_{i+1}) \cdot 0,5} \cdot \frac{41.799.990 m^2}{86.400 s}$, onde i corresponde ao dia.

** Sem variação observada de nível para o período e, portanto, taxa de rebaixamento igual a zero.

Pode-se observar na Tabela 5.1 que as taxas de rebaixamento para todos os casos apresentaram valores na mesma ordem de grandeza. Em termos comparativos, para o período de 9 a 10 de outubro, em que a vazão média adquiriu um valor próximo ao da vazão simulada de 20 m³/s (Q₂₀), a diferença percentual entre as TReb foi de aproximadamente 26%. Como já mencionado anteriormente, além das limitações de construção do próprio modelo, essas diferenças também podem ter sido provocadas pela reduzida precisão dos valores de vazão estimados nas estruturas do barramento, que afetariam a magnitude da taxa de rebaixamento. Embora tenha havido essa diferença, na média, os valores alcançados indicam uma boa correlação entre nível e vazão efluente do Lago simulados pelo D-Flow.

Nesse contexto, é possível estimar o tempo aproximado necessário para o rebaixamento do nível de água entre duas cotas definidas, considerando uma dada vazão efluente no período, a partir da seguinte equação:

$$Tempo_Reb = \frac{(N_i - N_{i+1})}{(Q_i + Q_{i+1}) \cdot 0,5} \cdot \frac{41.799.990 m^2}{TReb \cdot 10^{-1}} \cdot \frac{1h}{3.600s}$$

em que *Tempo_Reb* corresponde ao tempo de rebaixamento (horas), N_i e N_{i+1} às cotas dos níveis inicial e final (m), respectivamente, Q_i e Q_{i+1} às vazões no início e no final do período analisado (m³/s) e *TReb* à taxa de rebaixamento para a vazão correspondente (Tabela 5.1).

Vale destacar que os valores apresentados foram baseados em condições específicas de regime fluviométrico dos tributários do Lago para uma semana do período de estiagem. Neste caso, é esperado que as vazões dos contribuintes ao Lago se mantenham aproximadamente constantes, ou com tendência de redução. Neste trabalho, não foi realizada consistência dos dados fluviométricos, de modo que, caso existam oscilações expressivas dos valores monitorados, a TReb das vazões observadas no período poderia ser afetada.

5.2.3. Simulações de Rebaixamento Condicionado a Temperatura, Vazão e Vento

Neste capítulo foram discutidos os principais resultados dos cenários de simulação hidrodinâmica em que foram variadas as condições de temperatura do reservatório, a vazão efluente da barragem e os padrões de vento incidentes no espelho de água. A partir da comparação entre os cenários, é possível observar os efeitos da operação da barragem nos perfis de velocidade na coluna de água e o conseqüente arraste de material em suspensão.

A Tabela 4.6 no capítulo de Metodologia apresenta o conjunto de cenários simulados neste trabalho, construídos a partir de situações reais e hipotéticas para as condições selecionadas. À exceção dessas condições, todos os demais parâmetros físicos de entrada no modelo, especificados na Tabela 4.2, foram os mesmos dos obtidos na etapa de calibração. O período de simulação se estendeu do dia 3 ao dia 31 de outubro de 2017, estando o Lago à cota inicial de 1.000,63 m.

Apresenta-se neste trabalho os perfis de velocidade em diferentes posições no Lago, tanto em seções quanto em vistas de planta de camadas de interesse. A escolha da velocidade foi feita em função da possibilidade de associar a velocidade ao arraste de material em suspensão na coluna de água em direção às estruturas hidráulicas da barragem. Nesse contexto, seria possível avaliar quais condições de operação seriam mais eficientes em remover fitoplâncton da camada superficial do Lago e qual a importância dos efeitos do vento e da estratificação térmica no auxílio a essa remoção.

Diante do exposto, as Figuras 5.17 a 5.31 apresentam alguns dos cenários com as composições de imagens com o gradiente de velocidade para as cinco seções de referência, novamente apresentadas na Figura 5.16, e a seção da barragem, o perfil vertical longitudinal e as vistas em planta da superfície e das camadas dos vertedores e da tomada de água, com destaque para o trecho do canal final do Lago. Todos os demais cenários foram incluídos no Apêndice A.

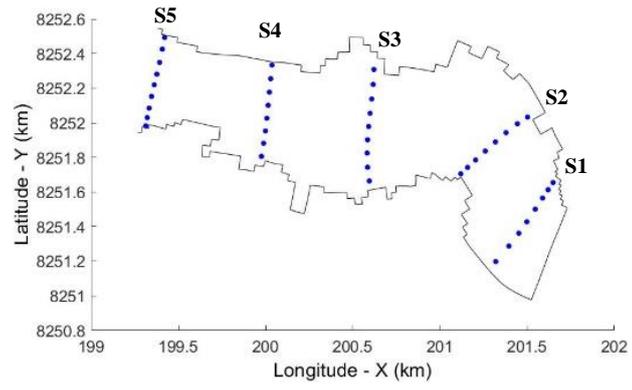


Figura 5.16 – Detalhe das seções de referência para o lançamento das partículas.

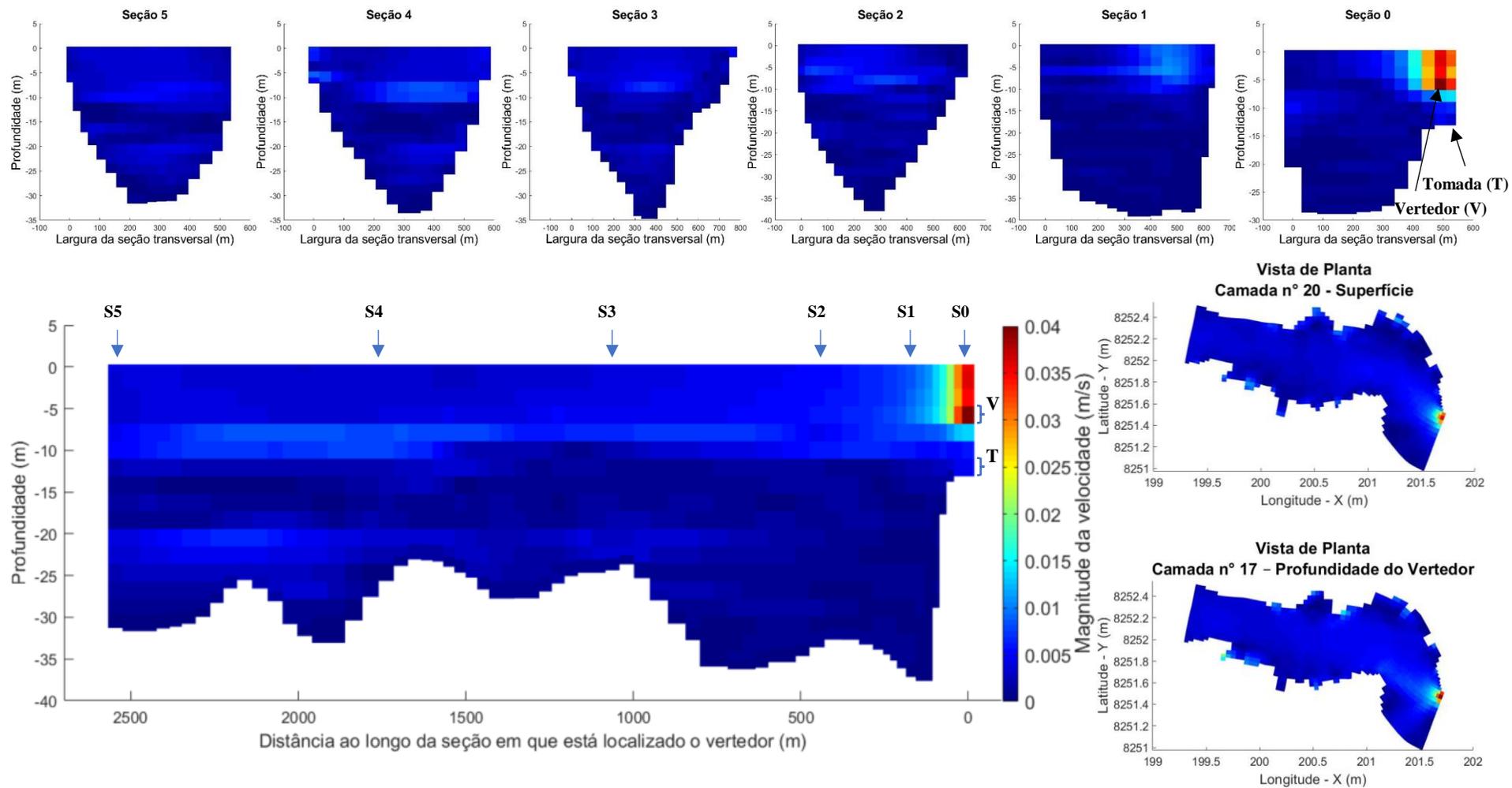


Figura 5.17 – Cenário 2.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo Vertedor e *sem vento*.

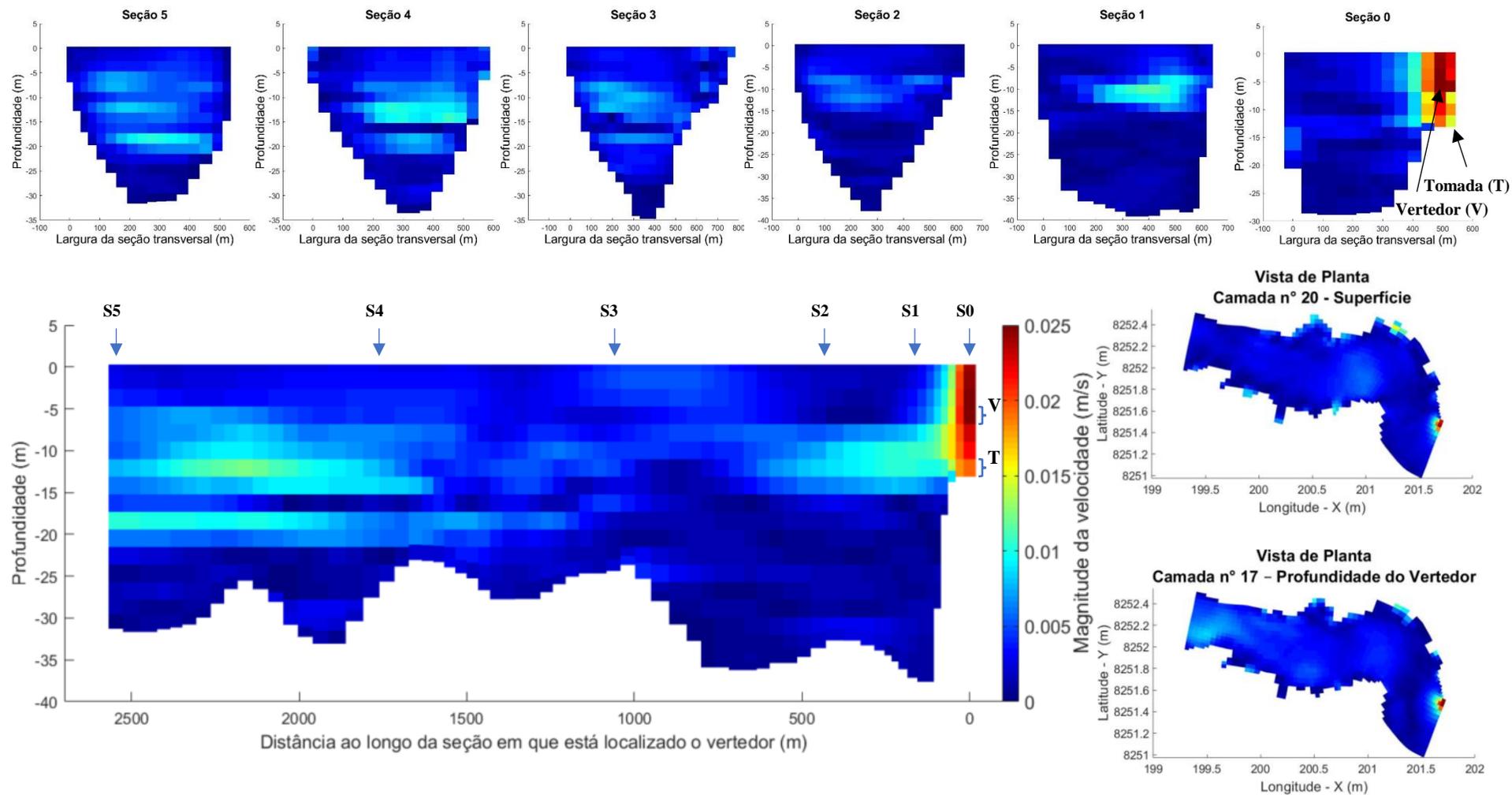


Figura 5.18 – Cenário 2.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

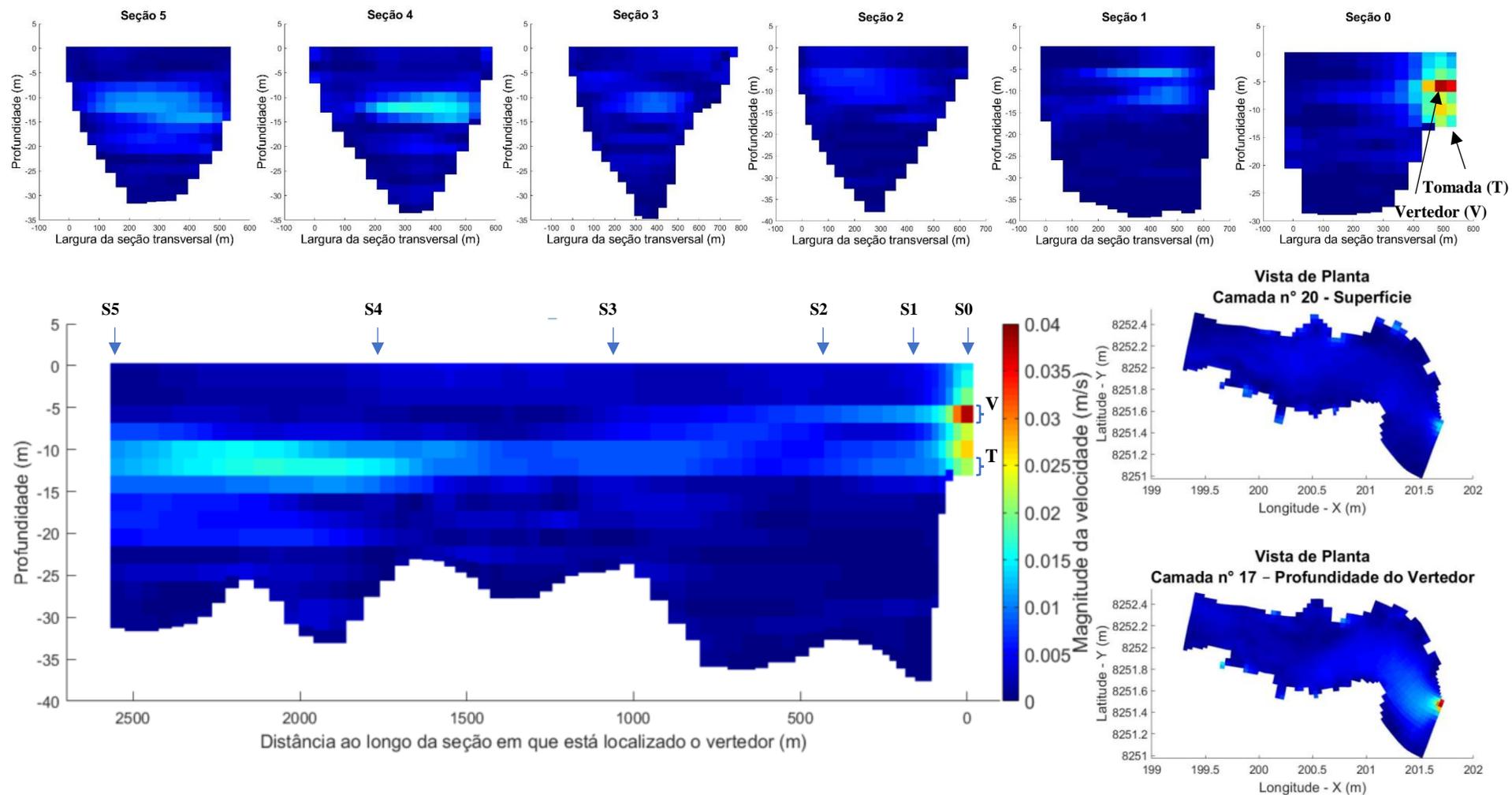


Figura 5.19 – Cenário 2.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

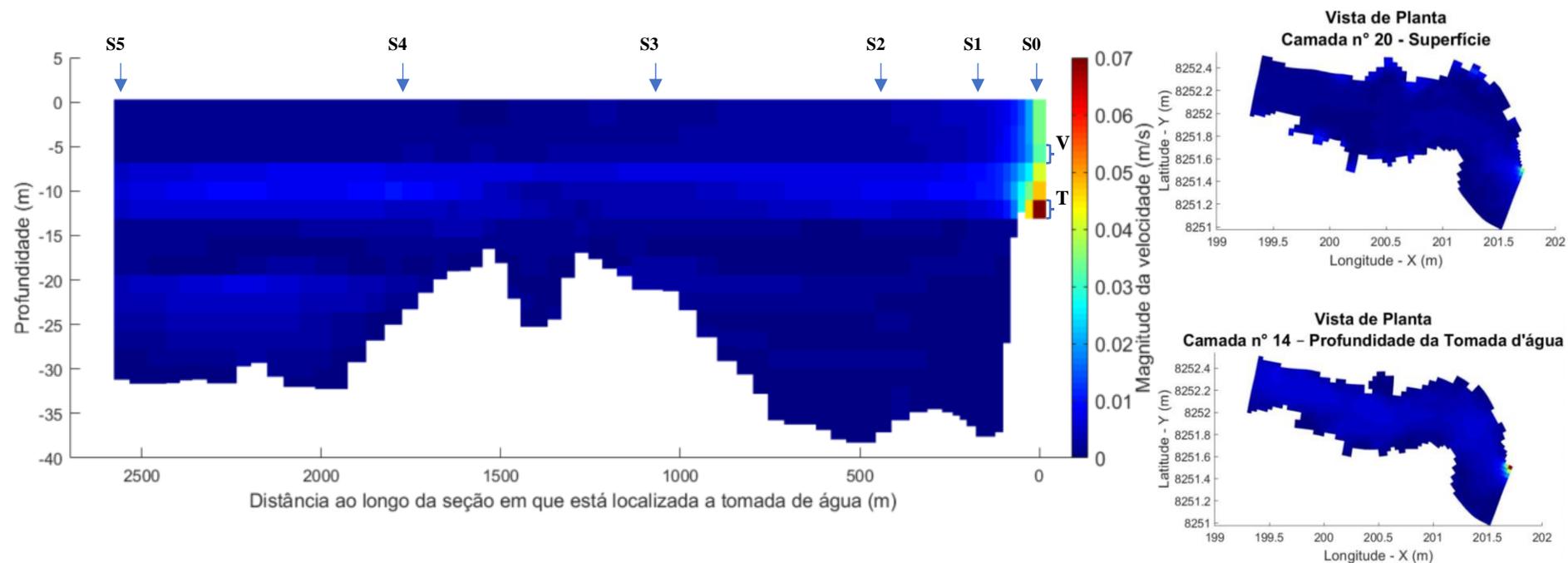
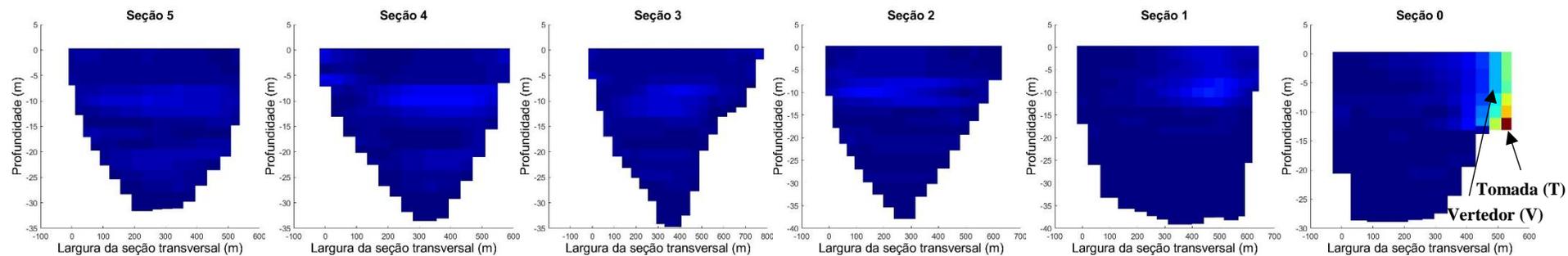


