

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

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO LAGO  
PARANOÁ UTILIZANDO O PROGRAMA MIKE 3**

**GABRIEL BANCILLON DO NASCIMENTO VIEIRA**

**ORIENTADOR: SERGIO KOIDE**

**CO-ORIENTADORA: ALICE ROCHA PEREIRA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM  
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF: MAIO/2021**

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

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO LAGO  
PARANOÁ UTILIZANDO O PROGRAMA MIKE 3**

**GABRIEL BANCILLON DO NASCIMENTO VIEIRA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

**APROVADA POR:**

---

**Prof. SÉRGIO KOIDE, PhD (ENC/UNB)  
(ORIENTADOR)**

---

**ALICE ROCHA PEREIRA, MSc (ENC/UNB)  
(CO-ORIENTADORA)**

---

**Prof. Ricardo Tezini Minoti, DSc (ENC/UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Gilliard Nunes, DSc  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 24 DE MAIO DE 2021.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, GABRIEL BANCILLON DO NASCIMENTO  
MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO LAGO PARANOÁ UTILIZANDO O  
PROGRAMA MIKE 3.

ix, 109 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)  
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Modelagem hidrodinâmica	2. MIKE 3
3. Lago Paranoá	4. Estratificação térmica
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, G.B.N. (2021). *Modelagem Hidrodinâmica do Lago Paranoá utilizando o programa MIKE 3*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gabriel Bancillon do Nascimento Vieira:

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Modelagem hidrodinâmica do Lago Paranoá utilizando o programa MIKE 3

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

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

---

Gabriel Bancillon do Nascimento Vieira

[gabrielbancillon@gmail.com](mailto:gabrielbancillon@gmail.com)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois d'Ele provém tudo. Nada é por acaso e tudo acontece por um motivo.

À minha mãe Gilda, por ser uma pessoa maravilhosa que sempre coloca os outros à frente de suas próprias vontades e necessidades e que não mede esforços para garantir a felicidade dos filhos.

Ao meu pai, Vieira, por ser um amigo repleto de virtudes, sempre disposto a passar um ensinamento importante e por mostrar o caminho da espiritualidade.

Aos meus irmãos, Yann e Yuri por serem mais que irmãos, mas sim companheiros de vida, onde poderei sempre contar com conversas e risadas.

Ao meu orientador, Sérgio Koide, pela oportunidade, pelo profundo ensinamento proporcionado, pela paciência e disponibilidade.

À minha co-orientadora, Alice Rocha Pereira, pela ajuda, paciência e pela presteza sempre.

Ao Gilliard Nunes, por conceder gentilmente os dados necessários para a confecção desse trabalho.

Aos grandes amigos e colegas do curso de Engenharia Ambiental da UnB, por compartilharem momentos incríveis, conversas, risadas, ensinamentos, angústias, frustrações e lições de vida.

À Universidade de Brasília, por proporcionar essa oportunidade de vida único.

Aos incríveis professores e professoras do ENC, Ariuska, Arthur, Cristina, Francisco, Manoel, Koide, Ricardo, Wagner e Yovanka, pelo imenso conhecimento compartilhado e que sempre se empenharam em mostrar o potencial dos alunos. Tomo esses professores como exemplos de vida.

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estudar o funcionamento do *software* MIKE 3 Flow Model FM numa aplicação de modelagem hidrodinâmica tridimensional do Lago Paranoá. Esse modelo foi construído tendo como base, os dados das séries históricas de vazão das estações fluviométricas dos tributários; dos dados de vazão das estações de tratamento de esgoto, dos dados de vazão defluentes da barragem, dos dados de vazão oriundos da contribuição direta ao Lago; dos dados meteorológicos da estação Brasília A001 do INMET e dos dados das séries históricas de evaporação, obtidas a partir do evaporímetro do tipo Tanque Classe A.

Com a base de dados construída para o padrão do *software*, um modelo hidrodinâmico foi construído e etapas como aquecimento do modelo, análise de sensibilidade e calibração foram feitas, onde os parâmetros mais sensíveis foram os de viscosidade, radiação, transferência de calor.

A etapa de aquecimento se provou importante para o desempenho do modelo com redução do Erro Médio Absoluto (MEA) de 0,51 para a simulação “fria” para 0,12 na etapa final de aquecimento. Com o modelo aquecido, pôde-se ajustar os parâmetros de temperatura e testá-lo para condições de ausência de vento. No entanto, devido ao elevado custo computacional, poucos ajustes puderam ser feitos aos parâmetros de calibração, resultando em valores de temperatura simulados discrepantes com os valores observados. A simulação não pôde, para os ajustes feitos, representar o efeito de estratificação do Lago.

Para a construção do domínio computacional, diversas malhas triangulares foram confeccionadas no intuito de se analisar a relação qualidade *versus* custo computacional. Essas malhas foram geradas abordando diversos critérios de refinamento, como especificação do limite máximo dos elementos triangulares, entre outros. Após duas malhas ótimas terem sido selecionadas, uma refinada e outra esparsa, verificou-se que, para efeito de distribuição vertical de temperatura, o refinamento da malha na região de interesse não desempenhou um papel significativo, com diferenças inferiores a 1% para todas as profundidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem hidrodinâmica, MIKE 3, Lago Paranoá, Estratificação Térmica.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 OBJETIVOS GERAIS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 ASPECTOS LIMNOLÓGICOS DE LAGOS E RESERVATÓRIOS..</b>	<b>5</b>
3.1.1 Gênese e características de lagos e Reservatórios.....	5
3.1.2 Temperatura .....	10
3.1.3 Estratificação Térmica.....	11
<b>3.2 PROCESSOS HIDRODINÂMICOS EM LAGOS E</b>	
<b>RESERVATÓRIOS .....</b>	<b>15</b>
3.2.1 Conservação de Massa .....	15
3.2.2 Conservação de Momento.....	17
3.2.3 Conservação de Energia .....	18
3.2.4 Equação de Navier-Stokes .....	19
3.2.5 Forçantes Externas .....	22
<b>3.3 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES</b>	
<b>DIFERENCIAIS PARCIAIS.....</b>	<b>26</b>
3.3.1 Método das Diferenças Finitas.....	27
3.3.2 Método dos Elementos Finitos.....	27
3.3.3 Método dos Volumes Finitos .....	28
<b>3.4 MODELAGEM DE LAGOS E RESERVATÓRIOS.....</b>	<b>30</b>
3.4.1 Modelos Determinísticos e Estocásticos .....	31
3.4.2 Hipóteses Simplificadoras para a Aplicação dos Modelos	
Hidrodinâmicos .....	32
3.4.3 Etapas do Processo de Modelagem .....	35
3.4.4 Modelagem de Lagos e Reservatórios .....	36
3.4.5 MIKE 3 Flow Model FM .....	39
<b>3.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>43</b>
3.5.1 Aspectos Gerais.....	43
3.5.2 Clima.....	44

3.5.3	Uso e Ocupação do Solo .....	44
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>DADOS DE ENTRADA PARA A CONFECÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....</b>	<b>47</b>
4.1.1	Dados Topobatimétricos .....	48
4.1.2	Dados Hidrológicos.....	49
4.1.3	Dados Meteorológicos.....	52
<b>4.2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE UTILIZAÇÃO DO MIKE 3 FLOW MODEL FM – <i>HYDRODYNAMIC MODULE</i> .....</b>	<b>53</b>
4.2.1	Construção do Banco de Dados do MIKE 3 .....	54
4.2.2	Construção do Módulo Hidrodinâmico.....	61
<b>4.3</b>	<b>SIMULAÇÃO.....</b>	<b>72</b>
4.3.1	Aquecimento do Modelo .....	72
4.3.2	Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo.....	72
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>MALHA NUMÉRICA.....</b>	<b>77</b>
<b>5.2</b>	<b>AQUECIMENTO DO MODELO .....</b>	<b>82</b>
<b>5.3</b>	<b>CALIBRAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>84</b>
<b>5.4</b>	<b>AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA TEMPERATURA .....</b>	<b>89</b>
<b>5.5</b>	<b>INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA E INFLUÊNCIA DO VENTO.....</b>	<b>92</b>
<b>5.6</b>	<b>AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DA MALHA NOS RESULTADOS DE TEMPERATURA .....</b>	<b>96</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>100</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Zonas específicas típicas de um reservatório devido aos gradientes horizontais (Adaptada: Wetzel, 2001) .....	9
Figura 3.2 – Zonas biológicas típicas de lagos e reservatórios (Adaptada: Ji, 2008) ..	9
Figura 3.3 – Representação das camadas de estratificação vertical em um lago (Adaptado: Ji, 2008). .....	12
Figura 3.4 – Representação Ilustrativa do princípio de conservação de massa. ....	15
Figura 3.5 – Volume de controle infinitesimal. (Adaptada: White, 2011) .....	16
Figura 3.6 – Forças que agem sobre um VC infinitesimal (Adaptada: White, 2011) 18	
Figura 3.7 – Perfil do comportamento da lâmina d’água devido à ação do vento para um corpo hídrico homogêneo. Situação barotrópica, onde a coluna d’água apresenta densidade uniforme (Adaptada: Imboden, 2004) .....	23
Figura 3.8 – Perfil de inclinação da superfície d’água quando o lago está estratificado. (Adaptada: Imboden, 2004) .....	24
Figura 3.9 – Representação visual dos três cenários possíveis quando o afluente dos tributários se encontram com a massa d’água do corpo hídrico lântico. (Adaptada: Martin & McCutcheon, 1999) .....	26
Figura 3.10 – Esquemática de uma célula do MVF, as setas azuis indicam o sentido dos fluxos das propriedades $S$ . $u_k^n$ é o centroide da célula, $H^n$ é a densidade dos fluxos (Fonte: Causon et al., 2011).....	29
Figura 3.11 – Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá, com as subdivisões das UHs (Fonte: Nunes, 2016). .....	43
Figura 4.1 – Fluxograma adotado para o desenvolvimento do trabalho. ....	46
Figura 4.2 – Mapa da localização dos pontos de interesse para a construção e calibração do modelo (Elaborado pelo Autor) .....	47
Figura 4.3 – Batimetria do Lago Paranoá .....	49
Figura 4.4 – Delimitação das Sub-Bacias do Lago Paranoá, com delimitação das áreas de contribuição direta (Adaptada: Nunes et al., 2020). .....	52
Figura 4.5 – Fluxograma para a construção do modelo MIKE 3.....	54
Figura 4.6 – Representação da distribuição vertical adotando a distribuição variável. (Fonte: MIKE Powered by DHI(d)) .....	66
Figura 4.7 – Procedimento de definição do $\Delta t_{HD}$ e $\Delta t_{AD}$ empregado pelo MIKE 3 FM. (Fonte: MIKE Powered by DHI(e)).....	68

Figura 4.8 – Localização geográfica dos outputs referentes aos cinco pontos de monitoramento de qualidade da água no modelo hidrodinâmico (Elaborada pelo autor)...	74
Figura 5.1 – Malha 4. Menos detalhada na garganta, com uma linha central nas regiões de maior profundidade. Seleccionada para as principais simulações. ....	78
Figura 5.2 – Malha 3. Vértices no contorno mais distribuídos, porém, com a garganta detalhada. Escolhida para efeito comparativo. ....	78
Figura 5.3 – Malha 2. Bem refinada na garganta, mas com arcos mais simplificados e suavizados.....	78
Figura 5.4 – Malha 1. Mais detalhada que incorpora os detalhes do contorno físico do Lago Paranoá. ....	78
Figura 5.5 – Modelo batimétrico gerados a partir das malhas. Batimetria da esquerda gerado a partir da Malha 3. Da direita a partir da Malha 4.....	81
Figura 5.6 – Visualização 3D da Batimetria do Lago Paranoá. ....	82
Figura 5.7 – Elevação da lâmina d’água para cada etapa do aquecimento para o período de 2007 a 2008 .....	83
Figura 5.8 – Elevação do nível d’água observado e simulado para o ano de 2007 a 2008 para o modelo calibrado. ....	85
Figura 5.9 –Ajuste dos valores de elevação d’água simulados para os dados observados de 2007 a 2008.....	85
Figura 5.10 – Comparação das calibrações 2,4 e 5 para as diversas profundidades do ponto de monitoramento C. ....	87
Figura 5.11 – Gráfico comparativo das temperaturas simuladas a 1 m do fundo e das temperaturas observadas.....	89
Figura 5.12 – Temperatura nos diversos pontos de monitoramento .....	91
Figura 5.13 – Visualização da distribuição espacial da temperatura durante 10/01/2009 a 16/01/2009.....	92
Figura 5.14 – Gráficos dos perfis de temperatura no Ponto C de monitoramento. Comparação entre os dados observados, simulação base e simulação sem vento para o ano de 2008 a 2009.....	94
Figura 5.15 – Perfil Longitudinal do Lago.....	95
Figura 5.16 – Efeito da malha fina sobre os resultados de temperatura no ponto C..	98
Figura 5.17 – Comparativo da Malha 3 com a Malha 4 na simulação do nível d’água. ....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais usos e características de reservatórios (Fonte: Straškraba, 2005).....	7
Tabela 3.2 – Uso e cobertura do solo da Bacia do Paranoá. Fonte: Nunes, 2016.....	45
Tabela 4.1 – Tipos de dados necessários do modelo .....	48
Tabela 4.2 – Localização e código das estações fluviométricas da Caesb.....	50
Tabela 4.3 – Descrição dos tipos de formato que a plataforma MIKE adota para a configuração dos modelos .....	59
Tabela 4.4 – Configuração dos dados para a elaboração do banco de dados do MIKE .....	62
Tabela 4.5 – Construção do modelo hidrodinâmico no MIKE 3 HD. (Adaptada: Teixeira, 2019).....	63
Tabela 4.6 – Configuração das condições iniciais de cada período de simulação.....	70
Tabela 4.7 – Parâmetros escolhidos para a calibração.....	73
Tabela 4.8 – Métodos estatísticos para avaliação da performance do modelo .....	75
Tabela 4.9 – Parâmetros adotados para cada calibração .....	76
Tabela 5.1 – Características de cada malha .....	79
Tabela 5.2 – Avaliação de performance das etapas de aquecimento .....	84
Tabela 5.3 – Avaliação da performance do modelo em representar a elevação do nível d’água .....	85
Tabela 5.4 – Avaliação das diferentes calibrações.....	88
Tabela 5.5 – Análise estatística para o ajuste da calibração 5 com os dados de temperatura a 1 m do fundo.....	89
Tabela 5.6 – Avaliação estatística do modelo calibrado para a distribuição espacial	91
Tabela 5.7 – Métrica para avaliar o desempenho de uma malha em relação a outra.	96
Tabela 5.8 – Avaliação de performance das duas malhas para a simulação do nível d’água .....	98

## LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\rho$  – Densidade do fluido

$g$  – Força gravitacional

$u, v, w$  – Componentes cartesianos do vetor velocidade

$\vec{\nabla}$  – Operador gradiente

$\tau_{ij}$  – Tensor das forças de cisalhamento

$\tau_w$  – Tensão de cisalhamento do vento

$\dot{q}_s$  – Taxa de transferência de calor por unidade de área

$\dot{q}_V$  – Taxa da fonte ou sumidouro de calor dentro do volume material por unidade de volume

$\sigma_{ij}$  – Tensor das tensões normais

$m$  – Massa do fluido

$t$  – Tempo

$H$  – Profundidade total da coluna d'água

$P$  – Componentes de pressão sobre o elemento infinitesimal

$\varepsilon_{ij}$  – Tensor da taxa de deformação do fluido

$\mu$  – Viscosidade do fluido

$\vec{F}_E$  – Forçantes externas

$\vec{\Omega}$  – Coeficiente de velocidade angular da Terra

$\zeta_0$  – Deslocamento do nível d'água em relação a superfície de equilíbrio

$\omega_i$  – Função peso de interpolação para cada ponto discretizado da fronteira do volume finito

$S_j$  – Comprimento da fronteira do volume finito

$\sigma$  – Coordenada sigma de normalização da coluna d'água

$\sigma +z$ -level – Combinação da coordenada sigma com coordenada  $z$

$\beta$  – Coeficiente da lei de Lambert-Beer

$\lambda$  – Coeficiente de extinção de luz

$\Delta t_{HD}$  – Passo de tempo para o cálculo das Equações de Navier Stokes do módulo hidrodinâmico do MIKE 3 FM

$\Delta t_{AD}$  – Passo de tempo para o cálculo das Equações de Transporte do módulo hidrodinâmico do MIKE 3 FM

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CD – *Constant in Dalton's Law*

CEB – Companhia Energética de Brasília

CFL – Condição de *Courant–Friedrichs–Lewy*

DF – Distrito Federal

DHI – *Danish Hydraulic Institute*

EDP – Equação Diferencial Parcial

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FM – *Flexible Mesh*, Malha Flexível

HD – *Hydrodynamic Module*, Módulo Hidrodinâmico

HEV – *Horizontal Eddy Viscosity*

HP – *Horizontal Dispersion*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MAE – *Mean Absolute Error*,

MDF – Método das Diferenças Finitas

ME – *Mean Error*,

MEF – Método dos Elementos Finitos

MVF – Método dos Volumes Finitos

UH – Unidade Hidrográfica

PGIRH/DF – Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal

PRH-PARANAÍBA-DF – Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Afluentes Distritais do Rio Paranaíba

RANS – *Reynold Averaged Navier Stokes*, Média de Reynolds da Equação de Navier-Stokes

RMSE – *Root Mean Square Error*,

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

TCC – *Transfer Coefficient for Heating*

TCH – *Transfer Coefficient for Cooling*

VEV – *Vertical Eddy Viscosity*

VP – *Vertical Dispersion*

WD – *Wind Coefficient in Dalton's Law*

WF – *Wind Friction*

# 1. INTRODUÇÃO

As alterações no uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas com o progresso das atividades antrópicas, resultam em impactos diretos sobre os corpos d'água, seja por emissões pontuais e difusas de poluentes; por aumento dos processos erosivos devido a alteração do ciclo hidrológico; aumento das velocidades de escoamento superficial pela retirada da cobertura vegetal e entre outros fatores que contribuam para a degradação dos corpos hídricos.

Esses problemas se tornam mais graves quando analisados sobre lagos e reservatórios urbanos que atendem a múltiplos usos. Como esses corpos d'águas devem atender a diversos fins, a degradação desses ecossistemas desencadeia uma série de impactos que prejudicam/inviabilizam um ou mais usos do reservatório, como por exemplo, a floração de cianobactérias que inviabiliza o uso recreativo, de manancial, de cultivo de peixes e etc.

Deve-se então, gerir os recursos hídricos de maneira integrada para que se garanta a proteção, prevenção e preservação da qualidade da água, assim como garantir disponibilidade pública para todos.

No âmbito do Distrito Federal, a gestão integrada dos recursos hídricos se dá pelo Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Afluentes Distritais do Rio Paranaíba (PRH-PARANAÍBA-DF), que dispõe de instrumentos de gestão de recursos hídricos para garantir um balanço hídrico adequado, universalização de acesso, alocação dos usos múltiplos e a promoção da segurança hídrica na bacia. Esse plano estabelece instrumentos e suas diretrizes para o aperfeiçoamento e implementação na Política de Recursos Hídricos do DF. Esses instrumentos tem sido aplicado ao Lago Paranoá, localizado na Bacia do Paranoá, para a manutenção e garantia dos múltiplos usos aos quais o Lago fornece.

O Lago Paranoá é um reservatório artificial, criado após o barramento do Rio Paranoá em 1959 para servir como uma forma de melhoramento do microclima da região, fonte de produção energética, alternativa de lazer público e etc. O Lago Paranoá é um corpo hídrico de grande interesse de estudo, pois a bacia à qual se está inserida, a Bacia do Paranoá, possui elevada densidade populacional, com alto impacto no uso e ocupação do solo, que pode acarretar em impactos ambientais severos como assoreamento, aporte de materiais contaminantes aos corpos hídricos e etc. A importância da gestão hídrica desse corpo d'água se dá pelo fato do Lago Paranoá atender a múltiplos usos concorrentes, como diluição dos

efluentes tratados das estações de tratamento de esgoto e recreação, por exemplo. Para tal, o Lago Paranoá é segmentado em regiões adequadas para cada tipo de uso, definidos pelo Zoneamento de Usos do Espelho D'água do Lago Paranoá

O zoneamento do espelho d'água, estabelecido no Decreto nº 39.555/2018, a partir de estudos técnicos ambientais, define o uso apropriado para cada espaço delimitado do Lago, garantindo um uso mais seguro para os diversos fins. O zoneamento é definido como:

- Zonas de uso preferencial para banho;
- Zonas de uso preferencial para atividades náuticas não motorizadas;
- Zonas de uso preferencial para a motonáutica;
- Zonas de diluição de efluentes de estações de tratamento de esgotos;
- Zonas de segurança dos pontos de captação de água para abastecimento público;
- Zonas de segurança da Barragem do Lago Paranoá;
- Zonas de segurança nacional;
- Zonas de restrição ambiental.

Para se prevenir, ou mitigar os impactos ambientais, é necessário o uso de ferramentas que forneçam subsídios para a tomada de decisão, para que se possa haver a melhor gestão dos recursos hídricos possíveis. Uma dessas ferramentas são os modelos matemáticos, que atuam como uma representação simplificada da realidade, ao mesmo tempo que captam a essência do corpo hídrico real; os modelos matemáticos se baseiam em equações matemáticas capazes de descrever fenômenos físicos, químicos e biológicos. São ferramentas úteis nos estudos hidrodinâmicos de corpos hídricos, pois se valem de equações fundamentais de conservação de massa, momento e energia.

Com o progresso das tecnologias e a compreensão dos processos interveniente de ecossistemas aquáticos, torna-se cada vez mais viável a implementação de modelos mais realistas que sirvam de auxílio aos gestores para a tomada de decisões mais eficientes e econômicas a longo prazo. No entanto, a falta de dados e a complexidade da implementação de modelos se dificultam a ampla aplicabilidade de modelos hidrodinâmicos.

O intuito deste trabalho é realizar uma modelagem do Lago Paranoá com o modelo MIKE 3 FM, a fim de estudar seu comportamento hidrodinâmico, como a variação do nível d'água, os efeitos de estratificação térmica e a influência das forçantes de vento. Optou-se por utilizar o modelo hidrodinâmico tridimensional MIKE 3 FM (*Flexible Mesh* – Malha

flexível), em função da sua capacidade de modelagem 3D, da disponibilidade de licença educacional, da facilidade de uso e a vasta aplicação verificada na literatura.

O MIKE 3 FM, desenvolvido pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI) é um modelo 3D que permite calcular as equações hidrodinâmicas através de uma malha flexível. A vantagem desse modelo sobre modelos 2D ou 1D e de malha fixa, é que, além de incorporar a tridimensionalidade, permitindo representar melhor a realidade, a malha flexível permite que seja aplicado a corpos hídricos de geometrias complexas, podendo ser refinada em apenas pontos de interesse, o que reduz o esforço computacional.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Entender o funcionamento do modelo hidrodinâmico MIKE 3 Flow Model FM e os aspectos relacionados à construção da malha numérica e tempo de processamento, como ferramenta para modelagem de hidrodinâmica e efeito de temperatura e vento no Lago Paranoá.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar o uso do modelo MIKE 3 FM para o Lago Paranoá, explorando aspectos como a geração de malhas, limitações do programa e o tempo de computação para diferentes malhas
- Realizar a modelagem hidrodinâmica tridimensional do Lago Paranoá usando o MIKE 3 Flow Model FM.
- Simular e calibrar os níveis de água do reservatório a partir do balanço hídrico.
- Simular e calibrar o perfil de temperatura da coluna d'água do Lago Paranoá.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nessa seção será tratada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do conhecimento requerido para a modelagem de lagos e reservatórios, como aspectos limnológicos, hidrodinâmica e métodos numéricos. A fundamentação buscou ser apoiada na bibliografia mais relevante, e a revisão bibliográfica respaldada nos trabalhos mais recentes em modelagem de lagos e reservatórios.

#### **3.1 ASPECTOS LIMNOLÓGICOS DE LAGOS E RESERVATÓRIOS**

Esteves (2011) define lagos como corpos d'água sem contato com o mar e que contenham baixas quantidades de íons e sal, se comparado às águas dos mares; exceto para lagos localizados em áreas áridas ou a locais que sofrem com grandes períodos de seca, onde a evaporação supera a precipitação, como é o caso por exemplo, do lago Urmia, o segundo maior lago hipersalino do mundo, localizado a noroeste do Irã (Ahmadi *et al.*, 2016).

##### **3.1.1 Gênese e características de lagos e Reservatórios**

São várias as classificações para corpos hídricos de água doce possíveis, como rios, riachos, lagos naturais, reservatórios, e etc. com cada um tendo características distintas e comportamentos diferentes. Essas características estão intimamente correlacionadas com as origens de sua formação. Para se entender essas características, deve-se remontar aos mecanismos responsáveis pela sua formação. Hutchinson (1957 *apud* Tundisi e Tundisi 2008) classifica a gênese dos lagos em 11 categorias: por movimentos diferenciais na crosta terrestre, por fenômenos vulcânicos, por movimentos do terreno, por períodos glaciares, por processos erosivos, por atividade de animais, por impacto por meteoritos, por atividade dos rios, pela atividade dos ventos, por acumulação orgânica e por fenômenos costeiros.

Tundisi e Tundisi (2008) ainda ressaltam a necessidade de classificar lagos não só pelo caráter geomorfológico, mas também por sua periodicidade, ou seja, sua perenidade ou intermitência.

Chapra (2008) classifica três características fundamentais para o estudo de lagos, que são quanto às suas origens, formato e tamanho. Essas três características afetam o

comportamento hidrodinâmico, qualidade da água e nível trófico do ecossistema aquático e são correlacionadas entre si.

Lagos artificiais, também chamado de reservatórios, são formados quando o curso principal de um rio é barrado para fim(ns) específico(s), cessando sua seção transversal e causando um efeito de remanso à montante da barragem, inundando as planícies de inundação. Lagos naturais também podem ser formados por barramento natural, como desabamento de encostas etc. mas estes não lançam normalmente vazões a jusante (Esteves, 2011, Dodds, 2002). Diversos são os motivos para se criar um lago artificial, os principais são:

- Amortecimento de cheias e regularização de vazões
- Armazenamento
- Potencial elétrico
- Manancial
- Cultivo de peixes
- Bombeamento
- Irrigação
- Navegação
- Recreação

Lagos artificiais, apesar de compartilharem dos processos ecológicos básicos de lagos naturais, possuem aspectos limnológicos distintos (Straškraba, 2005), devido aos múltiplos usos aos quais são designados. Esses usos provocam alterações nas condições hidrodinâmicas, hidrológicas e de qualidade da água do reservatório. Os usos típicos podem ser vistos na Tabela 3.1

Um dos parâmetros de avaliação e classificação hidrodinâmica e de qualidade de água, que representa as características de lagos e reservatórios é o tempo de detenção hidráulica, determinado pelas relações:

$$t_{dh} = \frac{V}{Q} \quad (3.1)$$

$$V(H) = \int_0^H A(z) dz \quad (3.2)$$

Onde na Equação (3.1),  $V$  é o volume do corpo d'água,  $Q$  é a vazão de saída e o volume é determinado pela Equação (3.2), sendo  $A(z)$  a área do espelho d'água, que é função da profundidade e  $z$  é a profundidade em determinado ponto do lago (Chapra, 2008).