Figura 5.20 – Cenário 5.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

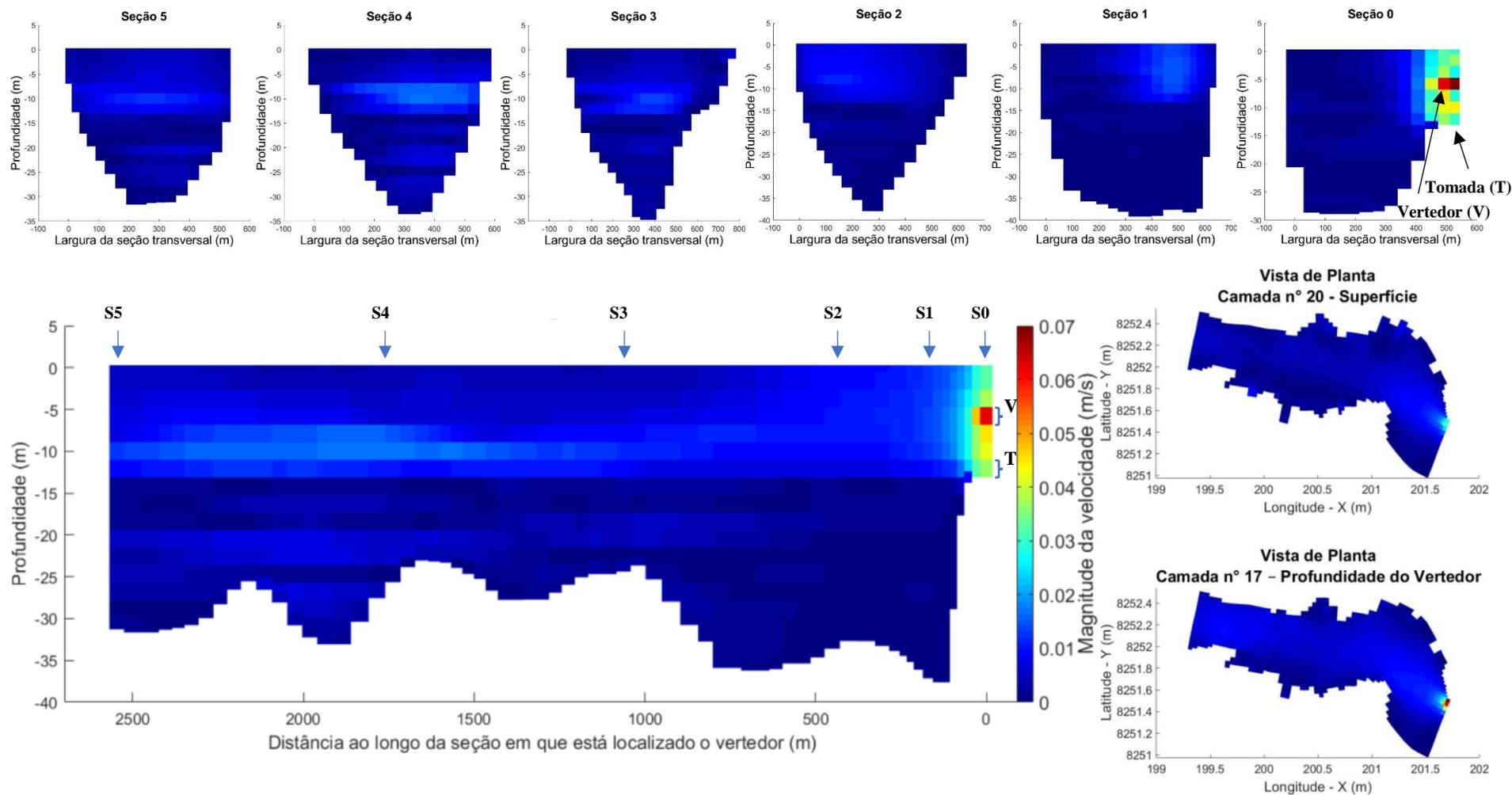


Figura 5.21 – Cenário 3.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

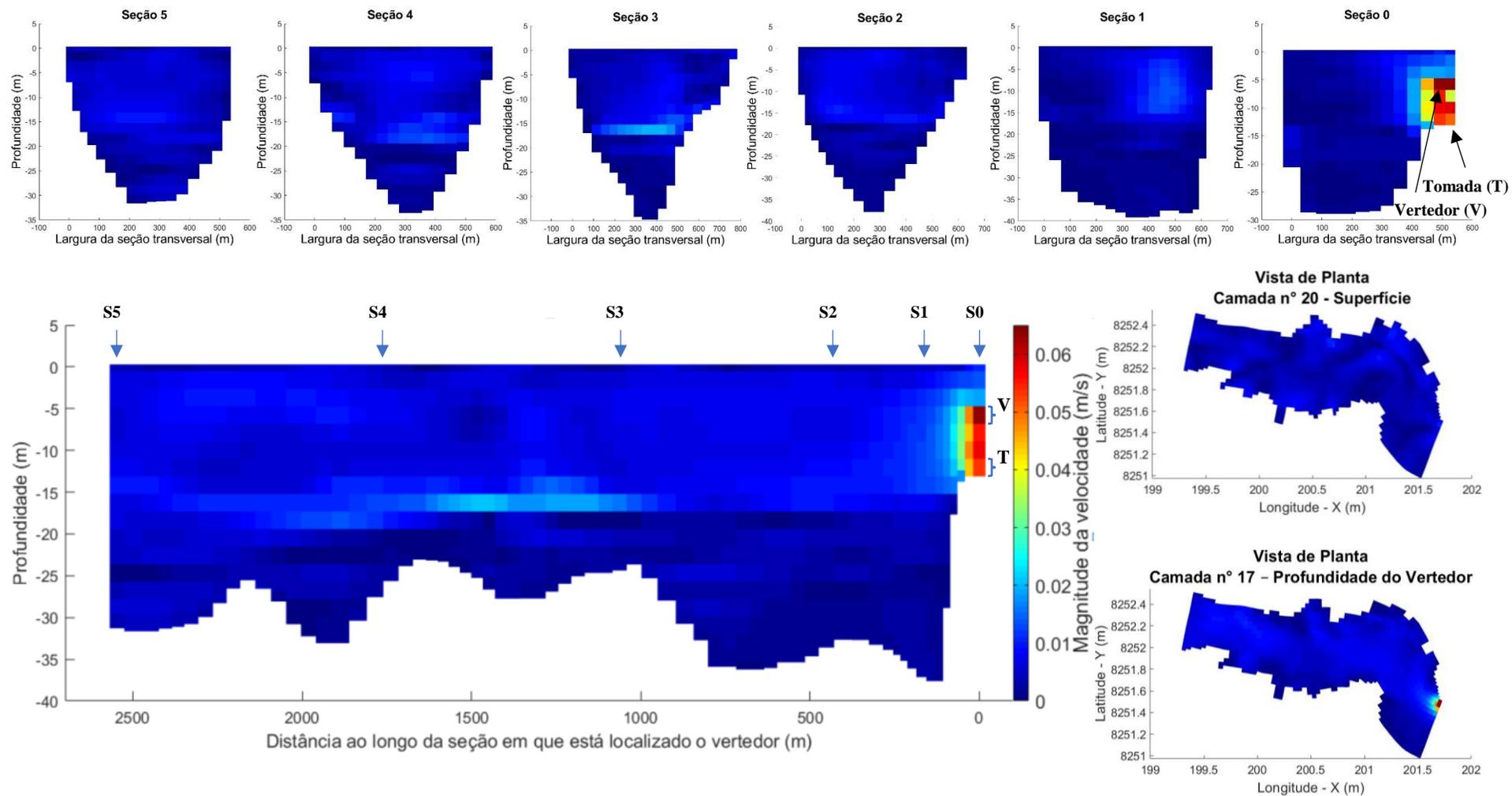


Figura 5.22 – Cenário 3.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

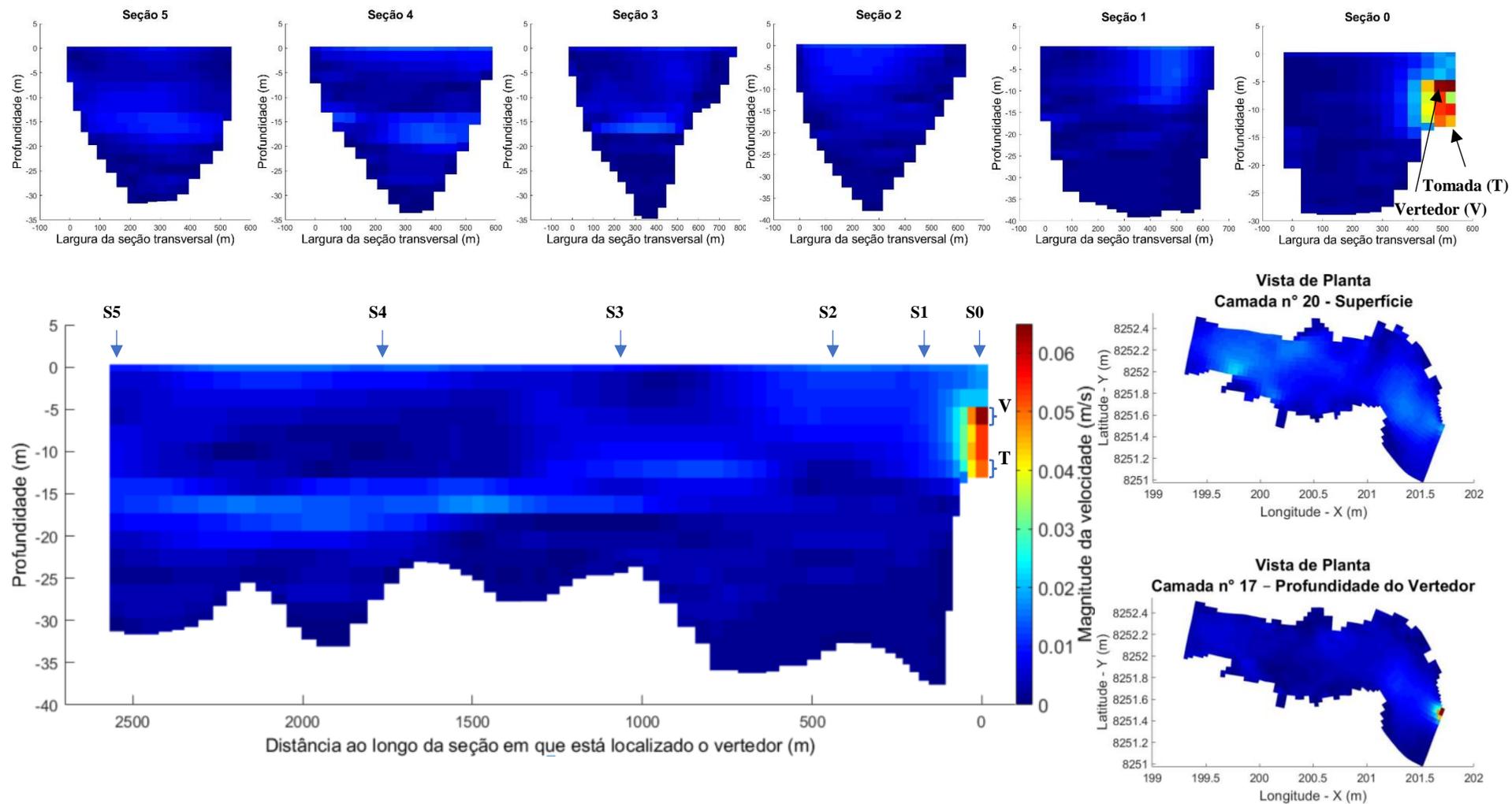


Figura 5.23 – Cenário 3.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo Vertedor e *sentido de vento a favor do fluxo*.

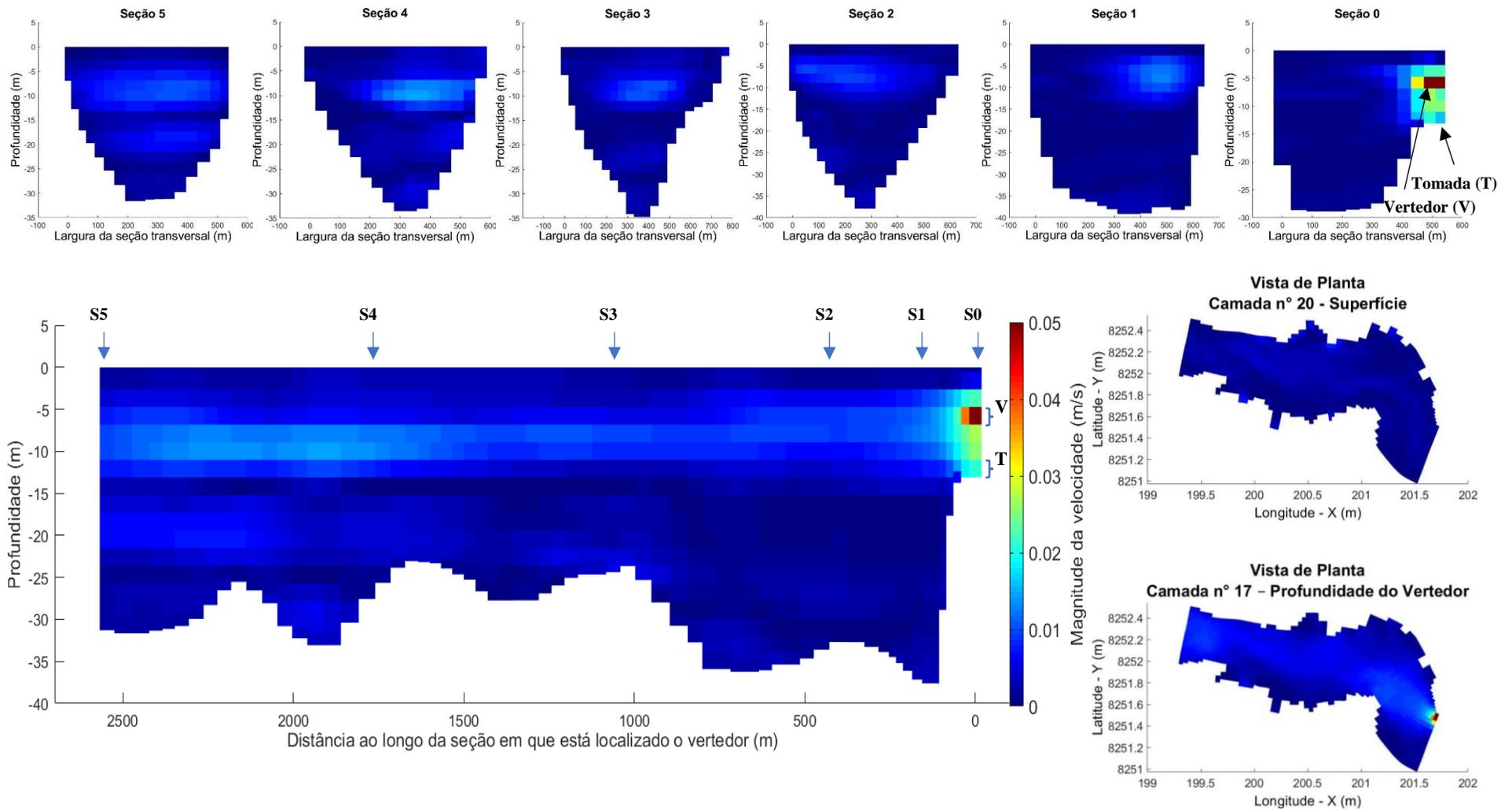


Figura 5.24 – Cenário 7.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

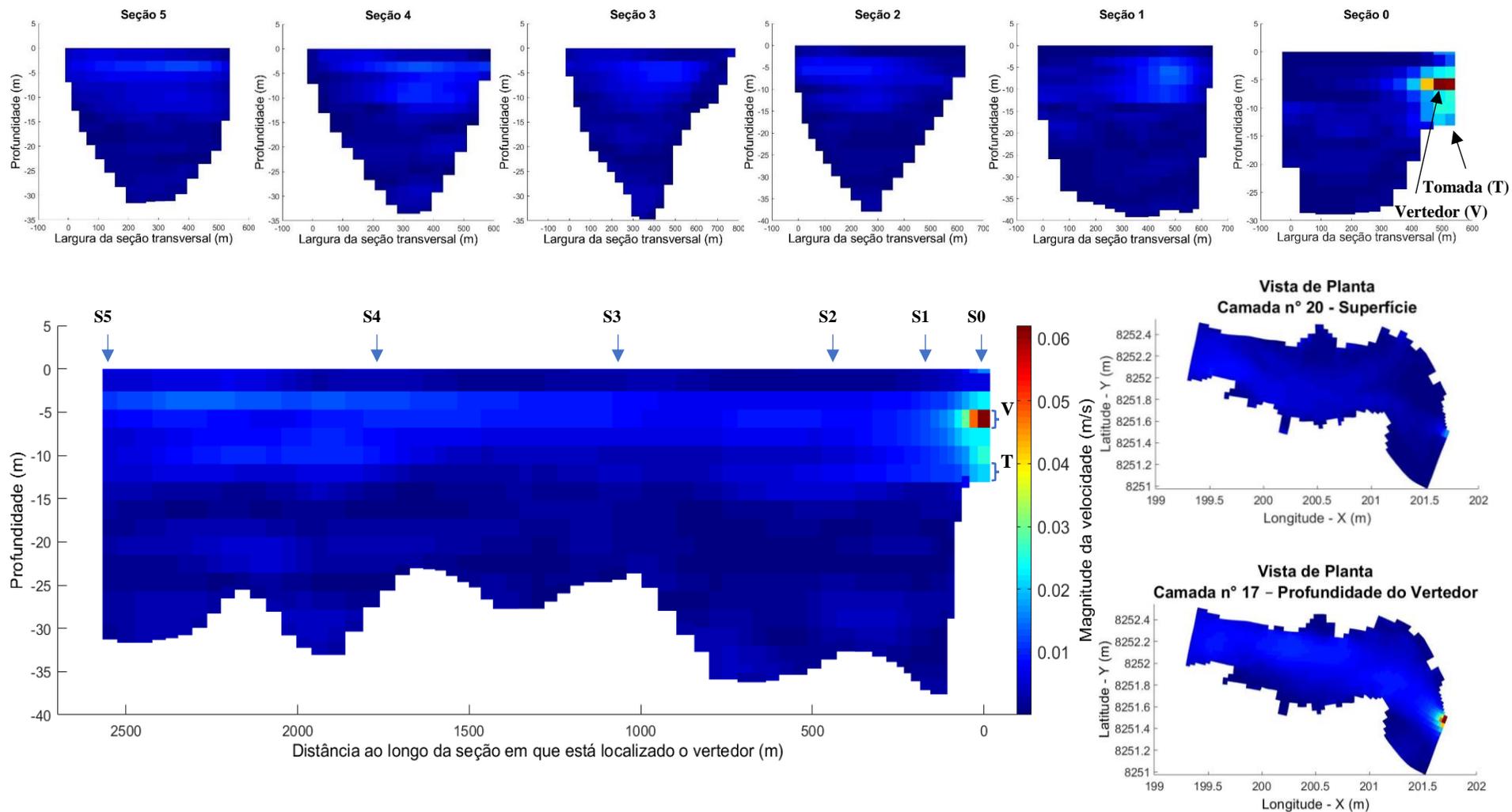


Figura 5.25 – Cenário 7.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor e sentido de vento contra o fluxo*.

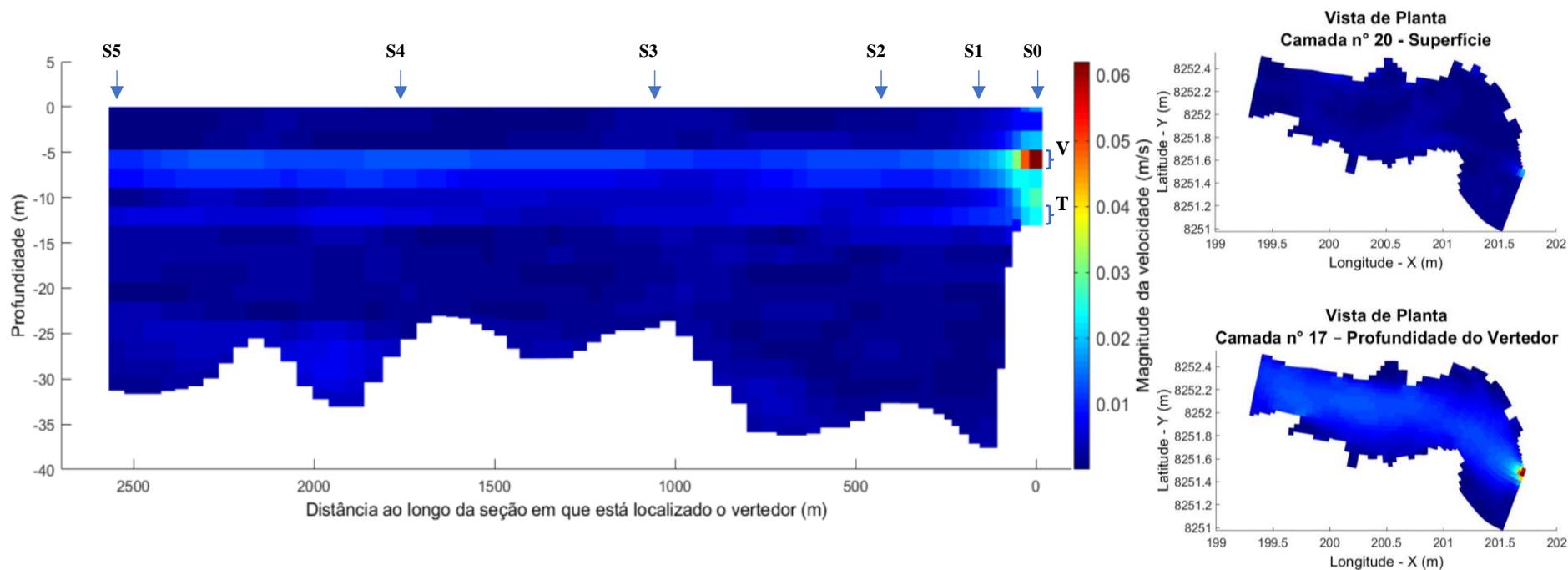
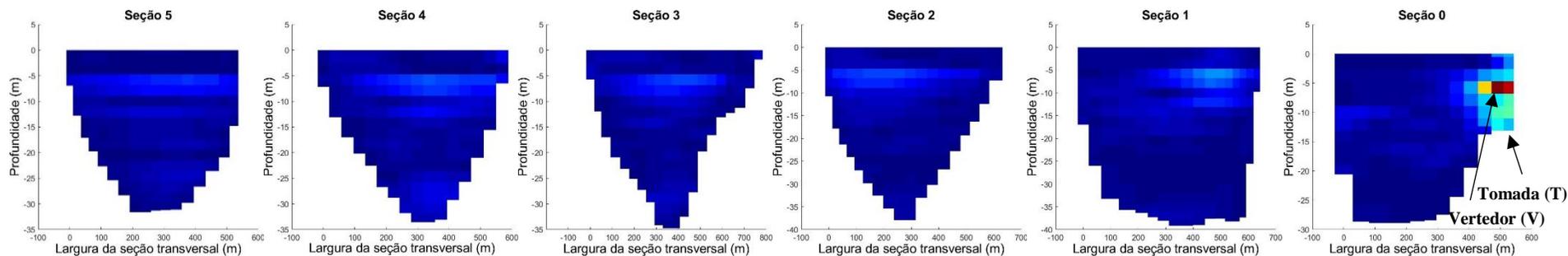


Figura 5.26 – Cenário 7.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

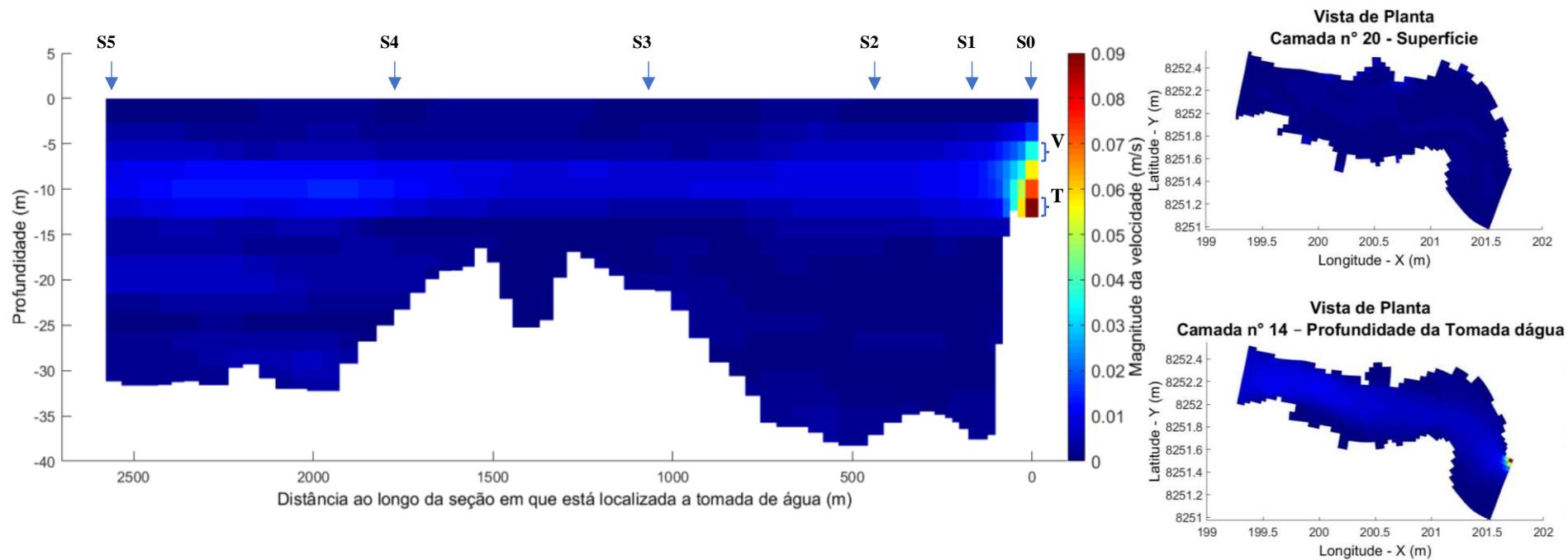
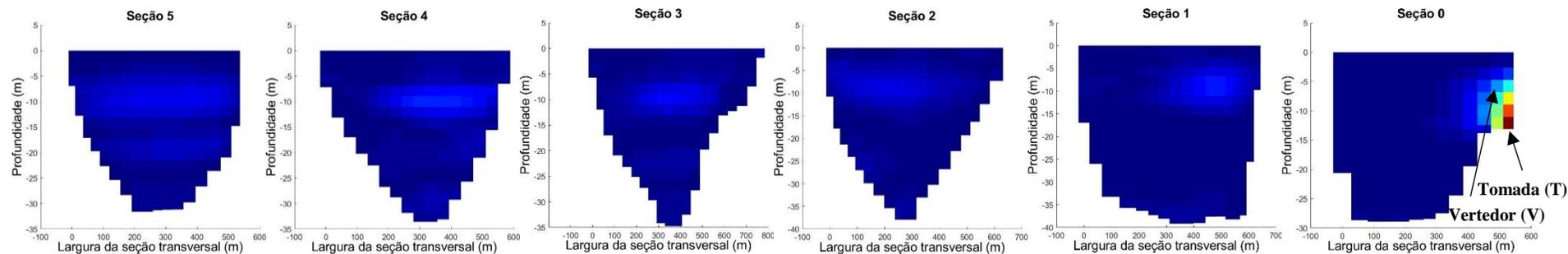


Figura 5.27 – Cenário 10.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

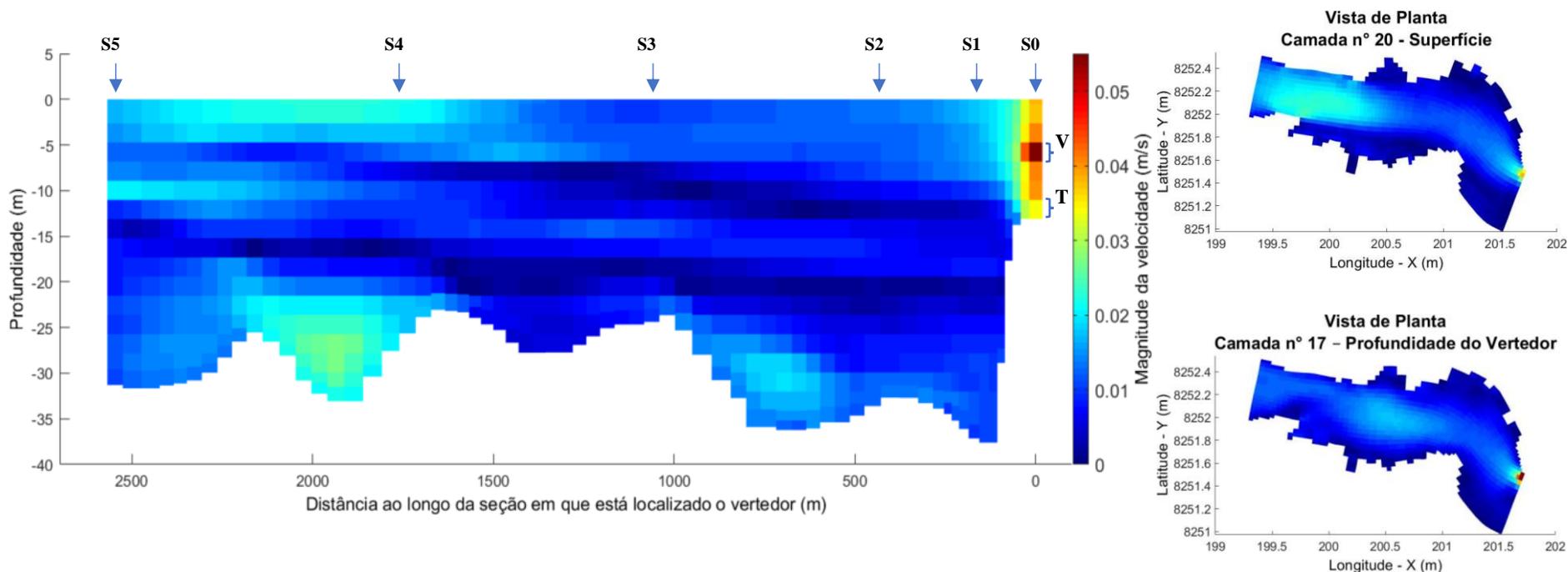
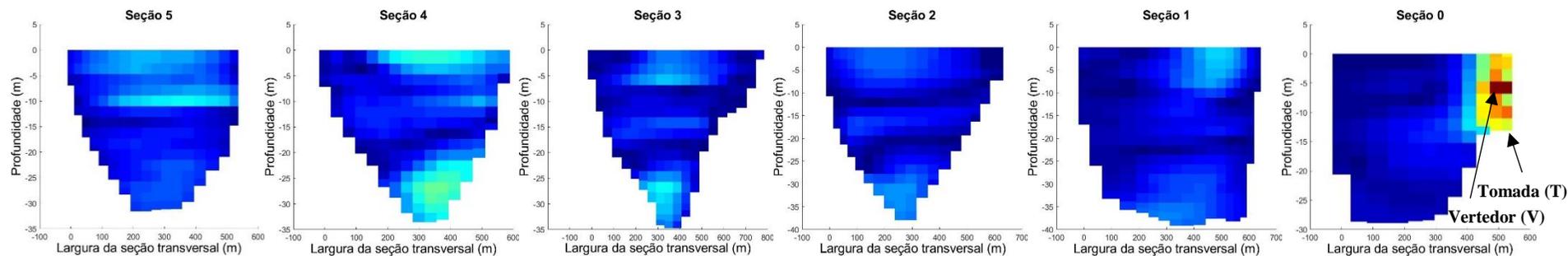


Figura 5.28 – Cenário 8.2. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

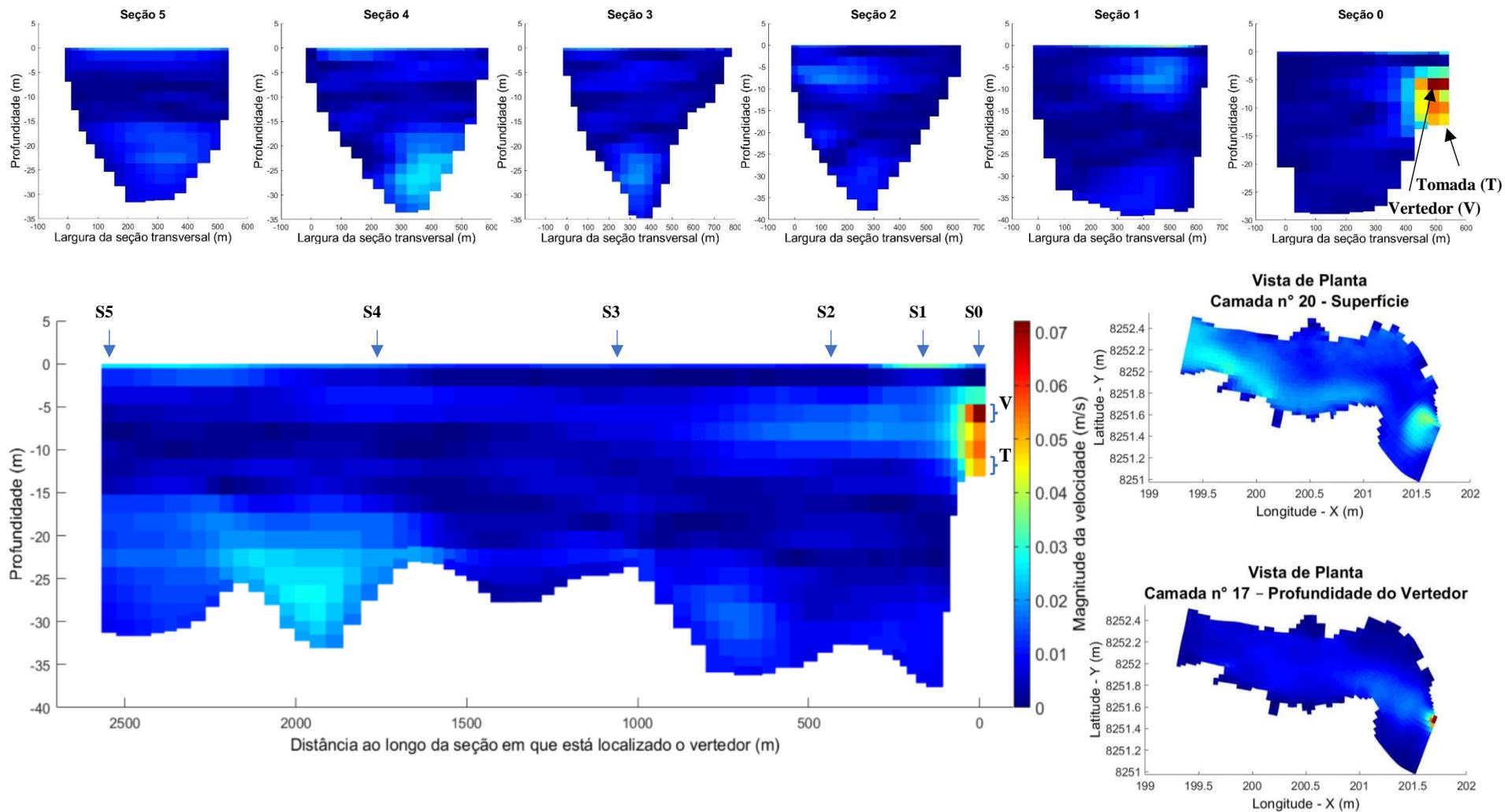


Figura 5.29 – Cenário 8.3. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

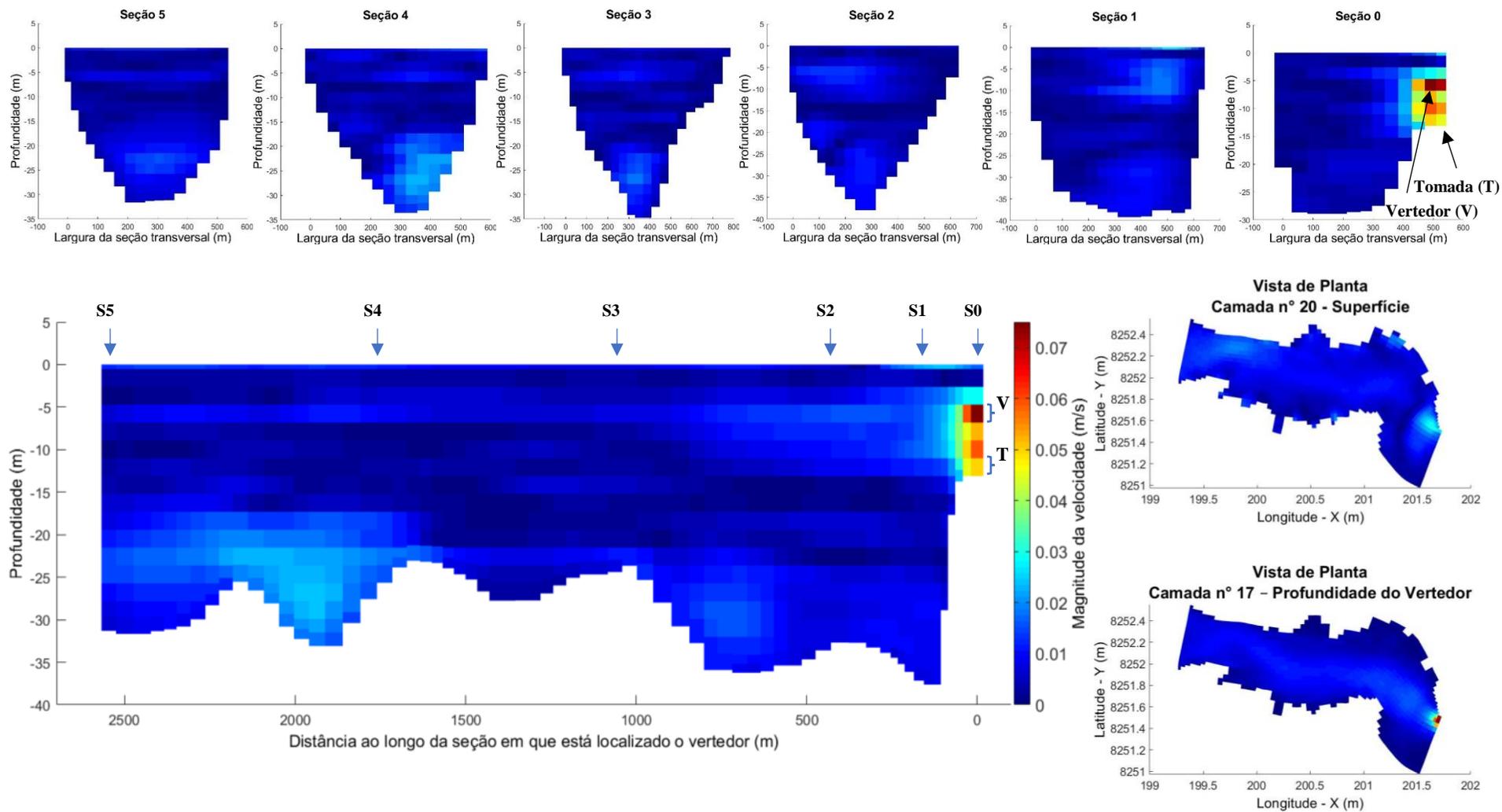


Figura 5.30 – Cenário 8.4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

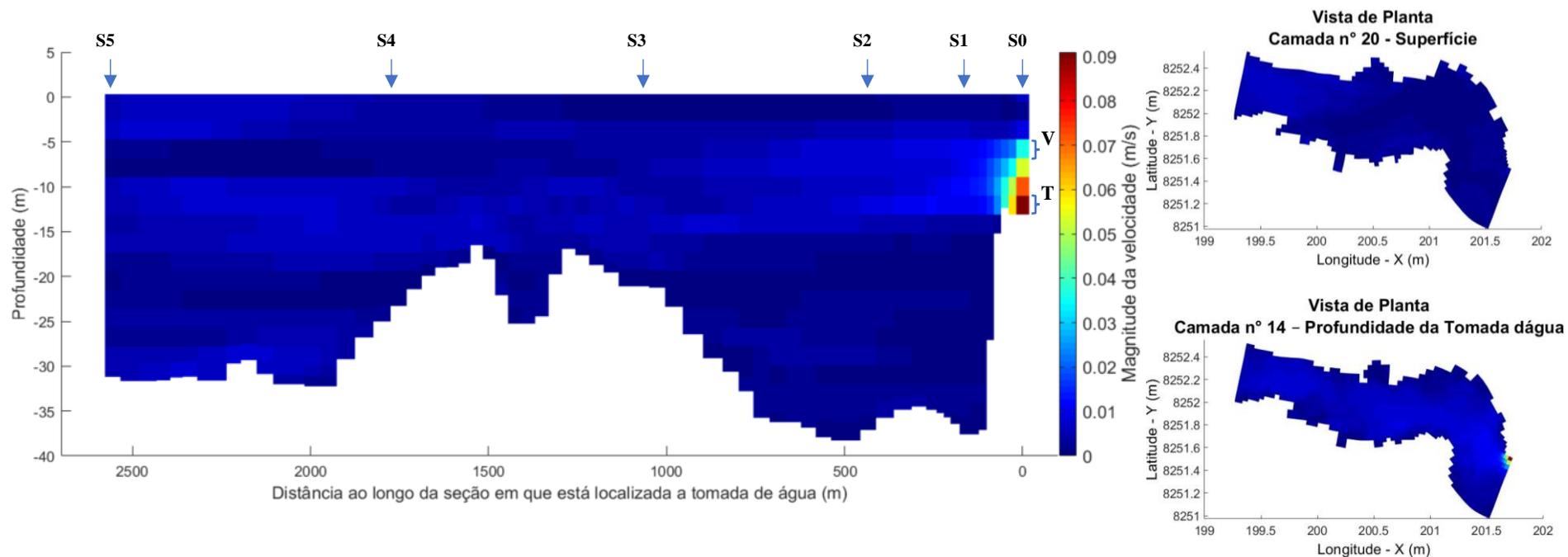
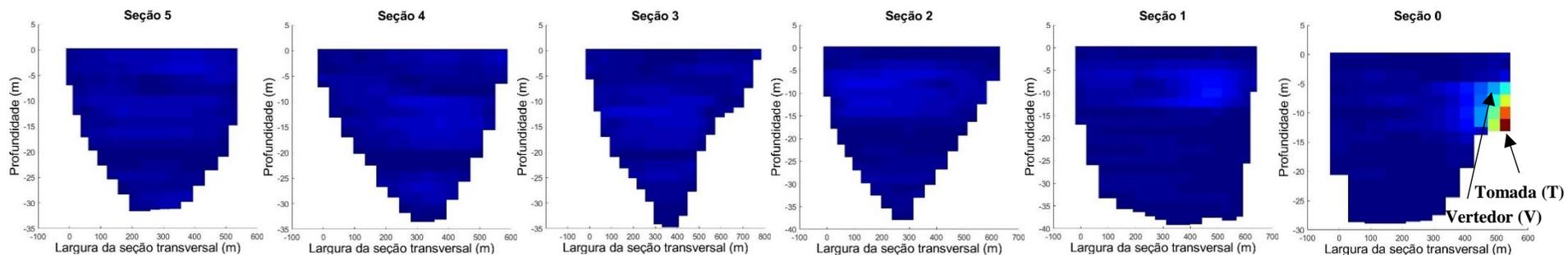


Figura 5.31 – Cenário 11. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais *observadas de temperatura, vazão e vento*.

As imagens apresentadas mostram momentos específicos do período da simulação. No conjunto de perfil vertical de temperatura estratificada, as imagens correspondem aos momentos, para as diferentes vazões, em que o nível de água atinge a cota de 1.000,30 m. Já para o perfil uniforme de temperatura, a cota de referência para as imagens foi de 1.000,00 m. Essa particularidade foi adotada em decorrência da formação de uma instabilidade numérica nos primeiros dias de simulação para a condição de temperatura uniforme. A instabilidade tornava o gradiente de velocidade inconsistente, podendo levar a erros na análise desse período inicial. De quatro a sete dias após o instante inicial da simulação, em média, a instabilidade numérica se dissipava em todos os cenários, tornando viável a análise.

As setas e os nomes nas imagens indicam a localização das células que representam os vertedores e a tomada de água, bem como o posicionamento das seções transversais de referência ao longo do eixo longitudinal em que estão localizadas estas estruturas hidráulicas da barragem. Embora com a mesma escala de cores, a amplitude de variação da velocidade foi distinta de cenário para cenário, tanto em função da vazão efluente quanto pelas condições de fluxo no momento de captura da imagem. As análises discutidas a seguir são os resultados da observação tanto das Figuras apresentadas anteriormente quanto das animações produzidas pelo software MATLAB.

Iniciando as análises em termos do perfil térmico adotado como condição inicial, no perfil uniforme de temperatura, de modo geral, foram observados os fluxos maiores em camadas mais profundas, comparativamente aos cenários equivalentes (mesmas condições de operação) no grupo de perfil estratificado, para todas as vazões de operação. Após alguns dias, foi observada a redução significativa da velocidade do fluxo em regiões mais próximas ao fundo.

Para as condições apresentadas neste trabalho, pôde-se concluir que o módulo D-Flow apresentou dificuldades na execução da rotina de cálculos para casos em que a condição inicial de temperatura se apresenta uniforme.

Quanto a estrutura hidráulica em operação, percebeu-se que, nos cenários onde os vertedores são os responsáveis pela vazão efluente da barragem, os efeitos na movimentação das massas de água atingem a faixa que se estende da superfície até aproximadamente 14 m de profundidade. Quando apenas a tomada de água estava ativa, por outro lado, os efeitos na velocidade do fluxo foram mais acentuados no intervalo de profundidades entre 5 e 14 m. A magnitude de velocidade do fluxo próximo a tomada de água também atingiu valores superiores às da célula que comporta os vertedores.

Nesse contexto e analisando os cenários mais estáveis, correspondentes ao grupo do perfil estratificado de temperatura, pôde-se inferir que a descarga, ou *flushing*, pelo vertedor da barragem promoveria uma maior remoção das camadas de água próximas à superfície e baixa ressuspensão do fundo, enquanto que a descarga pela tomada de água restringiria o fluxo a uma faixa intermediária entre a superfície e as camadas mais profundas, ainda com reduzidas chances de ressuspensão de material dos sedimentos. Vale ressaltar que, conforme discutido do item 5.1, a posição no plano vertical da tomada de água, nas simulações, foi definida uma célula acima da região exata em que se encontra a estrutura no barramento, tendo em vista que esta célula específica não foi produzida durante o processo de construção da malha. Considerando essa particularidade do modelo, é possível que os efeitos de arraste na superfície do Lago se tornassem ainda menores. Os impactos na superfície do Lago para cada cenário serão discutidos com mais detalhes no próximo capítulo, que discorre sobre as simulações com os traçadores.

Já em termos dos efeitos das diferentes vazões efluentes da barragem, verificou-se que a maior vazão simulada (50 m³/s) promove uma agitação mais intensa em toda a extensão do perfil longitudinal apresentado, enquanto que descargas menores, principalmente pela tomada de água, afetam menos intensamente o padrão de fluxo do corpo hídrico.

Os padrões de vento incidente no espelho do Lago, por sua vez, também são importantes no aumento da agitação da coluna de água, principalmente na camada superficial. Nas camadas inferiores, por outro lado, não foi percebido variação nítida quando comparadas às simulações com mesma descarga sob condições de vento presente e ausente.

Outro aspecto que exerce impactos na movimentação das massas de água, embora seja de difícil mensuração, refere-se a geometria da calha do reservatório. O arraste provocado pela descarga da barragem pode produzir ondas refletidas pelas margens do Lago que se propagariam para as demais regiões, efeito que aconteceria independentemente das condições de vento incidente.

5.2.4. Simulação de Partículas Traçadoras de Fluxo

Neste tópico foram apresentados os resultados das simulações com partículas (*Drogues*) lançadas na superfície do Lago para monitorar o percurso das linhas de fluxo superficiais. Estas simulações foram associadas às do item anterior (5.2.3), de modo que o momento de lançamento dos traçadores corresponde ao momento de captura das imagens apresentadas nas Figura de 5.17 a 5.31.