Tabela 3.1 – Principais usos e características de reservatórios (Fonte: Straškraba, 2005)

Uso primário	Tamanho	Profundidade	Tempo de detenção	Descarga	Nível d'água
<b>Amortecimento de cheias e regularização de vazões</b>	Pequeno a médio	Raso	Regionalmente dependente	Superfície	Altamente variável
<b>Armazenamento</b>	Pequeno a médio	Variado	Extremamente variável	Normalmente abaixo da superfície	Dependente do uso
<b>Hidroeletricidade</b>	Pequeno	Profundo	Variável	Próximo ao fundo	Operação de pico
<b>Manancial</b>	Pequeno	Preferivelmente Fundo	Curto	Do meio pro fundo	Variabilidade Natural
<b>Cultivo de peixes</b>	Pequeno	Raso	Curto	Superfície	Natural ou operacional
<b>Bombeamento</b>	Pequeno a médio	Profundo	Extremamente variável	Próximo ao fundo	Extremamente variável
<b>Irrigação</b>	Pequeno	Raso	Longo	Superfície	Altamente Variável
<b>Navegação</b>	Grande	Profundo	Curto	Em toda a profundidade	Variabilidade muito baixa
<b>Recreação</b>	Pequeno	Raso	Longo	Superfície	Baixa variabilidade

O tempo de detenção hidráulica é definido como o tempo necessário para que toda a água de um lago seja substituída, considerando que os fluxos estejam substituindo o volume uniformemente. Seu valor também indica como um reservatório responde a um aporte de nutrientes. Para  $t_{dh}$  baixo não haverá tempo suficiente para o desenvolvimento das algas, resultando em menos biomassa, enquanto que,  $t_{dh}$  alto resulta numa reciclagem e maior retenção de nutrientes, propiciando um maior nível de biomassa no corpo d'água (Ji, 2008).

O formato dos reservatórios normalmente conserva o formato do curso d'água ao qual se foi originado, com uma larga área de espelho d'água próximo da barragem e se alongando pelos tributários, tendo, portanto, um formato dendrítico (Chapra, 2008; Dodds, 2002). Devido a essa característica, reservatórios tendem a terem uma morfometria altamente variável, com as zonas mais afastadas do barramento preservando formatos preponderantemente longitudinais e perfis batimétricos típico de rios (baixas profundidades

d'água), com sua profundidade e geometria aumentando conforme se aumenta o nível da água (Straškraba, 2005; Ji, 2008).

Esse formato dendrítico surge do próprio barramento de rios, cuja ação provoca remanso a montante. Devido a essa característica, reservatórios apresentam gradientes de qualidade da água e gradientes hidrodinâmicos significativos longitudinalmente. (Ji, 2008; Tundisi e Tundisi, 2008). Por causa desse gradiente longitudinal pronunciado, reservatórios normalmente são caracterizados em três zonas características: Zona fluvial, transicional e lacustre, onde cada uma é dotada de características químicas, biológicas e físicas únicas (Wetzel, 2001) (Figura 3.1).

A zona fluvial ocorre na região onde os tributários começam a se mesclar com os reservatórios, portanto apresentam uma calha de escoamento mais rasa e área transversal menor, levando a escoamentos turbulentos de altas velocidades (Ji, 2008; Wetzel, 2001). Essa alta velocidade permite o carreamento dos sedimentos mais finos, nutrientes, matéria orgânica e quaisquer outros materiais bioquímicos. Nessa zona há baixa atividade biológica devido às altas velocidades (Straškraba, 2005) e a luz atinge toda a profundidade d'água caso o tributário não apresente níveis elevados de materiais suspensos, que aumentam a turbidez.

A zona transicional, é onde as águas da zona fluvial começam a perder velocidade em decorrência ao aumento da área transversal. Essa perda de velocidade faz com que as partículas suspensas se sedimentem, reduzindo a turbidez da água e levando a um aumento da penetração da luz. Nessa região, as forças de empuxo que ocorrem devido a diferença de densidade entre as vazões de afluxo e das águas estacionárias do lago, se tornam significantes (Ji, 2008).

Por fim, a zona lacustre, localizada imediatamente a montante do reservatório, possui maior profundidade, área superficial e menores velocidades. A essas velocidades, a concentração de partículas suspensas é geralmente baixa e a penetração da luz é suficiente para permitir o crescimento de algas (Ji, 2008).

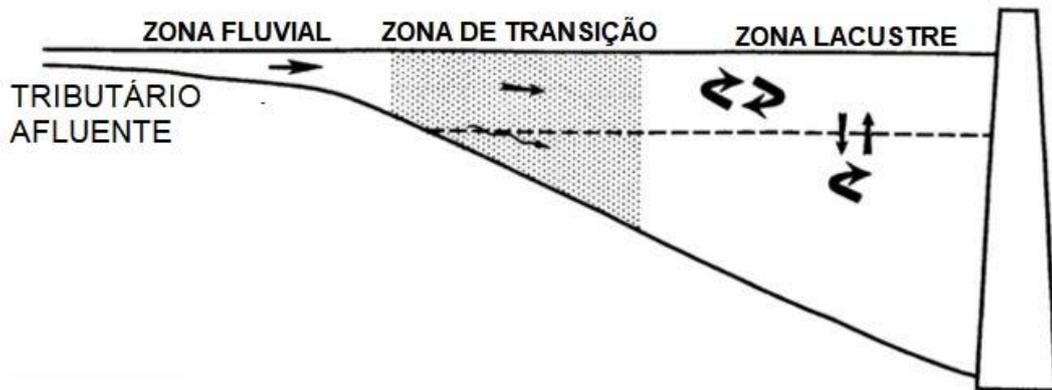


Figura 3.1 – Zonas específicas típicas de um reservatório devido aos gradientes horizontais (Adaptada: Wetzel, 2001)

Os sistemas lacustres, devido as suas dimensões, suas propriedades hidrodinâmicas, químico-biológicas e de qualidade da água variam transversalmente e verticalmente, formando zonas específicas na sua seção transversal, como ilustrado na Figura 3.2:

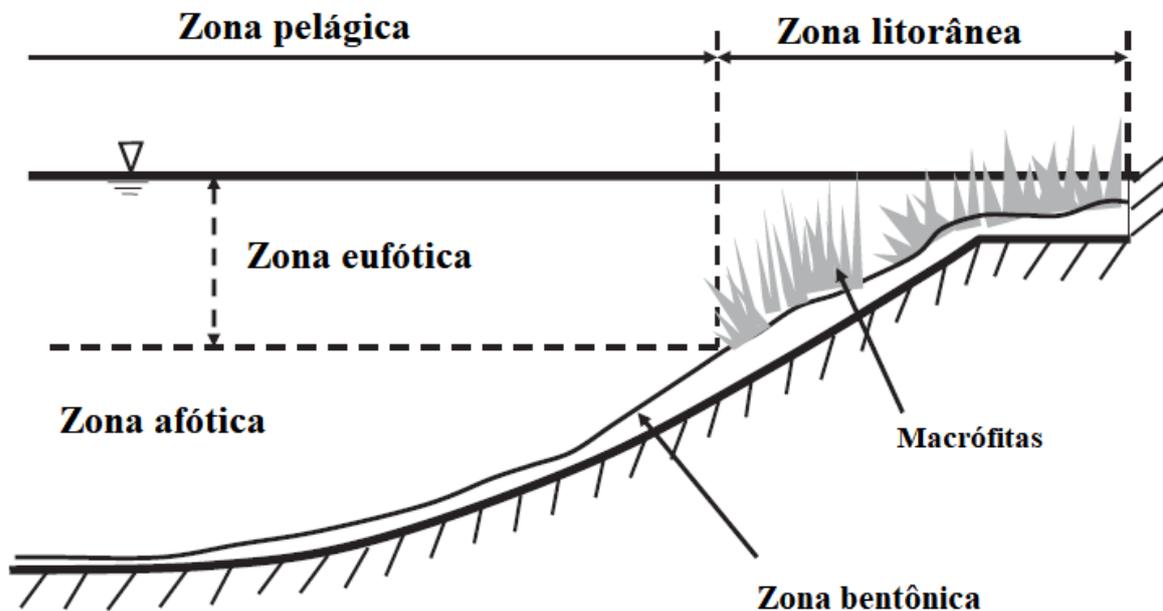


Figura 3.2 – Zonas biológicas típicas de lagos e reservatórios (Adaptada: Ji, 2008)

Na zona litorânea ocorre a penetração da luz solar em toda a extensão da coluna d'água, devido à baixa profundidade, fornecendo condições propícias para o crescimento de macrófitas aquáticas (Ji, 2008; Tundisi e Tundisi, 2008). Essas macrófitas conseguem reter particulados e dão resistência a fenômenos erosivos ocorrentes nas margens. Nesta zona há

também muita influência dos ventos, devido a sua menor profundidade e homogeneidade (Ji, 2008).

A zona central do lago, também chamada de zona pelágica, é onde há a maior extensão da área superficial do espelho d'água e onde há maior profundidade de água, e, portanto, devido ao coeficiente de absorção, ao espalhamento decorrente do material suspenso e a sua profundidade, a luz solar não é capaz de atingir a totalidade da profundidade d'água, criando duas zonas distintas: uma iluminada e outra não iluminada, zona eufótica e afótica, respectivamente (Tundisi e Tundisi, 2008). A região eufótica da zona pelágica é onde se localiza os principais organismos autotróficos dependentes da luz solar para seus processos metabólicos de síntese de matéria orgânica, como os fitoplânctons. O fitoplâncton é um conjunto de micro-organismos aquáticos que abrangem um diverso grupo taxonômico que possuem as características mais distintas (Wetzel, 2001).

A zona bentônica é uma fina camada de fundo, onde os materiais em suspensão carregados pelo fluxo de água como matéria orgânica, nutrientes e organismos, são sedimentados devido ao baixo gradiente de velocidades. A espessura dessa camada é tipicamente de alguns centímetros e contém uma ampla variedade de organismos, compostos majoritariamente por invertebrados. Essa variedade é altamente influenciada pelo nível de oxigênio presente nessa camada (Ji, 2008).

### **3.1.2 Temperatura**

A temperatura é um parâmetro muito importante não só para a hidrodinâmica, quanto para o estudo das características químicas e biológicas de lagos e reservatórios. A temperatura mede o grau de agitação das moléculas e conseqüentemente afeta a densidade do corpo d'água, a quantidade de oxigênio dissolvido n'água, a taxa metabólica de organismos presentes e etc. (Ji, 2008). A temperaturas elevadas, o fluido se expande em resposta à agitação das moléculas, tornando a massa d'água menos densa. Em contrapartida, a água se torna mais densa para temperaturas mais baixas até por volta de 4 °C, onde a partir daí começa a se expandir, devido a seu comportamento anômalo (Dodson, 2005).

### 3.1.3 Estratificação Térmica

As águas superficiais da zona eufótica, pelo efeito da radiação solar, são aquecidas e se expandem, o que resulta na diminuição de densidade. Como a penetração da luz na água é limitada, águas de maior profundidade são mais frias e conseqüentemente mais densas. Como fluidos de diferentes densidades não se misturam, esse gradiente de densidade acaba dividindo a coluna d'água em várias camadas. Esse fenômeno é de suma importância para a hidrodinâmica e qualidade da água devido aos movimentos de massa que proporciona.

A zona eufótica, por ser a região de maior absorção de luz solar, apresenta temperaturas maiores, com águas de menores densidades, que, pelo empuxo da água, ocupa as regiões mais superficiais. Como a taxa de variação da densidade é maior para maiores temperaturas (a diferença de densidade entre 20 e 21 °C é a mesma para 5 a 10 °C), nos períodos mais quentes, como verão e primavera, as águas superficiais ficam mais quentes, logo menos densas; conseqüentemente, o gradiente de densidade na profundidade do lago se torna significativo, deixando o corpo d'água mais estratificado (Ji, 2008; Esteves, 2011). Essa estratificação limita a condição de mistura que é restrita às zonas de mesma densidade.

Essa zona superior de temperaturas elevadas e menor densidade é chamada de epilímio. À medida que vai se descendo na profundidade do lago e se aproximando da zona afótica, a redução da radiação solar recebida causa uma queda abrupta na temperatura, até um ponto na profundidade onde a temperatura se mantém relativamente uniforme até o fundo do corpo d'água. Essa zona de fundo é chamada de Hipolímio e a zona de transição, Termoclina (Dodds 2002, Wetzel, 2005). Uma representação esquemática desse fenômeno pode ser vista na Figura 3.3.

Quando começa o período mais frio, no inverno, a temperaturas na superfície da água começa a diminuir, atenuando o gradiente de temperatura entre as camadas, conseqüentemente, reduzindo o gradiente de densidade. A temperatura, então, fica mais homogênea ao longo da profundidade da água, e, portanto, fenômenos de mistura são mais propícios de ocorrerem. Esse evento é chamado isotérmico.

Dodson (2005) lista alguns fatores que influenciam o fenômeno da estratificação térmica:

- **Período do ano:** Como descrito, a estratificação térmica é altamente dependente de eventos sazonais, tendo ciclos de estratificação e períodos isotérmicos;

- **Profundidade do lago:** Lagos rasos são menos suscetíveis à estratificação e são mais facilmente misturados pelas ações do vento. Lagos rasos permanecem mais tempo em períodos isotérmicos do que lagos profundos;

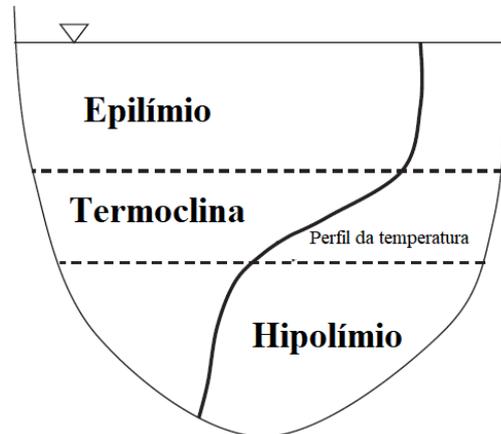


Figura 3.3 – Representação das camadas de estratificação vertical em um lago (Adaptado: Ji, 2008).

- **Topografia:** Características topográficas adjacentes alteram a distribuição de vento incidente às águas do lado, alterando as condições de estratificação;
- **Solutos:** Sais nas águas de lagos tornam a água mais densa; podendo eventualmente contribuir na resistência da mistura.

Dodds (2002), Dodson (2005) e Wetzel (2001) ressaltam que, além da estratificação decorrente da temperatura, lagos podem sofrer estratificações por níveis de salinidade, já que a densidade da água também é dependente das quantidades de sais e sedimentos. Nessas situações, se a diferença de densidade causada pela salinidade é maior que a diferença de densidade proporcionada pela temperatura, a água salina pode se depositar abaixo das camadas mais frias (Dodds, 2002).

### 3.1.3.1 Efeitos da Estratificação na Hidrodinâmica de Lagos

Lagos localizados em latitudes médias apresentam uma estruturação térmica cíclica, onde que, em períodos mais quentes, se estratifica, e em períodos mais frios as temperaturas superficiais se abaixam, podendo deixar o lago homogêneo. No entanto, devido ao comportamento anômalo da água e por condições de turbulência, eventualmente a água da superfície fica mais densa que as águas de fundo, causando uma suspensão das águas

profundas (Omstedt e Murthy, 1994; Chapra, 2008). Esse evento provoca um soerguimento da matéria sedimentada na zona bentônica.

Quando há a estratificação, a termoclina atua como uma “barreira”, que limita o transporte de energia cinética entre o epilímio e o hipolímio, em virtude do alto gradiente de densidade, dificultando a mistura. (Welch *et al.*, 2004; Wetzel, 2001). Sua extensão resulta do balanço entre a força de mistura, proporcionado pelos ventos, na direção vertical e a resistência a essa mistura decorrente do empuxo da água menos densa (Welch *et al.*, 2004).

Segundo Wetzel (2001) esse balanço de forças é denominado de estabilidade e pode ser mensurado pela quantidade de trabalho ou energia mecânica necessária para misturar todo o volume d’água sem transferência de calor. Wetzel (2001) também chega à conclusão de que, durante as estratificações no verão, a estabilidade quantifica a resistência que a estratificação fornece às forças dos ventos.

Em períodos de estratificação, as águas do epilímio são menos densas e mais quentes, o que faz com que as forças dos ventos que atuam sobre a sua superfície da água provoque circulações de mistura turbulenta, tornando essa faixa próxima da homogeneidade. Esse efeito limita os transportes verticais de energia cinética entre as camadas. O comprimento dessas circulações é dependente de vários fatores como: a área superficial, profundidade, localização topográfica, presença de ventos e assim por diante. (Lindell, 2004).

Omstedt e Murthy (1994) conduziram no lago Ontário, na América do Norte, um estudo sobre as correntes e as características das misturas verticais durante o período de estratificação no verão. Foi estudado as condições de estabilidade do lago, a estrutura térmica e a mistura vertical das camadas estratificadas. As análises foram feitas durante o período de junho a setembro de 1991 e eles perceberam que durante alguns períodos, a estrutura vertical do lago manteve as três faixas bem distintas (epilímio, termoclina e hipolímio), e com outros períodos em que a temperatura da termoclina se igualou a do epilímio, indicando uma camada bem misturada. Eles quantificaram o nível de mistura através do número de Richardson, um parâmetro adimensional, e perceberam que, durante vários períodos, toda a extensão do hipolímio se manteve turbulenta, apesar do baixo gradiente de temperatura; esse fenômeno foi decorrente das tensões de cisalhamento das camadas superiores que superaram o grau de estabilidade do lago.

### 3.1.3.2 Efeitos da Estratificação na Qualidade da Água de Reservatórios

Para reservatórios de múltiplos usos (Tabela 3.1), assim como a quantidade de água disponível, a qualidade da água se torna um parâmetro essencial para a gestão de corpos hídricos, não só para a questão de abastecimento humano, como também para a garantia de ambientes saudáveis para a fauna aquática, e manutenção das estruturas hidráulicas do barramento (Straškraba *et al.*, 1993). Reservatórios tendem a receber mais poluição que lagos naturais devido às suas maiores áreas de drenagem e por geralmente serem construídas ao redor de centros urbanos (Straškraba, 2005).

Nos lagos estratificados, o aporte excessivo de matéria orgânica e contaminantes em geral tende a permanecer na faixa do epilímio, já que a termoclina é um impeditivo para a mistura vertical do lago. No caso, o excesso de nutrientes dará o suporte para o desenvolvimento de micro-organismos que, restrito ao epilímio, suscetirá em um proliferação de biomassa no epilímio, diminuindo a capacidade luminosa da faixa d'água. O crescimento desproporcional de fitoplâncton causará um desequilíbrio no consumo de nutrientes, provocando mortes dos micro-organismos que, pela decomposição, levará ao consumo do oxigênio dissolvido e liberação de cianotoxinas pelas cianobactérias prejudicando a qualidade do lago (Ji, 2008).

No inverno, quando as águas do hipolímio são soerguidas, a matéria orgânica e os nutrientes sedimentados na camada bentônica são transportados à zona eufótica pelo processo de circulação da massa d'água. Isso acarreta num aumento de biomassa devido ao soerguimento de nutrientes, que é propício para o crescimento dos organismos. No entanto, nesse período, as condições de luminosidade podem ser limitantes à floração (Esteves, 2011). A falta de oxigênio dissolvido na camada de sedimentos faz com que os processos metabólicos desenvolvidos pela comunidade bentônica se deem por condições de anaerobiose, conseqüentemente elevando os níveis de amônia e de sulfeto de hidrogênio às águas superficiais quando forem soerguidas. Essa ressuspensão também pode trazer do fundo nutrientes propícios para a floração de algas, fitoplâncton e macrófitas, como o fósforo e nitrogênio (Winton *et al.*, 2019). Por fim, Winton *et al.*, (2019), concluem que reservatórios termicamente estratificados localizados a baixas latitudes correm risco de sofrerem eutrofização, devido a remobilização de fósforo interna.

## 3.2 PROCESSOS HIDRODINÂMICOS EM LAGOS E RESERVATÓRIOS

Para que se possa haver uma compreensão completa dos corpos hídricos é preciso entender como ocorrem os processos hidrodinâmicos nos corpos hídricos, que são regidos pelas leis universais de conservação, que dizem que nenhuma propriedade intrínseca do sistema pode ser ganhada ou perdida, apenas conservada (Martin e McCutcheon, 1999). Deve-se compreender também a importância das forçantes externas no comportamento hidrodinâmico, pois essas são capazes de provocar transporte de massa, energia e de momento. Será descrito os efeitos das forçantes dos ventos, assim como os efeitos proporcionado pelas vazões de afluxo a um lago ou reservatório.

### 3.2.1 Conservação de Massa

O princípio de conservação de massa diz que a massa não pode ser criada nem destruída, mas sim transportada ou transformada (Martin e McCutcheon, 1999). Aplicando esse conceito a um volume de controle arbitrário, pode-se esquematizar (Figura 3.4):



Figura 3.4 – Representação Ilustrativa do princípio de conservação de massa.

Aplicando esse conceito em termos matemáticos sobre um volume de controle infinitesimal de dimensões  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  (Figura 3.5), de tal maneira que o fluxo através de cada face é aproximadamente unidimensional (White, 2011) e adotando uma direção de escoamento da esquerda para a direita, o fluxo mássico que entra pela superfície  $dz dy$  é  $\rho u dydz$ , onde  $u$  é a componente da velocidade na direção  $x$ , e o que sai é o que entrou mais uma taxa de variação durante a extensão do elemento infinitesimal ( $[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx] dydz$ ).

Pode-se chegar então a uma equação geral que dita o princípio de conservação de massa em um fluxo unidirecional:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

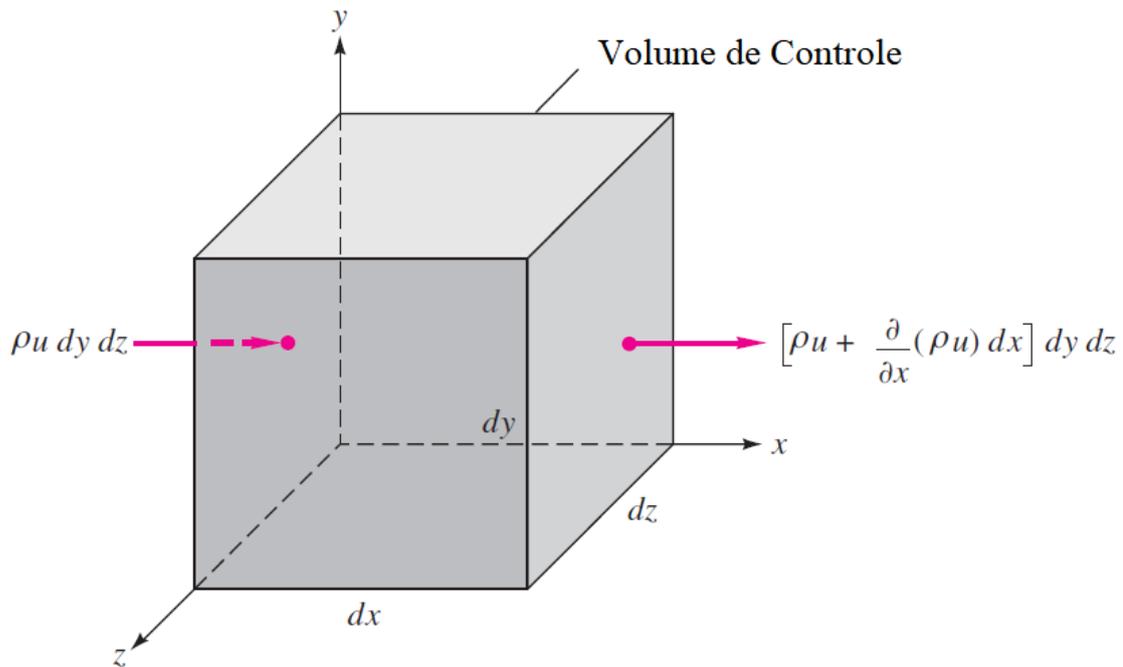


Figura 3.5 – Volume de controle infinitesimal. (Adaptada: White, 2011)

Onde o primeiro termo da representa a taxa de variação interna de massa em um volume de controle infinitesimal e o segundo, o balanço líquido de massa que escoo pelas superfícies desse volume de controle. A Equação (3.3) pode ser escrita na forma diferencial sob a hipótese de que o fluido é um meio contínuo, conseqüentemente, suas propriedades físicas (como densidade, e velocidades) podem ser descritas como funções escalares dependentes do tempo e posição, ou como campos vetoriais em algum espaço  $\mathbb{R}^3$  (Wesseling, 2001; White, 2011).

Como o fluxo ocorre nas seis direções, pode-se estender a Equação (3.3) para as direções z e y. (Eq. (3.4))

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

A Equação (3.4), também conhecida como equação da continuidade, está expressa em coordenadas cartesianas.

Pode-se representar Equação (3.4) em forma vetorial, que por sua vez, pode ser aplicado a qualquer sistema de coordenadas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.5)$$

Onde  $\vec{\nabla}$  é o operador gradiente  $\left(\frac{\partial}{\partial x}\hat{\mathbf{i}} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{\mathbf{j}} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{\mathbf{k}}\right)$  e  $\vec{V}$  é o campo vetorial de velocidades.

A Equação (3.5) leva em conta a possibilidade de deformação do elemento infinitesimal com conservação da sua massa, portanto, para qualquer análise diferencial do escoamento, a Equação (3.5) deve ser resolvida simultaneamente (Brunetti, 2008).

Para fluidos incompressíveis, isto é, fluidos onde a densidade não é função do tempo ou espaço, o primeiro termo da Equação (3.5) é nulo e a densidade, por ser constante, sai da derivada no segundo termo e a Equação (3.5) pode ser reduzida à forma incompressível:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.6)$$

### 3.2.2 Conservação de Momento

O princípio de conservação de momento dita que a somatória da taxa de variação de momento em um corpo é igual à somatória das forças que agem sobre esse corpo. (Wesseling, 2001)

As equações de conservação do momento podem ser derivadas a partir da segunda lei de Newton sobre um volume de controle infinitesimal e analisando as forças que agem sobre esse mesmo elemento. Basicamente há 3 tipos de forças internas que agem sobre o fluido: a força peso, a pressão e forças cisalhantes devido ao gradiente de velocidades do fluido em movimento.

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \\ dF &= \rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} dx dy dz \\ dF &= \rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (3.7)$$

As forças que atuam sobre um elemento podem ser vistas pela Figura 3.6, onde  $\sigma_{ii}$  são as tensões normais e  $\sigma_{ij}$ ,  $i \neq j$  as de cisalhamento.

O gradiente das tensões atuantes pode ser encontrado facilmente da mesma maneira como foi encontrada para a equação da continuidade, através de um balanço líquido das tensões sobre o corpo.

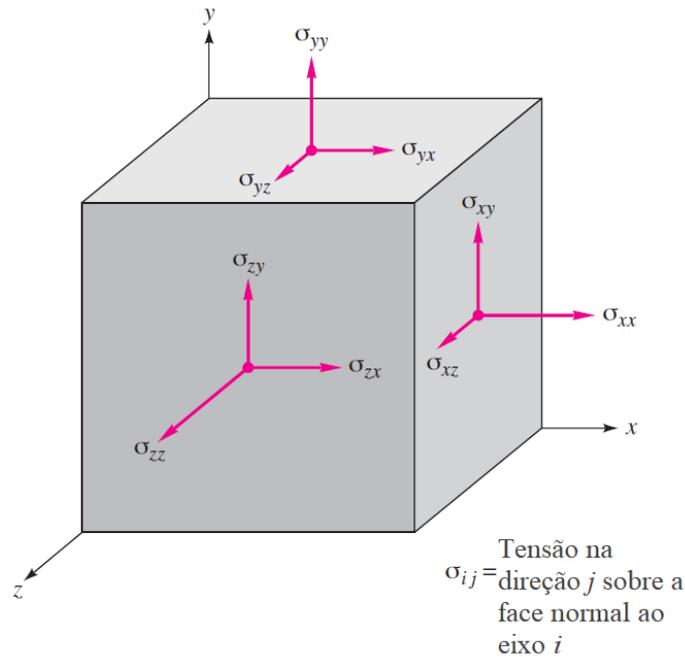


Figura 3.6 – Forças que agem sobre um VC infinitesimal (Adaptada: White, 2011)

Pode-se então substituir o lado esquerdo da Equação (3.7) pela força peso e as forças hidrostáticas e de cisalhamento e dividir os dois lados pelo volume infinitesimal ( $dx dy dz$ ) para chegar à Equação(3.8) (Çengel e Cimbala, 2012):

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (3.8)$$

A Equação(3.8) mostra que a aceleração do fluido (lado esquerdo da Equação 3.9) é proporcionada pela força gravitacional e pelos gradientes de tensão em sua superfície

### 3.2.3 Conservação de Energia

A equação da conservação da energia é derivada a partir da primeira lei da termodinâmica que diz que a energia não pode ser criada nem destruída, somente se transformar de uma forma a outra, logo, a soma de todas as formas de energia em um sistema fechado permanece constante (Moukalled, 2015). A sua dedução matemática descrita por Moukalled (2015) é feita aplicando um balanço energético em um volume material, incorporando as energias internas e cinéticas à energia total. Sua derivação é a partir do

teorema de Reynolds e do divergente, e é expressa da seguinte maneira na forma diferencial vetorial:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla \cdot [\rho \mathbf{v} e] = -\nabla \cdot \dot{q}_s - \nabla \cdot [p \mathbf{v}] + \nabla \cdot [\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}] + \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} + \dot{q}_V \quad (3.10)$$

Onde:

$\rho$ : densidade do volume material;

$e$ : energia total por unidade de massa;

$\mathbf{v}$ : vetor velocidade;

$\dot{q}_s$ : taxa de transferência de calor por unidade de área;

$p$ : pressão sobre o volume material;

$\boldsymbol{\tau}$ : tensor das forças de cisalhamento;

$\mathbf{f}_b$ : forças atuantes no volume material (body forces)

$\dot{q}_V$ : taxa da fonte ou sumidouro de calor dentro do volume material por unidade de volume

### 3.2.4 Equação de Navier-Stokes

O tensor  $\sigma_{ij}$  na Equação (3.8) representa as forças que atuam na superfície do elemento infinitesimal, as forças de pressão e de cisalhamento. Portanto, para um fluido em movimento, as pressões agem normal à superfície do volume de controle em sentido contrário aos eixos cartesianos e as forças cisalhantes surgem devido ao gradiente de velocidades ao qual esse elemento está submetido (Kundu e Cohen, 2002).

Como que para cada face desse elemento há três tensões (uma normal e duas cisalhantes) (Figura 3.6), o tensor  $\sigma_{ij}$  possui 9 componentes; esse tensor pode ser então representado da seguinte maneira em coordenadas cartesianas (Çengel e Cimbala, 2012; Kundu e Cohen, 2002):

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} -P + \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & -P + \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & -P + \tau_{zz} \end{vmatrix} \quad i, j = x, y, z \quad (3.11)$$

Sendo que  $P$  são as componentes de pressão sobre o elemento infinitesimal e  $\tau_{ij}$  são as tensões de cisalhamento aplicada às faces do elemento.

Para fluidos newtonianos, cuja deformação é linearmente proporcional à tensão de cisalhamento, e considerando escoamento aproximadamente isotérmico, portanto viscosidades dinâmicas e cinemáticas constantes, as tensões de cisalhamento podem ser descritas em função do campo de velocidade. Isso permite a redução de variáveis desconhecidas da Equação (3.8) (Çengel e Cimbala, 2012; White, 2011).

Kundu e Cohen (2002) demonstram que, para fluidos incompressíveis, a partir da conservação de massa e conseqüentemente, taxa de deformação volumétrica nula ( $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ ), as tensões de cisalhamento podem ser escritas como:

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (3.12)$$

Sendo  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido, que possui dependência com a temperatura e  $\varepsilon_{ij}$  o tensor da taxa de deformação do fluido provocado pelo gradiente de velocidade, é mostrado na Equação (3.13) que:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.13)$$

Onde  $u_{i,j}$  é a componente da velocidade na direção  $i$  ou  $j$  e  $x_{i,j}$  são os eixos ortogonais  $i$  e  $j$ .

Aplicando a Equação (3.13) ao tensor  $\sigma_{ij}$  (Eq.(3.11)), pode-se chegar às tensões de cisalhamento em cada face do fluido em coordenadas cartesianas:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \tau_{zx} = \tau_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Substituindo as Equações (3.11) e (3.14) na Equação (3.8) e fazendo as devidas manipulações algébricas, pode-se chegar a equação de Navier-Stokes na direção  $x$  para fluidos incompressíveis:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.15)$$

Por similaridade, pode-se desenvolver de maneira análoga a equação de Navier-Stokes nas direções  $y$  e  $z$  e combiná-las para se chegar à forma vetorial, que é válida para qualquer sistema de coordenadas:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla}P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F}_E \quad (3.16)$$

Onde  $\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V}$  é a derivada material do campo de velocidade,  $-\vec{\nabla}P$  é o gradiente de pressões,  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  é o operador laplaciano,  $\mu \nabla^2 \vec{V}$  são as forças viscosas e  $\vec{F}_E$  são quaisquer forças externas atuando no elemento.

É nítido perceber que a Equação (3.16) representa a segunda lei de Newton aplicada a um fluido em movimento, sendo a aceleração local e advectiva (lado esquerdo) causada pelas forças atuando sobre o fluido (lado direito).

Ji (2008) amplia a Equação (3.16) levando em consideração forças externas como a força de Coriolis, proporcionada pela rotação da Terra e outras forças que possam ser relevantes, como a ação do vento:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla}P + \mu \nabla^2 \vec{V} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{F}_{fr} \quad (3.17)$$

Onde:

$\vec{\Omega}$ : Coeficiente de velocidade angular da Terra;

$\vec{F}_{fr}$ : Termo que representa outras forças externas atuantes, como as ações dos ventos.

Ji (2008) ainda afirma que o termo de forças viscosas pode ser modificado para incluir a mistura turbulenta no escoamento; também afirma que o termo da força de Coriolis só é significativo para grandes corpos d'água.

As Equações (3.5), (3.16) e (3.17) são capazes de descrever o comportamento de qualquer fluido newtoniano incompressível e por isso são os pilares para o estudo da mecânica dos fluidos (Çengel e Cimbala, 2012). No entanto, devido a não-linearidade de segunda ordem e a transiência de seus termos, soluções analíticas só são possíveis para campos de escoamentos e geometrias simples. (Çengel e Cimbala, 2012; White, 2011; Ji, 2008).

### 3.2.5 Forçantes Externas

Além dos mecanismos hidrodinâmicos internos discutidos nas seções 3.2.1 a 3.2.4, o comportamento de lagos e reservatórios é regido por forças externas que atuam sobre a massa d'água. Essas forçantes são quaisquer forças que induzam correntes pela conservação de momento (Martin e McCutcheon, 1999). Segundo Martin e McCutcheon (1999), forçantes relevantes para o estudo de lagos e reservatórios são forças que provocam uma alteração na hidrodinâmica e qualidade da água. Algumas dessas forças que são relevantes para o estudo hidrodinâmico de lagos e reservatórios são as forçantes de vento e pelas vazões afluentes e efluentes do corpo d'água (Ji, 2008).

#### 3.2.5.1 Processos hidrodinâmicos causado pelas ações dos ventos

De acordo com Ji (2008), para o estudo hidrodinâmico de lagos e reservatórios, é imprescindível que haja uma compreensão plena do papel sinérgico das forças do vento nos processos de mistura, e circulação das correntes. As correntes de vento provocam movimento às camadas mais superficiais da água através da tensão cisalhante exercida pela interface ar-água; esse deslocamento, e conseqüentemente a velocidade, se torna mais acentuado na superfície d'água e vai diminuindo gradativamente ao longo da sua profundidade, devido às forças viscosas entre as camadas estratificadas, criando um perfil de velocidades ao longo da coluna d'água.

Essa tensão cisalhante dos ventos transfere momento e energia do campo das forçantes dos ventos à água e às camadas mais profundas através da difusão turbulenta (Imboden, 2004), onde o fornecimento da energia proporcionada pelas correntes de vento é convertido em energia térmica devido ao aumento da movimentação das partículas da água pela turbulência, até a dissipação da energia pelo gradiente térmico. Essa transferência de momento e energia é influenciada pela estratificação do lago, onde que as circulações de água são majoritariamente confinadas na camada epilímio do lago e a termoclina atue como uma barreira na transferência de momento verticalmente. Durante esse período, o principal movimento das águas se dá na direção longitudinal, seguindo os contornos de igual densidade. As duas principais forças motrizes desse movimento são as correntes de vento e o gradiente de densidade na direção horizontal (McGinnis e Wuest, 2005).

Em lagos rasos, ou lagos desestratificados, a transferência de momento e energia se estende por toda a profundidade do corpo d'água com mais facilidade (Ji, 2008).

Segundo Imboden (2004), maior parte do momento conferido pelos ventos é transferido às ondas na superfície da água. Essas ondas são manifestações da turbulência provocada pelo contato da interface ar-água ou de camadas com densidades diferentes devido ao influxo de vazões afluentes e efluentes de lagos e reservatórios (Martin e McCutcheon, 1999). Imboden (2004) ainda discorre que a formação de ondas altera a rugosidade da superfície da água, que por sua vez, provoca tensão de cisalhamento à água assim como ao ar. Essa formação das ondas não segue um padrão linear com as velocidades de vento, portanto a formação e a dissipação das ondas não estão em equilíbrio com o campo de velocidade dos ventos (Janssen, 1989 *apud* Imboden, 2004).

A parte restante da energia transferida é responsável pelo movimento em larga escala do corpo d'água, já que o momento e energia dos ventos provoca movimento, ao longo de sua direção, à superfície d'água, inclinando-a, resultando em um gradiente longitudinal da profundidade da coluna d'água, elevando o nível da água. Se o vento estiver forçando a lâmina d'água por tempo considerável, a tensão de cisalhamento provocado pelos ventos estabelece uma condição de equilíbrio com a pressão hidrostática da água na coluna considerada (Figura 3.7) (Imboden, 2004).

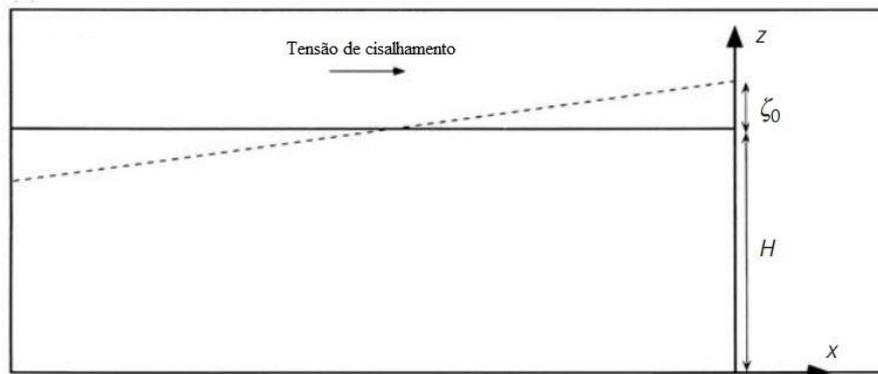


Figura 3.7 – Perfil do comportamento da lâmina d'água devido à ação do vento para um corpo hídrico homogêneo. Situação barotrópica, onde a coluna d'água apresenta densidade uniforme (Adaptada: Imboden, 2004)

Imboden (2004) estabelece as equações que definem a condição de equilíbrio da tensão cisalhante com a pressão hidrostática da coluna d'água com a superfície inclinada (Eq. (3.18)e (3.19))

$$-H \frac{\partial p}{\partial x} + \tau_w = 0 \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g\rho \frac{\partial \zeta_0}{\partial x} \quad (3.19)$$

Onde,  $H$  é a profundidade total da coluna d'água,  $\frac{\partial p}{\partial x}$  é o gradiente de pressão longitudinal devido a declividade da superfície d'água,  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento do vento,  $g$  é a força gravitacional,  $\rho$  é a densidade da água e  $\zeta_0$  é o deslocamento do nível d'água em relação a superfície de equilíbrio.

Quando o lago está estratificado, a dinâmica sofre alterações, com a superfície inclinando na direção do vento, provocando uma inclinação inversa na termoclina (Figura 3.8), resultado do efeito da estabilidade do lago (Welch, *et al.*, 2004; Wetzel, 2001). Pela Figura 3.8, a água do epilímio se move mais rápido na direção do vento, em contraste com a do hipolímio, devido a circulação de movimento contrário provocado pela resistência do leito do lago, da vegetação aquática entre outras forças de fricção (Ji, 2008)

Segundo Martin e McCutcheon (1999), a turbulência provocada pelo cisalhamento no interior da coluna d'água que ocorre na interface de camadas com densidades diferentes, causa ondas internas, que provocam uma mistura muito mais efetiva que as ondas superficiais, difundindo mais turbulência.

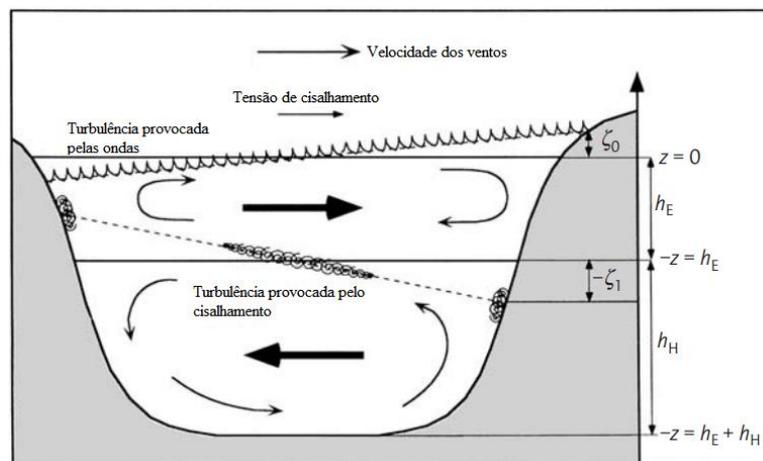


Figura 3.8 – Perfil de inclinação da superfície d'água quando o lago está estratificado. (Adaptada: Imboden, 2004)

### 3.2.5.2 Processos hidrodinâmicos causados por vazões de afluxo

Um fator importante para o estudo da hidrodinâmica de lagos e reservatórios é a consideração da vazão de afluxo ao corpo d'água. Rios tributários a lagos, devido às suas características geomorfológicas, possuem velocidades muito superiores aos lagos e reservatórios devido ao seu caráter lântico. Quando a massa d'água dos tributários atinge o corpo d'água lântico, provoca um deslocamento longitudinal da água do lago estagnada até o ponto onde o momento é dissipado pelas forças de atrito do leito do rio e pelo gradiente de pressões entre as interfaces das massas de água (Ford e Johnson, 1986; Cassidy 1989, *apud* Martin e McCutcheon, 1999).

As diferenças de velocidades provocam tensões de cisalhamento, e, caso esse gradiente de velocidades seja muito elevado, haverá turbulência, provocando mistura e difusão do momento (Martin e McCutcheon, 1999; Ji, 2008; Guyon *et al.*, 2001).

As temperaturas dos tributários desempenham um papel crucial no comportamento hidrodinâmico dos lagos; Ji (2008) categoriza 3 situações distintas concernentes às temperaturas dos rios tributários quando entram em contato com o lago: Na situação onde as águas afluentes são mais quentes do que as águas receptoras, essas ocupam a camada superior do lago devido a sua menor densidade e tendem a se espalhar pela superfície do lago, por causa da instabilidade hidrostática decorrente da elevação da superfície d'água (Martin e McCutcheon, 1999); essa diferença de densidade limita a mistura turbulenta. Essa limitação da mistura se reduz quando o gradiente de temperatura das camadas d'água diminui. A segunda situação se dá quando em períodos frios, as águas dos rios se resfriam mais rápidos que as águas superficiais do corpo lântico, que acarreta no afundamento dessa massa d'água afluente até um ponto intermediário do corpo d'água receptor, onde as densidades são iguais. A terceira situação é o afundamento completo da água do rio tributário quando esta tem densidade maior à água do fundo do corpo receptor.

Martin e McCutcheon (1999); Ji (2008) classificam essas três situações em *overflow*, *interflow* e *underflow*, respectivamente. A Figura 3.9 esquematiza as três configurações.

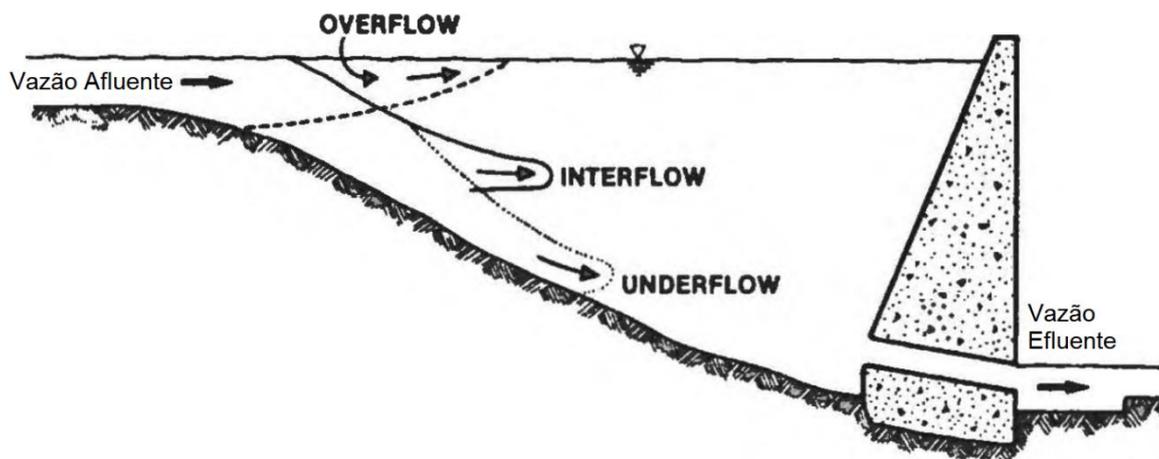


Figura 3.9 – Representação visual dos três cenários possíveis quando o afluente dos tributários se encontram com a massa d’água do corpo hídrico lântico. (Adaptada: Martin & McCutcheon, 1999)

### 3.3 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARCIAIS

Como foi visto na seção anterior, a Equação (3.16), junto com a equação da continuidade (Eq. ((3.5)) modelam o comportamento de qualquer fluido incompressível existente, portanto, análises sobre essas equações são primordiais para estudos dos comportamentos hidrodinâmicos dos corpos hídricos (Çengel & Cimbala, 2012). Tal conhecimento é necessário para estudo de transporte de contaminante, sedimentos, eutrofização e etc.

No entanto, devido à complexidade das equações de Navier-Stokes, soluções analíticas não são possíveis para casos gerais, apenas para simplificações (Çengel & Cimbala, 2012). Para superar essas adversidades, pesquisadores estudaram e criaram metodologias numéricas para a solução das equações, e com o progresso tecnológico há cada vez mais ferramentas capazes de realizar os cálculos hercúleos necessários para se obter aproximações satisfatórias.

Resolver numericamente as equações de Navier-Stokes é uma tarefa complicada devido a relação intrínseca dos campos de velocidade e pressão, vistos na Equação (3.16) e pelo fato de que a pressão não é expressa como variável primária tanto na equação da continuidade quanto na do momento (Moukalled *et al.*, 2015).

A dificuldade de resolução dessas equações faz necessária a utilização de métodos numéricos que busquem soluções aproximadas dessas equações. Devido à complexidade dos

cálculos numéricos, os métodos exigem alto poder computacional, sendo necessário muitas vezes a adoção de hipóteses simplificadoras, como fluxo permanente, bi-dimensional e etc.

Com o intuito de se prover uma boa base na compreensão da hidrodinâmica de fluidos, é fundamental entender como os modelos hidrodinâmicos operam numericamente sobre as equações de fluidos. Em especial para o método dos volumes finitos (MVF), mais aplicado em estudos de dinâmica dos fluidos. Isso permite escolher o modelo mais eficiente e mais estável para um determinado objetivo. Portanto, será apresentado os métodos numéricos mais empregados nas resoluções das equações de forma breve, mas ao mesmo tempo que se tente captar a filosofia dos métodos.

### **3.3.1 Método das Diferenças Finitas**

O método das diferenças finitas (MDF) consiste em aproximar uma equação diferencial a uma equação discretizada na qual é possível, através de manipulações algébricas, calcular as variáveis de interesse em pontos especificados. (Leveque, 1998).

O método das diferenças finitas possui a vantagem de ser um método intuitivo e simples de ser aplicado a geometrias simples, onde o domínio é discretizado em uma malha uniforme e a cada nó da malha a EDP de interesse é calculada por uma expressão algébrica (Ferziger e Perić, 2002). Alguns modelos computacionais como Delft3D e MIKE 3 possuem versões baseadas nos métodos de diferenças finitas.

No entanto, o método apresenta desvantagens pela dificuldade da discretização de se adequar a geometrias complexas, requerendo que haja uma maior discretização da malha como um todo, já que o método é aplicado comumente em malhas regularmente estruturada, como relatam Ferziger e Perić (2002); isso acaba encarecendo em muito os cálculos, computacionalmente falando. Para algumas EDPs têm-se problemas com convergência e estabilidade, como por exemplo, as equações de advecção e difusão apresentam problemas de estabilidade quando o termo advectivo domina sobre o difusivo, o que requer um tratamento especial sobre esses casos (Hu, 2002).

### **3.3.2 Método dos Elementos Finitos**

O método dos elementos finitos (MEF) surgiu por volta da década de 50 com o intuito de resolver análises estruturais de aeronaves e devido a sua facilidade de implementação,

pesquisadores e engenheiros naturalmente quiseram expandir as aplicações dos MEF's para o estudo de dinâmica dos fluidos, datando da década de 60, com o trabalho pioneiro de Zienkiewicz e Taylor (Pepper *et al.*, 2014).

Segundo Ferziger e Perić (2002), a vantagem do MEF é que se pode lidar com qualquer geometria, devido a sua possibilidade de malha não estruturada, e a sua facilidade de refino.

Para a aplicação do MEF em estudos hidrodinâmicos, alguns autores ressaltam certos empecilhos em sua aplicação, como Souza (2000), que fala que devido as características das equações hidrodinâmicas, como a não linearidade dos termos convectivos das equações de Navier-Stokes, os métodos dos elementos finitos tiveram dificuldade em serem aplicados ao estudo dos fluidos, por produzirem muitas instabilidades. Hu (2002) diz que, a maior dificuldade da aplicabilidade dos métodos é para os campos de velocidade e pressão, isso porque, quando são adotadas funções de forma iguais para esses dois campos, a solução do campo de pressão sofre de altos distúrbios oscilatórios.

No entanto, há estudos que validam o uso de MEF's para o estudo de dinâmica dos fluidos e literatura extensa de aplicação de MEF para a resolução das equações de Navier-Stokes, como os trabalhos de Gunzburger (1989) e Girault e Raviart (1979), por exemplo. Borges *et al.*, (2016) estudaram o desenvolvimento de um modelo capaz de lidar com geometrias complexas baseado numa simplificação 2D da equação de Navier-Stokes.

Ferrarina *et al.* (2008) desenvolveram e avaliaram um modelo morfológico para bacias de águas rasas baseado em elementos finitos e conseguiram simular satisfatoriamente as condições hidrodinâmicas e sedimentológicas da lagoa de Veneza.

### **3.3.3 Método dos Volumes Finitos**

O método dos volumes finitos (MVF) foi originalmente desenvolvido para ser uma formulação especial do método das diferenças finitas, e por causa de sua conceituação e estruturação se basearem nos princípios de conservação das propriedades relevantes para cada célula da malha, sua aplicação é muito difundido em modelos hidrodinâmicos (Versteeg e Malalasekra, 1995) sendo o mais empregado no estudo de dinâmica dos fluidos (Causon *et al.*, 2011) como MIKE 3 FM e o Delft3D FM (Mike Powered by DHI (a); DELTARES).

Moukalled *et al.* (2015) descrevem o MVF como métodos numéricos que transformam EDPs em equações algébricas discretas sobre um domínio discretizado consistido por volumes finitos (células ou elementos) como ilustrado na Figura 3.10. Essas equações algébricas são integradas para cada célula discretizada da malha. Esse método inerentemente

adapta os princípios de conservação, já que para duas células adjacentes, o fluxo de qualquer propriedade que sai de uma célula é o mesmo que entra na célula adjacente.

Uma das vantagens desse método é que a malha do MVF pode se ajustar a geometrias complexas, sem a necessidade de transformação do sistema de coordenadas, já que pode ser configurada em malhas não estruturadas, se ajustando às condições de contorno físicas, consequentemente tendo uma alta flexibilidade. (Moukalled *et al.*, 2015). Essa característica se torna, então, um parâmetro de escolha para modelos hidrodinâmicos, já que malhas não estruturadas permitem cálculos mais eficientes, reduzindo o custo computacional.

Será apresentado para um caso simples, mas que simbolize a essência do método, como o MVF resolve as EDPs numericamente:

Tomando como exemplo, por simplicidade, a equação da conservação de massa, incompressível Equação (3.6) e a integrando sobre um volume de controle V:

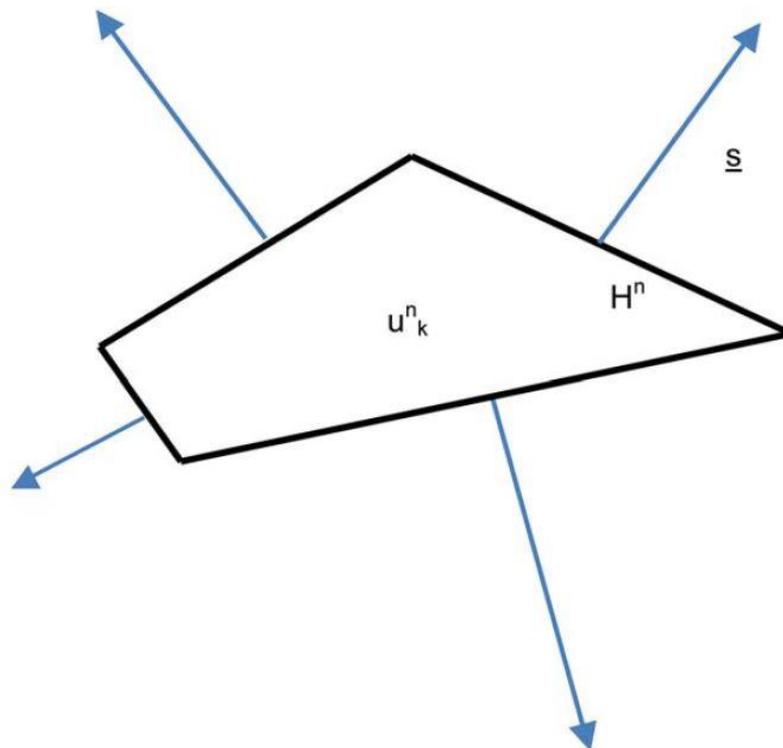


Figura 3.10 – Esquematização de uma célula do MVF, as setas azuis indicam o sentido dos fluxos das propriedades  $\underline{S}$ .  $u_k^n$  é o centroide da célula,  $H^n$  é a densidade dos fluxos (Fonte: Causon *et al.*, 2011)

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

$$\int_V \nabla \cdot \vec{V} dV = 0 \quad (3.20)$$

Pode-se aplicar o teorema do divergente, resultando numa integral de superfície:

$$\oint_S (\vec{V} \cdot \mathbf{n}) dS \quad (3.21)$$

A Equação (3.21) expressa a densidade de fluxo de massa ( $\underline{S}$ , Figura 3.10) que atravessa a fronteira. Para cada célula, cada fronteira é discretizada em pontos para que se possa obter precisões de maior ordem (quanto mais pontos maior a precisão), que serão integrados numericamente. Supondo que uma fronteira seja discretizada em  $n$  pontos, e que cada célula tenha  $m$  fronteiras, a integral da Equação (3.21) é transformada na forma discretizada em:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (\vec{V} \cdot \mathbf{n})_i \omega_i S_j \quad (3.22)$$

Onde  $\omega_i$  é uma função peso de interpolação para cada ponto discretizado da fronteira e  $S_j$  é o comprimento de cada fronteira.