Para as análises deste tópico, foram considerados os cenários sem incidência de vento como sendo os padrões para as comparações com os demais cenários, por se tratarem de simulações que independem do efeito de forçantes externas.

Neste contexto, a Figura 5.32 apresenta os gráficos comparativos entre os diferentes cenários sem o efeito do vento, para todas as vazões simuladas e todas as seções de referência. Nas tabelas que se encontram abaixo dos gráficos estão dispostos o tempo de operação do reservatório, que compreende o intervalo entre o lançamento da partícula na superfície do Lago até sua remoção pelos vertedores ou pela tomada de água. Nas células em que foi atribuído o valor zero indica que, durante o tempo de simulação, nenhuma partícula alcançou a barragem e foi eliminada do reservatório.

Na Figura 5.32, é possível notar que as condições do perfil de temperatura não exercem expressiva influência na redução ou no prolongamento do tempo de trajeto das partículas. De modo geral, em ambas as situações, o tempo que leva para uma partícula em suspensão se deslocar do local de origem (seções de referência) até ser eliminada do reservatório pelos vertedores ou pela tomada de água independe das condições de temperatura encontradas no reservatório, conforme cenários elaborados neste trabalho.

Em termos da estrutura hidráulica em operação, para uma mesma vazão considerada, verificou-se que o efeito produzido na superfície pela descarga através da tomada de água é substancialmente menor que efeito da descarga pelos vertedores, de modo que o tempo necessário para eliminar uma partícula do reservatório pela tomada de água é maior que pelos vertedores, mesmo em regiões próximas a barragem, como é o caso da seção de referência número 1. Em locais mais afastados, como nas seções 3, 4 e 5, e descargas pequenas pela tomada de água, o material em suspensão não consegue ser eliminado do Lago, mesmo após aproximadamente um mês de operação.

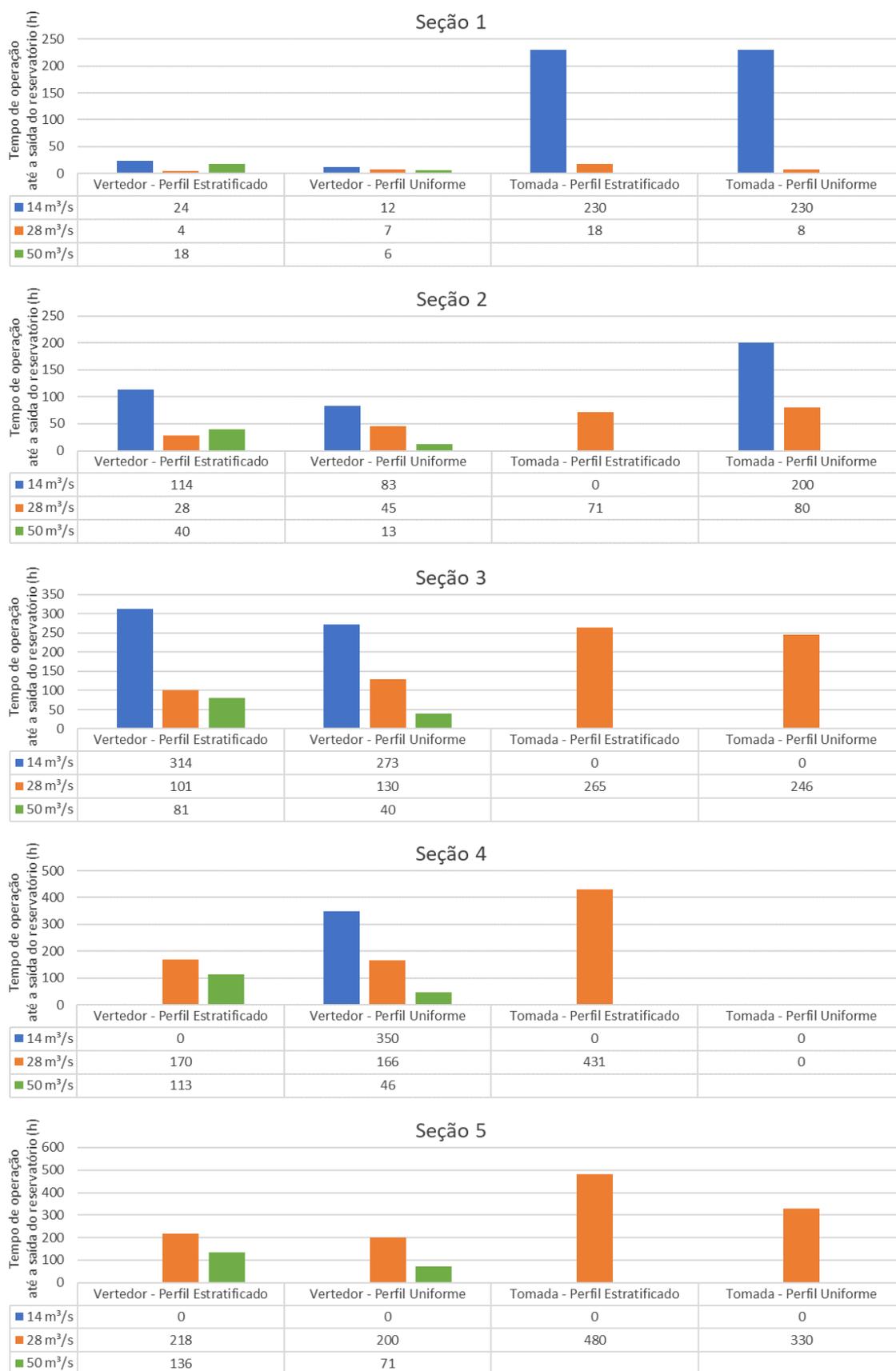


Figura 5.32 – Comparação entre os tempos de trajeto dos traçadores nos diferentes cenários para a condição sem vento. O valor zero indica que, para o referido cenário, nenhuma partícula foi eliminada do reservatório, durante todo o intervalo de tempo simulado.

Em situações de descarga pelos vertedores, por outro lado, mesmo com vazões pequenas, o fluxo é suficiente para conduzir as partículas para fora do Lago, desde que estas não estejam muito afastadas da barragem. Para o caso de vazões maiores, o efeito é ainda maior, sendo capaz de atingir regiões mais distantes dos vertedores. Outra observação importante é que, em regiões muito próximas à barragem, o tempo de trajeto é proporcionalmente menos influenciado pela magnitude da vazão, ao passo que em locais mais afastados, valores de descarga elevados tendem a resultar em tempos de trajeto significativamente menores, comparados aos de vazões menores.

As análises de cenários sem a influência do vento são importantes para balizar a magnitude esperada do tempo de trajeto das partículas suspensas, considerando uma situação hipotética onde apenas as correntes internas, provocadas pela variação de temperatura e principalmente pela vazão efluente da barragem, são responsáveis pelo fluxo. Com essas análises, é possível estimar o potencial do *flushing* em remover a camada superficial da água e avaliar, separadamente, os efeitos do vertimento e do turbinamento da água no arraste da coluna de água. Quando se adiciona à simulação determinados padrões de vento incidente ao espelho de água, o comportamento observado no trajeto das partículas sofre expressivas modificações.

Para ilustrar estas situações, as Figura 5.33 a 5.47 apresentam, para alguns cenários, o percurso desenvolvido pelas partículas lançadas na superfície das seções de referência, definidas na Figura 5.16. Os demais cenários foram apresentados no Apêndice A. Em cada seção foi contabilizado o tempo necessário para que uma das partículas atingisse o local em que se encontram os vertedores ou a tomada de água. Em diversas situações, contudo, foi verificado que as partículas não alcançaram a região das estruturas hidráulicas, seja por terem permanecido nas bordas da malha numérica até o término da simulação, seja por terem se deslocado para regiões mais distantes da barragem.

Em praticamente todos os cenários analisados, para todas as vazões simuladas e seções de referência, as condições de vento observado e sentido contrário ao fluxo impediram que as partículas alcançassem as estruturas da barragem. Nestes casos, percebeu-se claramente a influência das correntes de vento no transporte de elementos flutuantes. Nas situações em que o padrão de vento foi aplicado na direção do fluxo de água, o tempo de trajeto foi reduzido, embora em alguns casos as partículas tenham sido mantidas nas bordas do Lago devido à própria ação dos ventos. Esse comportamento fornece um indicativo importante acerca da efetividade do *flushing* na remoção de fitoplâncton, principalmente em relação aos grupos que se mantêm muito próximos à superfície.

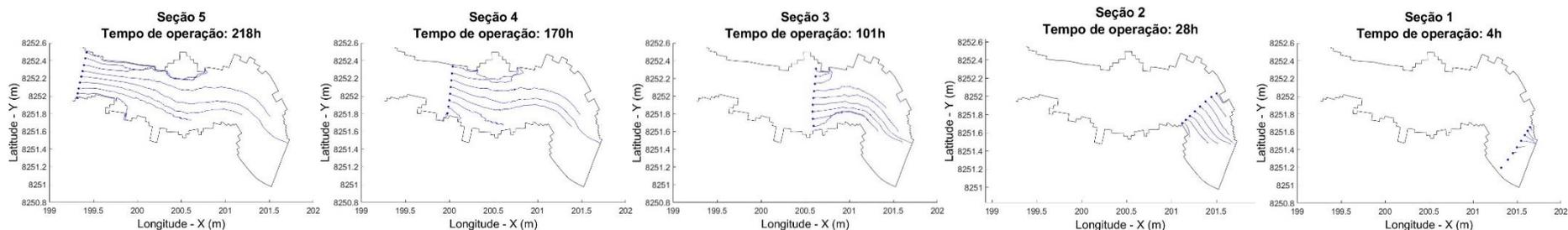


Figura 5.33 – Cenário 2.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

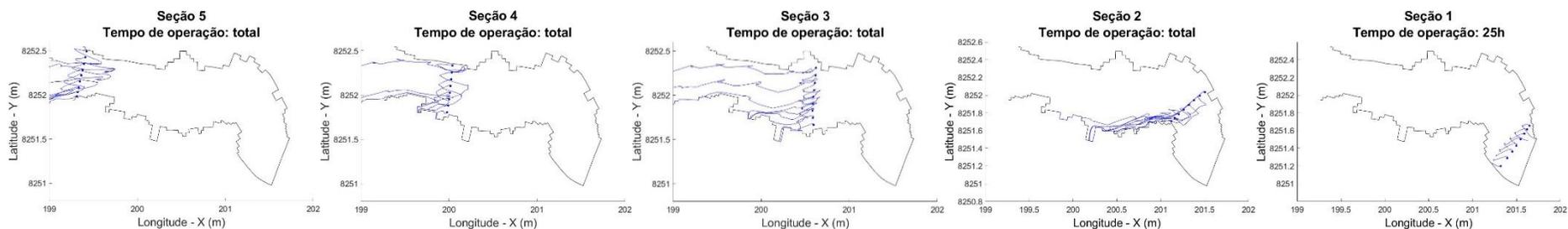


Figura 5.34 – Cenário 2.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

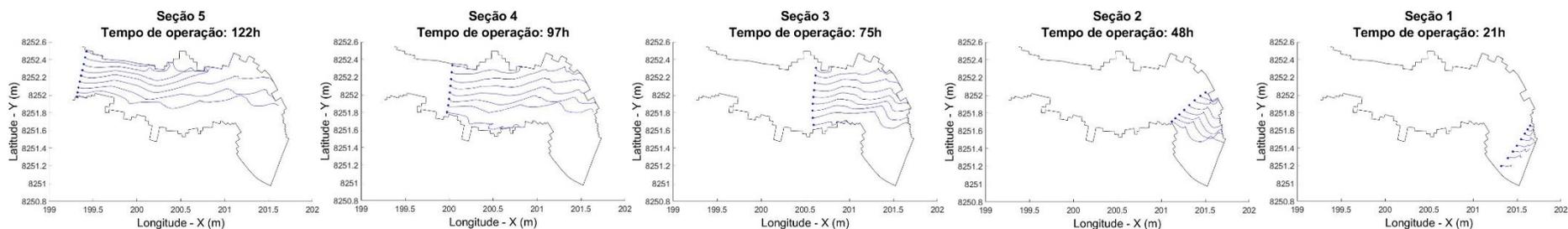


Figura 5.35 – Cenário 2.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

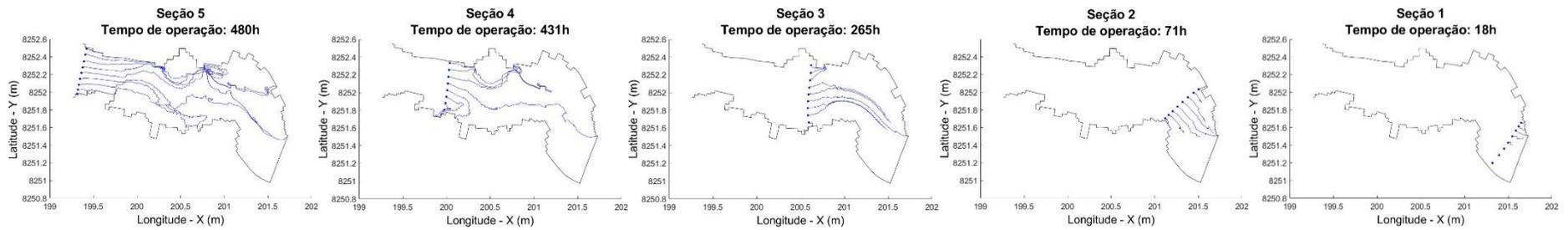


Figura 5.36 – Cenário 5.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

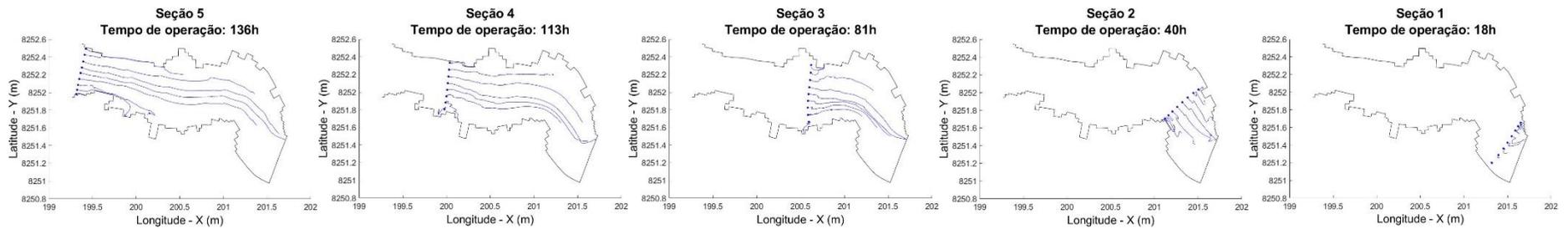


Figura 5.37 – Cenário 3.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

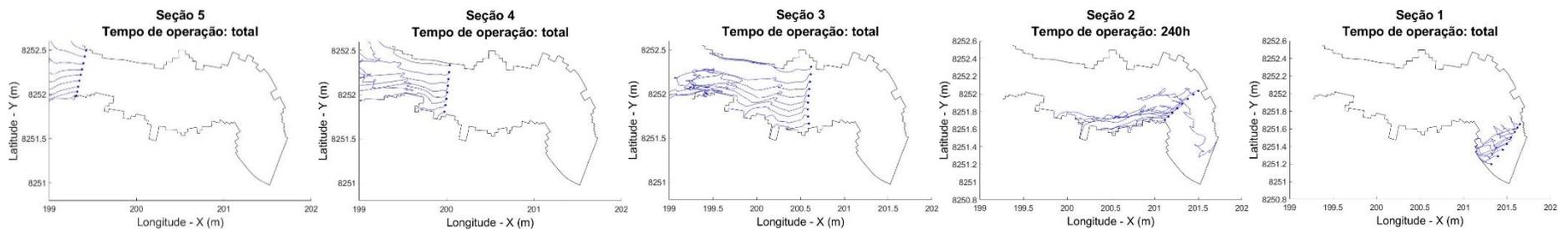


Figura 5.38 – Cenário 3.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

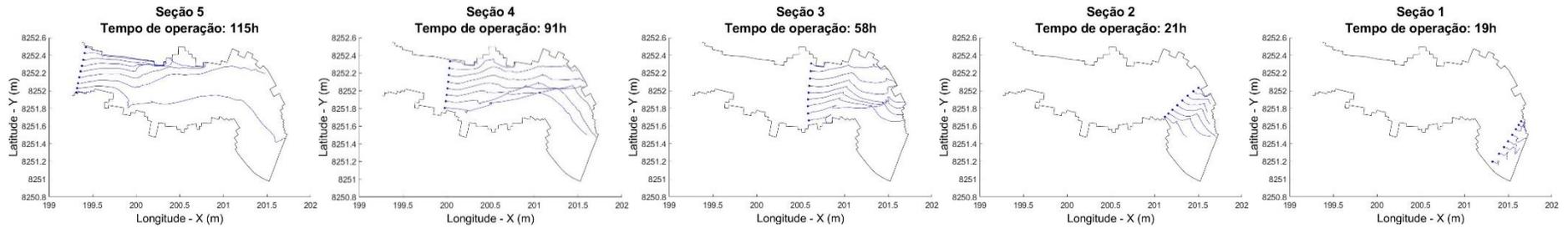


Figura 5.39 – Cenário 3.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

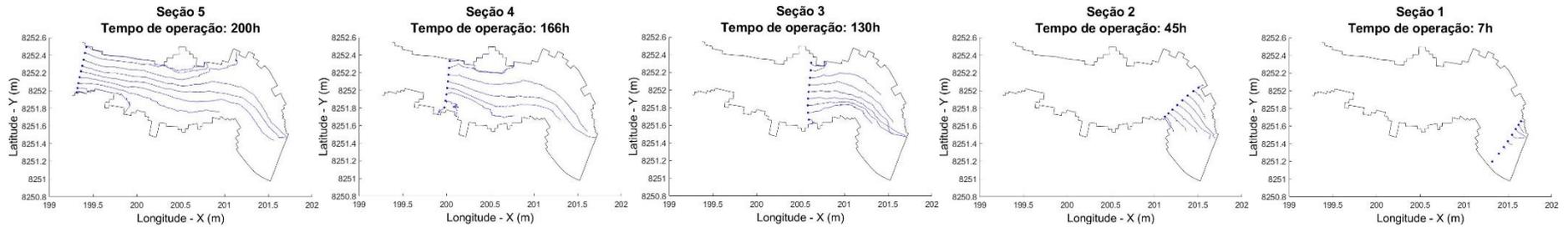


Figura 5.40 – Cenário 7.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

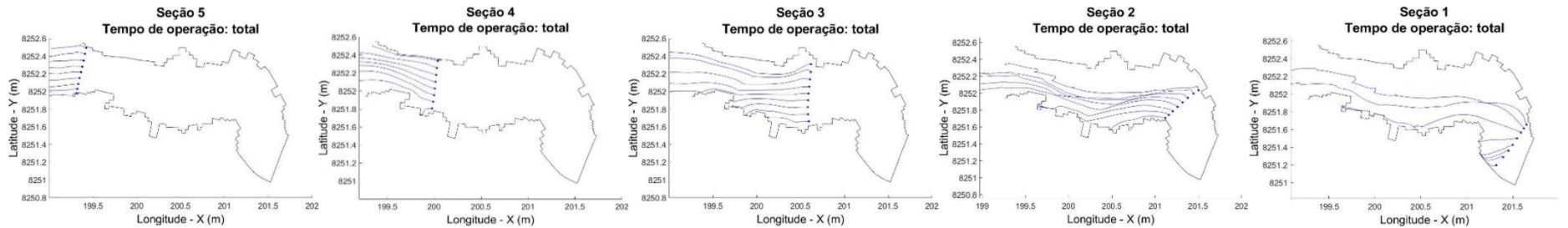


Figura 5.41 – Cenário 7.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

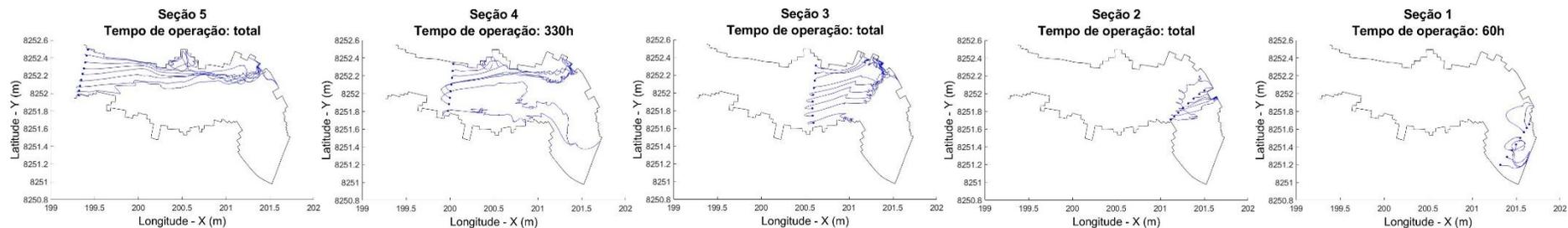


Figura 5.42 – Cenário 7.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

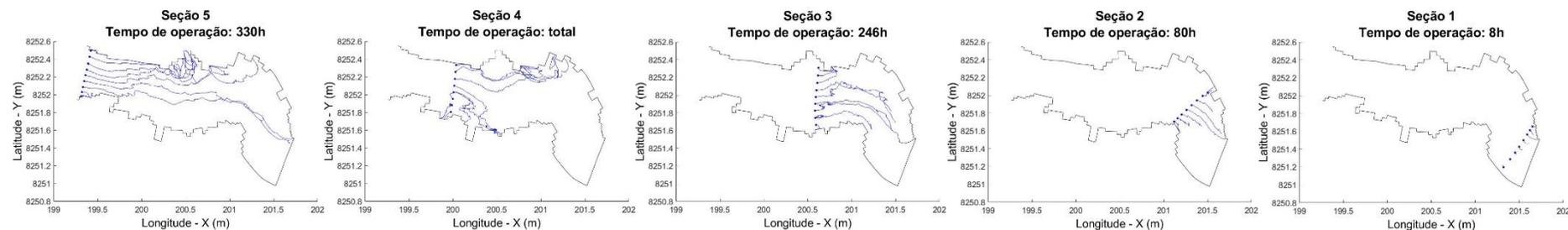


Figura 5.43 – Cenário 10.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

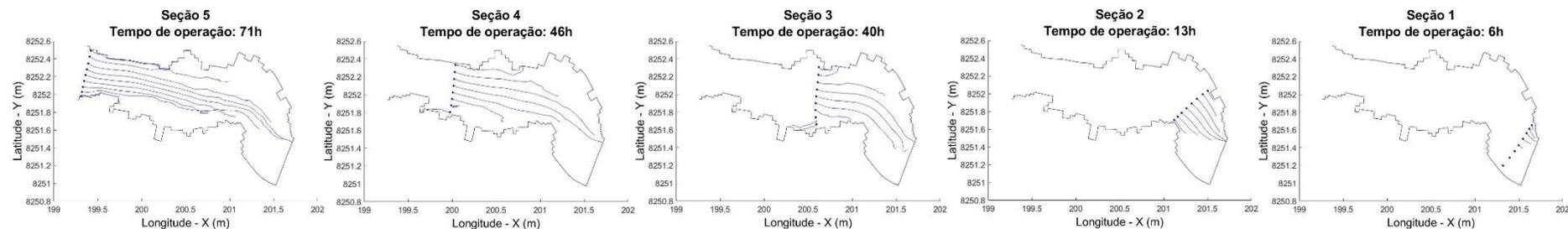


Figura 5.44 – Cenário 8.2. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

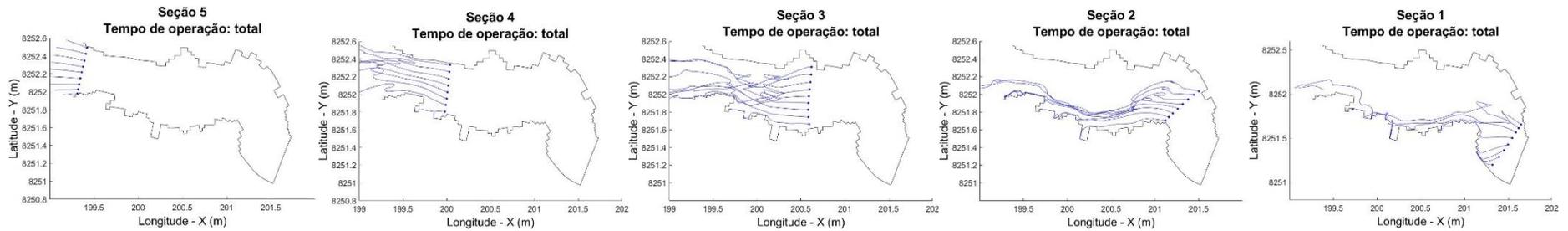


Figura 5.45 – Cenário 8.3. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de 50 m³/s pelo *Vertedor* e *sentido de vento contra o fluxo*.