Huang, *et al.* (2017), ao modelarem a hidrodinâmica do reservatório Yazidang na China, utilizaram um modelo 2D com malha triangular não estruturada baseado no MVF e obtiveram resultados satisfatórios com poucas discrepância dos dados observados e os simulados. Segundo os autores, o modelo matemático, a discretização da malha e delimitação das condições de contorno validaram o método.

### 3.4 MODELAGEM DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

Um modelo é qualquer representação simplificada da realidade, que ainda assim, incorpore as características essenciais do sistema. Os modelos são necessários por constituírem pontes entre os níveis de observação e as proposições teóricas (Christofoletti, 1999). Para sistemas dinâmicos complexos, como lagos e reservatórios, onde os processos intervenientes de sua hidrodinâmica e qualidade da água são intrincados e mutuamente

dependentes, é necessário a escolha de modelos que possam simular os efeitos mais dominantes a uma certa confiabilidade ao menor custo possível. Essa abstração da realidade envolve simplificações necessárias para que o modelo seja executável, e que ao mesmo tempo não se distancia muito da realidade.

Modelos muito complexos envolvem muitos parâmetros, coleta de dados, conhecimento técnico e extenso tempo computacional, que incorrem a custos elevados, sendo a coleta de dados responsável por, em média, 80 a 90% dos custos (Jørgensen, 2005). No entanto, adotar muitas simplificações pode prejudicar o modelo, o alienando da realidade, e, portanto, não servindo ao propósito da modelagem, que é ser uma representação do mundo real. Ao se simplificar demasiadamente, se ignora características essenciais, sejam físicas, químicas ou biológicas, dos corpos hídricos. Modelos muito simplificados negligenciam muitos parâmetros de calibração, que geram incertezas que vão se retroalimentando, levando a uma redução da confiabilidade e ao aumento de custos e complexidade à aplicação do modelo (Martin e McCutcheon, 1999).

### **3.4.1 Modelos Determinísticos e Estocásticos**

Um modelo é dado como determinístico quando o comportamento de suas variáveis é determinado pelas equações que regem o sistema, com cada entrada correspondendo univocamente a um dado de saída, como por exemplo, a equação da continuidade (Ji, 2008).

No entanto, mesmo em modelos determinísticos não há como se eximir de seu caráter estocástico, pois sempre haverá incerteza envolvida. Como modelos são simplificações do fenômeno real, sempre haverá um erro inerente à essas simplificações, pois certos processos serão ignorados em favor da factibilidade computacional, devendo ser almejado a minimização desses erros através da calibração e validação (Ji, 2008).

Uusitalo *et al.* (2015) estudaram diversos métodos em como se diminuir esta incerteza como por exemplo, modelos de análise de sensibilidade, cujo propósito é avaliar o quão variável é o dado de saída em relação às mudanças controladas dos dados de entrada, entre outros métodos, como emulação de modelo e variabilidade temporal ou espacial. Já em modelos estocásticos, para cada valor de *input*, se obtém um resultado dado por distribuição aleatória.

### 3.4.2 Hipóteses Simplificadoras para a Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos

Como já mencionado anteriormente, as equações necessárias para a modelagem hidrodinâmica são notoriamente complexas devido a seus termos transientes e termos de segunda ordem não lineares, e mesmo numericamente são muito complexas de serem resolvidas para grandes domínios e por períodos longos de tempo, tornando imperativo a adoção de simplificações (Ji, 2008).

#### 3.4.2.1 Dimensionalidade

A elaboração da malha sobre um corpo d'água de interesse, resulta em células discretizadas nas 3 dimensões, que, em alguns casos, pode se tornar um impeditivo computacional, devido a quantidade exacerbada de cálculos necessários para resolver todas as equações simultaneamente para cada célula. Isso se agrava mais em situações de geometrias irregulares onde que é exigido uma malha mais refinada.

Em algumas situações pode-se considerar que uma variável de interesse não varie significativamente em uma direção se comparado à variação nas outras dimensões, podendo o modelo ser reduzido a dimensões inferiores, resultando em menores custos computacionais. Martin e McCutcheon (1999) e Ji (2008) discorrem sobre a simplificação de dimensionalidade como segue:

Em modelos 0D, é considerado que o corpo d'água esteja completamente misturado e que o gradiente espacial é nulo, levando os cálculos a serem uma média sobre o volume do corpo d'água. Essa consideração se torna válida para pequenos corpos d'água como poças.

Modelos 1D consideram que a variação das variáveis se dê majoritariamente em uma dimensão, como rios, por exemplo, onde a variação de estado é preponderantemente ao longo do eixo longitudinal, devido a sua geomorfologia.

Em modelos 2D pode se considerar que as variações relevantes se deem longitudinalmente e transversalmente, tirando uma média sobre a profundidade, consideração válida para largos rasos onde a largura do corpo d'água é muito superior à sua profundidade; se deem longitudinalmente ou axialmente, tirando uma média sobre a largura, válido para corpos d'água relativamente longos, estreitos e profundos, como alguns lagos, rios e estuários; ou ainda, que se dê axialmente e transversalmente, tirando uma média sobre o comprimento, lagos circulares largos e profundos que não tenham comprimentos elevados.

Huang *et al.* (2017) realizaram uma simulação 2D do reservatório Yazidang na China sob duas condições de operação do reservatório. A premissa da simulação em 2D foi o fato de a escala horizontal ser muito maior que a vertical. Ao analisar os campos de velocidade proporcionado pelas duas condições de operação em seções transversais selecionadas do reservatório, os resultados obtidos da simulação tiveram boa concordância com os valores observados, salvo o caso de uma seção transversal que teve o valor simulado superestimado em relação ao valor real para uma distância mais afastada da margem.

No entanto, ao conduzir um estudo sobre as limitações dos modelos com dimensões simplificadas, Fenocchi *et al.*, (2016) relatam que simulações adotando simplificações 2D para lagos rasos induzem a vários erros de acurácia, devido a consideração da força dos ventos como uma força que atua sobre todo o volume d'água ao invés de ser uma força que atua sobre a superfície, distribuindo verticalmente sua turbulência. Esses erros de acurácia são mais agravantes para corpos d'água com geometrias complexas, baixa intensidade de ventos e águas profundas, onde a consideração de águas rasas não se torna mais válida. Apesar de que para lagos rasos de geometrias regulares, os modelos 2D consigam simular o campo de velocidades corretamente, há uma subestimação no efeito das forças do vento, levando a análises subestimadas de transporte de nutrientes, sedimentos e tempo de detenção hidráulica.

#### 3.4.2.2 Aproximação Hidrostática

Válida para águas rasas (quando a escala horizontal é muito maior que a escala vertical), a aproximação hidrostática assume que o gradiente de pressão vertical é compensado pela força do empuxo da água, podendo assim, omitir o termo de aceleração vertical da Equação (3.17) e se simplificando a:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (3.23)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água,  $\frac{\partial p}{\partial z}$  é o gradiente de pressão vertical e  $g$  é a aceleração da gravidade (Ji, 2008).

### 3.4.2.3 Boussinesq

Na aproximação de Boussinesq os fluxos de escoamento são adotados como incompressíveis, o que significa que a densidade da água não varia com a densidade. A aproximação de Boussinesq é usada para representar o empuxo em um fluido incompressível e as variações da densidade são ignoradas, exceto quando a força gravitacional e o empuxo são considerados (Ji, 2008). Ji (2008) também fala que a aproximação é justificada já que a variação de densidade em corpos d'águas é ínfima.

Martin e McCutcheon (1999) ainda dizem que a aproximação de Boussinesq é quando as diferenças de densidade representam efeitos insignificantes nos termos inerciais, mas não nos termos gravitacionais.

### 3.4.2.4 Sistema de coordenadas

#### Coordenadas Sigma

A coordenada sigma surge com a transformação da coordenada de profundidade do corpo d'água (o eixo  $z$  no sistema cartesiano) para outra que forneça resolução uniforme no eixo vertical (Ji, 2008).

Phillips (1957), que desenvolveu essa transformação para resolver problemas meteorológicos, constatou que o sistema convencional de coordenadas ( $x, y, z$  e  $t$ ) resultava em problemas numéricos em fronteiras de montanhas, devido o sistema de coordenadas não se adequar às fronteiras irregulares, isto é, a atmosfera não é uma coordenada de superfície.

Devido a sua conceituação generalizada, ela é muito adotada em modelagem de fluidos por conseguir representar as variações dos níveis d'água em camadas uniformes, que são convenientes para os cálculos numéricos (Ji, 2008).

#### Coordenadas Curvilíneas

A adoção das coordenadas curvilíneas vai do princípio de que os escoamentos são muito influenciados pelas condições de contorno dos corpos d'água, e que o sistema de coordenadas padrão não consegue resolver as equações nessas regiões adequadamente. A malha desenvolvida para resolver essas situações é então ajustada conforme os limites do corpo d'água (Ji, 2008).

### **3.4.3 Etapas do Processo de Modelagem**

#### **3.4.3.1 Escolha do Modelo**

A escolha do modelo deve ser feita quando se tem pleno conhecimento da situação a ser estudada, partindo de um objetivo a ser alcançado. Isso guiará as decisões do analista que deverá escolher um modelo que atenda a todos os objetivos ao menor custo possível. A adoção de simplificações se torna necessária para a viabilização do modelo, devendo ser feitas análises de quais serão as considerações adotadas, sendo cada caso, único (Martin e McCutcheon, 1999).

#### **3.4.3.2 Análise de Sensibilidade**

A análise de sensibilidade busca em determinar o quanto os resultados do modelo variam para mudanças controladas dos parâmetros. Isso permite determinar qual o parâmetro que exerce mais influência na acurácia do modelo (Ji, 2008). É de grande importância para a calibração e verificação do modelo.

#### **3.4.3.3 Calibração**

A calibração do modelo consiste no ajuste dos parâmetros adotados para obter uma discrepância mínima dos dados observados aos resultados simulados. Segundo Ji (2008), essa discrepância pode ser analisada através de ferramentas estatísticas como o erro médio, erro quadrático médio e entre outros.

Devido ao caráter empírico de alguns parâmetros hidrodinâmicos, os coeficientes que determinam esses parâmetros não podem ser medidos e/ou não tem dados suficientes para um corpo d'água. Portanto, o processo de calibração consiste em ajustar esses parâmetros, para que os resultados estejam em conformidade com os dados observados. Logo, para um bom desempenho da modelagem é importante que haja uma extensa série de dados para que se possa calibrar o modelo com mais precisão e confiabilidade, embora que, a precariedade de informações e ausência de dados sejam situações comuns.

Tendo como motivação a construção de uma base de dados para a calibração, Pilotti *et al.*, (2013) prepararam um conjunto de dados para subsidiar calibrações em futuras

modelagens sobre o Lago de Iseo, na Itália. Esse conjunto de dados consistiu em séries históricas de dados meteorológicos, temperatura, oxigênio dissolvido e vazões afluentes e efluentes. Os dados foram coletados durante um período de 16 anos mensalmente. O intuito do trabalho era de construir e fornecer dados de alta confiabilidade para modelagens posteriores.

A calibração é uma tarefa que demanda muito tempo (Zarein & Naderkhanloo, 2014), pois, a depender da resolução da malha empregada, das simplificações adotadas e do tempo de simulação, será exigindo um grande esforço computacional, incorrendo em muito tempo de processamento. Maneiras de se mitigar essa dificuldade podem ser a adoção de intervalos de valores de calibração mais amplos e utilização de valores encontrados na literatura, de estudos semelhantes (Ji, 2008), além de ferramentas eficientes para auxílio na busca por parâmetros ótimos.

#### 3.4.3.4 Verificação

Após a calibração do modelo deve-se realizar simulações para um conjunto de dados, já que a calibração, por si só, é insuficiente para atestar a capacidade do modelo. Um determinado conjunto de parâmetros, quando calibrados, pode não ser representativo para outros cenários de forçantes externas. Portanto, se o modelo é calibrado com um conjunto independente de dado com uma acurácia aceitável, se ganha muito mais credibilidade (Ji, 2008). Ji (2008) ainda fala que mesmo que o modelo tenha sido validado para um segundo conjunto de dados independentes, simulações além das condições de calibração ainda são incertas. Pode-se calibrar o modelo para um terceiro conjunto de dados independentes e assim sucessivamente, a cada iteração aumentando a acurácia do modelo.

### 3.4.4 Modelagem de Lagos e Reservatórios

Os impactos ambientais aos ecossistemas aquáticos provenientes dos avanços da urbanização são cada vez mais crescentes e os recursos cada vez mais escassos, ainda mais para reservatórios, já que são expostos ao maior aporte de poluentes devido a maiores bacias de drenagem com altas cargas de poluição difusa e pontual (Straškraba, 2005). Portanto, se faz cada vez mais necessário o uso de modelos eficientes que sirvam de ferramentas de apoio à tomada de decisões. Esses modelos devem ser capazes de prever o comportamento do

corpo hídrico mediante a forçantes externas, como aporte de poluentes, nutrientes, energia e etc (Jørgensen, 2005).

A modelagem de lagos e reservatórios ajudam a entender o comportamento físico, químico e biológico, assim como serve de ferramentas de auxílio para planejamento e gestão. Como lagos e reservatórios são ambientes complexos, os modelos devem ser capazes de acoplar os equacionamentos matemáticos da hidrodinâmica com as considerações químico-biológicas do sistema (Henderson-Sellers, 1993).

Straškraba *et al.* (1993) elencam 3 objetivos principais que devem ser almeçados na modelagem de reservatórios:

1. Avanço do conhecimento teórico e a compreensão de como os processos dinâmicos dos ecossistemas de reservatórios se relacionam;
2. Capacidade de prever condições de estados futuros do sistema, e como o sistema muda quando se altera os *inputs* ou as condições ambientais;
3. Possibilidade de tomadas de decisão sobre qualidade da água e disponibilidade.

#### 3.4.4.1 Modelagem de lagos e reservatórios na literatura

A literatura é vasta e rica em estudos de caso de modelagem de lagos reservatórios. Jørgensen (2010) realizou uma revisão bibliográfica sobre os artigos mais importantes nos últimos cinco anos (2005 – 2010) sobre modelagem de lagos e reservatórios com enfoque em modelos de qualidade de água. Com a revisão foi constatado o aumento ao longo dos anos, de modelos hidrodinâmicos acoplados com os ecológicos.

Belolipetsky *et al.* (2010) desenvolveram dois modelos hidrodinâmicos, um 1D, outro 2D, para simular o desenvolvimento da estratificação do Lago Shira na Rússia. Esse modelo foi estruturado com o método de diferenças finitas para calcular as equações de transferência de calor, massa e de salinidade; e também incorporado com várias características físicas do lago, para servir como base para a aplicação posterior de um modelo de qualidade da água. Os modelos foram calibrados e validados com os dados observados de temperatura e distribuição salina na coluna d'água. O modelo foi capaz de simular satisfatoriamente a distribuição de salinidade e temperatura ao longo da coluna d'água para os dois modelos. Esse resultado permitiu aos autores estimarem que o lago permanece estratificado no outono contanto que a salinidade média esteja acima de 0,3%.

Hassanzadeh *et al.*, (2011) desenvolveram um modelo hidrodinâmico baseado numa metodologia de dinâmica de sistemas, próprio para modelagens de recursos hídricos e

gerenciamento de cenários. O objetivo do estudo foi determinar os principais motivos das quedas do nível da água no Lago Urmia, no Irã, que chegou a diminuir em até 6 metros no período de 2001 a 2011. A hipótese inicial era de que o principal motivo dessa queda era devido ao barramento dos principais afluentes do Lago Urmia. No entanto, a partir da modelagem e confecção de cenários, os autores puderam concluir que o principal fator para a queda do nível d'água seria a diminuição das vazões afluentes decorrentes das secas intensas e não do barramento dos tributários. Os autores puderam, então, sugerir medidas de gestão de recursos hídricos para que se pudesse haver melhor aproveitamento do Lago.

Fenocchi e Sibilla (2016) estudaram o comportamento hidrodinâmico do Lago Mantua, um lago raso e fluvial localizado ao norte da Itália. Apesar de modelos bidimensionais que adotam simplificações de profundidades médias serem razoáveis para corpos d'água dessa característica, os autores justificam que essas simplificações são inadequadas para corpos hídricos rasos e fluviais, levando à subestimações dos efeitos dos ventos nas circulações do lago. Portanto, os autores utilizaram um modelo 3D, o STAR-CCM+, que resolve as equações de momento e continuidade através do método dos volumes finitos. Segundo os autores, o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente as interações dos ventos e vazões afluentes na formação das circulações internas do lago.

Huang *et al.* (2010), compararam três modelos distintos para o estudo hidrodinâmico do lago Ontário, os modelos POM, CANDIE e ELCOM. Todos os três são formulados com os métodos de diferenças finitas, com cada um tendo uma esquematização numérica; no entanto, apresentaram valores tendenciosos para o período de verão e produziram camadas de mistura mais rasas do que o observado. Os modelos não incluem mistura vertical por ondas de superfície e circulações internas, o que contribuiu para a subestimação das camadas de mistura.

Bonnet *et al.* (2000) desenvolveram um modelo numérico para a simulação hidrodinâmica e térmica de reservatório na França, para que pudesse servir como base para a implementação de um modelo ecológico de qualidade da água. O modelo possibilitou a quantificação dos processos de mistura vertical, assim como a distribuição da matéria orgânica dissolvida ou particulada nas diferentes regiões do lago. O perfil de temperatura foi calculado usando a equação unidimensional de transferência de calor, que foi calculada numericamente usando uma esquematização de diferenças finitas com passo de tempo de 3 horas e discretização espacial de um metro. O modelo foi calibrado com dados de temperatura (medidos com frequência horária, em 11 níveis de profundidade, em 3 pontos distintos) e meteorológicos (medidos a cada 20 minutos). Os dados de calibração foram do

intervalo de um ano e validados com conjunto de dados de dois anos. Segundo os autores o modelo foi validado satisfatoriamente, pronto para simulação de cenários específicos e acoplamento ao modelo ecológico de qualidade de água.

Teixeira (2019) estudou o efeito das descargas rápidas pelos vertedores ou tomada de água – fenômeno denominado de *flushing* – da barragem do Lago Paranoá sobre as condições hidrodinâmicas do Lago. Para tal, ele utilizou o modelo Delft3D para simular o comportamento das linhas de fluxo, nível da água e perfis de temperatura. A modelagem foi desenvolvida a partir de dados topobatimétricos do Lago Paranoá, em conjunto com dados hidrológicos, climatológicos e da estrutura e operação da usina hidrelétrica do Lago Paranoá. A malha do modelo foi confeccionada a partir dos dados topobatimétricos, respeitando critérios de estabilidade, e refinada em áreas de maior interesse (próximo à barragem, onde as propriedades hidrodinâmicas variam significativamente). O modelo foi então, calibrado e simulado a condições reais observadas. A modelagem foi capaz de representar razoavelmente bem as variações do nível da água, com a discrepância dos valores simulados com os observados sendo fruto da falta de dados necessários para o balanço hídrico. No entanto, o modelo, para as condições simuladas e para o conjunto de parâmetros utilizados, não foi capaz de simular satisfatoriamente o padrão de circulação da coluna d'água e transferência de calor para as regiões mais profundas.

### **3.4.5 MIKE 3 Flow Model FM**

O MIKE 3 Flow Model FM, desenvolvido pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI) é um sistema de modelagem abrangente capaz de simular escoamentos bi e tridimensionais; faz parte do conjunto de estruturas denominado MIKE Zero, cuja arquitetura abriga diversos ambientes de modelagem, junto com ferramentas de pré, pós-processamento e visualização 2D e 3D.

Algumas subestruturas do MIKE Zero podem listadas:

- MIKE HYDRO – Modelo conceitual sobre bacias de drenagem, hidrografia e planícies de inundação;
- MIKE 11 – Modelo unidimensional para simular rios e canais;
- MIKE 21 – Modelo bidimensional para simular estuários, lagos e oceanos com baixas profundidades;
- MIKE 3 – Modelo tridimensional para simular corpos d'água profundos;

- MIKE 21/3 – Modelo acoplado e integrado dos MIKE 21 e MIKE 3, permite acoplamento dinâmico entre modelos de onda, fluxos e transporte de sedimentos;
- MIKE FLOOD – Modelo uni e bidimensional para simulação de inundações urbanas;
- LITPACK – Modelo para simulação de processos litorâneos;
- MIKE SHE – Sistema de modelagem que acopla modelos de águas superficiais e subterrâneas.

O MIKE 3 Flow Model FM é uma versão aprimorada do modelo clássico MIKE 3 Flow Model com a adição da malha flexível (*Flexible Mesh* – FM) que permite a construção de malhas não estruturadas que fornecem flexibilidade para se ajustar a geometrias complexas com representações suaves de contorno. A série FM – *flexible mesh* contém os seguintes módulos, ou sub-componentes (MIKE Powered by DHI (a)):

- Módulo Hidrodinâmico – HD
- Módulo de transporte – TR
- Módulo de Ecologia – ECO Lab
- Módulo de Transporte de Areia – TR
- Módulo de Transporte de Sedimentos - MT
- Módulo Traçador de Partículas – PT

O módulo hidrodinâmico (*Hydrodynamic Module* – HD) simula o nível d'água e suas variações ao resolver as equações de conservação de massa e momento, assim como as distribuições de temperatura e salinidade em resposta às forçantes externas através de equações de transporte. O módulo HD, é a base para os outros módulos, sendo assim, necessário para a execução dos outros módulos.

A discretização espacial das equações é feita usando o método dos volumes finitos com valores centrados na célula, e as equações a serem resolvidas são as equações de Navier-Stokes incompressível com a média de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS) com aproximação de Boussinesq e pressão hidrostática. Para o modelo 3D a superfície livre é simulada com a transformação da coordenada sigma ( $\sigma$ ).

#### 3.4.5.1 Aplicação do modelo por outros autores

Soudi *et al.* (2019) utilizaram o modelo MIKE 3 Flow Model FM para estudar o comportamento hidrodinâmico e distribuição salina no lago Urmia, no Irã, que sofre com a má gestão da bacia hidrográfica e com secas intensas. O objetivo dos autores foi estudar a variação do nível d'água e o transporte de sais no lago. Os autores calibraram parâmetros como rugosidade de fundo, coeficiente de fricção do vento e viscosidade vertical turbulenta. Após análises de sensibilidade para 11 conjuntos de dados diferentes, foi constatado que para o modelo, a viscosidade turbulenta vertical e a fricção de ventos foram os parâmetros mais relevantes para simular corretamente os fluxos de velocidades e distribuições de salinidade. No entanto, o campo de velocidades do modelo tende a subestimar as velocidades observadas, sendo que a viscosidade turbulenta vertical melhoraria o resultado em detrimento da acurácia da distribuição salina. Também foi constatado que a rugosidade de fundo pouco importa nas velocidades das águas superficiais.

Moharir *et al.*, (2014) fizeram uma revisão bibliográfica sobre as aplicações do MIKE 3 avaliando a aplicabilidade do modelo para diferentes propósitos. Os casos estudados utilizaram o modelo para simulações hidrodinâmicas e abrangeram simulações de qualidade da água em rios, transporte de sedimentos e simulação de erosão, correntes d'água provocada pela força dos ventos, impactos da descarga de água residuárias, impactos de tufões sobre corpos d'água, modelagem de plumas de sedimentos e nutrientes em rios e outros. Sobre todos esses casos estudados, é mostrado a viabilidade do modelo em categorizar, para o estudo hidrodinâmico, condições de fluxo, qualidade da água, transporte de sedimentos e parâmetros ecológicos para diferentes corpos d'água; sendo a aplicação mais proeminente do MIKE 3, as simulações das condições de fluxo.

Sokolova *et al.* (2013) usaram o MIKE 3 FM para simular a hidrodinâmica do lago Rådasjön na Suécia para servir como base para um estudo de qualidade no lago, que serve como manancial para abastecimento público. O objetivo do estudo era estimar o quanto as fontes de poluição local contribuíam para a contaminação de *E.coli* no lago Rådasjön. O modelo hidrodinâmico foi desenvolvido para 3 dimensões, transiente e com malha triangular se ajustando bem a geometria do lago. O modelo foi operado para rodar uma simulação de 4 anos, de 2007 a 2011. Também foi configurado para as condições meteorológicas locais e para simular a troca de calor entre o lago e atmosfera. Para a calibração, Sokolova *et al.* (2013) utilizaram dados medidos locais, e a viscosidade vertical turbulenta foi ajustada para melhor poder representar a espessura da camada do epilímio. O resultado obtido foi

considerado bom pelos pesquisadores e serviu como informação para tomadas de decisão no futuro, comprovando a validade do modelo.

Zarein e Naderkhanloo (2014) usaram o modelo MIKE 3 Flow Model para simular os efeitos de rompimento de barragens na propagação de cheias. Os autores modificaram as equações 3D de águas rasas para considerar o assoreamento dos rios e sedimentação na planície de inundação. Para a configuração do modelo, foi adotado algumas das hipóteses simplificadoras discutidas no item 3.4.2; assim como outras que os autores julgaram adequadas. Foram testadas várias malhas diferentes, cada uma com uma diferente configuração de nós, até que foi escolhida uma malha adequada, que possuía 21.181 elementos. A malha é apropriada quando, ao se refinar mais, não resulte em melhoras significativas. Foi adotado um passo de tempo de 36 segundos, para que se pudesse ter estabilidade. O modelo foi calibrado e validado espacialmente e temporalmente. Durante a calibração foi notado uma diferença perceptível dos dados simulados e observados, embora o modelo tenha captado a tendência e o comportamento da situação real.

Zhang *et al.* (2020) utilizaram o MIKE 3 Flow Model para estudar a estratificação de um reservatório de abastecimento de água para o consumo humano do Reservatório de Targo, um lago monomítico situado na Austrália. Os autores, com apoio de estações de monitoramento de temperatura da água, ao longo da coluna d'água e de dados meteorológicos e hidrológicos, usaram o modelo para investigar a estrutura térmica do lago e também a sua estabilidade. Além do mais, foi estudado a influência dos ventos, precipitação e das vazões afluentes e defluentes sobre a estratificação. Para estudar a estrutura térmica do reservatório, os autores segmentam o lago em três zona: fluvial, de transição e lacustre. Foi percebido um gradiente longitudinal dessa estrutura térmica. Fatores importantes para a efetiva calibração da temperatura e validação do modelo tridimensional foram a qualidade dos dados, já que a estação de monitoramento de qualidade de água coletava dados de temperatura com frequência de três horas e coletava as medidas a cada metro. Os autores conseguiram simular bem o perfil de temperatura da coluna d'água. Os autores julgam que o modelo tridimensional desenvolvido será capaz de avaliar o papel das forçantes externas sobre a estruturação térmica do Reservatório de Tarago, para que se possa haver uma melhor gestão sobre esse recurso hídrico.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.5.1 Aspectos Gerais

O Lago Paranoá é um lago artificial criado em 1959 com o barramento do rio Paranoá. Foi inaugurado no mesmo ano que Brasília e tinha inicialmente como objetivo a melhoria do micro clima, servir como uso recreativo e fonte hidroelétrica.

O Lago se situa na Bacia do Paranoá, cuja bacia possui uma área de drenagem de 1.024 km<sup>2</sup> e é responsável por drenar 12,03% da área total do Distrito Federal. Esse reservatório é alimentado por cinco tributários principais: Riacho Fundo, Ribeirão do Gama, Ribeirão do Torto, Ribeirão Bananal e Córrego Cabeça de Veado (Figura 3.11) (PGIRH, 2012a). Também recebe a contribuição de pequenos córregos como o Córrego da Palha, Córrego do Jerivá e Córrego Taquari na região do Lago Norte entre outros. A princípio de servir como fonte de produção energética, à jusante da barragem, foi construída a Usina Hidrelétrica do Paranoá, que abastece Brasília com um potencial de geração de 30 MW (SEBRAE, 2004).

A respeito de suas características físicas, em consequência ao barramento do rio Paranoá, o Lago possui um formato dendrítico com ramificação em quatro braços principais que drenam as sub-bacias do Riacho Fundo, Ribeirão do Gama, Ribeirão do Torto e Ribeirão do Bananal (Figura 3.11). Possui uma profundidade média de 12,42 m com máxima de 38 m próxima a barragem à cota 1.000,00 m e área superficial de 38 km<sup>2</sup>; seu volume é de aproximadamente 498x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> e  $t_{dh}$  de 299 dias (Liporoni, 2012; Teixeira, 2019).

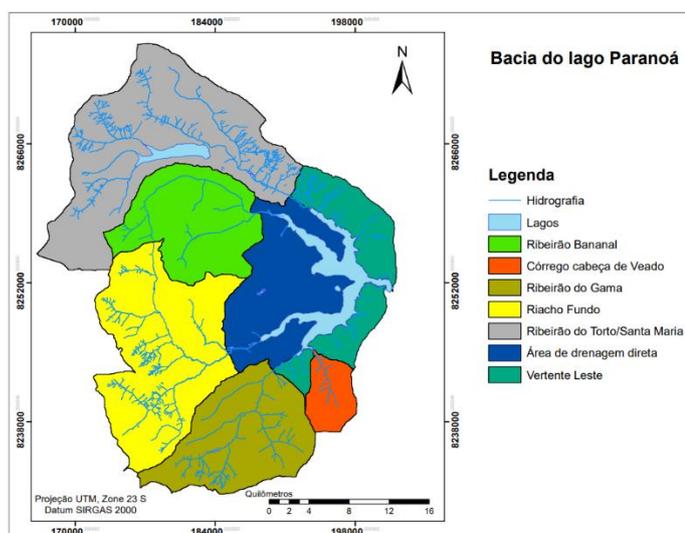


Figura 3.11 – Mapa de localização da Bacia do Lago Paranoá, com as subdivisões das UHs (Fonte: Nunes, 2016).

### **3.5.2 Clima**

A região do DF possui um clima marcado pela forte sazonalidade, com dois períodos distintos bem caracterizados como períodos chuvosos que vão de outubro a abril apresentando precipitações médias mensais superiores a 200 mm e períodos secos, indo de maio a setembro com precipitações inferiores a 50 mm. Os períodos chuvosos são responsáveis por cerca de 90% da precipitação anual total. A precipitação média anual varia em torno dos 1500 mm (Campos, 2004; Nunes, 2016; PGIRH/DF, 2012).

O período que o Lago recebe a maior radiação compreende os meses de julho e agosto, no período seco, tendo comportamento inverso ao da umidade, que acompanha o padrão sazonal das precipitações. Os meses de setembro a outubro é o período mais quente no DF do ano, conseqüentemente sendo a época onde ocorre os maiores índices de evaporação (PGIRH/DF, 2012).

O clima do DF é caracterizado como tropical pela classificação Köppen (*apud* GDF, 2020a) por possuir temperaturas superiores a 18 °C para o mês mais frio. No geral, as temperaturas médias anuais possuem uma variabilidade de 19 a 23 °C, com a média histórica mais alta chegando a 30 °C. Entre os meses junho e julho, o período mais seco, as temperaturas podem chegar a 13 °C (GDF, 2020a).

### **3.5.3 Uso e Ocupação do Solo**

A partir do início da construção de Brasília, em 1956, ocorreu na região do DF um intenso processo migratório, provocando o adensamento populacional. Com o aumento da população, novos núcleos urbanos foram criados e o número de Regiões Administrativas passou de oito, em 1964, para 33, atualmente (GDF, 2020b).

A Bacia do Paranoá é responsável pelo maior percentual de áreas urbanizadas do DF, correspondentes a 35% da área da bacia, que abrange a mais ampla gama de situações de ocupação humana, indo desde a zona urbana do conjunto tombado de Brasília, cidades-satélite de ocupação consolidada até ocupações de origem desordenada como Vila Estrutural e Itapoã (PGIRH, 2012a).

O Uso e ocupação da Bacia do Paranoá é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Uso e cobertura do solo da Bacia do Paranoá. Fonte: Nunes, 2016

<b>Classe</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>
Campo Sujo	<b>123,39</b>	<b>12,05</b>
Campo Limpo	<b>37,89</b>	<b>3,7</b>
Cerrado	<b>276,77</b>	<b>27,02</b>
Área Degradada	<b>3,84</b>	<b>0,37</b>
Solo Exposto	<b>7,79</b>	<b>0,76</b>
Pastagem	<b>2,24</b>	<b>0,22</b>
Áreas Úmidas	<b>15,36</b>	<b>1,5</b>
Lagoas ou Reservatórios	<b>46,68</b>	<b>4,55</b>
Estradas Pavimentadas	<b>23,19</b>	<b>2,26</b>
Reflorestamento – Eucalipto	<b>36,25</b>	<b>3,54</b>
Agropecuária	<b>34,96</b>	<b>3,41</b>
Áreas urbanas de Baixa Densidade	<b>48,23</b>	<b>4,71</b>
Áreas Urbanas de Média/Baixa Densidade	<b>87,85</b>	<b>8,57</b>
Fruticultura	<b>6,73</b>	<b>0,65</b>
Áreas Urbanas de Alta Densidade	<b>146,69</b>	<b>14,32</b>
Mata de Galeria	<b>62,08</b>	<b>6,07</b>
Área Vegetada	<b>63,69</b>	<b>6,22</b>
Estradas não Pavimentadas	<b>0,84</b>	<b>0,08</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1024,47</b>	<b>100</b>

Com o aumento da urbanização, há um crescimento equivalente na impermeabilização do solo, o que provoca um aumento do escoamento superficial das águas pluviais sobre a bacia urbana. Em decorrência dessa impermeabilização o escoamento superficial pode chegar a elevado volume d'água e também de velocidade, ocasionando fenômenos erosivos nas áreas mais frágeis, como solos expostos, que não possuem raízes de vegetação como meio suporte. Essa situação de urbanização provoca efeitos adversos em corpos hídricos devido ao carreamento de poluentes das bacias urbanas e de nutrientes do solo agrícola, assim como os sedimentos carreados pela erosão do solo. Na foz dos tributários Riacho Fundo e Bananal houve assoreamento em decorrência dos processos erosivos (Roig, 2010; Menezes, 2010 *apud* Liporoni, 2012).

## 4. METODOLOGIA

Nesta seção discute-se a metodologia adotada para a construção do modelo hidrodinâmica do Lago Paranoá utilizando o software MIKE 3 Flow Model FM. O trabalho foi desenvolvido a partir da obtenção dos dados necessários para a entrada do modelo, indo desde a construção da base de dados própria do programa, da construção da malha numérica até a calibração e análises do modelo. Devido à complexidade dos processos intervenientes de um corpo hídrico real, foram adotadas algumas simplificações e abstrações ao modelo, embora tentando ao máximo representar os processos mais significantes. Dessa forma, foi possível estabelecer uma sequência de procedimentos necessários para gerar um modelo representativo do Lago Paranoá. O procedimento adotado pode ser observado na Figura 4.1. Essa sequência parte da geração da malha, configuração das condições de contorno, montagem da base de dados, simulação, análises de sensibilidade, calibração e análises da influência dos ventos e da qualidade da malha. O modelo foi desenvolvido a partir da consulta de manuais científicos do MIKE 3 Flow Model FM, assim como o de ferramentas de pré e pós-processamento, o MIKE Zero.

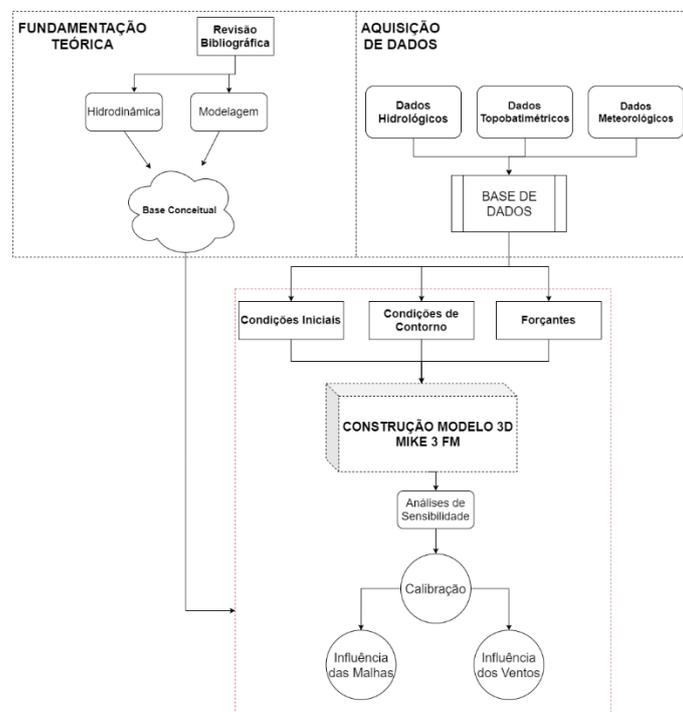


Figura 4.1 – Fluxograma adotado para o desenvolvimento do trabalho.

## 4.1 DADOS DE ENTRADA PARA A CONFECÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Após definido conceitualmente o modelo e entender como as principais forçantes operam sobre o comportamento hidrodinâmico de um corpo hídrico, pôde-se saber as variáveis de entrada necessárias para a construção do modelo. Para o fechamento do balanço hídrico são necessários dados das variáveis que contabilizem a entrada e saída da massa d'água do Lago. Para a representação dos perfis de temperatura na coluna d'água, dados quantitativos da transferência de calor entre a interface atmosfera-água, como radiação solar, ventos, temperatura do ar e etc. são necessários. Por fim, dados de cota da lâmina d'água e de temperatura na profundidade do Lago foram necessários para a calibração do modelo.

A Figura 4.2 mostra a localização das estações fluviométricas, das ETEs, dos pontos de monitoramento de qualidade da água e da estação climatológica INMET. A Tabela 4.1 – explicita os dados necessários e suas respectivas categorias. Esta seção descreve como os dados foram obtidos e tratados para a posterior aplicação.

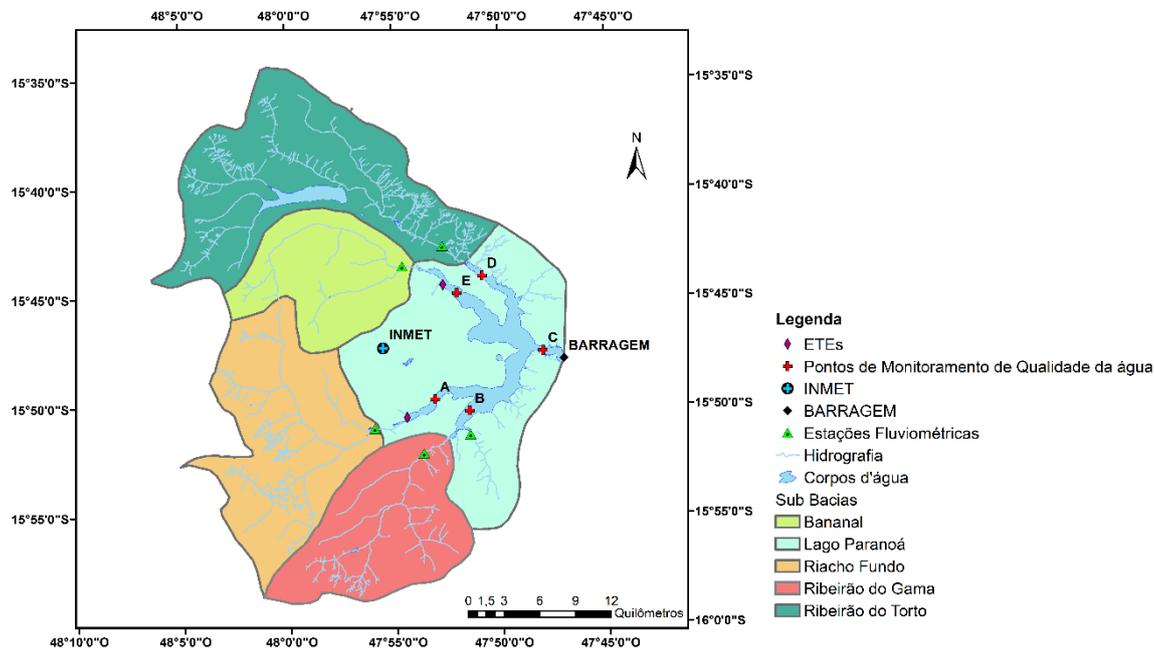


Figura 4.2 – Mapa da localização dos pontos de interesse para a construção e calibração do modelo (Elaborado pelo Autor)

Tabela 4.1 – Tipos de dados necessários do modelo

	<b>Tipo de Dado</b>	<b>Categoria dos Dados</b>
-	Batimetria	Topobatimétrico
<b>Balço Hídrico</b>	Vazões Afluentes	Hidrológicos
	Vazões Defluentes	
	Contribuição Direta	Hidrológicos – Calibração
	Cota da Lâmina d'água	
	Evaporação	
<b>Temperatura</b>	Precipitação	Climatológicos
	Radiação Solar	
	Velocidade e Direção do Ar	
	Temperatura do Ar	
	Umidade Relativa	
	Nebulosidade do Ar	
	Temperatura da Água	Temperatura – Calibração

#### 4.1.1 Dados Topobatimétricos

Os dados da morfometria do Lago Paranoá foram obtidos da base de dados de Teixeira (2019), que por sua vez, obteve os dados no âmbito do Convênio N° 01/2017 – Adasa – UnB, em estudo desenvolvido pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília e coordenado pelo professor Henrique Llacer Roig (Roig *et al.*, 2017). Esse dado matricial de formato *raster* é um modelo digital de terreno com resolução espacial de 5x5 metros com cota máxima de 1.097 metros e mínima de 961,5 metros de altitude, com locais de máxima profundidade perto da barragem.

Teixeira (2019) ao estudar o efeito de *flushing* do Lago Paranoá, transformou os dados topobatimétricos de maneira a retirar pontos com altitude superior à cota máxima operacional do Lago, de altitude de 1.000,80 metros, junto com os pontos a jusante da barragem, que não faziam parte do Lago. Dessa maneira, ele obteve a informação batimétrica transformada para ser incorporada ao Delft3D.

Para a utilização dos dados no presente trabalho, foi necessário a adequação da informação para a utilização no MIKE 3 Flow Model FM, pelo fato do Delft3D adotar um padrão referencial diferente, com valores de profundidade com valores acima de 0, ao passo que para o MIKE as profundidades são denotadas com valores negativos. Os dados foram modificados com a ferramenta de geoprocessamento ArcGIS, transformando todos os valores em negativo para se adequarem ao formato do MIKE 3 (Figura 4.3).

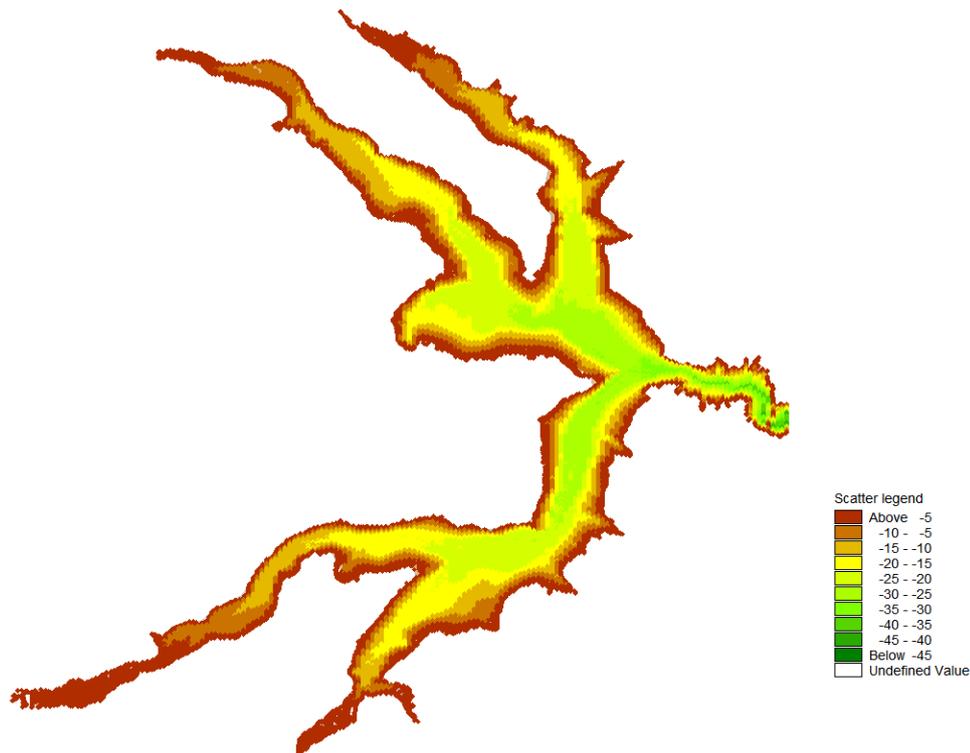


Figura 4.3 – Batimetria do Lago Paranoá

#### 4.1.2 Dados Hidrológicos

Os dados hidrológicos se referem às variáveis necessárias para quantizar o balanço hídrico do Lago Paranoá (Tabela 4.1) e constituem das séries históricas de vazões afluentes dos tributários, defluentes da saída da barragem e da contribuição de drenagem direta ao Lago. Como as vazões de um tributário são variáveis aleatórias, é importante de se ter séries históricas extensas de adequada frequência temporal para se garantir maior acurácia possível para a modelagem, embora a dificuldade intrínseca da obtenção de dados com tais qualidades.

Os dados de vazões monitoradas são obtidas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), que possui uma rede de monitoramento de estações fluviométrica, pluviométrica, climatológicas e sedimentométricas, distribuídas pelo Distrito Federal e entorno; esses dados são disponibilizados publicamente através da plataforma online da Caesb, onde pode-se consultar as séries históricas das estações, assim como a relação de cota-vazão dos cursos fluviais.

A base de dados hidrológica consistida e preenchida foi fornecida por Nunes (2021). Essas séries históricas possuem frequência diária que abrangem o período de 2000 a 2017.

#### 4.1.2.1 Vazões Afluentes dos Tributários

Os principais tributários do Lago Paranoá (Riacho Fundo, Gama, Córrego Cabeça de Veado, Bananal e Torto) possuem estações fluviométricas com medições diárias em conjunto com a relação cota-vazão. A Tabela 4.2 mostra o código e as coordenadas geográficas das estações fluviométricas utilizadas. Várias estações fluviométricas apresentam ausência de medidas e até mesmo extensos períodos consecutivos sem dados. O tributário Riacho Fundo possui duas estações de monitoramento, onde a mais próxima ao Lago apresentava uma ausência de dados de mais de 10 anos (1994 – 2005) (Liporoni, 2012). Devido a importância dos dados de vazão afluente como dados de entrada para a confecção do modelo, Liporoni (2012) calculou os coeficientes estatísticos de correlação e determinação entre estações similares para que se pudesse preencher as lacunas existentes das estações.

Tabela 4.2 – Localização e código das estações fluviométricas da Caesb

<b>Estação</b>	<b>Código</b>	<b>Coordenadas</b>
<b>Ribeirão do Torto</b>	60477400	15°42'51.00"S 47°52'39.00"O
<b>Ribeirão Bananal</b>	60477600	15°43'41.00"S 47°54'36.00"O
<b>Riacho Fundo</b>	60478200	15°51'32.00"S 47°56'33.00"O
<b>Ribeirão do Gama</b>	60478500	15°52'18.00"S 47°53'46.00"O
<b>Córrego Cabeça de Veado</b>	60478600	15°51'27.00"S 47°51'27.00"O

#### 4.1.2.2 Vazões de Saída

A vazão de saída do Lago Paranoá se dá pelo vertimento da água quando o nível d'água ultrapassa o valor-limite da cota estabelecida e também pelo turbinamento para a geração de energia elétrica. Esses dados são operacionados pela Companhia Energética de Brasília (CEB). Os dados da vazão turbinada não são medidos, mas obtidos de maneira indireta, através da estimação da energia produzida por 4 turbinas que operam por mais de cinquenta anos, desde a construção do barramento, em 1960. Esses dados constituem um grande fator de erro para o balanço hídrico devido a imprecisão dos dados e o fato das equações de descarga da barragem não foram propriamente calibradas (Nunes *et al.*, 2020).

#### 4.1.2.3 Vazões Provenientes da Drenagem Direta

As águas que afluem ao Lago por escoamento superficial direto proveniente das áreas urbanas de Brasília constituem uma parcela importante do volume que chega ao Lago, considerando o elevado nível de impermeabilização da região. Essas vazões são tipicamente expressivas e devem ser contabilizadas no balanço hídrico. O Lago Paranoá recebe contribuição direta das áreas do Plano Piloto, Lagos Norte e Sul e da área a Leste e Oeste do Lago Paranoá e seus volumes constituem cerca de 20% na contribuição do balanço hídrico (Nunes, 2016) (Figura 4.4).

Nunes (2016), ao estudar o balanço hídrico e qualidade de água do Lago Paranoá, calculou as vazões de escoamento das áreas que contribuem diretamente ao Lago. A partir dos dados de uso e ocupação do solo, MDE (Modelo Digital de Elevação); dados hidrológicos, pedológicos, geológicos e climáticos, o autor realizou a modelagem hidrológica das cinco principais sub-bacias afluentes à bacia do Lago Paranoá com o modelo *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. Para se estimar as vazões das áreas não monitoradas (Figura 4.4) o autor considerou a similaridade nas características das sub-bacias com as áreas não monitoradas. Para a área não monitorada urbana, suas vazões de contribuição direta foram estimadas baseando-se na vazão específica da sub-bacia do Riacho Fundo, por ser uma bacia de expressivo adensamento urbano. Por outro lado, as vazões da região não monitorada leste foram estimadas com base na vazão específica da sub-bacia do Gama, devido à similaridade entre o uso e ocupação do solo para essas duas regiões.

Após a calibração e validação do modelo, Nunes (2016) obteve a série histórica das vazões de contribuição direta para os anos de 1982 a 2017. Sua metodologia também foi adotada por Teixeira (2019) para a modelagem do Lago Paranoá com o Delft3D.

Para o presente trabalho, a série histórica das vazões de contribuição direta do Lago Paranoá foi obtida junto com Nunes (2021) para os anos de 2000 a 2017.

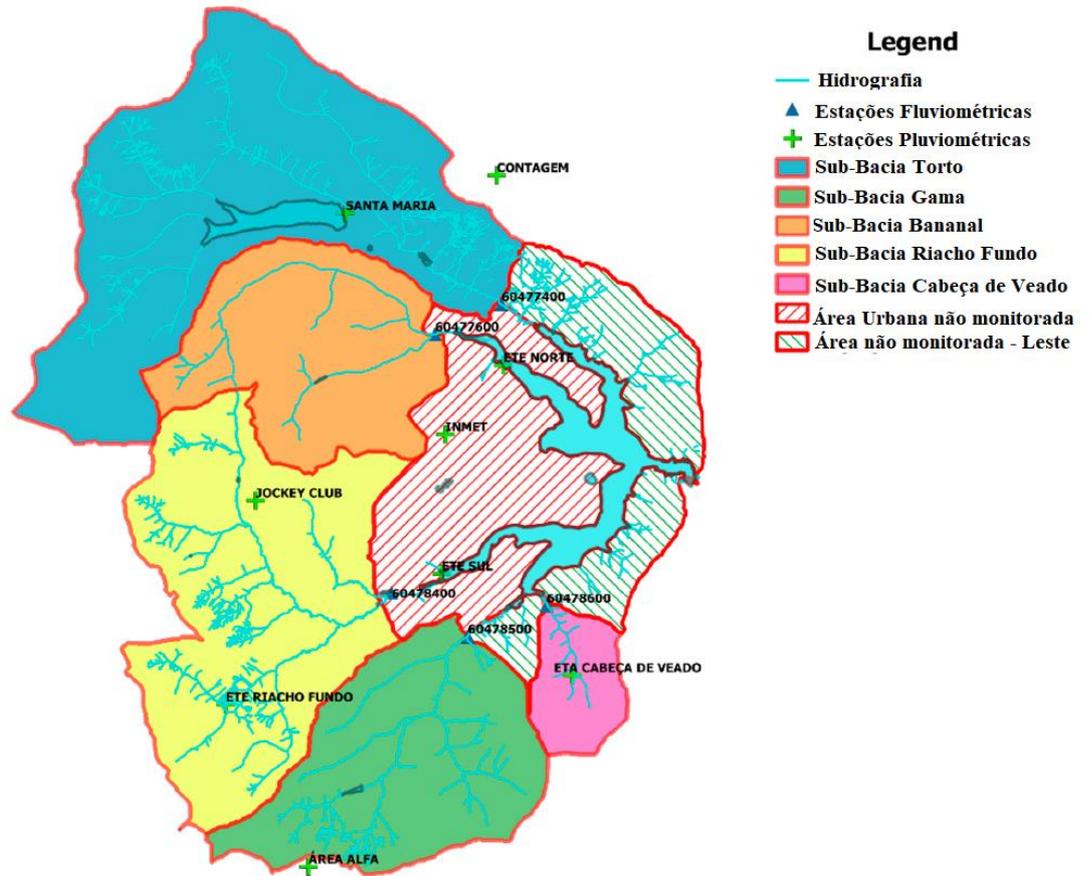


Figura 4.4 – Delimitação das Sub-Bacias do Lago Paranoá, com delimitação das áreas de contribuição direta (Adaptada: Nunes *et al.*, 2020).

#### 4.1.2.4 Vazões das Estações de Tratamento de Esgoto

As vazões provindas das estações de tratamento de esgoto, a ETE Norte e ETE Sul constituem uma parcela importante no fechamento do balanço hídrico, já que suas vazões em média são superiores às do córrego Cabeça de Veado e suas vazões conjuntas se equivalem à das vazões específicas da contribuição direta da área leste (Nunes *et al.*, 2020).

#### 4.1.3 Dados Meteorológicos

As leituras dos dados meteorológicos são realizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, cuja estação automática Brasília A001 encontra-se a cerca de 15 km do Lago Paranoá (Figura 4.2). Essa estação coleta dados com escala horária e abrange diversas variáveis climatológicas como temperatura máximas, médias, mínimas, de orvalho; radiação global; velocidade e direção do vento, e etc.

Para a configuração do modelo, os seguintes dados meteorológicos/climatológicos foram elencados:

- Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Umidade Relativa (%);
- Visibilidade (%);
- Velocidade do vento (m/s);
- Direção do vento (graus);
- Precipitação (mm/dia);
- Evaporação (mm/dia);
- Radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Os dados foram obtidos pela requisição ao banco de dados do INMET. De acesso público, pode-se requisitar esses dados informando a região, o tempo inicial e final, frequência da série histórica, variáveis de interesse, seleção das estações e etc.

Para uma melhor configuração do modelo e precisão, foram obtidas as variáveis de interesse da estação automática Brasília A-001 com frequência horária, para os anos de 2000 a 2017, a fim de ser compatível com as outras séries históricas já adquiridas.

## **4.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE UTILIZAÇÃO DO MIKE 3 FLOW MODEL FM – *HYDRODYNAMIC MODULE***

O Módulo Hidrodinâmico (*Hydrodynamic Module – HD*) é baseado na solução numérica tridimensional das equações de Navier-Stokes sob a hipótese de escoamento incompressível. Esse modelo consiste na resolução das equações de conservação de massa, momento, temperatura, salinidade e densidade, levando em conta o escoamento turbulento. Para a resolução numérica das EDPs, a discretização espacial das equações é realizada baseando-se no método dos volumes finitos. No plano horizontal, o domínio é discretizado com elementos triangulares não sobrepostos e não estruturados, enquanto que no plano vertical uma discretização estruturada é feita, a partir de uma transformação sigma, resultando em células prismáticas. O *Software* utiliza um *solver* de aproximação de Riemann para o cálculo dos fluxos advectivos, o que possibilita lidar com soluções descontínuas dos cálculos dos fluxos advectivos (MIKE Powered by DHI (e)).

A partir do Módulo Hidrodinâmico, pode-se acoplar outros módulos que atendam a objetivos específicos, como por exemplo, qualidade da água e transporte de sedimentos.