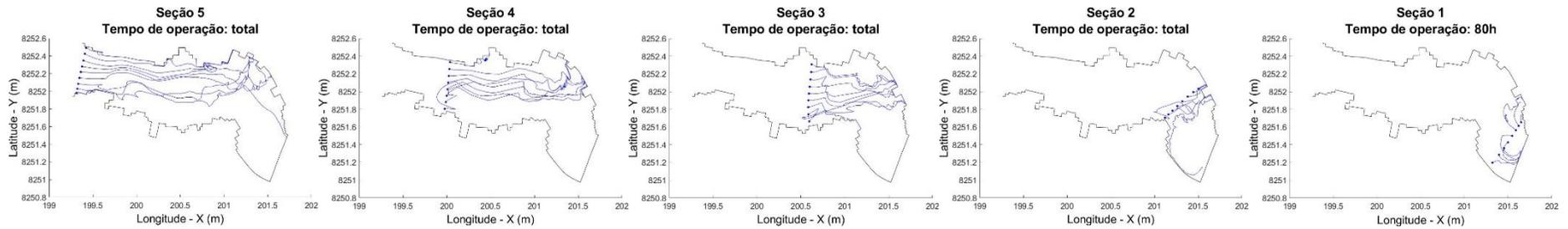


Figura 5.46 – Cenário 8.4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de 50 m³/s pelo *Vertedor* e *sentido de vento a favor do fluxo*.

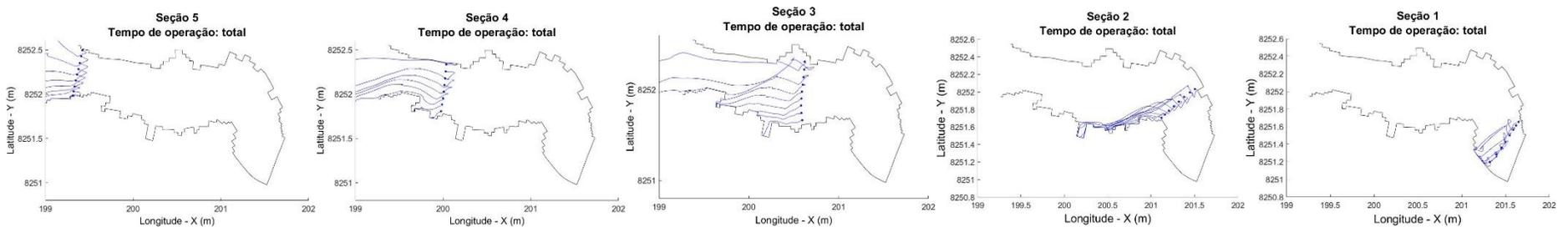


Figura 5.47 – Cenário 11. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais *observadas de temperatura, vazão e vento*.

Em termos de velocidade média de trajeto das partículas, a Tabela 5.2 apresenta um quadro comparativo entre as velocidades médias de todos os cenários simulados, dadas em m/h, para cada seção de referência, conforme apresentado na Figura 5.16. A estimativa dos valores considerou a distância média entre as seções de referência até a última fileira de células da malha, em que se localiza a barragem, e o tempo que as partículas levaram para se deslocar da posição inicial até atingirem a linha da barragem. Nos cenários em que as partículas não foram eliminadas do reservatório, as velocidades médias não foram estimadas.

Tabela 5.2 – Velocidade média das partículas traçadoras de fluxo para cada cenário.

Cenário	Condições*	Velocidade média (m/h)				
		Seção 5	Seção 4	Seção 3	Seção 2	Seção 1
1	E-V-Sv-14	-	-	4,14	4,96	7,08
2.1	E-V-Ob-28	-	-	3,44	-	8,10
2.2	E-V-Sv-28	11,70	11,12	12,87	20,71	42,50
2.3	E-V-Cf-28	-	-	-	-	6,80
2.4	E-V-Ff-28	20,90	19,48	17,33	12,08	8,10
3.1	E-V-Ob-50	-	-	-	-	-
3.2	E-V-Sv-50	18,75	16,73	16,05	14,50	9,44
3.3	E-V-Cf-50	-	-	-	2,42	-
3.4	E-V-Ff-50	22,17	20,77	22,41	27,62	8,95
3.5	E-V-Lf-50	51,00	9,45	10,40	27,62	9,44
4	E-T-Sv-14	-	-	-	-	0,74
5.1	E-T-Ob-28	-	-	-	-	8,10
5.2	E-T-Sv-28	5,31	4,39	4,91	8,17	9,44
6	U-V-Sv-14	-	5,40	4,76	6,99	14,17
7.1	U-V-Ob-28	-	-	-	-	-
7.2	U-V-Sv-28	12,75	11,39	10,00	12,89	24,29
7.3	U-V-Cf-28	-	-	-	-	-
7.4	U-V-Ff-28	-	5,73	-	-	2,83
8.1	U-V-Ob-50	-	-	-	-	-
8.2	U-V-Sv-50	35,92	41,09	32,50	44,62	28,33
8.3	U-V-Cf-50	-	-	-	-	-
8.4	U-V-Ff-50	-	-	-	-	2,13
9	U-T-Sv-14	-	-	-	2,90	0,74
10.1	U-T-Ob-28	-	-	-	-	-
10.2	U-T-Sv-28	7,73	-	5,28	7,25	21,25
11	Observado	-	-	-	-	-

* Primeiro campo: Perfil de temperatura estratificado (E) ou uniforme (U).

Segundo campo: Vazão efluente pelos vertedores (V) ou pela tomada de água (T).

Terceiro campo: Condições de vento observado (Ob), sem vento (Sv), contra o fluxo (Cf), a favor do fluxo (Ff) ou lateral ao fluxo (Lf).

Quarto campo: Vazão efluente, em m³/s.

As simulações de rebaixamento desenvolvidas neste estudo, para as condições e vazões propostas, sugerem que o efeito da abertura das comportas dos vertedores na eliminação de florações de algas e cianobactérias no espelho do Lago Paranoá, em regiões muito afastadas da barragem, seria pequeno, considerando a máxima vazão de operação de 50 m³/s. Embora não tenha sido avaliado neste trabalho, por meio da análise dos resultados alcançados, traçadores lançados em locais próximos aos braços do Lago (regiões dos pontos de monitoramento A, B, D e E, Figura 4.7) levariam dias, ou mesmo semanas, para serem eliminados pela barragem, em condições hipotéticas sem a incidência de vento. Caso apenas as turbinas fossem operadas na sua capacidade máxima, o impacto na remoção do fitoplâncton na camada superficial seria ainda menor, se comparado ao efeito produzido pelos vertedores, para uma mesma vazão.

Outro aspecto relevante das simulações com traçadores refere-se à posição na vertical para o lançamento das partículas. Como mencionado, a versão utilizada do módulo D-Flow não disponibiliza a opção de posicionar os traçadores em outras camadas verticais, além da superficial. Por conta dessa limitação, não foi possível definir com precisão o tempo de trajeto de partículas nas camadas inferiores, e assim avaliar o grau de arraste ao longo do perfil vertical da coluna de água.

Ressalta-se que este trabalho não avaliou o impacto indireto na qualidade da água provocado pela remoção de elementos químicos essenciais para o estabelecimento de condições de eutrofização de corpos hídricos, particularmente nitrogênio e fósforo, e de biomassa de fitoplâncton. As principais conclusões acerca da efetividade do *flushing* discutidas neste trabalho referem-se à remoção de parcela da coluna de água próxima a superfície, em termos do comportamento hidráulico das linhas de fluxo. Não se pode, portanto, afirmar que o carreamento provocado pelo *flushing* seria, ou não, suficiente para modificar o balanço de nutrientes do Lago e resultar na diminuição da concentração de fitoplâncton.

Nas comparações feitas por Angelini *et al.* (2008) quanto às intervenções feitas no Lago Paranoá visando a melhoria na qualidade da água, os autores observaram o aumento na transparência da água em pontos de monitoramento da Caesb apenas após a abertura abrupta das comportas. Não há consenso, contudo, sobre a vazão vertida pelas comportas durante o procedimento de *flushing* realizado em novembro de 1999 nem o tempo de operação transcorrido. Nos registros observados pelos autores, consta apenas que o tempo de detenção hidráulico do reservatório que, em 1998 aumentou de 321 para 721 dias, foi abruptamente reduzido para 192 dias em novembro do ano seguinte (Angelini *et al.*, 2008).

6. CONCLUSÕES

O módulo D-Flow do Delft3D se mostrou uma ferramenta importante para simulações hidrodinâmicas tridimensionais em reservatórios, incluindo na modelagem as principais variáveis climáticas e hidrológicas que exercem influência no balanço hídrico. A capacidade de representação de geometrias complexas, como é o caso do Lago Paranoá, reforça a flexibilidade do modelo e evidencia sua implementação em diversos ambientes lênticos. Os resultados obtidos no trabalho atestaram a aplicabilidade do modelo em representar os fenômenos hidrodinâmicos internos ao reservatório e a interferência das forçantes externas ao ambiente aquático.

Embora consiga fornecer uma visão abrangente e detalhada do ambiente como um todo, o elevado número de variáveis e processos simulados faz com que o modelo exija a inclusão de grande quantidade de informações, tanto relativas à estrutura física do corpo hídrico e da área de drenagem como das variáveis climatológicas que condicionam as trocas de energia com o ambiente aquático. Em muitas situações, contudo, a rede de monitoramento disponível na região não possui séries de dados na frequência e na qualidade necessárias para viabilizar a construção do modelo hidrodinâmico.

Neste trabalho, o ambiente em análise, o Lago Paranoá, contou com uma ampla disponibilidade de informações produzidas e gerenciadas por órgãos do governo distrital. De posse desses dados, foi possível construir um modelo hidrodinâmico no módulo D-Flow do Delft3D para realizar simulações em que foram analisadas as condições reais observadas para o ano de 2017, os cenários possíveis de operação das comportas dos vertedores em eventos de rebaixamento rápido, as influências decorrentes das vazões efluentes da barragem, do perfil vertical de temperatura e da incidência de correntes de vento, e os comportamentos das linhas de fluxo na superfície através do monitoramento de partículas traçadoras.

Os resultados referentes às simulações de nível de água se mostraram satisfatórios quando comparados aos registros observados, embora em alguns casos os valores observados e simulados tenham apresentado diferenças da ordem de 40 cm. O nível simulado pelo modelo apresentou tendências de crescimento e de deplecionamento similares às dos registros observados e resultou no erro médio de 0,20 m, indicando boa correlação entre o balanço hídrico simulado e a cota do nível de água.

As simulações de perfil térmico da coluna de água apresentaram resultados com ajuste aceitável para as camadas superficiais, acompanhando tendências de aquecimento e

resfriamento ao longo do ano. Nas camadas profundas, por outro lado, verificou-se que a temperatura tendeu a diminuir e se manter nos patamares mínimos, mesmo após o período mais frio, entre os meses de junho a agosto. Também foi observado momentos em que se estabeleceu uma condição de estratificação térmica pelo modelo, ao mesmo tempo em que se observava uma condição de mistura da coluna de água, mantendo a temperatura aproximadamente uniforme ao longo de todo o perfil vertical. O inverso também foi observado em alguns meses, onde os resultados indicaram condição de uniformidade térmica na coluna de água e os registros monitorados sugeriam que havia sido estabelecida uma condição de estratificação térmica. A partir dessas considerações, foi possível concluir que, para as condições simuladas e para o conjunto de parâmetros utilizados, o D-Flow não conseguiu simular satisfatoriamente o padrão de circulação da coluna de água e a transferência de calor para regiões mais profundas do Lago Paranoá.

As simulações de rebaixamento rápido do nível de água com a descarga viabilizaram a comparação entre os tempos de rebaixamento para cada magnitude de vazão de operação proposta. Com base nos resultados alcançados, foi possível estabelecer uma correlação entre a variação do nível de água, a vazão de descarga e o tempo de abertura das comportas, de modo a fornecer aos órgãos públicos distritais mais um instrumento para auxiliar na gestão operacional do reservatório do Lago Paranoá.

O grupo de simulações condicionadas à vazão de descarga, ao perfil de temperatura e aos padrões de vento incidente permitiu avaliar os efeitos de cada variável na resposta em termos do comportamento hidrodinâmico do corpo hídrico. Pela observação dos resultados, pôde-se inferir que a descarga, ou *flushing*, pelo vertedor da barragem promoveria uma maior remoção das camadas de água próximas à superfície e baixa ressuspensão do fundo, enquanto que a descarga pela tomada de água restringiria o fluxo a uma faixa intermediária entre a superfície e as camadas mais profundas, ainda com reduzidas chances de ressuspensão de material dos sedimentos. Quanto ao perfil vertical de temperatura, a principal diferença entre as condições uniforme e estratificada deveu-se a uma instabilidade numérica no período inicial das simulações com o perfil uniforme, repercutindo no aumento irregular da agitação das massas de água e na propagação desses movimentos para os dias seguintes. Por fim, em termos das correntes de vento, verificou-se que o efeito do arraste se concentra principalmente na superfície do Lago, reduzindo rapidamente à medida que aumenta a profundidade. É importante salientar que as simulações mostraram que o *flushing* é mais efetivo quanto maior for a vazão descarregada pelos vertedores, sendo limitada aos

possíveis impactos provocados pela onda de cheia a jusante da barragem, para o caso de vazões muito elevadas.

Nas simulações envolvendo a análise das direções predominantes de vento no arraste de partículas suspensas pôde-se observar que, utilizando ventos observados e predominantemente contra o fluxo, impactam diretamente no deslocamento de partículas, impedindo, na maioria dos casos, que as mesmas sejam eliminadas pelos vertedores ou pela tomada de água. Nesse contexto, os resultados obtidos sugeriram que o efeito da abertura das comportas dos vertedores na eliminação de florações de algas e cianobactérias no espelho do Lago Paranoá, em regiões muito afastadas da barragem, seria pequeno, considerando a máxima vazão de operação de 50 m³/s. Caso a descarga fosse efetuada pela tomada de água, o arraste da camada superficial seria ainda menor.

Este trabalho limitou-se a análise do comportamento hidrodinâmico do Lago Paranoá, avaliando a influência das diversas variáveis climáticas e hidrológicas que impactam no balanço hídrico e nas condições de temperatura do reservatório e o potencial de *flushing* na remoção de parte da coluna de água próxima a superfície. Não se pode, portanto, afirmar que o carreamento provocado pelo *flushing* seria, ou não, suficiente para modificar o balanço de nutrientes do Lago e provocar a diminuição da concentração de fitoplâncton. Vale destacar, contudo, que este trabalho representa o início da modelagem tridimensional do Lago Paranoá com vistas a fornecer uma base para o desenvolvimento completo da modelagem tridimensional hidrodinâmica, físico-química e ecológica, como subsídio à gestão integrada das águas da bacia hidrográfica.

7. RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para estudos futuros e de modo a avaliar o impacto indireto do *flushing* na qualidade da água do reservatório, sugere-se acoplar o modelo hidrodinâmico construído neste trabalho ao módulo de qualidade do Delft3D, o D-WAQ, para simular os efeitos do *flushing* nas cargas de nutrientes e na produção de biomassa de fitoplâncton. A partir dessas simulações, seria possível comparar com o grau de transparência da água nos pontos de monitoramento da Caesb e observar a variação na concentração de nutrientes e fitoplâncton no reservatório. Vale destacar que, para a realização de tais simulações, seria necessário o monitoramento dos parâmetros de qualidade em mais pontos e profundidades ao longo do espelho do Lago, incluindo os locais de deságue dos principais tributários, e na frequência de monitoramento compatível com os demais registros fluviométricos.

Recomenda-se também que sejam realizadas simulações com as vazões efluentes de 75 e 100 m³/s, com o intuito de avaliar o comportamento dos vetores de velocidade quando submetidos a vazões elevadas. Quanto a análise das linhas de fluxo, sugere-se que seja consultada, junto aos desenvolvedores do Delft3D, a possibilidade de realizar simulações com traçadores em outras camadas do perfil de água, de modo a permitir uma maior compreensão do comportamento das linhas de fluxo na vertical. Caso as versões comerciais do modelo não disponibilizem essa opção, recomenda-se que sejam testados outros modelos capazes de realizar esse conjunto de simulações das linhas de fluxo no perfil vertical da coluna de água.

Recomenda-se ainda que sejam realizadas mais simulações testando outros valores para os parâmetros de calibração considerados, de modo a melhorar a calibração do modelo em termos de temperatura; aumentar a quantidade de pontos de monitoramento para fornecer ao modelo condições iniciais e de contorno mais precisas e parâmetros melhor calibrados; e alterar a série de valores de evaporação para considerar as diferenças de potencial evaporativo horário durante o dia e à noite.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akurut, M.; Niwagaba, C. B. e Willems, P. (2017). “Long-term variations of water quality in the Inner Murchison Bay, Lake Victoria”. *Environ. Monit. Assess.* 189(22), 17p.
- Angelini, R.; Bini, L. M. e Starling, F. L. R. M. (2008). “Efeitos de diferentes intervenções no processo de eutrofização do Lago Paranoá (Brasília – DF)”. *Oecologia Brasiliensis – Monitoramento biológico em ecossistemas aquáticos continentais*, 12(3), 564-571p.
- Barbedo, J.; Miguez, M.; van der Horst, D. e Marins, M. (2014). “Enhancing ecosystem services for flood mitigation: a conservation strategy for peri-urban landscapes?”. *Ecology and Society*, 19(2), 11p.
- Betancur-Pérez, G.; Toro-Botero, F. M. e Gómez-Giraldo, A. (2016). “Methodology for hydrodynamic model selection. Case study: spatial variability of the thermal structure in the Riogrande II tropical reservoir, Colombia”. *DYNA*, 83(198), 154-164p.
- Blumberg, A. F. e Mellor, G. L. (1987). “A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model.” In: N. S. Heaps (Ed.), *Three dimensional coastal models*, AGU, 1-16p, Washington, DC.
- Bocaniov, S. A.; Ullmann, C.; Rinke, K.; Lamb, K. G. e Boehrer, B. (2014). “Internal waves and mixing in a stratified reservoir: Insights from three-dimensional modeling”. *Limnologica*, 49, 52-67p.
- Boeriu, P.; Roelvink, D.; Mulatu, C. A.; Thilakasiri, C. N.; Moldovanu, A. e Margaritescu, M. (2011). “Modeling the Flushing Process of Reservoir”. *MECAHITECH*, 11(3), 240-252p.
- Burnett, J. A. B.; Mattos, S. P. e Azzolin, N. M. P. (2001). “IX – Intervenções da Companhia de Saneamento” in Fonseca, F. O. (org.). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília-DF, 199-212p.
- Cañavate, J. P.; Pérez-Gavilan, C.; Mazuelos, N. e Manchado, M. (2015). “Flushing-related changes of phytoplankton seasonal assemblages in marsh ponds of the warm temperate Guadalquivir river estuary (SW Spain)”. *Hydrobiologia*, 744, 15-33p.
- Cavalcanti, C.G.B.; Pinto, M.T.; Freitas, H.J. e Moreira, R.C.A. (1997). “Paranoá Lake restoration: impact of tertiary treatment sewage in the watershed”. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 26, 689-693p.

- Chanudet, V.; Fabre, V. e Kaaij, T.V.D. (2012). “Application of a three-dimensional hydrodynamic model to the Nam Theun 2 Reservoir (Lao PDR).” *Journal of Great Lakes Research*, **38**, 260-269p.
- Chanudet, V.; Smits, J.; Van Beek, J.; Boderie, P.; Guérin, F.; Serça, D.; Deshmukh, C. e Descloux, S. (2016). “Hydrodynamic and water quality 3D modelling of the Nam Theun 2 Reservoir (Lao PDR): predictions and results of scenarios related to reservoir management, hydrometeorology and nutrient input”. *Hydroécologie Appliquée*, **19**, 87-118p.
- Chapman, R. S.; Johnson, B. H. e Vemulakonda, S. R. (1996). “User’s Guide for the Sigma Stretched Version of CH3D-WES: A Three-Dimensional Numerical Hydrodynamic, Salinity, and Temperature Model.” *U.S. Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station*. Washington, D.C. 48p.
- Chapra, S. C. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*, Waveland Press, Long Grove, Illinois, United States.
- Chen, H. e Yuan, H. (2015). “Numerical simulation of impacts on marine environment by sewage discharge”. *MATEC Web of Conferences*, **22**, 6p.
- Cole, T. M. e Wells, S. A. (2015). “CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.72.” *User Manual*, Portland State University, Portland, 797p.
- Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb). “Estações de Tratamento de Esgotos.” Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em: 08/04/2018.
- Companhia Energética de Brasília – CEB (2015). Relatório da Administração 2014 – Diário Oficial do Distrito Federal, Nº 75, 17 de abril de 2015, 13p.
- Corman, J. R.; McIntyre, P. B.; Kuboja, B.; Mbemba, W.; Fink, D.; Wheeler, C. W.; Gans, C.; Michel, E. e Flecker, A. S. (2010). “Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa”. *Limnology and Oceanography*, **55**(1), 214-224p.
- Cunha, A. C. da.; Mustin, K.; Santos, E. S. dos; Santos, É. W. G. dos; Guedes, M. C.; Cunha, H. F. A.; Rosman, P. C. C. e Sternberg, L. da S. L. (2017). “Hydrodynamics and seed dispersal in the lower Amazon”. *Freshwater Biology*, **62**, 1721-1729p.
- Cunha, C. de L. da N.; Rosman, P. C. C.; Ferreira, A. P. e Monteiro, T. C. do N. (2006). “Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay”. *Continental Shelf Research*, **26**, 1940-1953p.