O processo de construção do modelo hidrodinâmico do MIKE 3 pode ser esquematizado de acordo com o fluxograma disposto na Figura 4.5.

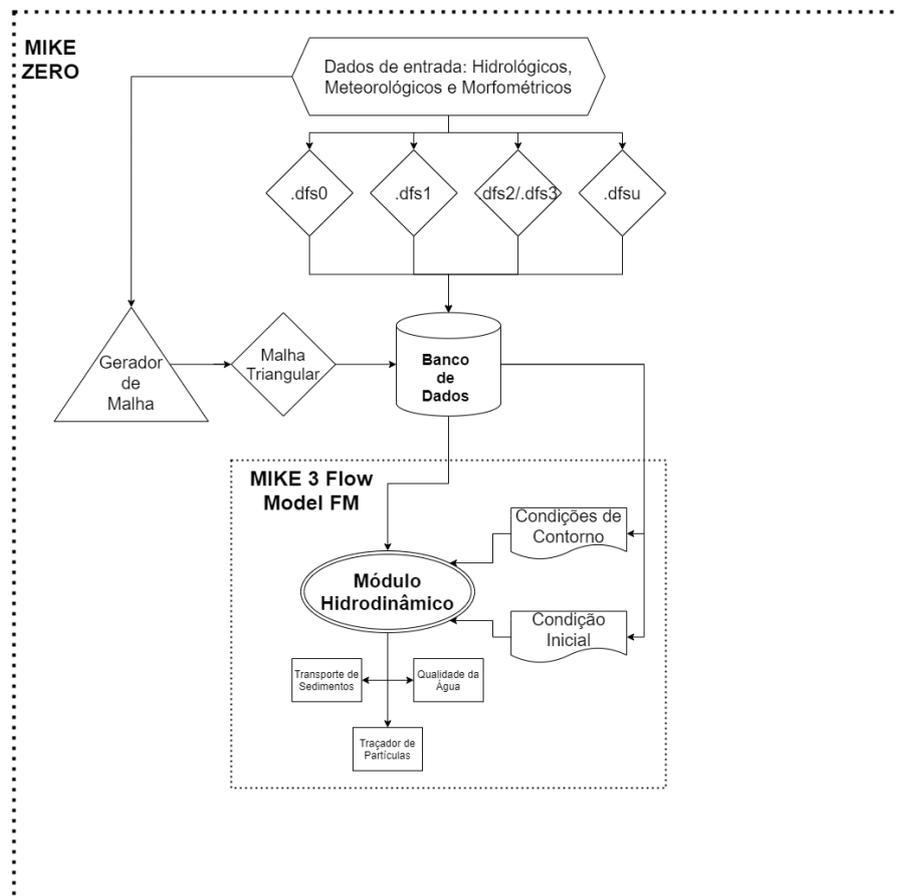


Figura 4.5 – Fluxograma para a construção do modelo MIKE 3

## 4.2.1 Construção do Banco de Dados do MIKE 3

### 4.2.1.1 Construção da malha numérica

O primeiro passo para a construção do modelo foi a criação da malha não estruturada com células triangulares. Utilizou-se a ferramenta *Mesh Generator* cuja interface permite facilmente a construção do contorno do lago a partir do limite físico do corpo hídrico. Essa interface também permite criação e edição dos vértices, nós e arcos; que servirão de base para a criação dos elementos triangulares e da criação das condições de contorno.

Para a criação do limite da malha e das condições de contorno, a plataforma *Mesh Generator* adota o conceito de vértices, nós, polígonos e arcos, que podem ser compreendidos da seguinte maneira:

- Nó: ponto que define o início e o fim de um arco; um arco fechado possui apenas um nó, enquanto um arco aberto está entre dois nós;
- Vértice: ponto interno ao longo do arco;
- Arco: conjunto de segmentos de linha compostos por zero ou mais vértices que tenham necessariamente, um ou mais nós;
- Polígono: conjunto de arcos que tenham início e fim sobre um mesmo nó, criando uma área fechada. Propriedades específicas, como limite máximo de área e etc. podem ser definidas sobre os polígonos.

Para o traçado do contorno físico do domínio devem ser adicionados arcos que delimitem a área em questão. Pode-se ainda utilizar imagens georreferenciadas para auxílio do desenho, onde ferramentas como *zoom* podem ajudar no detalhamento. O contorno do Lago foi feito com auxílio de um arquivo vetorial *shapefile* do Lago Paranoá. O sistema de referência espacial foi o datum SIRGAS 2000 com projeção UTM-23S. Após a criação do contorno, foi utilizada a função *redistribute vertices*, que permite a distribuição uniforme dos vértices. Esse processo é importante para uma maior qualidade dos elementos da malha. Ao especificar alguns parâmetros, como números de vértices para cada segmento, distância mínima entre cada vértice/nó e entre outros, pode-se aumentar ou diminuir a densidade de vértices ao contorno da malha.

Com o limite físico delimitado, deve-se confeccionar as condições de contorno do modelo. Foram estabelecidas a partir de arcos abertos (delimitados por dois nós), de acordo com a atribuição de códigos aos arcos e nós do contorno da malha. Esses códigos são Algarismos inteiros que vão de 0 até valores especificados pelo usuário, sendo o valor 0 convertido automaticamente para 1, no qual o programa utiliza para interpretar o contorno como solo. Para o restante dos valores, a enumeração é arbitrária, cabendo ao usuário definir os valores distintos para condições de contorno distintas. O modelo interpreta os valores dos códigos e atribui sobre os arcos, propriedades de condição de contorno aberta (CA) ou fechada (CF). A propriedade CF define o limite físico do corpo hídrico, onde é assumida que as velocidades perpendiculares ao arco são iguais a zero. A propriedade CA define os arcos que serão estabelecidos como condição de contorno, onde serão especificadas as forças motrizes atuantes sobre o volume de controle.

As condições de contorno foram definidas como as vazões afluentes dos tributários, as saídas pelo vertimento e turbinamento da barragem e as vazões proveniente da contribuição direta. Para contabilizar estas vazões, o perímetro do Lago foi compartimentado em 7 seções:

- Área Central 1;
- Área Central 2;
- Área do Riacho Fundo;
- Área do Gama;
- Área do Córrego Cabeça de Veado;
- Área do Torto;
- Área do Bananal.

Cada seção foi definida por arcos delimitados por nós, com cada arco atribuído a um código distinto. Essa especificação foi definida a partir dos dados de contribuição direta provida por Nunes (2021) que discretizava por cada sub-bacia contribuinte.

Delimitado o contorno, pode-se gerar a malha triangular do modelo automaticamente, bastando definir a área máxima dos elementos, menor ângulo permitido e o máximo número de nós. Idealmente, deve-se buscar elementos com maior ângulo e área possível, a fim de se garantir maior eficiência e estabilidade numérica. No entanto, para conseguir maiores ângulos, é necessário um maior número de elementos, implicando em maiores custos computacionais para as simulações. Os elementos triangulares são criados a partir dos vértices e nós do contorno, sendo, por isso, importante alocar vértices uniformemente distribuídos, evitando regiões com distribuição irregular de vértices e que tenham elementos com ângulos fora dos limites estabelecidos.

Após criados os elementos, pode-se suavizá-los com a função *smooth*, que reconfigura os nós das células da malha, produzindo elementos mais uniformemente distribuídos. Para suavizar os elementos, especifica-se um determinado número de iterações para os cálculos de suavização e conformação dos elementos. Não é recomendado pelo manual adotar valores maiores que 100 iterações, pois poderá produzir elementos com ângulos inferiores ao mínimo recomendado, comprometendo a eficiência da malha.

É usual na modelagem numérica que, áreas com menor interesse ou variabilidade das variáveis sejam discretizadas mais esparsamente, baseado na ideia de que a inacurácia presente não afete o modelo expressivamente, enquanto que áreas onde o gradiente das variáveis de interesse é elevado, haja a necessidade de um maior refinamento da malha,

como por exemplo, regiões onde há uma variação brusca no campo de velocidades do escoamento (Çengel & Cimbala, 2012; Wei, *et al.*, 2013, DHI, 2020).

Para a presente proposta da modelagem, foram desenvolvidas diversas malhas, com cada uma atendendo a objetivos variados, ao passo que, no geral, todas seguiram a mesma metodologia proposta: Compartimentação do Lago em 3 seções distintas: uma área mais esparsa com elementos maiores, compreendendo uma parcela da área central mais os quatro tributários; uma área refinada de interesse, com elementos menores, localizada na área da garganta do Lago, próximo à barragem; e uma área de transição, a fim de permitir uma transição suave da região da malha mais esparsa para uma da malha mais refinada.

De posse dos dados batimétricos já transformados, interpolou-se os dados topobatimétricos à malha, utilizando o método do vizinho natural de interpolação, proposto pelo programa.

De posse da malha com os elementos suavizados, é necessário efetuar uma análise sobre estes: identificar os elementos mais restritivos, para a posterior correção manual. Portanto, análises de qualidade da malha foram feitas, a fim de se garantir a estabilidade numérica e eficiência computacional. O modelo possui três parâmetros para indicar a qualidade da malha:

- Ângulo dos elementos;
- Área dos triângulos;
- Passo de tempo necessário para a resolução das equações.

Sendo que o passo de tempo necessário é estimado a partir da célula mais restritiva, de acordo com a seguinte equação:

$$\max \Delta t = CFL \cdot \frac{\min(l)}{2\sqrt{gh}} \quad (4.1)$$

Onde  $\max \Delta t$  é o máximo passo de tempo da célula mais restritiva,  $\min(l)$  é o menor comprimento da aresta do elemento restritivo e CFL é um coeficiente de critério de estabilidade, que está compreendido entre 0 e 1.

O processo de construção da malha se dá por tentativa e erro, ajustando-a de acordo com as necessidades e limitações das simulações, sempre buscando o equilíbrio entre a eficiência computacional e acurácia dos resultados. Para todas as malhas criadas, as células foram ajustadas manualmente com as ferramentas de edição de células, a fim de se buscar ângulos superiores a 26° (recomendação do manual) e maiores  $\Delta t$  possíveis.

Para o objetivo do estudo foram projetadas várias malhas, no intuito de se estudar o efeito do refinamento nos resultados; os métodos de refinamento podem ser indicados como (DHI, 2020):

1. Aumento de vértices na área de interesse: como os triângulos são gerados a partir dos vértices do contorno, quanto maior a quantidade de vértices, mais elementos serão gerados;
2. Refinamento por polígonos: consiste na definição de polígonos onde é estabelecido um limite máximo da área dos elementos dentre este polígono;
3. Refinamento por bi-seccionamento: método que consiste em dividir cada elemento da malha em quatro elementos menores. Esse método possui a vantagem de não diminuir necessariamente o ângulo dos elementos, mas, computacionalmente, é altamente custoso, principalmente para grandes corpos d'água, já que o número total de elementos é aumentado por um fator de 4.
4. Refinamento por profundidade/gradiente: consiste em estabelecer uma função, linear ou não, que governará o tamanho dos elementos em função da profundidade. Útil para situações onde um efeito hidrodinâmico é altamente dependente da profundidade da coluna d'água, como propagação de ondas.

As malhas projetadas foram refinadas com os métodos 1 e 2, sendo o método 2 a segmentação do Lago em três regiões, como discutido anteriormente, estabelecendo polígonos com limite de área para as células. O método 1 foi adotado na região da garganta, para se garantir um detalhamento melhor das células dos contornos.

Devido à alta exigência computacional do modelo, das diversas malhas desenvolvidas, só duas foram utilizadas efetivamente para as simulações: uma mais esparsa, sem detalhamento do contorno físico com vértices mais distribuídos e sem refinamento na seção da garganta do Lago; e uma mais refinada, com vértices mais próximos entre si e com maior número de elementos na área da garganta. No entanto, a malha mais esparsa foi construída de tal maneira que se pudesse incorporar as elevadas profundidades junto à barragem. Para tal, os elementos foram remanejados para que os principais nós dos elementos se alinhassem ao centro da garganta.

As malhas depois de criadas, suavizadas, analisadas e corrigidas foram exportadas em formato .mesh para a utilização do modelo.

#### 4.2.1.2 Base de dados

O MIKE opera com uma arquitetura própria desenvolvida pela DHI para armazenar, operar, gerenciar e tratar facilmente os dados de entrada necessário para a configuração dos modelos. Os dados são armazenados em formato “dfs” (*Data File System*), que abrangem desde séries temporais adimensionais até *grids* bi e tridimensionais de resolução desejada. A Tabela 4.3 descreve resumidamente as características de cada formato (DHI, 2020).

Os dados hidrológicos e meteorológicos foram transformados em séries temporais ao formato .dfs0 para serem inseridos como dados de entrada. A configuração geral do formato .dfs0 consiste na escolha do período inicial e final da série histórica, o número de passos de tempo, a especificação de cada passo (dias, minutos, horas e segundos), o tipo da variável e o tipo do eixo das abscissas.

Tabela 4.3 – Descrição dos tipos de formato que a plataforma MIKE adota para a configuração dos modelos

<b>Formato</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Descrição</b>
<b>.dfs0</b>	Séries temporais adimensionais	Formato adequado para o armazenamento de séries históricas. No entanto, são constantes ao longo do domínio
<b>.dfs1</b>	Séries de perfil 1D	Armazenamento de dados temporais que variam unicamente em uma direção
<b>.dfs2/.dfs3</b>	Grids 2D e 3D	Grid retangular onde cada pixel possui informações 2D e 3D, pode se definir valores à cada pixel.
<b>.dsfu</b>	Dados não estruturados	Formato que permite armazenamento de dados 2D e 3D atrelado aos nós da malha
<b>.mesh</b>	Dados não estruturados/malha	Formato próprio para as malhas criadas

Podem ser definidos cinco tipos de eixo:

- Eixo com calendário equidistante: É definido um período inicial e final com passo de tempo regular, próprio para dados com frequência histórica regular;
- Eixo equidistante relativo: define-se o passo de tempo, mas não é definido um período inicial;
- Eixo com calendário não-equidistante: Define-se o período inicial da série e a quantidade de passos, mas a configuração do passo deve ser definida manualmente. Ideal para dados com coleta irregulares, onde que o próprio

programa interpola automaticamente os valores entre uma medida e outra (exemplo: se uma coleta for feita no dia 01, a segunda no dia 03 e a terceira no dia 06, o programa interpolará linearmente os valores para os dias intermediários);

- Eixo não-equidistante relativo: Similar ao eixo equidistante relativo, mas não possui o passo de tempo regular, devendo ser especificado pelo usuário;
- Eixo de item relativo: Define-se dados que não variem com o tempo. O primeiro item especificado é usado como variáveis do eixo X cujo valores serão plotados relacionados com o item especificado.

Para os dados de vazão, o passo adotado foi de 1 dia, já que as leituras são realizadas diariamente. Para os dados climatológicos, o passo foi adotado como horário, e assim sucessivamente. Alguns dados apresentavam medidas com frequências irregulares, como os dados de evaporação média com frequência é mensal e a visibilidade do céu, que é medida pela estação convencional de Brasília que efetua coletas as 0h-12h-18h. Os dados de evaporação providos por Nunes (2021) foram transformados para o padrão de entrada do MIKE de mm/d.

Deve-se especificar também a categoria da variável e a unidade correspondente no campo *Type* e *Unit*, respectivamente, para que o programa possa entender o dado e utilizá-la nas equações adequadas, como por exemplo, dados de radiação devem ser especificados como *Heat Flux* e a unidade [kW/m<sup>2</sup>], vazão como *Discharge* [m<sup>3</sup>/s] e assim sucessivamente.

Para dados que possuam variabilidade espacial, como as condições iniciais, foram preparados dados .dfs0 a partir da malha gerada, por se tratar de um formato que incorpora as informações bi e dimensionais do Lago junto com as informações topológica da malha,. A Tabela 4.4 resume a configuração utilizada para cada tipo de dado.

Importante observar que a adoção de dados .dfs0 para dados como precipitação, evaporação e condições de contorno parte de uma premissa simplificadora que os dados são constantes para todo o domínio. Poderia-se, por exemplo, incorporar os diversos dados das séries históricas das estações pluviométricas próximas ao Lago e preparar um arquivo .dfs0 ou .dfs2 com dados distribuídos espacialmente, conferindo resultados mais acurados.

## 4.2.2 Construção do Módulo Hidrodinâmico

O MIKE 3 Flow Model FM é acessado pela interface MIKE Zero e nela inserimos todos os dados do modelo e parâmetros necessários. Possui uma interface amigável e intuitiva, organizada de maneira lógica todos os processos e subprocessos necessários.

A primeira etapa configura em definir o domínio, estabelecer a discretização vertical e horizontal, nomear as condições de contorno e definir as configurações do tempo de simulação, como período da simulação e o intervalo do passo de tempo. Por último, escolhe-se o módulo, que para este caso, é o *Hydrodynamic* – HD.

Ao selecionar o módulo desejado, abre-se uma ramificação de configurações para se definir as forçantes e as condições de contorno e condições iniciais. As principais etapas consistem em:

- Estabelecer quais equações serão utilizadas, calculadas e solucionadas pelo modelo;
- Configurar as forçantes;
- Configurar as condições de contorno e as condições iniciais;

Todo o processo da construção do módulo hidrodinâmico é esquematizado de maneira simplificada na Tabela 4.5.

### 4.2.2.1 Definição do período de simulação

Liporoni (2012) ao realizar um estudo de qualidade da água do Lago Paranoá realizou uma análise dos dados meteorológicos, das séries históricas de vazão e de temperatura dos tributários (dados de vazão, disponíveis desde 1978; de temperatura desde 2000 e meteorológicas desde 2006). Com isso estabeleceu o melhor período de simulação a partir da maior disponibilidade de dados, a partir de 10/07/2007.

Para o propósito desse trabalho, a modelagem foi compreendida entre dois períodos de ciclos anuais, com cada uma cobrindo uma etapa específica:

- ❖ Período de aquecimento do modelo: 18/06/2007 a 17/06/2008;
- ❖ Calibração: 17/06/2008 a 17/06/2009;

A escolha da data 18/06/2007 foi em decorrência que nesta data havia sido realizada a leitura mensal de temperatura nos pontos de monitoramento de qualidade da água no Lago Paranoá; e também pela possibilidade do Lago estar em situação de mistura completa. A

escolha de simular o Lago a partir da condição de mistura completa é baseada no trabalho de Zhang, *et al.* (2020), que utilizaram o MIKE 3 para investigar a estrutura térmica de um reservatório de abastecimento de água, e relataram que simular a partir de condição de mistura completa foi eficiente para minimizar os erros na distribuição vertical de temperatura.

Tabela 4.4 – Configuração dos dados para a elaboração do banco de dados do MIKE

<b>Tipo de dado</b>	<b>Formato</b>	<b>Type</b>	<b>Unidade</b>	<b>Passo de tempo</b>	<b>Fonte do dado</b>
<b>Ventos</b>	.dfs0	Wind Velocity Wind Direction	m/s graus	1 hora	INMET
<b>Precipitação</b>	.dfs0	Precipitation Rate	mm/d	1 hora	INMET
<b>Evaporação</b>	.dfs0	Evaporation Rate	mm/d	Irregular – mensal	Nunes (2021)
<b>Vazões tributários e barragem</b>	.dfs0	Discharge	m <sup>3</sup> /s	1 dia	CAESB/Nunes (2021)
<b>Condição Inicial – Elevação do nível d'água</b>	.dfsu	Total Water Depth/Surface Elevation	m	–	Produzido pelo autor
<b>Condição Inicial - Velocidades</b>	.dfsu	U velocity V velocity W velocity	m/s	–	Produzido pelo autor
<b>Condição de Contorno – Vazões de Contribuição Direta</b>	.dfs0	Discharge	m <sup>3</sup> /s	1 dia	Nunes (2016)
<b>Radiação</b>	.dfs0	Heat Flux	Watt/m <sup>2</sup>	1 hora	INMET – Brasília A001
<b>Temperatura do Ar</b>	.dfs0	Air Temperature	° C	1 hora	INMET – Brasília A001
<b>Umidade Relativa</b>	.dfs0	Relative Humidity	%	1 hora	INMET – Brasília A001
<b>Visibilidade do Céu</b>	.dfs0	Clearness Coefficient	%	Irregular – 0h-12h-18h	INMET – Brasília 83377
<b>Condições de Contorno e Inicial - Temperatura</b>	.dfs0/.dfsu	Temperature	° C	1 dia	CAESB/Nunes (2021)
<b>Malha</b>	.mesh	Bathymetry	m	–	Produzido pelo autor

Tabela 4.5 – Construção do modelo hidrodinâmico no MIKE 3 HD (Continuação). (Adaptada: Teixeira, 2019)

<b>Grupo de dados</b>	<b>Subgrupo de Dados</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
	Mesh and Bathymetry	–	–	Arquivo .mesh
<b>Domain</b>	Vertical Mesh	Type of Mesh	$\sigma / \sigma - z$ - level	$\sigma$
		Nº de camadas	–	10
		Tipo de distribuição	m / %	Distribuída
		Nº $\Delta t$	–	262.800
		Time step interval $\Delta t$	Seg	120
<b>Time</b>	Simulation Period	Simulation start date	dd/mm/yy	18/06/07
			hh:mm:ss	00:00:00
				17/06/08
		Simulation end date	dd/mm/yy	00:00:00
			hh:mm:ss	17/06/09
				00:00:00
<b>Basic Equations</b>	Governing Equations	Shallow water equations	–	✘
		Navier-Stokes equations	–	✓
<b>Solution Technique</b>	Navier-Stokes equations	Time integration	–	Ordem superior
		Space discretization	–	Ordem superior
		Minimum $\Delta t$	seg	0.01
		Maximum $\Delta t$	seg	120
	Transport equations	Critical CFL	–	1
		Minimum $\Delta t$	seg	0.01
		Maximum $\Delta t$	seg	120
		Critical CFL	–	1
<b>Density</b>	Density Type	Reference Temperature	° C	25
		Reference Salinity	PSU	–

Tabela 4.5 – Construção do modelo hidrodinâmico no MIKE 3 HD (Continuação). (Adaptada: Teixeira, 2019)

Grupo de dados	Subgrupo de Dados	Parâmetros	Unidade	Valor	
<b>Eddy Viscosity</b>	Horizontal Eddy Viscosity	Eddy Type	k-ε	–	
			Smagorinsky	–	
	Vertical Eddy Viscosity		k-ε	–	
			Log law	–	
<b>Bed Resistance</b>	Resistance Type	Minimum Eddy viscosity	m <sup>2</sup> /s	1,8e-06	
		Maximum Eddy viscosity	m <sup>2</sup> /s	0,04	
		No bed resistance	–	✘	
		Quadratic drag coeficiente	–	✘	
		Roughness height	–	✓	
<b>Wind Forcing</b>	Wind Friction	Speed	m/s	7	
				12	
		Friction	–	0,0016	
				0,002425	
<b>Precipitation</b>		Constant in Domain	mm/d	Tabela 4.4	
<b>Evaporation</b>		Constant in Domain	mm/d	Tabela 4.4	
<b>Sources</b>	ETE SUL	Simple source	m <sup>3</sup> /s	Tabela 4.4	
	ETE NORTE	Simple source	m <sup>3</sup> /s	Tabela 4.4	
	Turbina	Simple source	m <sup>3</sup> /s	Tabela 4.4	
<b>Initial Conditions – Nível D'água e Velocidades</b>	Type	Constant	m / m/s	0	
		Spatially Varying Surface Elevation	m / m/s	Tabela 4.4	
		Spatially Varying Surface Elevation and Velocities	m / m/s	Tabela 4.4	
<b>Initial Conditions – Temperatura</b>	Type	Constant	° C	Tabela 4.4	
		Varying in Domain	° C	Tabela 4.4	
<b>Boundary Conditions – Vazões</b>	Type	Specified discharge		✘	
		Approach	Strong formulation		✓
			Weak formulation		
<b>Boundary Conditions – Temperatura</b>	Boundary Data	Varying in time	m <sup>3</sup> /s	Tabela 4.4	
	Boundary data	Varying in time, constant along boundary	° C	Tabela 4.4	

Tabela 4.5 – Construção do modelo hidrodinâmico no MIKE 3 HD (Continuação). (Adaptada: Teixeira, 2019)

Grupo de dados	Subgrupo de Dados	Parâmetros	Unidade	Valor
<b>Temperature Module</b>	Solution Technique	Time Integration	–	Ordem superior
		Space discretization	–	Ordem superior
<b>Temperature Module – Dispersion</b>	Horizontal Dispersion	No dispersion	–	–
		Scaled eddy viscosity formulation	–	1
		Dispersion coefficient formulation	–	–
	Vertical Dispersion	No dispersion	–	–
		Scaled eddy viscosity formulation	–	0,02
		Dispersion coefficient formulation	–	–
<b>Heat Exchange</b>	Latent heat	Constant in Dalton's Law		1,55
		Wind coefficient in Dalton's Law		0,75
	Sensible heat	Critical wind speed	m/s	2,7
		Transfer coefficient for heating		0,0011
		Transfer coefficient for cooling		0,005
		Critical wind speed		2,7
	Short wave radiation	Beta in Beer's law		0,3
		Light extinction coefficient	1/m	1,5
	Long wave radiation	Radiation data	W/m <sup>2</sup>	Tabela 4.4
		Formulation		Empirical
Atmospheric conditions	Air temperature	° C	Tabela 4.4	
	Relative humidity	%	Tabela 4.4	
	Clearness coefficient	%	Tabela 4.4	

#### 4.2.2.2 Configuração da estrutura vertical da malha

Como já discutido, no modelo MIKE 3 o eixo vertical pode ser discretizado de forma estruturada através da transformação de coordenada sigma ( $\sigma$ ) ou combinação  $\sigma+z$ -level, onde que, na configuração z-level a profundidade é definida pela coordenada cartesiana z e discretizada de acordo com o número especificado de camadas e a espessura de cada. A combinação  $\sigma+z$ -level estabelece que, a partir da superfície livre até uma profundidade especificada, a coluna d'água é segmentada pela transformação  $\sigma$  e a profundidade do restante das camadas é definido pela coordenada z.

Para a coordenada  $\sigma$  pode-se especificar a espessura das camadas, se serão equidistantes, variáveis definidas por uma função, ou com espessuras definidas manualmente.

Para a proposta do projeto foi adotado como discretização da malha vertical a transformação  $\sigma$ , com 10 camadas verticais e uma distribuição de camadas de acordo com uma função variável estabelecida como padrão do modelo. A motivação dessa escolha se deve ao fato dessa distribuição refinar mais a região da superfície e de fundo, com elementos do centrais mais distribuídos, aumentando assim, a eficiência computacional.

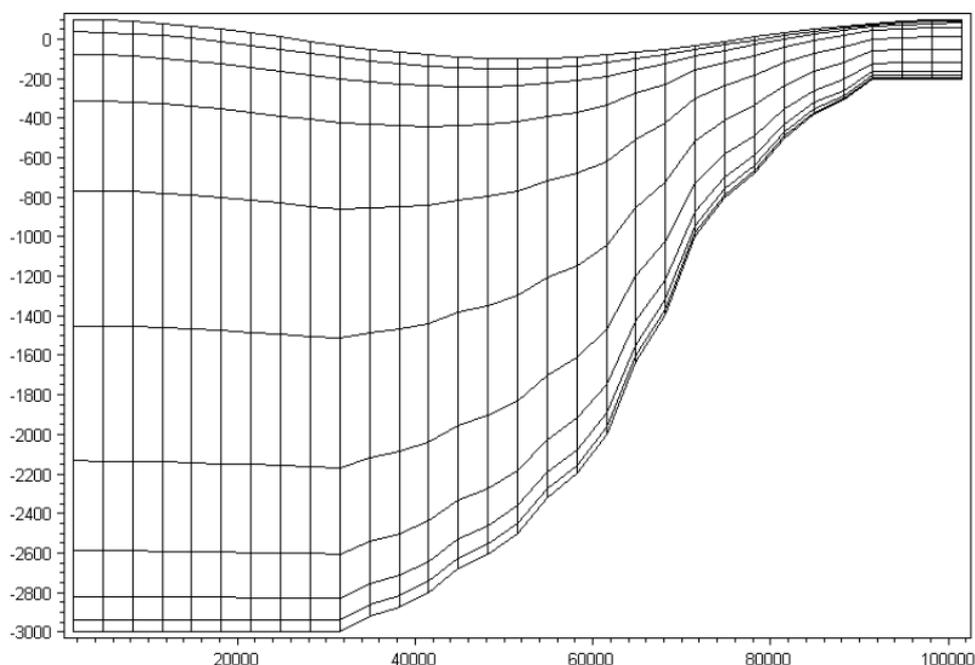


Figura 4.6 – Representação da distribuição vertical adotando a distribuição variável.

(Fonte: MIKE Powered by DHI(d))

No entanto, é relatado na literatura (Mellor *et al.* 1998 *apud* Ji, 2008) e no próprio manual que a adoção da coordenada sigma em sistemas hídricos com declividades muito acentuadas podem produzir erros significativos nos gradientes de pressão e nos termos advectivos e de mistura, levando a velocidades não realísticas, com padrões de circulação espúrios.

A utilização de z-level permite a realização de cálculos simples dos gradientes de pressão horizontal, advecção e mistura, embora não sendo capaz de representar o leito do corpo hídrico adequadamente, levando a velocidades de fundo não realísticas. Devido a esses cálculos mais simples, a combinação de coordenadas pode levar à simulação mais rápidas, decorrente do aumento da eficiência computacional, como relatado por Li *et al.* (2018), que utilizaram a combinação  $\sigma$ +z-level para modelar um reservatório profundo localizado na China.

Para o presente trabalho também foram elaborados modelos com a combinação  $\sigma$  +z-level, para que se pudesse avaliar os resultados de ambas as maneiras. No entanto, devido à complexidade da configuração desse sistema combinado, exigência computacional das simulações, e o tempo limitado para a utilização de tais malhas, não foi possível fazer essa verificação.

#### 4.2.2.3 Configuração do método de resolução das EDPs

As equações governantes para as equações de momento e continuidade escolhidas foram as equações de Navier-Stokes, como já discutido na Fundamentação Teórica. Para essa escolha, o modelo estabelece automaticamente que a discretização espacial e a integração temporal sejam feitas por esquematizações de segunda ordem.

O cômputo dos processos de salinidade e temperatura no modelo são realizados através do solucionamento das equações de transporte. Essas equações podem ser resolvidas numericamente tanto por equações de baixa quanto de ordem superior. Para melhor simulação da temperatura, foram escolhidas esquematizações de ordem superior.

Quanto ao intervalo do passo de tempo deve-se definir entre um valor mínimo e máximo em respeito a um número de CFL crítico, não devendo ultrapassar de 1. Adicionalmente, deve ser observado que o passo de tempo escolhido no grupo de dados *Time* não define o  $\Delta t$  utilizado na resolução numérica das equações, mas sim o passo de tempo geral (*Overall*) onde todos os processos serão sincronizados.

Para a integração temporal, o MIKE adota  $\Delta t$  dinâmicos tanto para as equações hidrodinâmicas (*Hydrodynamic*) –  $\Delta t_{HD}$ , quanto para as equações de transporte (*Advection-dispersion*) –  $\Delta t_{AD}$ . Essa esquematização é apresentada na Figura 4.7.

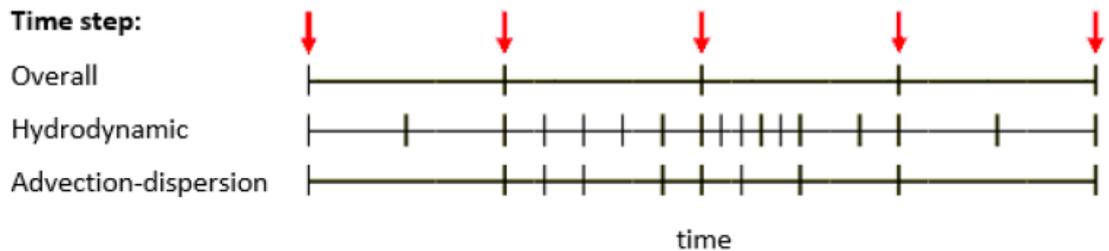


Figura 4.7 – Procedimento de definição do  $\Delta t_{HD}$  e  $\Delta t_{AD}$  empregado pelo MIKE 3 FM. (Fonte: MIKE Powered by DHI(e))

No geral, o  $\Delta t_{HD}$  é definido a partir do CFL crítico, da profundidade da célula do domínio, do comprimento do elemento e das magnitudes das componentes  $u$  e  $v$  de velocidade do escoamento. Como já mencionado no item 4.2.1.1 (p. 54), o  $\Delta t_{HD}$  é definido a partir da célula mais restritiva da malha.

Para o parâmetro de estabilidade CFL (Courant-Fredrichs-Lewy) o modelo recomenda valores 0,8 com um limite máximo de 1; quanto menor o valor de CFL, mais restritivo é a solução, incorrendo a maiores tempos de simulação. Para o trabalho foi adotado CFL=1 para cálculos mais rápidos. Para as malhas adotadas, o  $\Delta t_{HD}$  variavam de 2,18s para malhas mais finas a 4,14s para as malhas esparsas.

#### 4.2.2.4 Configuração da viscosidade turbulenta

A viscosidade turbulenta deve ser configurada para a direção horizontal e vertical. Em ambas as direções, a viscosidade pode ser especificada por quatro maneiras distintas:

Para horizontal:

- Sem turbulência;
- Constante;
- Formulação de Smagorinsky;
- k-ε.

Para vertical:

- Sem turbulência;
- Constante;
- Log law;
- k- $\epsilon$

A escolha dos métodos foi apoiada na revisão de literatura de estudos que modelaram lagos e reservatórios e nas leituras dos manuais técnicos. Para a direção vertical Soudi *et al.* (2019) & Zeinoddini *et al.* (2015) utilizaram formulação log law, enquanto que Zhang, *et al.* (2020) utilizaram o método k- $\epsilon$ . Para a direção horizontal Wei *et al.* (2013) e Zhang, *et al.* (2020) usaram a formulação de Smagorinsky. Dessa maneira, foram escolhidos os métodos de Smagorinsky e k- $\epsilon$ , para a direção horizontal, enquanto que, para a direção vertical foram escolhidos os métodos log law e k- $\epsilon$ .

Para determinar o coeficiente de viscosidade pelo método k- $\epsilon$ , o modelo habilita o módulo de turbulência (*Turbulence Module*), no qual a viscosidade é resolvida por equações de transporte, incorrendo ao aumento considerável da complexidade dos cálculos, levando a maiores tempos de simulação.

#### 4.2.2.5 Definição das condições iniciais e de contorno

Para a especificação das condições de contorno o modelo oferece diversas possibilidades, como a especificação por velocidade, por nível d'água, vazão, curva chave e etc. Como as condições de contorno são as vazões dos tributários, da contribuição direta e da defluência da barragem, o tipo de condição de contorno foi definido como descarga específica (*Specified discharge*). Para essa especificação, pode-se adotar um valor constante de vazão, onde o valor positivo se refere a um fluxo positivo sobre o volume de controle, e negativo, o inverso. Todas as condições de contorno foram definidas como descargas específicas variando no tempo, onde foi necessário inserir um arquivo no formato .dfs0 (Tabela 4.4 (p.62)). A “abordagem” do método (*Approach*) pode ser escolhida entre *Strong formulation* e *Weak formulation*. Resultados mais acurados foram obtidas com o método *Strong formulation*, conseqüentemente o escolhido para as condições de contorno.

O método de interpolação e o tipo do perfil vertical foram definidos em linear e logarítmico, respectivamente, sem alterações significativas nas simulações.

As condições iniciais do modelo se referem ao estado inicial do corpo hídrico no primeiro passo de tempo da simulação, sendo importantes para a correta solução do modelo. Para o objetivo do trabalho foram especificadas três condições iniciais: de elevação do nível d'água/profundidade da coluna d'água; das componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  da velocidade e da temperatura. Para essas três, pode-se especificar valores constantes sobre todo o domínio ou especificar arquivos .dfs2/.dfs3/.dfsu (Tabela 4.3) que contenham as informações de condição inicial ao longo de todo o domínio.

A configuração das condições iniciais para cada período de simulação pode ser vista na Tabela 4.6.

Para a condição inicial do Ciclo 1 (aquecimento), a elevação do nível d'água e velocidades foram definidas como 0 m e 0 m/s; para a temperatura, um valor de 22 °C foi definido.

Para o restante das simulações foi adotado como condição inicial o resultado da simulação anterior, com exceção dos dados de temperatura.

Pelo fato do modelo não estar calibrado, apresentava resultados anômalos de temperatura, inapropriados para serem utilizados como condição inicial da etapa seguinte, com o risco da propagação do erro.

Portanto, para o Ciclo 2 (calibração) foi preparado um arquivo utilizando os dados de temperatura dos cinco pontos de monitoramento de qualidade da água, incluindo as temperaturas medidas a diferentes profundidades do ponto C (Figura 4.2).

Tabela 4.6 – Configuração das condições iniciais de cada período de simulação

Período de simulação	Etapa da modelagem	Ciclo	Condição Inicial		
			Elevação do nível d'água (m)	Componentes $u$ , $v$ , $w$ (m/s)	Temperatura (° C)
18/06/07 17/06/08	Aquecimento	1	0	0	22
17/06/08 17/06/09	Calibração	2	Final do Ciclo 1	Final do Ciclo 1	Dados monitoramento QA do Lago Paranoá (arquivo .dfsu)

Por fim, esses valores foram interpolados para toda a extensão do domínio. No final o arquivo foi exportado com o formato .dfsu para ser inserido como condição inicial.

#### 4.2.2.6 Configuração do módulo de temperatura

Para a configuração do módulo de temperatura, deve-se especificar a técnica de solução das equações de transporte e as constantes de dispersão. Para a técnica de solução foi escolhida como de ordem superior com os parâmetros definidos proporcionais à viscosidade turbulenta, com as constantes de 1 e 0.01, na direção horizontal e vertical, respectivamente.

#### 4.2.2.7 Configuração das forçantes meteorológicas

As forçantes configuradas foram o Vento, Precipitação, Evaporação, e as demais variáveis climatológicas no Grupo *Heat Exchange* (Tabela 4.5). Todos esses dados foram especificados como variando no tempo e constante sobre o domínio; sendo inseridos arquivos .dfs0 devidamente configurados (Tabela 4.4). Para o vento, é possível especificar se o coeficiente de arrasto é linear ou se segue uma função linear da velocidade. Para a evaporação, o modelo permite o cômputo da evaporação ao longo do domínio, caso não se disponha dos dados de evaporação. Esse cálculo é feito pelas equações de calor latente.

Para as variáveis do grupo *Heat Exchange*, os parâmetros das equações de calor sensível e latente foram adotados valores padrão do modelo, sendo necessários calibrá-los posteriormente, enquanto que, para a estimativa da radiação de onda longa emitida pelo Lago, o modelo adota uma formulação empírica.

Para configuração da radiação de onda curta, é necessário especificar os seguintes parâmetros:

- ❖ Beta da lei de Lambert-Beer ( $\beta$ ): parâmetro que define a fração da radiação de onda curta líquida que é absorvida pela superfície.
- ❖ Coeficiente de extinção de luz ( $\lambda$ ): a absorção da radiação na coluna d'água decai exponencialmente em função da distância da superfície da água até o fundo. Valor adotado.
- ❖ Tipo de absorção na coluna d'água: possui duas opções, *Normalized* e *Not normalized*; quando escolhido *Normalized* a radiação de onda curta absorvida na coluna d'água é multiplicada por um fator  $(1-\beta)$ . Quando *Not normalized* é escolhida, somente uma parte dessa radiação é absorvida na coluna d'água, a depender da profundidade. A parte restante é assumida como sendo absorvida pelo leito.

## **4.3 SIMULAÇÃO**

Com o modelo configurado, pôde-se fazer as simulações, compreendendo a fase de aquecimento e de calibração. Esta seção descreve os procedimentos adotados para ambas as etapas.

### **4.3.1 Aquecimento do Modelo**

Como discutido no item 4.2.2.5 (p.69), ao adotar como condição inicial valores de elevação e velocidade iguais a zero, faz-se necessário realizar uma série de simulações preliminares, a fim de se garantir um tempo de aquecimento necessário à estabilização do sistema (Norato & Duarte, 2011). Portanto, para o aquecimento, três simulações foram realizadas para o período de 18/06/2007 a 17/06/2008, onde a cada etapa as condições iniciais eram definidas como o resultado da simulação anterior. Após o aquecimento se deu início as simulações do período de 17/06/2008 a 17/06/2009.

### **4.3.2 Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo**

#### **4.3.2.1 Análises de Sensibilidade**

Após o aquecimento, o modelo foi rodado por algumas vezes variando alguns parâmetros, a fim de se identificar quais eram os mais influentes para os resultados de temperatura para a posterior calibração. A escolha dos parâmetros para a análise foi feita através de leitura da bibliografia (Zhang, *et al.*, 2020; Liporoni, 2012; Nunes, 2021), assim como leitura do manual técnico do software (DHI, 2020) e encontram-se resumidos na Tabela 4.7. Para cada parâmetro escolhido foi analisado o resultado de variações graduais destes parâmetros. Devido aos tempos necessários para as simulações, a seleção dos parâmetros foi limitada, mas alguns parâmetros puderam ser elencados como os mais sensíveis.

Tabela 4.7 – Parâmetros escolhidos para a calibração

<b>Parâmetro</b>	<b>Grupo</b>	<b>Descrição</b>
<i>Horizontal Eddy Viscosity – HEV</i>	<i>Eddy Viscosity</i>	Parâmetro que define a dispersão horizontal da quantidade de movimento
<i>Vertical Eddy Viscosity – VEV</i>		Parâmetro que define a dispersão vertical da quantidade de movimento
<i>Wind friction – WF</i>	<i>Wind Forcing</i>	Coefficiente de arrasto do ar
<i>Horizontal Dispersion - HP</i>	<i>Temperature Module</i>	Constante de dispersão da temperatura horizontal
<i>Vertical Dispersion – VP</i>		Constante de dispersão da temperatura vertical
<i>Constant in Dalton’s law – CD</i>	<i>Latent Heat – Heat Exchange</i>	Constantes – Calor latente
<i>Wind coefficient in Dalton’s law – WD</i>		
<i>Transfer coefficient for heating – TCH</i>	<i>Sensible heat – Heat Exchange</i>	Constantes do número de Stanton
<i>Transfer coefficient for cooling - TCC</i>		
$\beta$	<i>Short Wave Radiation – Heat Exchange</i>	Coefficiente da lei de Lambert-Beer
$\lambda$		Coefficiente de extinção da luz

#### 4.3.2.2 Calibração

As variáveis de controle a serem calibradas foram o nível d’água e a temperatura do Lago. Os dados de saída para a calibração (*Outputs*) foram configurados como dados temporais (.dfs0) de elevação da superfície d’água e da temperatura, nos pontos distribuídos na coluna d’água. As profundidades estipuladas neste *output* foram as mesmas das profundidades de coleta dos pontos de monitoramento (A,B,D,E – 1m; C – 1,5,10,15,20m e 1m do fundo). Para o período abordado, os dados de 5 m de profundidade do ponto C não se encontravam disponíveis, sendo utilizado, portanto, as leituras das profundidades 1, 10,15,20 m e a 1 m do fundo.

As localizações desses *outputs* foram selecionadas no domínio do modelo, na posição geográfica dos pontos correspondentes ao monitoramento de qualidade da água da CAESB, e medição da cota d’água, monitorado pela CEB (Figura 4.8).

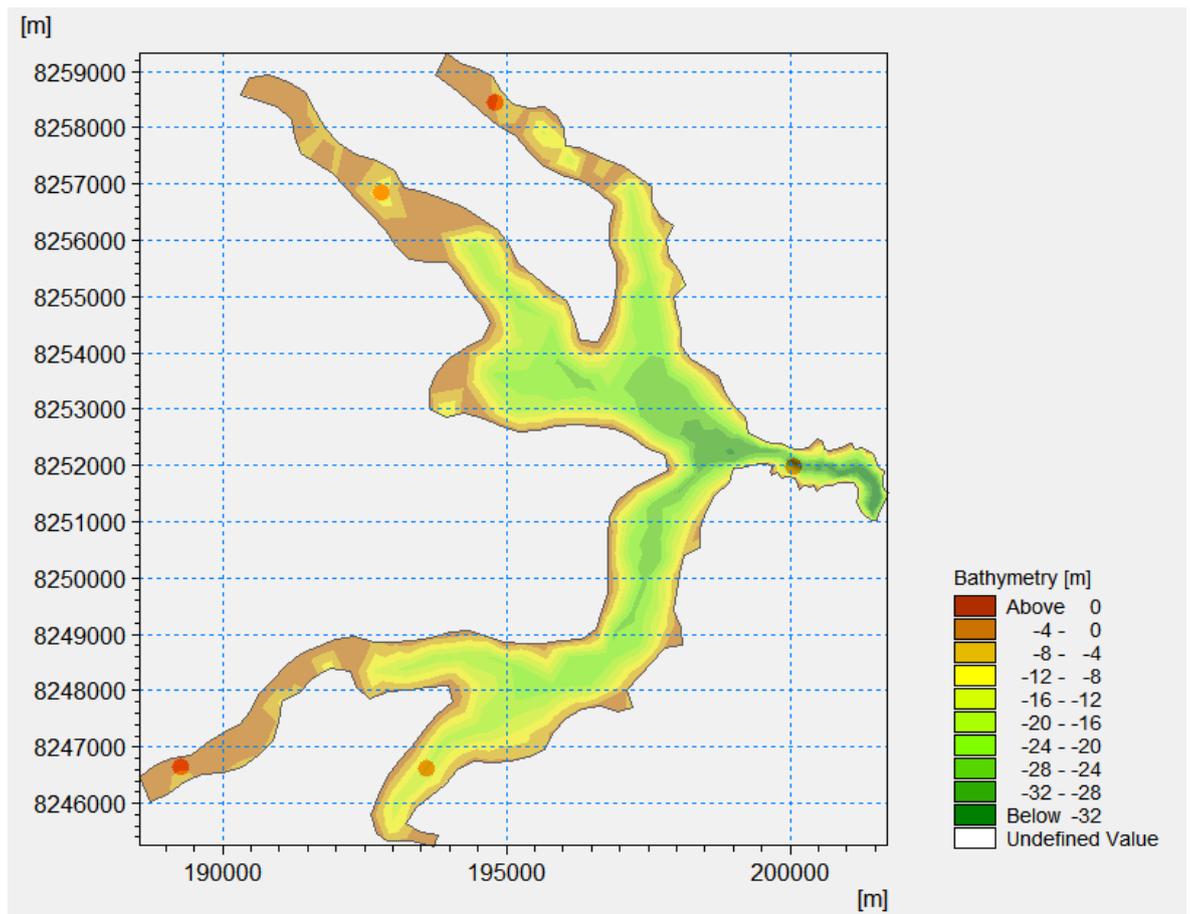


Figura 4.8 – Localização geográfica dos *outputs* referentes aos cinco pontos de monitoramento de qualidade da água no modelo hidrodinâmico (Elaborada pelo autor)

Após selecionados os parâmetros, a calibração foi feita ajustando cada parâmetro de acordo com os resultados da simulação anterior. Baseado nas respostas do modelo, pôde-se escolher quais parâmetros específicos dos selecionados (Tabela 4.7) seriam ajustados a cada etapa (Tabela 4.9). A magnitude da variação de cada parâmetro, se deu por tentativa e erro. Idealmente, o processo de calibração do modelo seria realizado alterando um parâmetro por vez. No entanto, para tentar calibrar o modelo em tempo ágil, para cada etapa, dois ou mais de parâmetros eram alterados simultaneamente.

O MIKE Zero dispõe de um pacote de calibração automática (*Auto Calibration*) que permite que várias simulações sejam calculadas simultaneamente, para diferentes conjuntos de parâmetros, permitindo a otimização dos processos de análise de sensibilidade e calibração. Essa ferramenta avalia o conjunto ótimo de parâmetros e seus valores através da avaliação de performance estatística, comparando dados observados com os resultados da

simulação. Devido a restrição de tempo hábil para se aprender a utilizar e implementar essa ferramenta, ela não foi utilizada.

Para avaliar a eficiência das calibrações, os dados simulados foram confrontados com os dados observados e uma série de métodos estatísticos foram empregados para mensurar a acurácia e precisão do modelo. Os métodos podem ser vistos na Tabela 4.8

O Erro Médio EM é uma média simples da diferença entre os dados observados e os dados obtidos na simulação. Um valor diferente de zero indica que a simulação pode estar subestimada,  $EM > 0$ , ou superestimada  $EM < 0$ . No entanto, apresenta restrições quando as subestimações são compensadas pela superestimação (ou vice-versa), resultando em  $EM = 0$ , dando a falsa sensação de acurácia. Portanto, as análises foram embasadas em outras métricas complementares, como o Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Quadrático Médio (RMSE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Tabela 4.8 – Métodos estatísticos para avaliação da performance do modelo

<b>Avaliação de Performance</b>	<b>Equação</b>
<b>Erro Médio – ME</b>	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i) \quad (4.2)$
<b>Erro Médio Absoluto – MAE</b>	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  OBS_i - SIM_i  \quad (4.3)$
<b>Erro Quadrático Médio – RMSE</b>	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2} \quad (4.4)$
<b>Coeficiente de Determinação – <math>R^2</math></b>	$\frac{[\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS_i})(SIM_i - \overline{SIM_i})]^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS_i})^2 \sum_{i=1}^n (SIM_i - \overline{SIM_i})^2} \quad (4.5)$

Tabela 4.9 – Parâmetros adotados para cada calibração

Sub Grupo	Parâmetro	Controle	Calibração 1	Calibração 2	Calibração 3	Calibração 4	Calibração 5
<b>Eddy Parameters</b>	HEV	k-ε	k-ε	Smagorinsky	k-ε	k-ε	Smagorinsky
	Mínimo (m <sup>2</sup> /s)	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06
	Máximo (m <sup>2</sup> /s)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Valor	–	–	0,22	–	–	0,15
<b>Eddy Parameters</b>	<b>VEV</b>	k-ε	k-ε	Log law	k-ε	k-ε	Log law
	Mínimo (m <sup>2</sup> /s)	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06	1,8e-06
	Máximo (m <sup>2</sup> /s)	0,4	0,4	0,04	0,4	0,4	0,04
<b>Dispersion</b>	<b>WF</b>	Constant 0,001255	Linear - { Speed = 7; 0,001255 Speed = 12; 0,002425	Linear - { Speed = 7; 0,0016 Speed = 12; 0,0025	Linear - { Speed = 7; 0,0016 Speed = 12; 0,0025	Linear - { Speed = 7; 0,0016 Speed = 12; 0,0025	Linear - { Speed = 7; 0,0016 Speed = 12; 0,0025
	<b>HP</b>	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1
<b>Latent heat</b>	<b>VP</b>	0,01	0,01	0,001	1e-05	8,5e-07	0,02
	<b>CD</b>	0,5	1,2	1,55	1,55	1,55	1,55
<b>Sensible heat</b>	<b>WD</b>	0,9	0,5	0,75	0,75	0,5	0,75
	<b>TCH</b>	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011
<b>Short wave radiation</b>	<b>TCC</b>	0,0011	0,0011	0,0050	0,0043	0,0055	0,0055
	<b>β</b>	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4
	<b>λ</b>	1	1,4	1,5	1,7	2	1,5

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são discutidos e analisados os resultados obtidos a partir da metodologia adotada. Abre-se a discussão com enfoque da malha numérica e suas restrições, depois é relatado todo o procedimento de aquecimento e calibração. Para a análise da distribuição de temperatura pelo Lago é feita uma discussão acerca dos parâmetros mais relevantes para uma calibração mais bem sucedida. Por fim, é analisada a influência da resolução da malha sobre os resultados de temperatura.

### 5.1 MALHA NUMÉRICA

Seguindo a metodologia exposta no 4.2.1.1 foram criadas quatro malhas, como expostas nas Figura 5.1 a Figura 5.4. As principais características relevantes para os cálculos numéricos são apresentadas na Tabela 5.1. O ângulo mínimo foi ajustado para 26°, para todas as malhas. Os desenhos das malhas foram esboçados por inspeção visual baseado no contorno do Lago, tentando delimitar o contorno da malha rente às polilinhas do arquivo *shapefile*.

A Malha 1 (Figura 5.4) foi criada no intuito de se representar fidedignamente o Lago Paranoá, captando o máximo de detalhes possíveis. Em áreas com maior detalhamento, como a região da garganta, foi necessária uma maior quantidade de vértices. Para preparar a zona de transição, foram estabelecidos nós próximos ao fim do braço do tributário do Torto, ao sul da garganta e na entrada da garganta. Conseqüentemente, puderam ser definidos os polígonos da garganta e da zona de transição. Dessa forma, foram estabelecidos os polígonos e a área máxima dos elementos presentes. O procedimento adotado foi feito de maneira idêntica à todas as malhas.

O refinamento da Malha 1 se deu numa proporção de 1:4, onde a partir da definição da área máxima dos elementos, estabelecida em 5.000 m<sup>2</sup>, foram definidas as áreas das outras zonas. Esse escalonamento é recomendado pelo manual, de forma a garantir transições mais suaves. A Malha 1 consistiu em 1.467 elementos e com  $\Delta t_{HD}$  de 1,2 segundos.

Devido à restrição computacional de se usar a Malha 1, as demais malhas foram construídas simplificando o contorno do Lago e adotando limites de área máxima mais permissíveis, embora não tendo mais o escalonamento recomendado. Tal configuração pode ser observada na Tabela 5.1

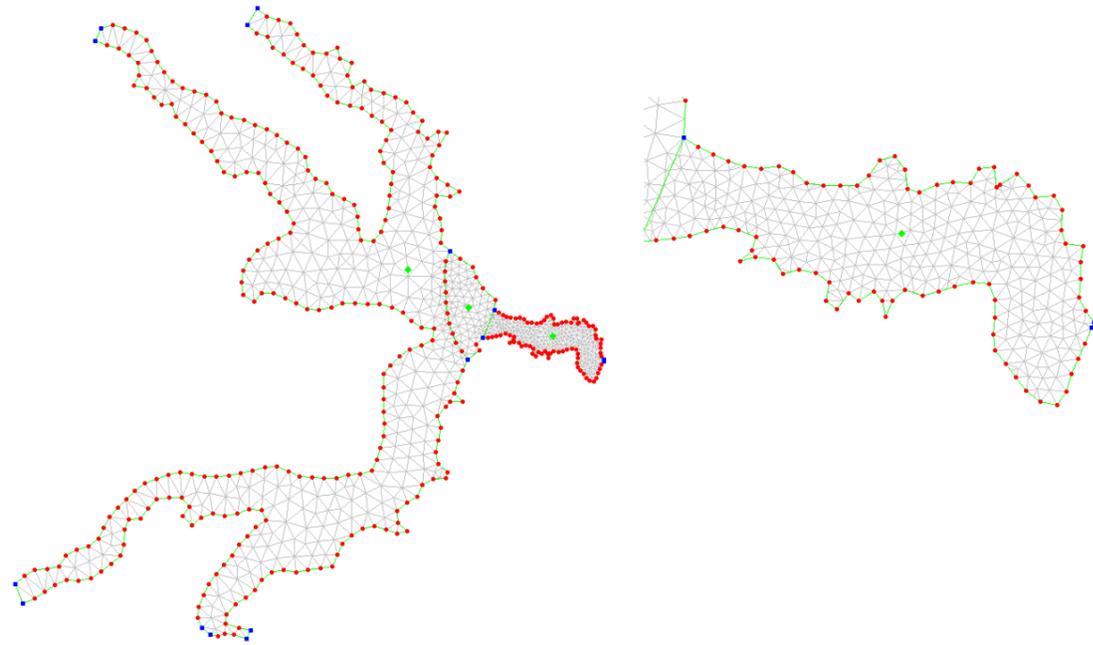


Figura 5.4 – Malha 1. Mais detalhada que incorpora os detalhes do contorno físico do Lago Paranoá.