- DELTAIRES. (2014a). Delft3D-FLOW. Simulation and multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Deltares, Delft, The Netherlands, 2014. 710 p.
- DELTAIRES. (2014b) Delft3D-RGFGRID. Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-Flow and Delft3D-Wave, User Manual. Deltares, Delft, The Netherlands, 2014. 128 p.
- DELTAIRES. (2014c) Delft3D-QUICKPLOT: Visualization and animation program for analysis of simulation results, User Manual.
- DELTAIRES. “Deltares Flexible Mesh Suite: Modules.” Disponível em: <<https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/#modules>>. Acesso em: 14/02/2018.
- Dodds, W. K. (2002). Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications, Academic Press, California, USA, 591p.
- Drazin, P. G. e Reid, W. H. (1995). Hydrodynamic Stability. Cambridge University Press, New York, USA, 527p.
- EFDC. (2007). The Environmental Fluid Dynamics Code, User Manual, U.S. EPA Version 1.01. Tetra Tech, Inc.
- Elhakeem, A. A.; Elshorbagy, W. e Chebbi, R. (2007). “Oil spill simulation and validation in the Arabian (Persian) Gulf with special reference to the UAE coast”. *Water Air Soil Pollut*, **184**, 243-254p.
- Esteves, F. de A. (1988). Fundamentos de Limnologia. Editora Interciência (FINEP), Rio de Janeiro, 575p.
- Falconer, R. A.; George, D. G. e Hall, P. (1991). “Three-dimensional numerical modelling of wind-driven circulation in a shallow homogeneous lake”. *Journal of Hydrology*, **124**, 59-79p.
- Ferrante, J. E. T.; Roncan, L. e Netto, B. P. (2001). “III – Meio Físico” in Fonseca, F. O. (org.). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília-DF, 45-78p.
- George, D. G. (1981). “The spatial distribution of nutrients in the South Basin of Windermere”. *Freshwater Biology*, **11**, 405-424p.
- Governo do Distrito Federal – GDF (2010). *Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal – Volume II Diagnóstico: Relatório de Meio Físico e Biótico*. Brasília – DF, 172p.

- Graebel, W. P. (2007). "Thermal Effects". Advanced Fluid Mechanics. Elsevier Science, San Diego, California, 362 p.
- Hamilton, D. P.; Hocking, G.C. e Patterson, J. C. (1997). "Criteria for selection of spatial dimension in the application of one- and two-dimensional water quality models." *Mathematics and Computers in Simulation*, **43**, 387-393p.
- Haque, Md. M. (2007). *Numerical simulation of thermal processes at hydropower dams*. Tese de Doutorado, University of Iowa, USA, 226p.
- Hecky, R. E. e Kilham, P. (1988). "Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment". *American Society of Limnology and Oceanography*, **33**(4), 796-822p.
- Imberger, J. (1985). "Thermal Characteristics of Standing Waters: An Illustration of Dynamical Processes." *Hydrobiologia*, **125**, 7-29p.
- Ji, Zhen-Gang. (2008). "Hydrodynamics." Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries, ed. John Wiley & Sons, New Jersey, 676 p.
- Jin, K.-R.; Hamrick, J. H. e Tisdale, T. (2000). "Application of three-dimensional hydrodynamic model for Lake Okeechobee". *Journal of Hydraulic Engineering*, **126**(10), 758-771p.
- Kundu, P. K. e Cohen, I. M. (2008). "Conservation Laws." Fluid Mechanics. 4 ed. Elsevier Science, San Diego, California, 872 p.
- Lap, B. Q. e Mori, K. (2007). "A two-dimensional numerical model of wind-induced flow and water quality in closed water bodies". *Paddy Water Environ*, **5**, 29-40p.
- Laval, B. e Hodges, B. R. (2000). The CWR Estuary and Lake Computer Modelo (ELCOM) – User Guide. Centre for Water Research, The University of Western Australia. Australia, 56p.
- Leite, L. M.; Dias, J. M.; Carvalhos, J. M. B. e Klein, A. H. F. (2011). "Hydrodynamic study of bay beaches – a case of study of Itapocorói Bay, Brazil". *Journal of Coastal Research*, **64**, 1086-1090.
- Lerman, A. (1978). LAKES: Chemistry, Geology and Physics. Springer-Verlag, New York, USA, 356p.
- Leys, V. (2007). "3D Flow and Sediment Transport Modelling at the Reversing Falls – Saint John Harbour, New Brunswick". *Proceedings of MTS/IEEE Oceans Conference*. Vancouver, Canada, 16p.

- Li, Z.; Chen, Q. e Xu, Q. (2014). “Modeling algae dynamics in Meiliang Bay of Taihu Lake and parameter sensitivity analysis”. *Journal of Hydro-environment Research*, **9**, 216-225p.
- Liporoni, L. M. (2012). *Estudo preliminar da qualidade da água do Lago Paranoá, Brasília – DF, utilizando um modelo de qualidade de água bidimensional*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM–138/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188p.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España, 1008p.
- Masters, G. M. (1998). *Introduction to Environmental Engineering and Science*. 2º Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA, 651p.
- MIKE Powered by DHI (a). “Hydrodynamics – Advanced 2D and 3D modelling of hydrodynamic processes”. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/hydrodynamics>>. Acesso em: 06/02/2018.
- MIKE Powered by DHI (b). “MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module – Short Description”. Disponível em: < <https://www.mikepoweredbydhi.com> >. Acesso em: 14/03/2018.
- Minoti, R. T. (2019). Comunicação pessoal.
- Nunes, G. (2016). *Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade de água da Bacia Hidrográfica do lago Paranoá – DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM – 185/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148p.
- Omer, A. Y. A.; Huismans, Y.; Sloff, K. e Kitamura, Y. (2017). “The effect of different gate opening patterns on reservoir flushing and morphological changes downstream a dam”. *ResearchGate*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/313835993_The_effect_of_different_gate_opening_patterns_on_reservoir_flushing_and_morphological_changes_downstream_a_dam/overview>. Acesso em: 24/02/2018.
- Park, K.; Jung, H.-S.; Kim, H.-S. e Ahn, S.-M. (2005). "Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea." *Marine Environmental Research*, **60**, 171-193p.
- Pavlyukova, T. (2014). *A 3-D Hydrodynamic modeling at Head of Passes of the Mississippi River*. Dissertação de Mestrado, University of New Orleans, USA, 72p.

- Pereira, L. P. (2006). *Avaliação econômica do uso do Lago Paranoá para atividades recreacionais*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Brasília – DF, 197 p.
- Popescu, I. (2014). “Modelling water related problems.” *Computational Hydraulics: Numerical Methods and Modelling*, IWA Publishing, London, UK, 165 p.
- Rasmussen, E. K.; Hansen, I. S.; Erichsen, A. C.; Muhlenstein, D. e Dørge, J. (2000). “3D model system for hydrodynamics eutrophication and nutrient transport”. *Environmental Coastal Regions III, WIT Press*, 291-300p.
- Reynolds, C. S.; Maberly, S. C.; Parker, J. E. e Ville, M. M. de. (2012). “Forty years of monitoring water quality in Grasmere (English Lake District): separating the effects of enrichment by treated sewage and hydraulic flushing on phytoplankton ecology”. *Freshwater Biology*, **57**, 384-399p.
- Robarts, R. D.; Ashton, P. J.; Thornton, J. A.; Taussig, H. J e Sephton, L. M. (1982). “Overturn in a hypertrophic, warm, monomictic impoundment (Hartbeespoort Dam, South Africa).” *Hydrobiologia*, **97**, 209-224p.
- Rosenmeier, M. F.; Brenner, M.; Kenney, W. F.; Whitmore, T. J. e Taylor, C. M. (2004). “Recent eutrophication in the Southern Basin of Lake Petén Itzá, Guatemala: human impact on a large tropical lake”. *Hydrobiologia*, **511**, 161-172p.
- Rosman, P. C. C. (2016). *Referência técnica do SisBaHiA*. Rio de Janeiro: UFRJ-COPPE. Engenharia Costeira e Oceanográfica.
- Ruttner, F. (1953). *Fundamentals of Limnology*. University of Toronto Press, Toronto, Canada, 242p.
- Santos, M. L. S.; Saraiva, A. L. de L.; Pereira, J. A. R.; Nogueira, P. F. R. de S. M. e Silva, A. C. (2015). “Hydrodynamic modeling of a reservoir used to supply water to Belem (Lake Agua Preta, Para, Brazil)”. *Acta Scientiarum*, **37**(3), 353-359p.
- SCISOFTWARE – Scientific Software Group. “WASP5/DYNHYD5 Description”. Disponível em: <http://www.scisoftware.com/products/wasp_details/wasp_details.html>. Acesso em: 06/02/2018.
- Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA (COPPE - UFRJ). “Manual do Usuário do SisBaHiA ®”. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisBAHIA/A1Index.htm>>. Acesso em: 06/02/2018.

- Sokolova, E. (2013). Hydrodynamic modelling of microbial water quality in drinking water sources. Tese de Doutorado, Chalmers University of Technology, Sweden, 46p.
- Somura, H.; Takeda, I.; Arnold, J. G.; Mori, Y.; Jeong, J.; Kannan, N. e Hoffman, D. (2012). “Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin, Japan”. *Journal of Hydrology*, **450-451**, 25-35p.
- Soullignac, F.; Vinçon-Leite, B.; Lemaire, B. J.; Martins, J. R. S.; Bonhomme, C.; Dubois, P.; Mezemate, Y.; Tchiguirinskaia, I.; Schertzer, D. e Tassin, B. (2017). “Performance Assessment of a 3D Hydrodynamic Model Using High Temporal Resolution Measurements in a Shallow Urban Lake”. *Environ Model Assess*, **22**, 309-322p.
- Tang, T. J.; Yang, S.; Peng, Y.; Yin, K. e Zou, R. (2017). “Eutrophication control decision making using EFDC model for Shenzhen Reservoir, China”. *Water Resources*, **44**(2), 308-314p.
- Taub, F. B. (1984). Lakes and Reservoirs – Ecosystems of the World 23. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, 643p.
- Thomann, R. V. e Mueller, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. HarperCollinsPublishers Inc., 644p.
- Tuan, N. V.; Hamagami, K. e Mori, K. (2009). “Mixing by wind-induced flow and thermal convection in a small, shallow and stratified lake”. *Paddy Water Environ.*, **7**, 83-93p.
- Tundisi, J. G., Tundisi, T. M., (2008). *Limnologia*. 1 edição, Editora Oficina de Textos, São Paulo – SP, 631p.
- Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M. e Rocha, O. (2002). “Limnologia de águas interiores. Impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos.” In Rebolças, A. da C.; Braga, B. e Tundisi, J. G. (2002). *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. **2ª ed.**, Escrituras Editora, São Paulo – SP, 195-225p.
- Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M. e Rocha, O. “Ecossistemas aquáticos interiores.” In Rebolças, A. da C.; Braga, B. e Tundisi, J. G. (2006). *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. **3ª ed.**, Escrituras Editora, São Paulo – SP, 161-202p.
- U.S. Environmental Protection Agency – U.S. EPA. “Exposure Assessment Models – EFDC”. Disponível em: <<https://www.epa.gov/exposure-assessment-models/efdc#History>>. Acesso em: 06/02/2018.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). The Environmental Fluid Dynamics Code, User Manual. Tetra Tech, VA, USA.

- USACE – U.S. Army Corps of Engineers. (2010). “HEC-RAS, River Analysis Systema User’s Manual (CPD-68), Hydraulic Reference Manual (CPD-69), and Applications Guide.” *Hydrologic Engineering Center*. Davis, CA. 790p.
- Wahl, B. e Peeters, F. (2014). "Effect of climatic changes on stratification and deep-water renewal in Lake Constance assessed by sensitivity studies with a 3D hydrodynamic model". *Association for the Science of Limnology and Oceanography*, **59**(3), 1035-1052p.
- Wang, Y.; Jiang, Y.; Liao, W.; Gao, P.; Huang, X.; Wang, H.; Song, X. e Lei, X. (2014). “3-D hydro-environmental simulation of Miyun reservoir, Beijin”. *Journal of Hydro-environment Research*, **8**, 383-395p.
- Wetzel, R. G. (1975). *Limnology*. W. B. Saunders Company, Philadelphia, USA, 741p.
- Zárate, J. M. O. e Sengers, J.V. (2005). *Hydrodynamic Fluctuations in Fluids and Fluid Mixtures*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 310 p.

APÊNDICE A

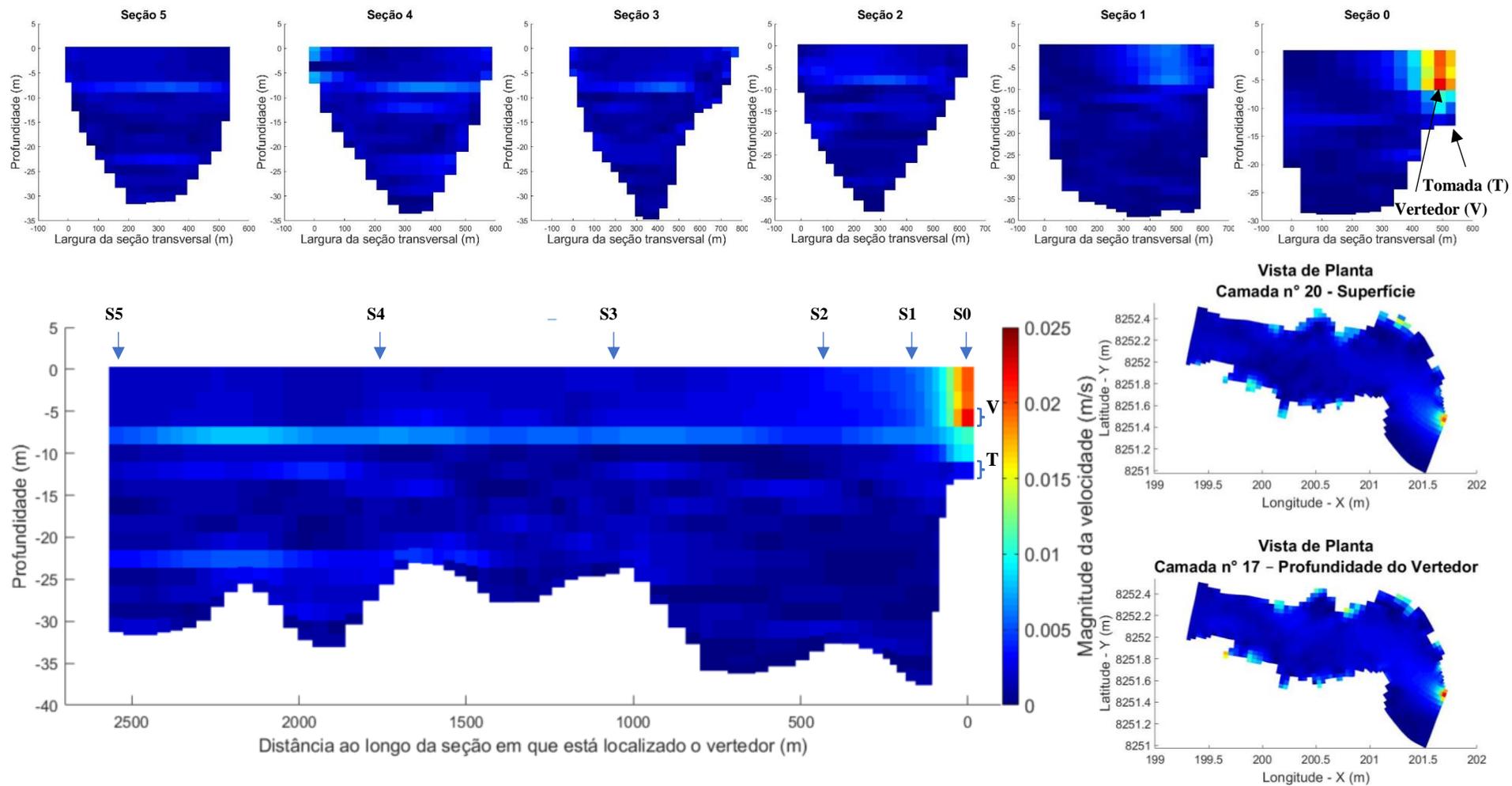


Figura A.1 – Cenário 1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

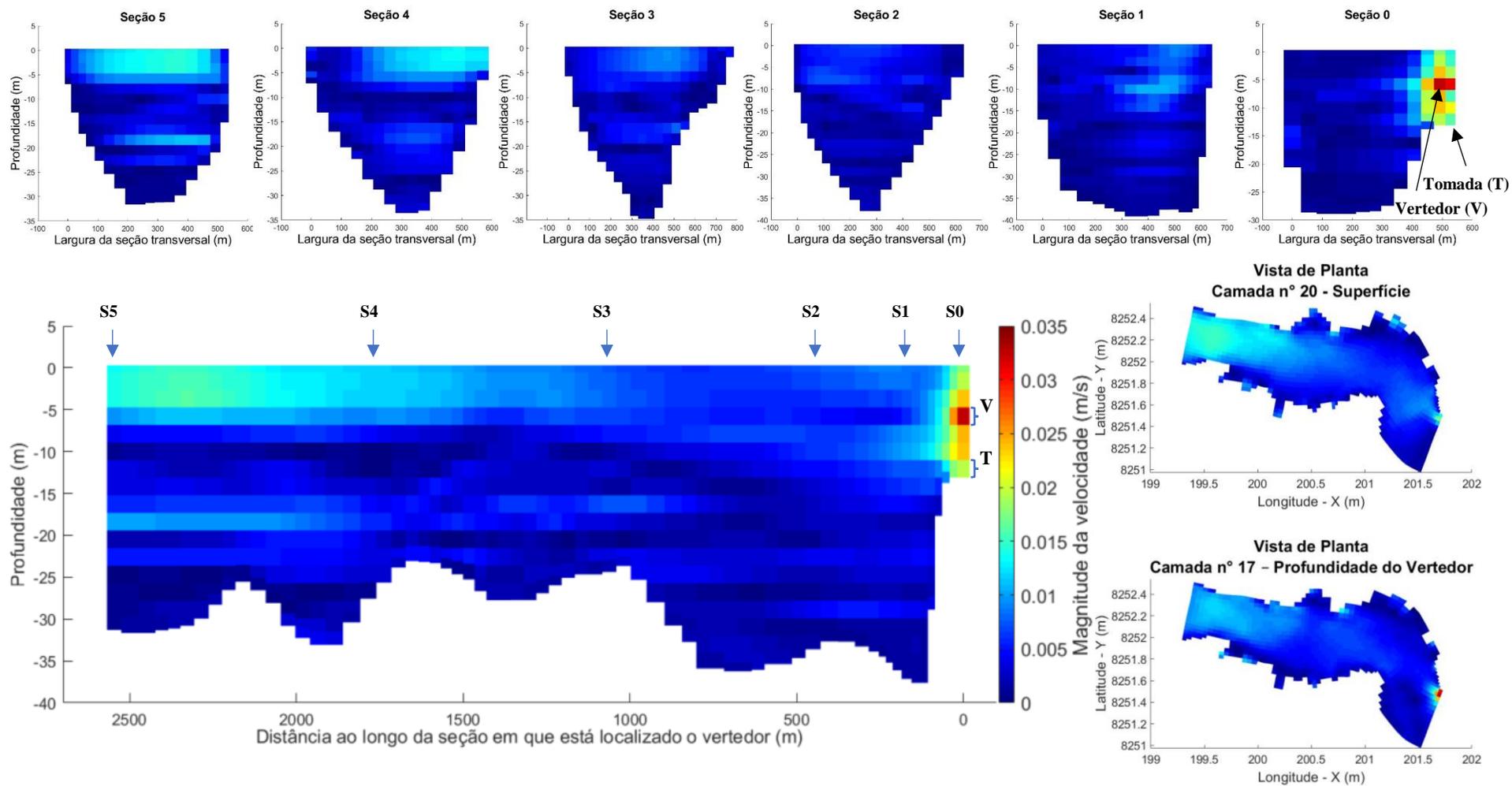


Figura A.2 – Cenário 2.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo Vertedor e condições observadas de vento.

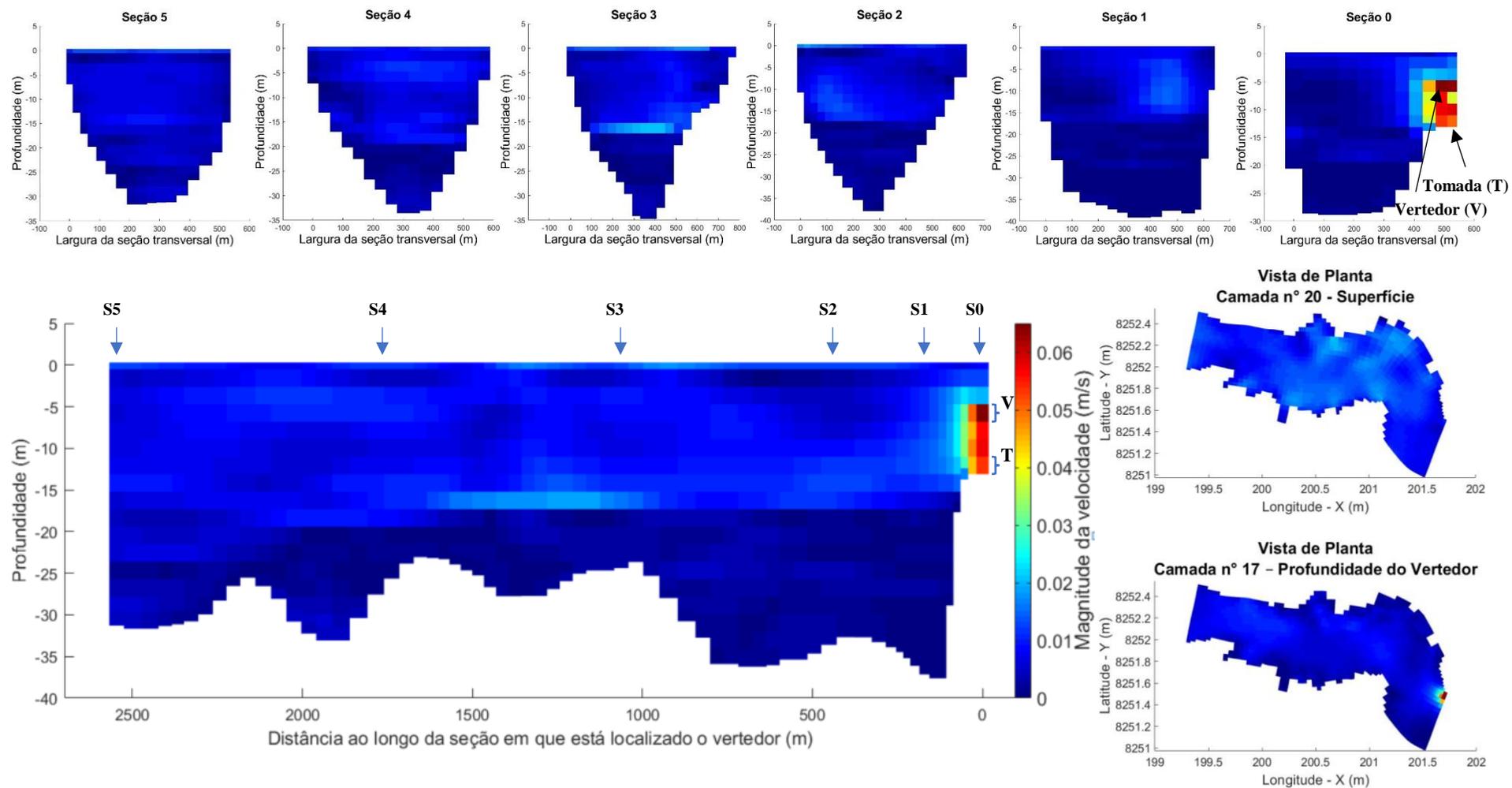


Figura A.3 – Cenário 3.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo Vertedor e condições observadas de vento.

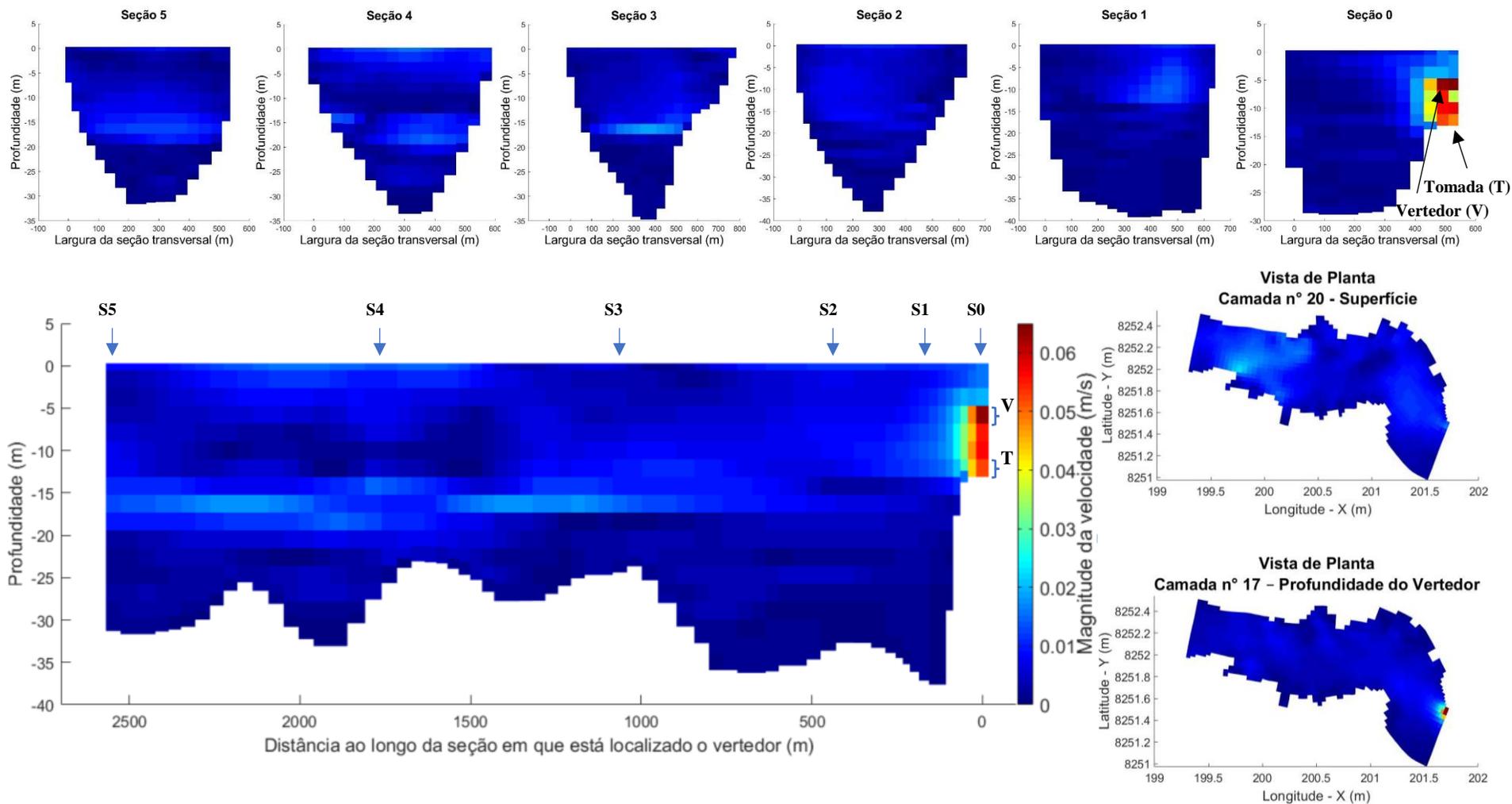


Figura A.4 – Cenário 3.5. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento lateral ao fluxo*.

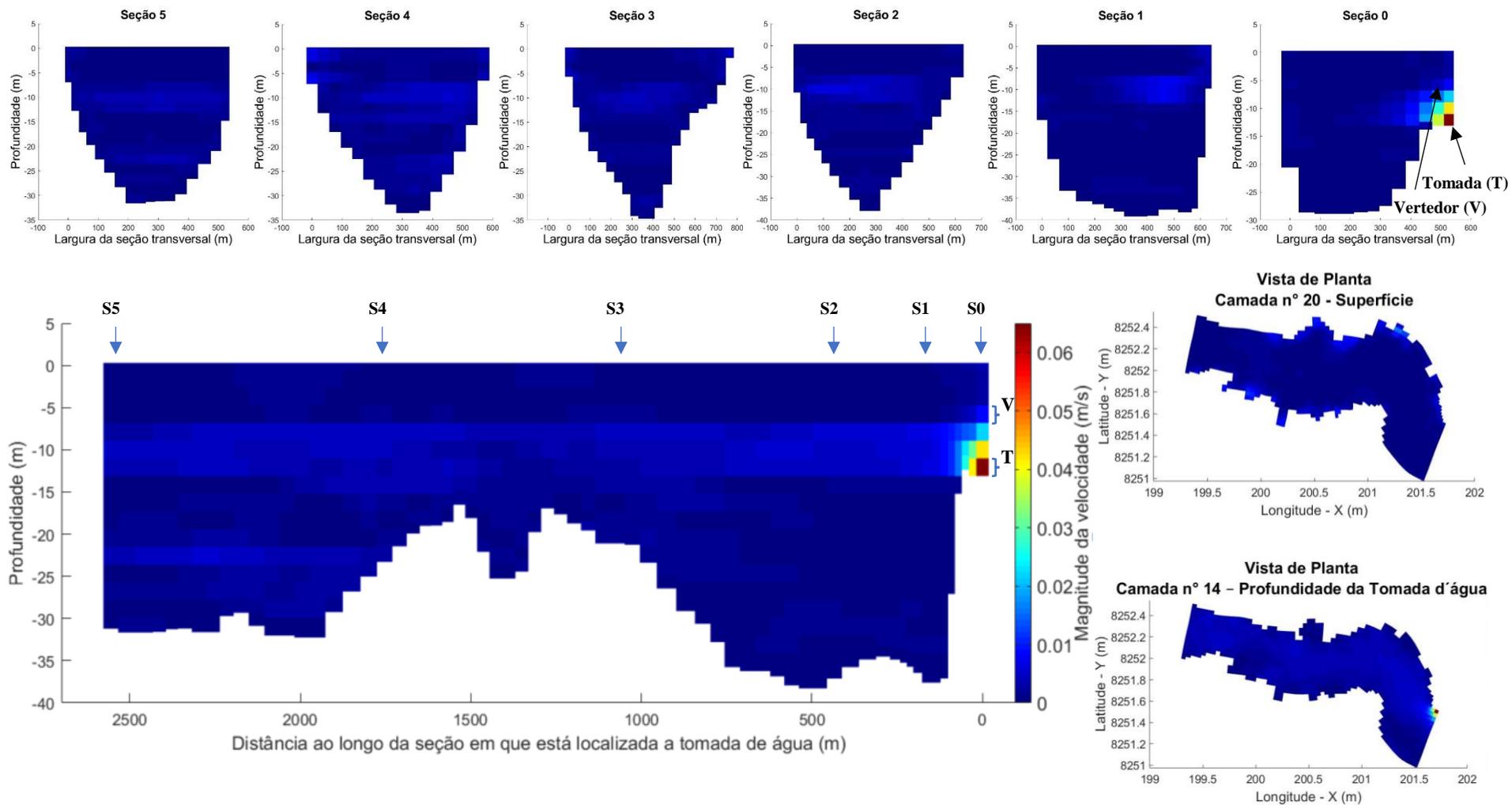


Figura A.5 – Cenário 4. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

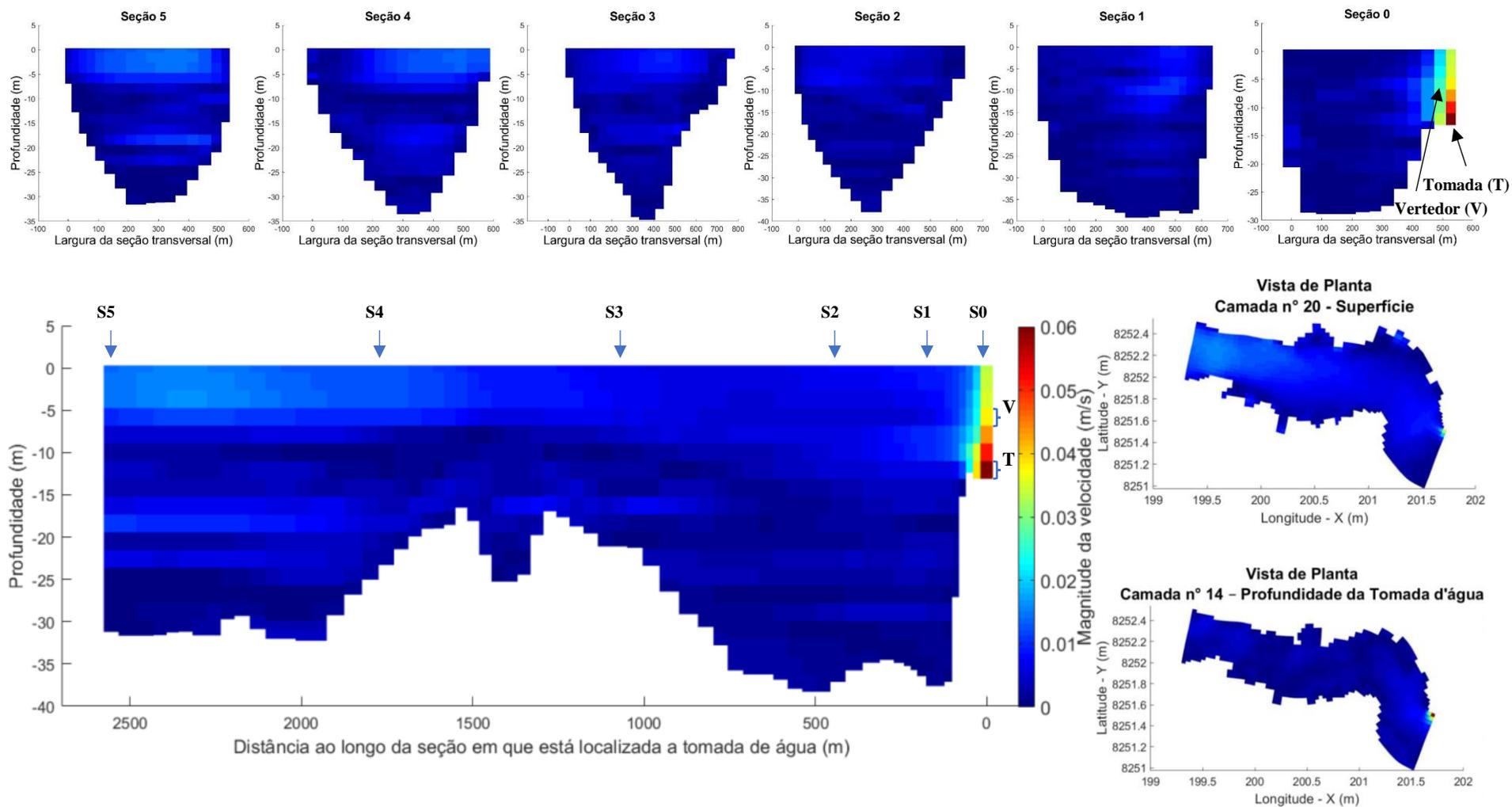


Figura A.6 – Cenário 5.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e condições observadas de vento.

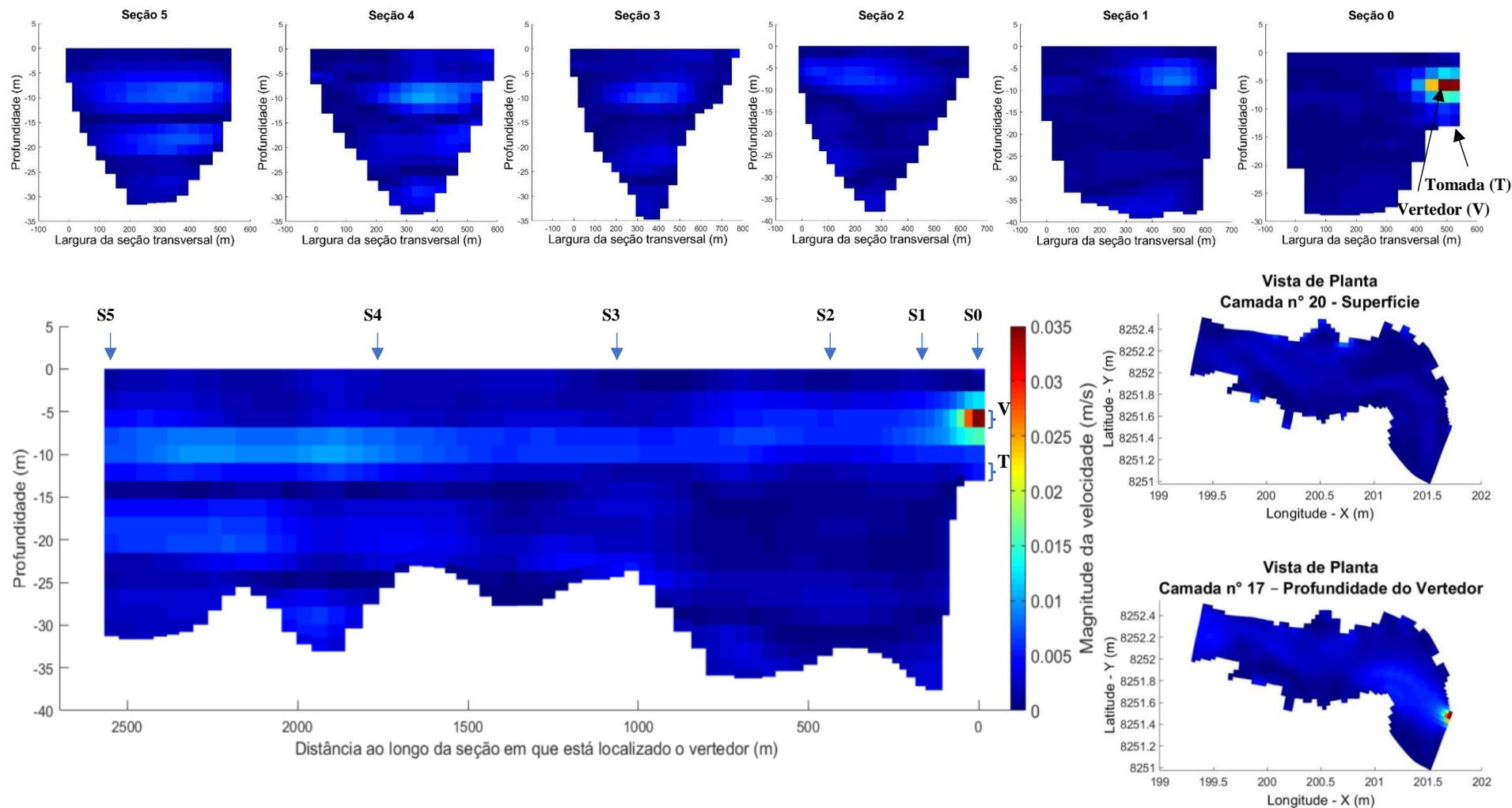


Figura A.7 – Cenário 6. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

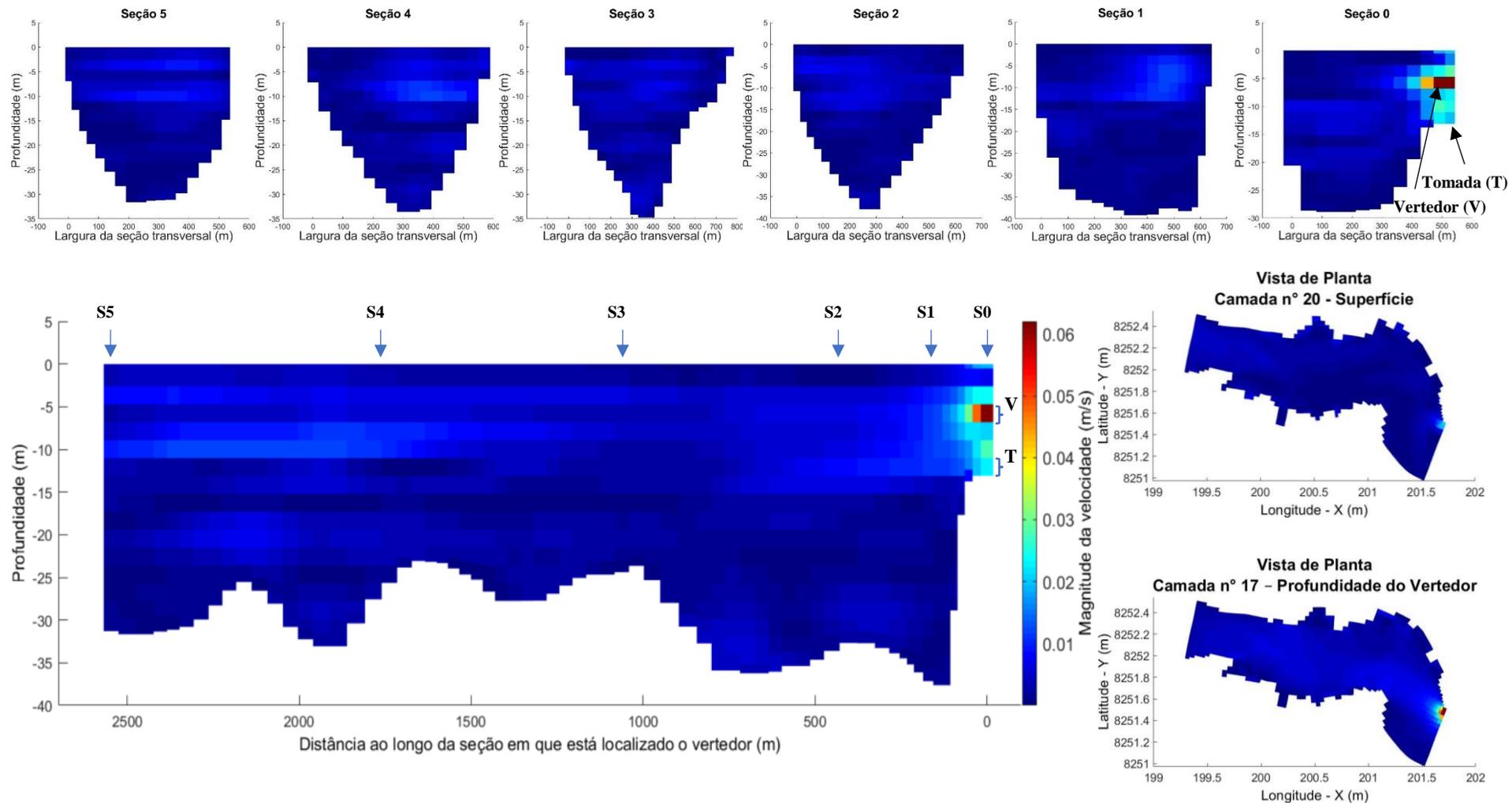


Figura A.8 – Cenário 7.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *condições observadas de vento*.

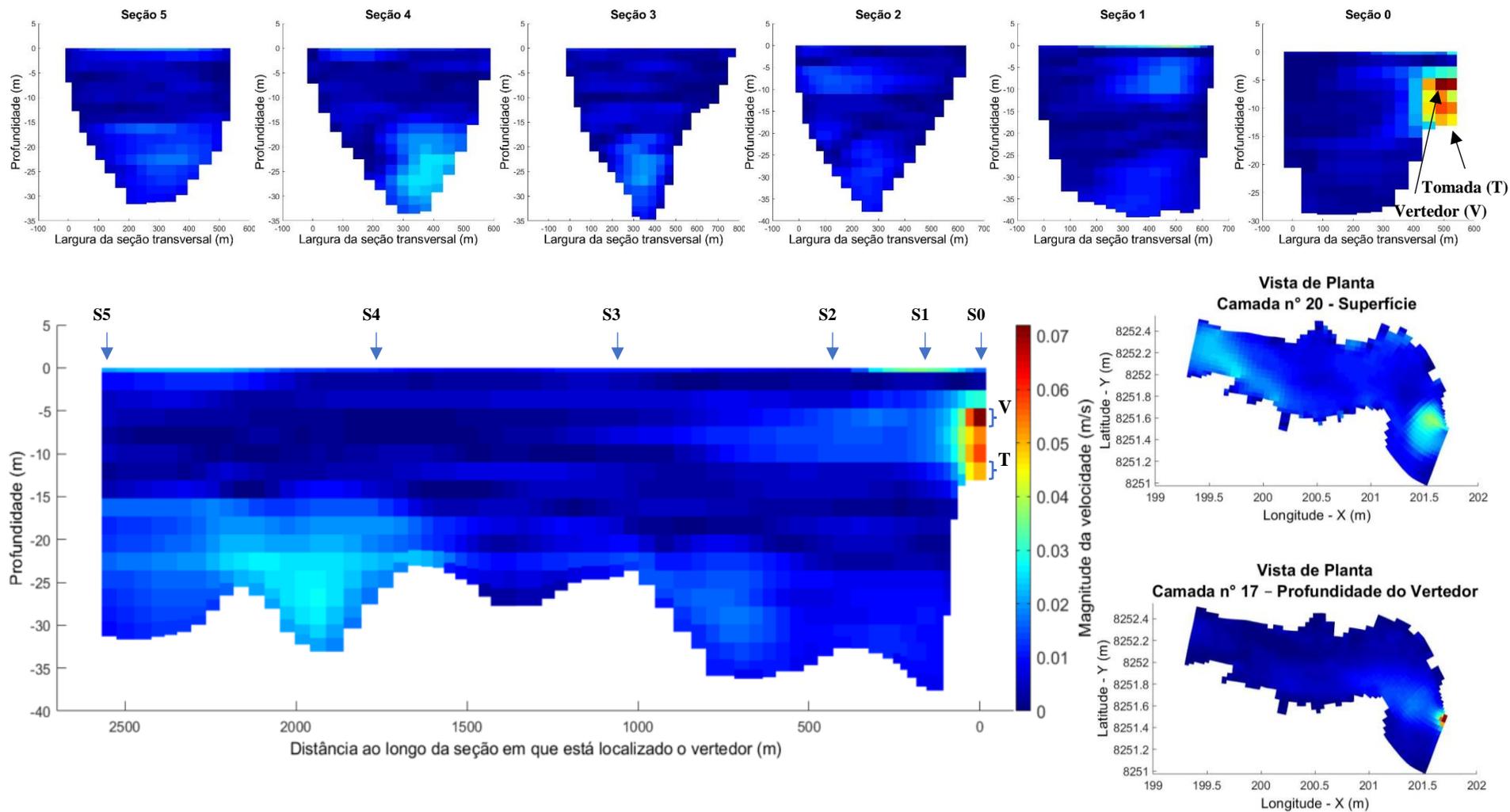


Figura A.9 – Cenário 8.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *condições observadas de vento*.

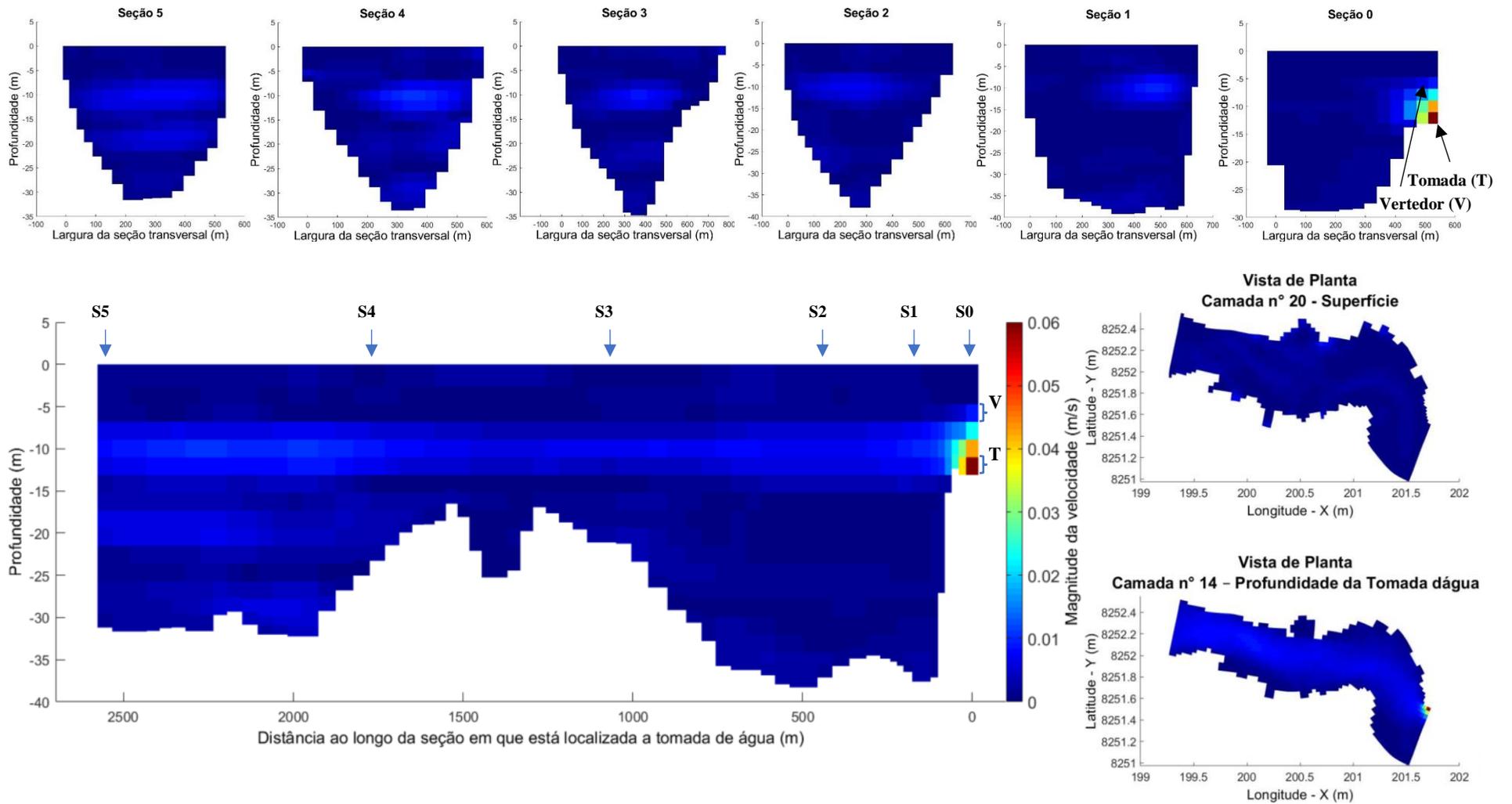


Figura A.10 – Cenário 9. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

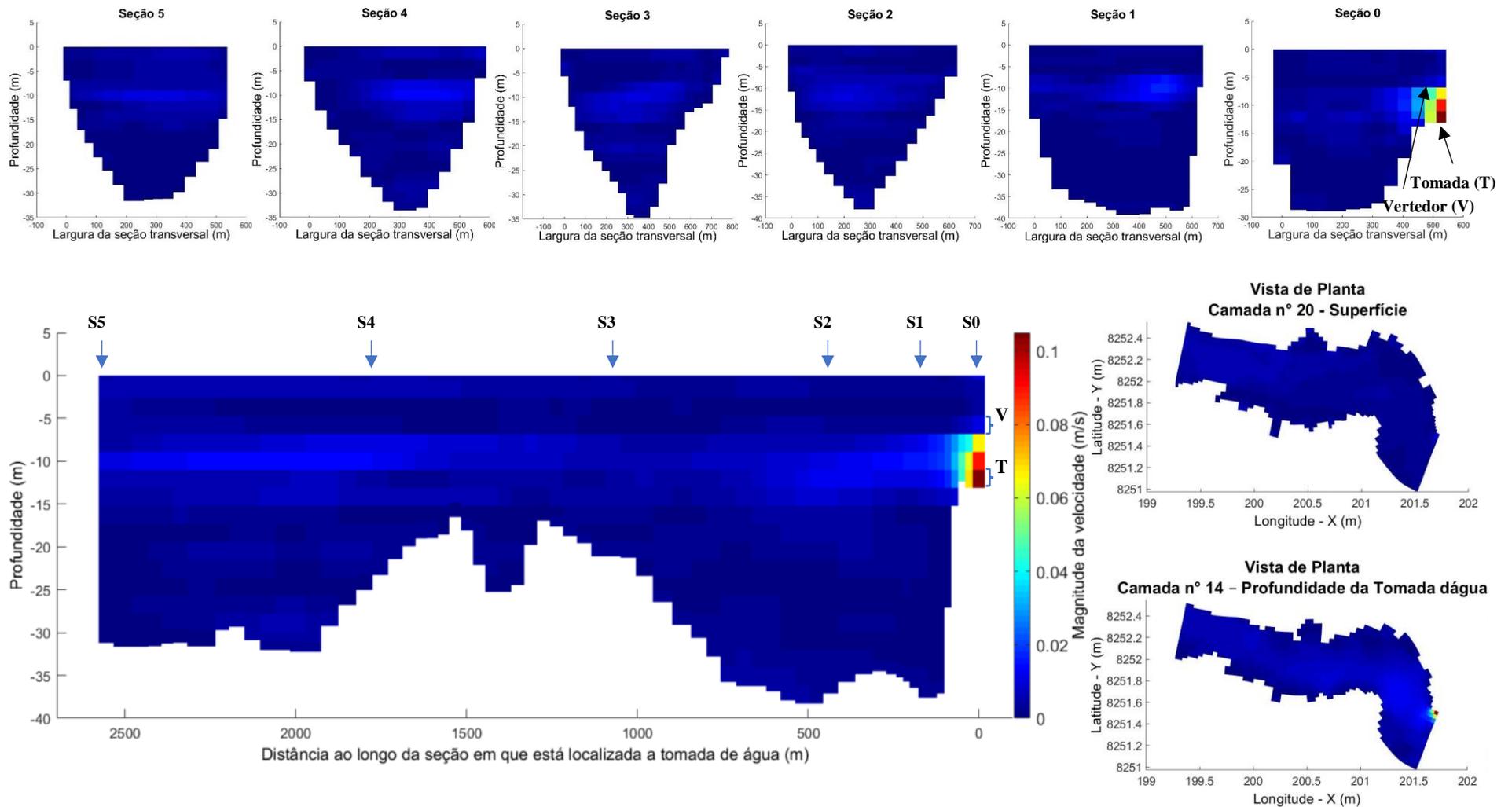


Figura A.11 – Cenário 10.1. Perfis de magnitude de velocidade do fluxo sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *condições observadas de vento*.

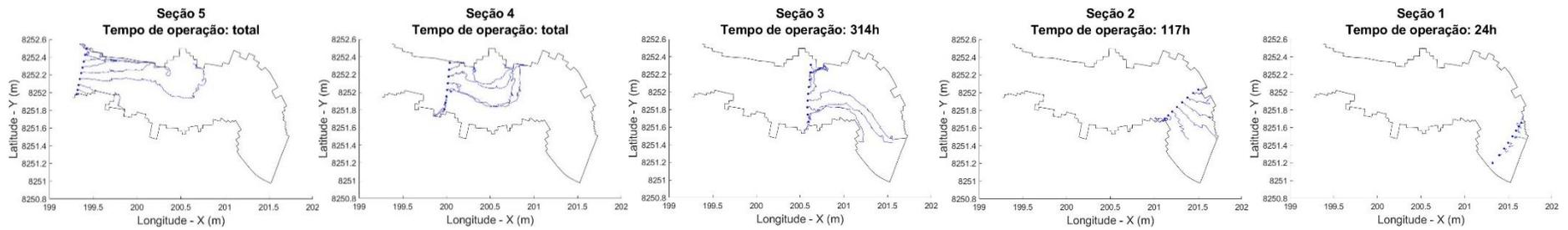


Figura A.12 – Cenário 1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

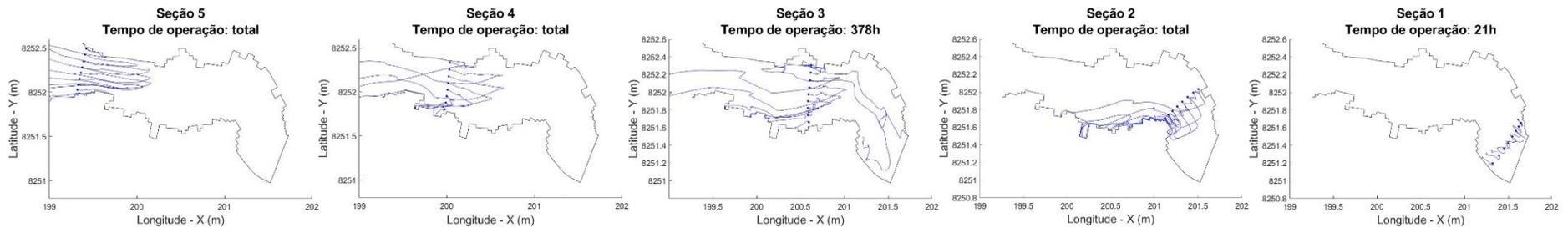


Figura A.13 – Cenário 2.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *condições observadas de vento*.

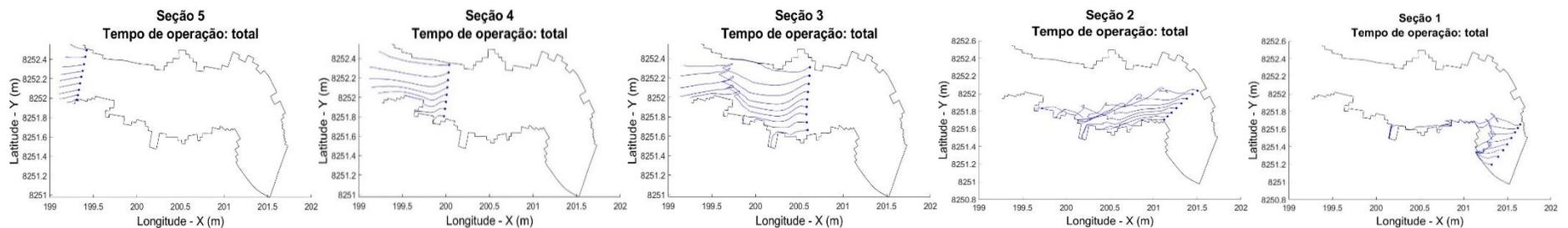


Figura A.14 – Cenário 3.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *condições observadas de vento*.

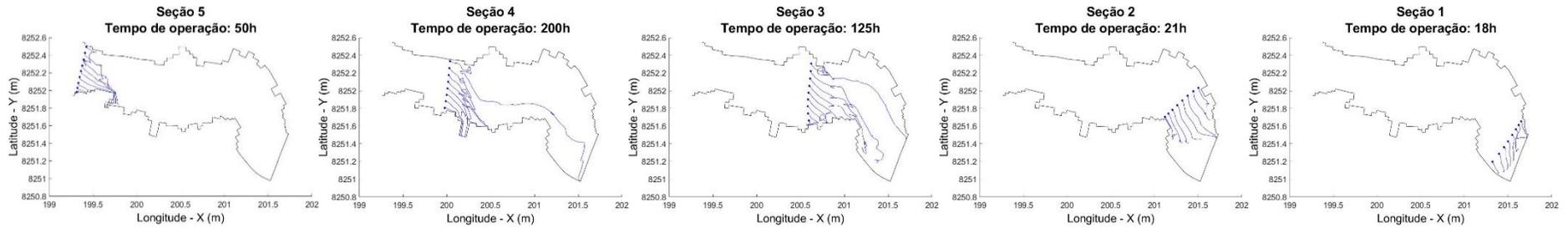


Figura A.15 – Cenário 3.5. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sentido de vento lateral ao fluxo*.

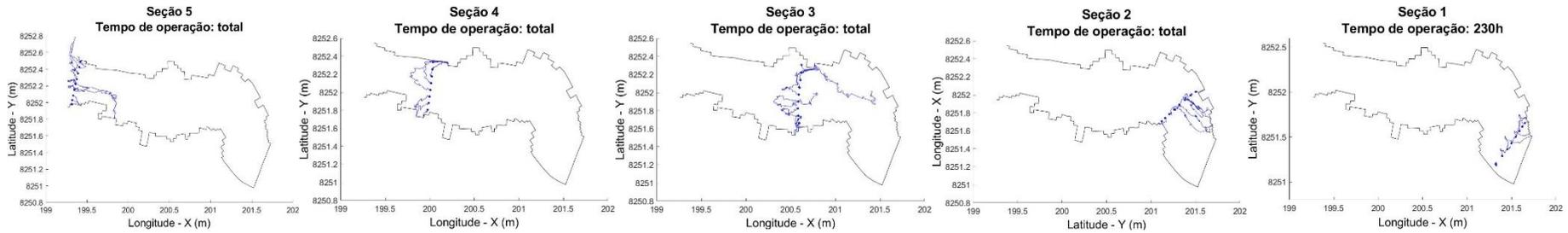


Figura A.16 – Cenário 4. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

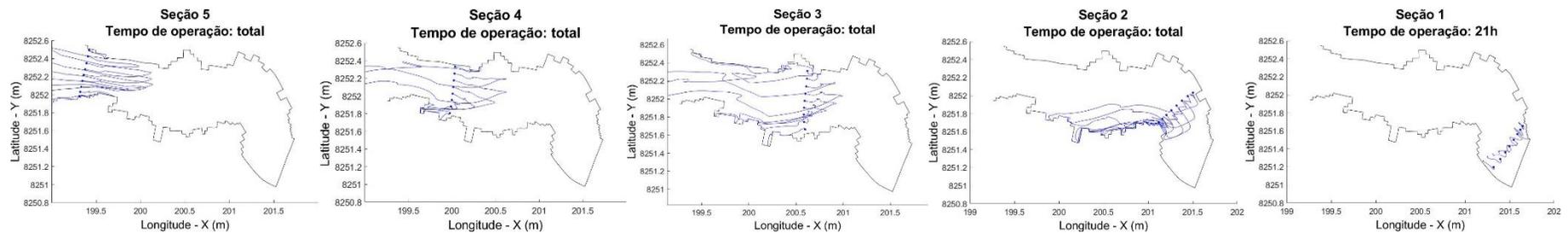


Figura A.17 – Cenário 5.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *estratificada*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *condições observadas de vento*.

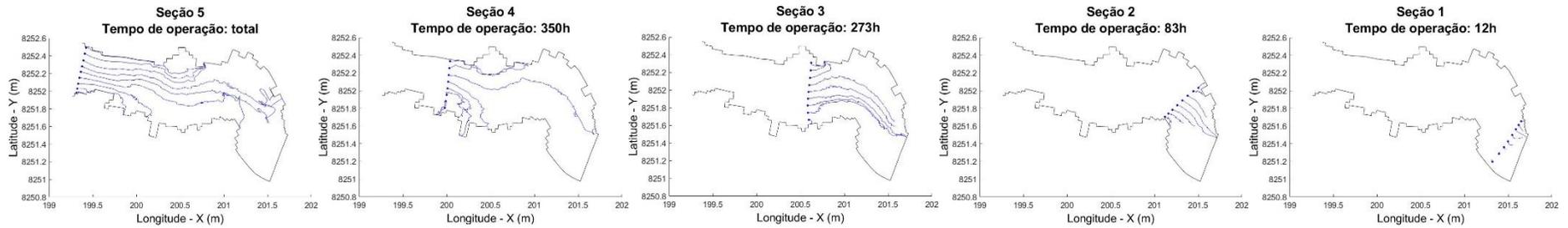


Figura A.18 – Cenário 6. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *sem vento*.

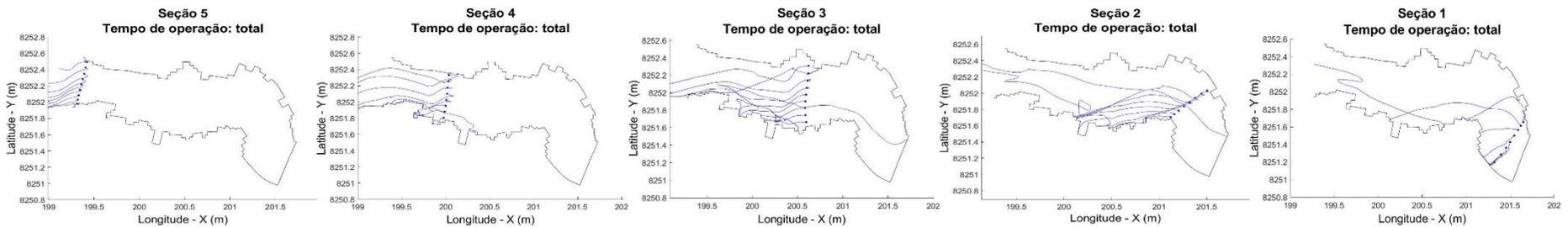


Figura A.19 – Cenário 7.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *condições observadas de vento*.

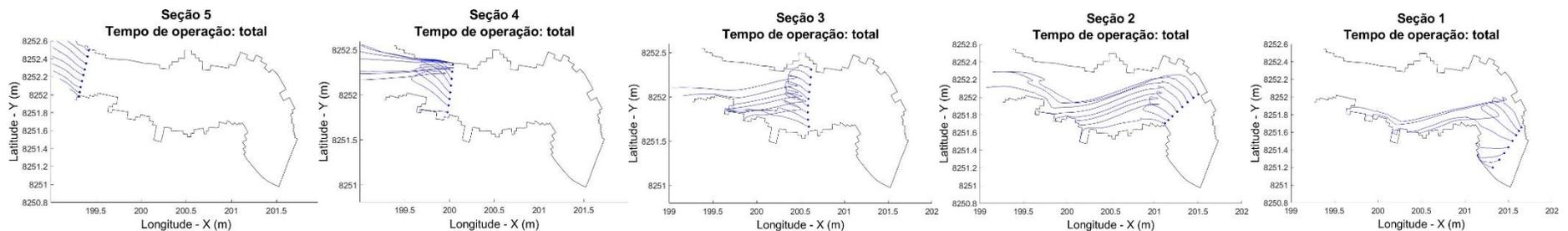


Figura A.20 – Cenário 8.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pelo *Vertedor* e *condições observadas de vento*.

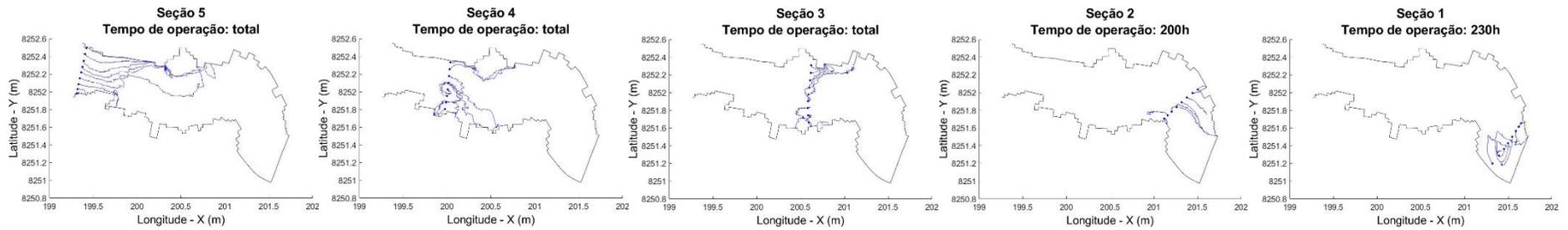


Figura A.21 – Cenário 9. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *sem vento*.

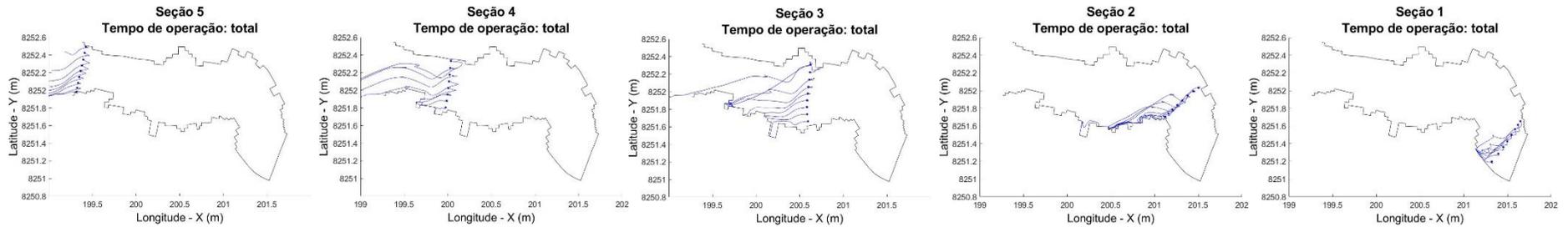


Figura A.22 – Cenário 10.1. Percurso desenvolvido pelas fileiras de traçadores lançados na superfície das seções de referência, sob condições iniciais de temperatura *uniforme*, vazão de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ pela *Tomada de água* e *condições observadas de vento*.