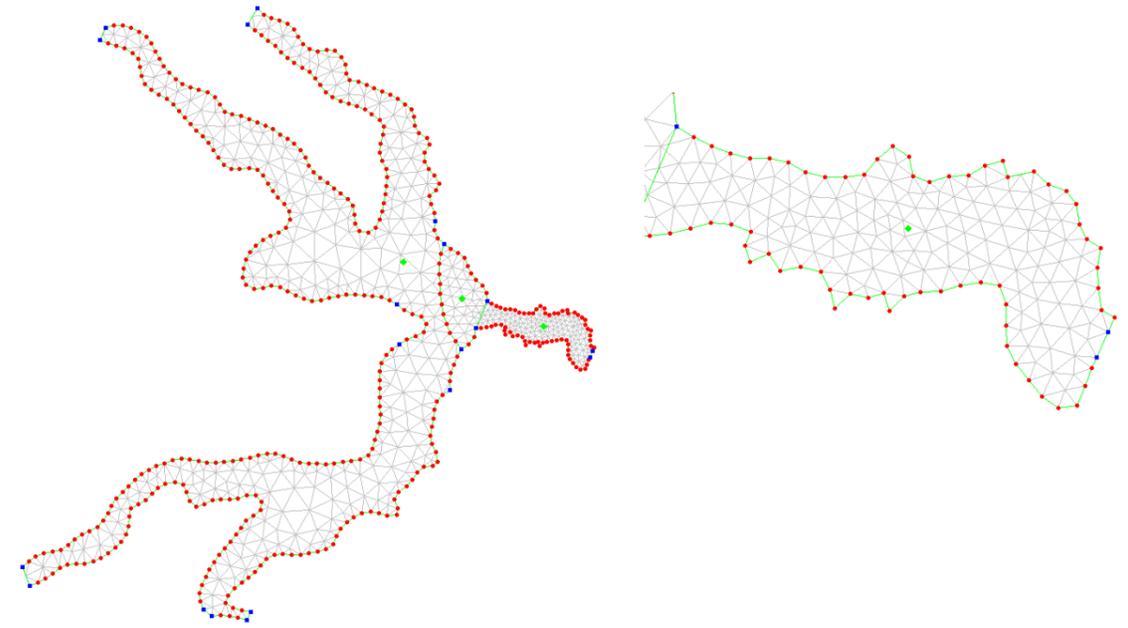


Figura 5.3 – Malha 2. Bem refinada na garganta, mas com arcos mais simplificados e suavizados.

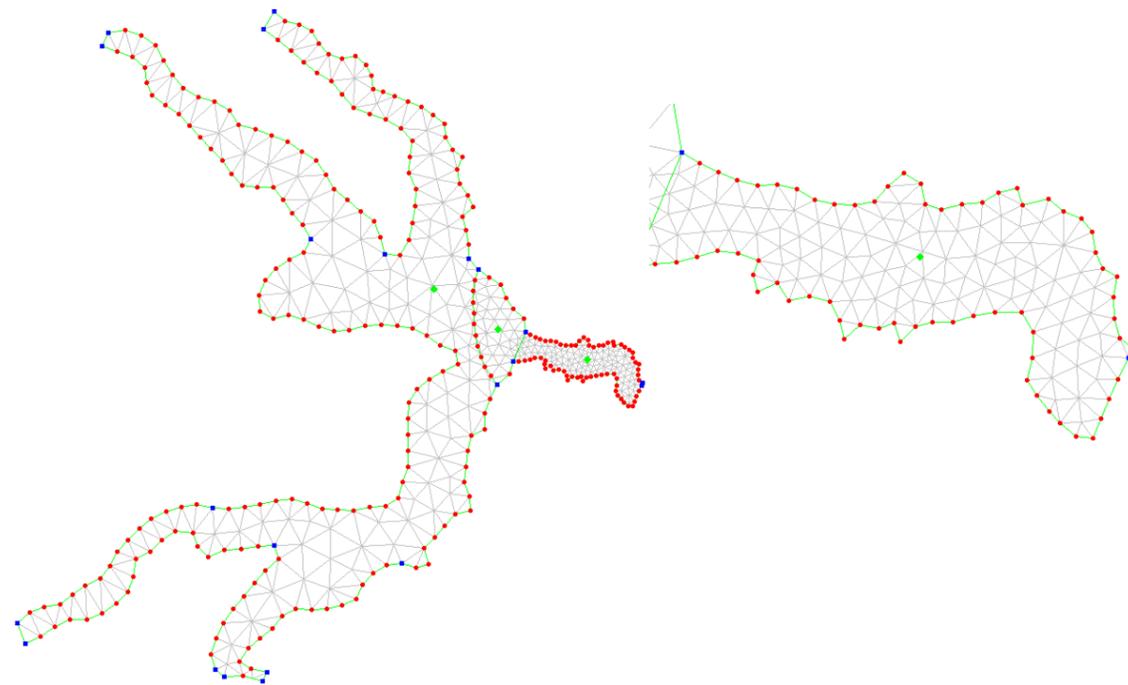


Figura 5.2 – Malha 3. Vértices no contorno mais distribuídos, porém, com a garganta detalhada. Escolhida para efeito comparativo.

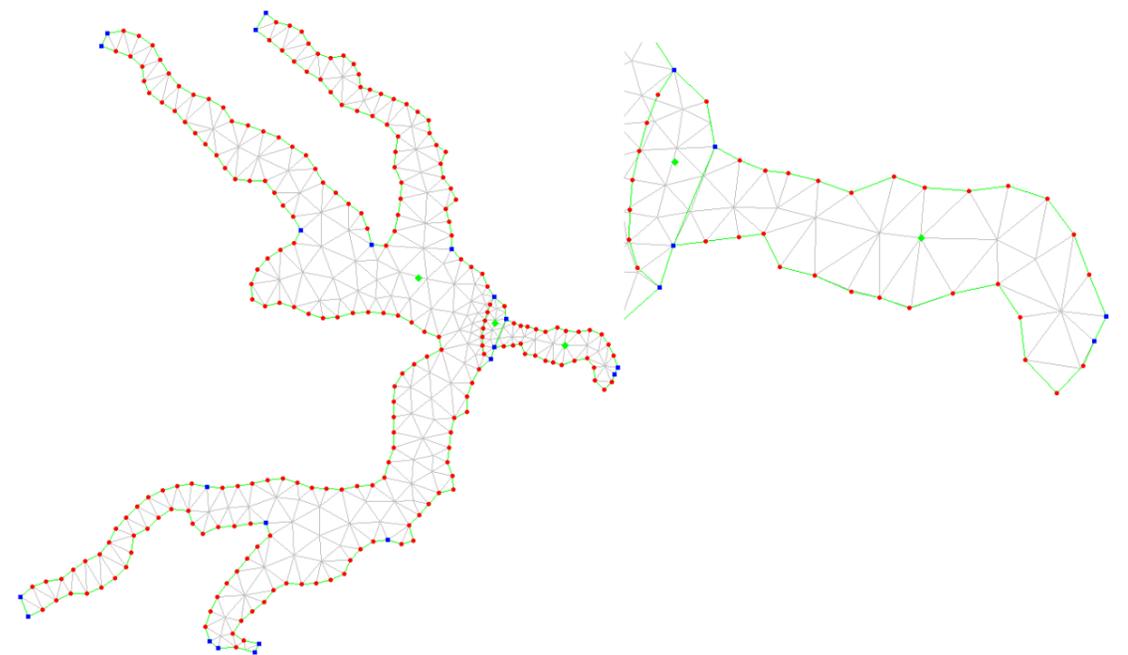


Figura 5.1 – Malha 4. Menos detalhada na garganta, com uma linha central nas regiões de maior profundidade. Selecionada para as principais simulações.

Tabela 5.1 – Características de cada malha

MALHA	Nº Elementos	$\Delta t_{HD}$ (s)	Tempo necessário (CPU Time) para simulação 1 ano** (h)	Área Máxima dos elementos (m <sup>2</sup> )		
				Zona Esparsa	Zona de Transição	Garganta
1	1.467	1,2*	72 ~ 80	80.000	20.000	5.000
2	1.174	1,48*	59 ~ 65	390.000	40.000	9.000
3	656	2,18	20 ~ 37	390.000	48.000	12.000
4	442	4,14	8 ~ 21	390.000	30.000	390.000

\*:  $\Delta t_{HD}$  não otimizado. \*\*: Valores aproximados, variável dependendo do uso da CPU

A zona da garganta na Malha 2 (Figura 5.3) também foi simplificada e adotado uma área máxima de 9.000 m<sup>2</sup>. No total a malha consistiu em 1.174 elementos com  $\Delta t_{HD}$  em 1,48 segundos.

Para as Malhas 1 e 2 os elementos não foram ajustados de maneira ótima para de obter o maior  $\Delta t_{HD}$  possível, já que, para o número elevado de elementos e o custo computacional impeditivo, haveria apenas em uma melhora pouco significativa.

A Malha 3 (Figura 5.2) foi feita espaçando mais os vértices do contorno da zona de transição, enquanto que ainda mantendo uma distribuição mais detalhada da garganta. Também foram estabelecidos limites de áreas mais permissíveis para a zona de transição e garganta, em 40.000 e 9.000 m<sup>2</sup>, respectivamente; o limite da zona esparsa não foi alterada já que um aumento desse valor não alterou o nº total de elementos. Como os elementos são gerados a partir dos vértices do contorno físico do corpo hídrico, essas mudanças resultaram numa queda drástica do número de elementos, contudo, aumentando o tamanho desses elementos, no geral.

Pôde-se assim, seguir um procedimento iterativo de otimização do  $\Delta t_{HD}$ , ajustando o tamanho das células mais restritivas individualmente até atingir um limiar no melhoramento. O critério de parada de ajuste foi quando ao melhorar uma célula, resultaria no prejuízo de outra. Portanto, para essa configuração, o  $\Delta t_{HD}$  ótimo foi de 2,18 segundos.

Para estudar o efeito do refinamento malha nos resultados de temperatura e balanço hídrico; e também para permitir tempos de simulação menores, a Malha 4 (Figura 5.1) foi construída sem o detalhamento na área da garganta e limite de área. Os elementos desta área foram manipulados de maneira que as arestas dos elementos contíguos interceptassem a região mais profunda do Lago, criando uma linha central. Para essa malha, a zona de transição também foi reduzida. Após o ajuste, o  $\Delta t_{HD}$  ótimo foi de 4,14 segundos.

Como já discutido, por ser um modelo tridimensional que resolve as equações de Navier Stokes, a exigência computacional para os cálculos numéricos é bastante elevada, como pode ser vista na Tabela 5.1, com tempos de simulação podendo passar até das 100 horas para simulação de um ano completo. Esses valores foram obtidos para um computador com as seguintes especificações:

- Processador: Intel® Core™ i5-9400 CPU @ 2.90 GHz
- RAM instalada: 8,00 GB

Esses tempos de simulação são apenas uma estimativa, já que, dependendo dos processos, dos parâmetros e das forçantes a serem calculadas, e também do uso da CPU, os tempos podem aumentar ou diminuir, como por exemplo, para duas simulações distintas usando a Malha 3 (Figura 5.2) uma simulação levou cerca de 19 horas enquanto outra, para parâmetros distintos o tempo necessário para a simulação foi de aproximadamente 34 horas.

Levando isso em consideração, a Malha 4 foi selecionada para as principais simulações de aquecimento, calibração e condição de ausência de vento, enquanto a Malha 3 foi utilizada para servir de comparativo se o efeito do refinamento na garganta produzia resultados distintos.

As condições de contorno foram criadas cortando uma pequena parcela dos tributários e estabelecido arcos que simularam as vazões afluentes. Esses arcos são delimitados pelos nós em azul nas Figura 5.4 Figura 5.1. A condição de contorno da vazão de saída da barragem foi estabelecida como um pequeno arco com comprimento próximo à largura da barragem, resultando em elementos mais restritivos. Na Malha 4 foi adotado um arco maior para representar essa condição de contorno. Essa consideração não alterou significativamente os resultados encontrados.

As condições de contorno de contribuição direta foram definidas na Malha 3 e 4. Pode-se ver nas Figura 5.2 e Figura 5.1 os nós em azul que delimitam as sub-bacias contribuintes e as áreas centrais.

Após a escolha das malhas a serem utilizadas, os dados batimétricos de resolução espacial 5x5 m foram interpoladas à malha para gerar o modelo batimétrico. O resultado pode ser visto na Figura 5.5. Apesar de ambas as malhas conseguirem representar razoavelmente o perfil batimétrico do Lago, algumas discontinuidades se mostraram presentes no momento da interpolação. O Ribeirão do Torto apresenta um certo aclive em direção à zona lacustre do Lago para ambas as malhas e o Ribeirão Bananal para a Malha 3. Pode ser visto também que a Malha 4 apresentou regiões menos profundas próximo à barragem e à zona de transição. Já na área da garganta é perceptível que a malha mais fina

conseguiu captar com mais precisão a batimetria real. Uma representação 3D do modelo batimétrico gerado pode ser vista na Figura 5.6.

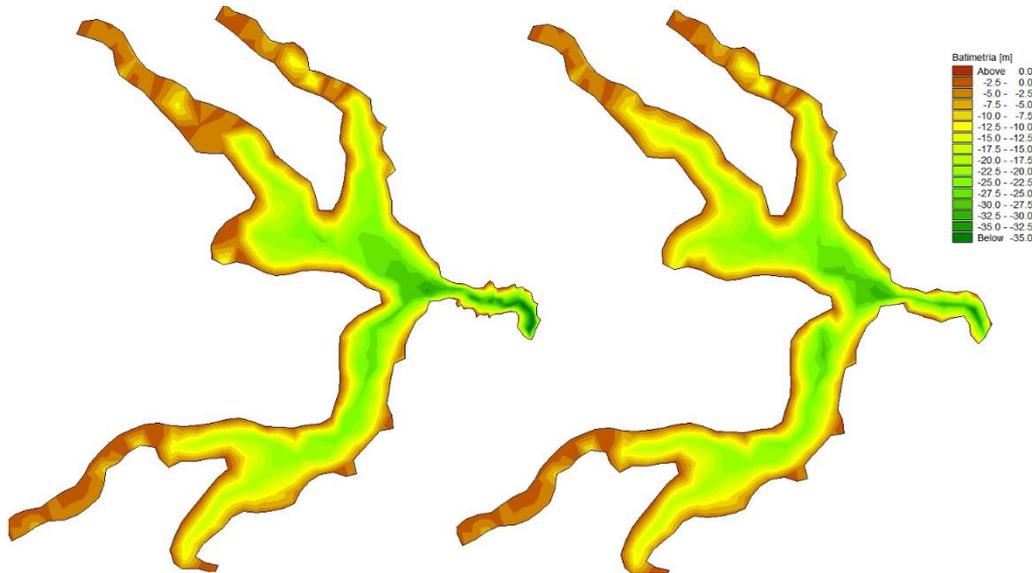


Figura 5.5 – Modelo batimétrico gerados a partir das malhas. Batimetria da esquerda gerado a partir da Malha 3. Da direita a partir da Malha 4

Essas discontinuidades nos tributários decorreram do ajuste manual dos ângulos dos elementos, pois a cada ajuste do nó do elemento, a batimetria é interpolada ao nó resultante. Pela Figura 5.5 percebe-se que a Malha 4 não incorporou fidedignamente a batimetria. Isso se deve ao fato de ser uma malha mais esparsa e com uma quantidade reduzida de elementos, o que acabou afetando o resultado final. Essa falta de precisão constituiu um limitador nos resultados, já que para o ponto C de monitoramento, a profundidade máxima interpolada foi de 21 metros e o ponto a 1 m do fundo seria de 20 m, coincidindo com o ponto de medição imediatamente acima. Dessa maneira, os valores de um metro do fundo foram obtidos de um ponto próximo, cuja profundidade é de 29 m. Vale ressaltar que, como as condições iniciais adotadas são de mistura completa, isso não deve afetar os resultados do modelo quanto a temperatura.



Figura 5.6 – Visualização 3D da Batimetria do Lago Paranoá.

## 5.2 AQUECIMENTO DO MODELO

Com o modelo configurado de acordo com o item 4.2.2 (p.61) e com o banco de dados preparado de acordo com o item 4.2.1.2 (Tabela 4.4, p.62), o modelo foi rodado por três vezes para o período de 18/06/2007 a 17/06/2008 com os parâmetros iniciais do programa. A cada término de simulação os resultados eram incorporados como condição inicial para as próximas simulações. O progresso de cada etapa pode ser visto na Figura 5.7. É notável a importância e necessidade do aquecimento prévio do modelo antes das simulações objetivas.

As análises estatísticas estão resumidas na Tabela 5.2. Para a primeira etapa do aquecimento a simulação ajustou-se razoavelmente aos dados observados, até metade de novembro de 2007 onde houve um deplecionamento rápido até início de janeiro onde o Lago começou a encher novamente. A partir desse ponto, apesar do valor subestimado, o modelo conseguiu incorporar o comportamento do reservatório.

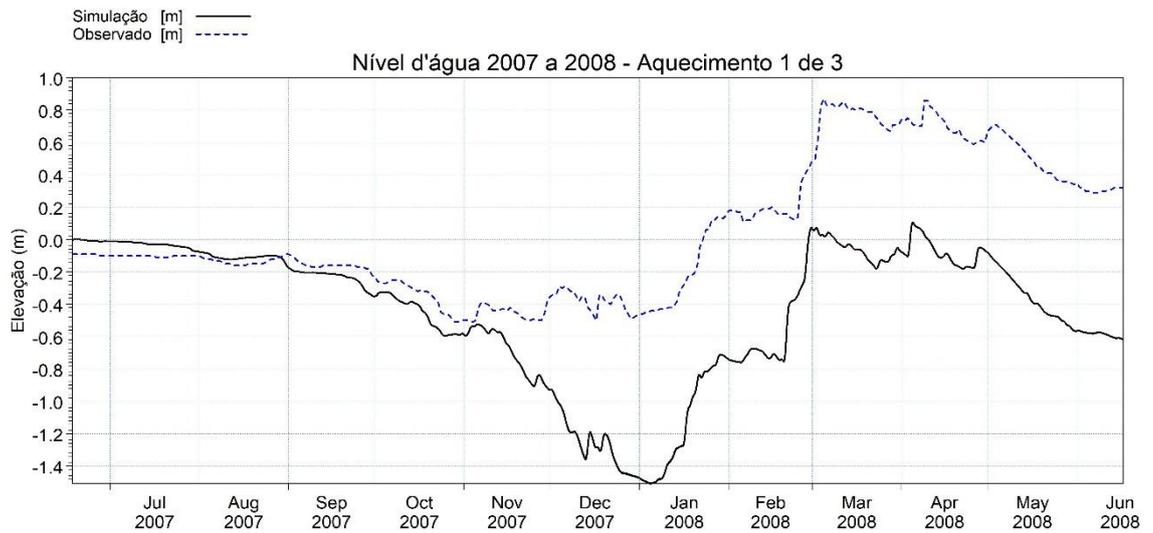


Figura 5.7 – Elevação da lâmina d'água para cada etapa do aquecimento para o período de 2007 a 2008

Tabela 5.2 – Avaliação de performance das etapas de aquecimento

<b>ETAPA AQUECIMENTO</b>	<b>ME</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	0,4899	0,5109	0,6413	0,2710
<b>2</b>	0,6042	0,6042	0,6165	0,9631
<b>3</b>	0,0858	0,1283	0,1633	0,9685

Na segunda etapa do aquecimento, o modelo obteve comportamento similar à curva real mostrado pelo aumento do R<sup>2</sup> da etapa 1 para para a etapa 2, embora apresentando uma subestimação da curva real.

Na etapa 3, o modelo já se apresentava aclimatado e representando bem a evolução do nível d'água do Lago, apresentando um bom ajuste à curva real e erros baixos.

### **5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO**

A Figura 5.8 mostra a elevação do nível d'água durante o período de calibração do modelo. No geral, o modelo conseguiu representar razoavelmente bem o comportamento volumétrico do Lago, apresentando erro médio absoluto de 15 cm (Tabela 5.3) e um coeficiente de determinação  $R^2 > 0,9$  (Figura 5.9). Durante o período inicial de julho, o modelo apresentou um deplecionamento mais acentuado que o observado, causando uma inversão nas curvas que se manteve relativamente estável até o final do período, mostrando, no geral, uma leve subestimação dos valores de nível d'água. Essa discrepância aparenta ser um erro no fechamento do balanço hídrico. Esse erro pode estar relacionado à adoção dos dados de precipitação unicamente da estação Brasília-A001, do INMET, não refletindo assim, a precipitação real incidente sobre o espelho d'água para o período de 2008 a 2009. O deplecionamento se mostrou mais acentuado a partir de abril e indo até junho, onde a diferença entre o nível observado e o simulado atingiu a máxima de 33 cm.

O procedimento inicial da calibração foi feito a partir de análises da distribuição de temperatura do Lago para o final do período aquecido. O modelo estava apresentando uma retenção de calor em toda a extensão da coluna d'água, indicando a necessidade da calibração dos parâmetros das equações de calor latente e sensível. Os parâmetros de viscosidade turbulenta, dispersão vertical, radiação solar e vento também foram calibrados. Novamente, deve-se fazer a ressalva de que, para uma calibração efetiva, apenas um parâmetro deve ser mudado por vez, e que, devido ao alto custo computacional para

simulações de um ano (Tabela 5.1), foi adotado para esse projeto, uma combinação de parâmetros a serem calibrados simultaneamente.

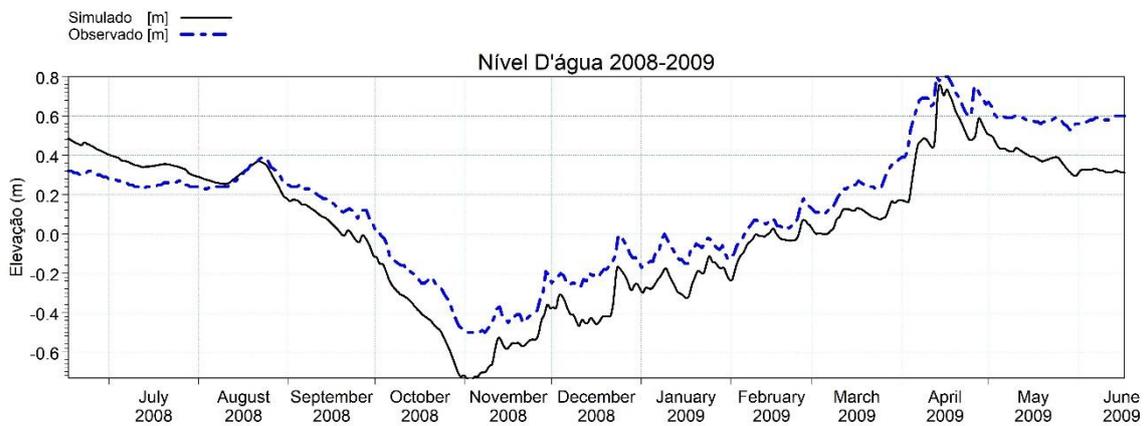


Figura 5.8 – Elevação do nível d’água observado e simulado para o ano de 2007 a 2008 para o modelo calibrado.

Tabela 5.3 – Avaliação da performance do modelo em representar a elevação do nível d’água

<b>Estatística</b>	<b>Valor</b>
<b>ME</b>	0,12
<b>MAE</b>	0,15
<b>RMSE</b>	0,16
<b>R<sup>2</sup></b>	0,91

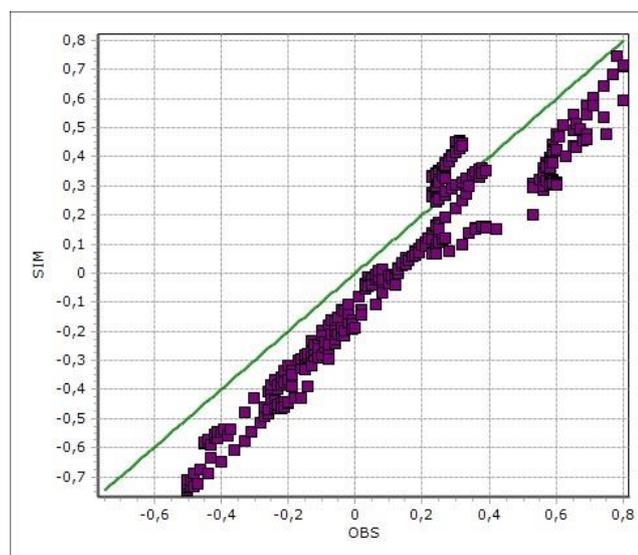


Figura 5.9 –Ajuste dos valores de elevação d’água simulados para os dados observados de 2007 a 2008.

Para lidar com o sobreaquecimento e a retenção de calor do modelo, os parâmetros **TCC** (*Transfer Coefficient for Cooling*) e **CD** (*Constant in Dalton's Law*), referentes ao calor sensível e latente (Tabela 4.7, p.73) foram ajustados (Tabela 4.9, p.76). Para as temperaturas elevadas das zonas mais profundas foi levantada a hipótese de que a radiação estivesse penetrando até as camadas mais profundas, sendo necessário ajustes a  $\beta$  e  $\lambda$  (coeficiente da lei de Lambert e coeficiente de extinção da luz, respectivamente). Já para a difusividade vertical, o parâmetro **VP** (*Vertical Dispersion*) foi estabelecido para valores baixos, a fim de limitar a transferência de calor por turbulência às camadas mais profundas. Para as calibrações 1, 3 e 4 foi adotada a formulação k- $\epsilon$  para a solução da viscosidade turbulenta. Os limites horizontais **HEV** (*Horizontal Eddy Viscosity*) e verticais **VEV** (*Vertical Eddy Viscosity*) foram definidos como padrão. Para as calibrações 2 e 5 as formulações Smagorinsky e Log law foram adotadas, com os limites de viscosidade iguais para ambos. Para essas duas calibrações os parâmetros diferentes foram **TCC**,  $\beta$  e **VP**. Os valores adotados dos coeficientes de arrasto do vento, **WF** (*Wind Friction*) foram os mesmos calibrados por Zhang *et al.* (2020). Para efeito de comparação, o resultado das calibrações 2,4 e 5 foram plotados em gráficos contra os valores observados. Os resultados das calibrações 1 e 3 foram omitidos, já que os resultados não diferiram expressivamente dos resultados da calibração 4. Os resultados das comparações podem ser vistos na Figura 5.10 junto com as análises estatísticas na Tabela 5.4.

Ao observar os gráficos da Figura 5.10 e Tabela 5.4 fica perceptível que os valores adotados dos parâmetros da calibração 4 não foram suficientes para limitar a difusividade vertical da temperatura, já que para as temperaturas mais profundas, MAE e RMSE aumentaram, indicando um distanciamento dos valores reais, ou seja, evidenciando um aumento no erro.

Isso se mostra nítido quando observado que mesmo a 20 metros abaixo da superfície d'água a temperatura permaneceu próxima a 28 °C para todo o ano, enquanto que os valores observados não passaram de 24 °C. Já os valores de R<sup>2</sup> aumentaram com a profundidade, que pode ser explicada pela menor variabilidade das temperaturas a profundidades maiores.

Era esperado que o aumento de  $\lambda$  atenuasse a absorção da radiação solar na coluna d'água, porém fatores mais minuciosos na hidrodinâmica devem estar envolvidos. Um fator que se acredita ser o principal motivo do desempenho inferior das calibrações que usaram formulação k- $\epsilon$  se comparado à calibração 2 e 5, que utilizaram Smagorinsky e Log law, é que para estes o limite máximo de **VEV** (Tabela 4.9) foi definido para valores 10 vezes menores, o que pode ter limitado a difusividade turbulenta.

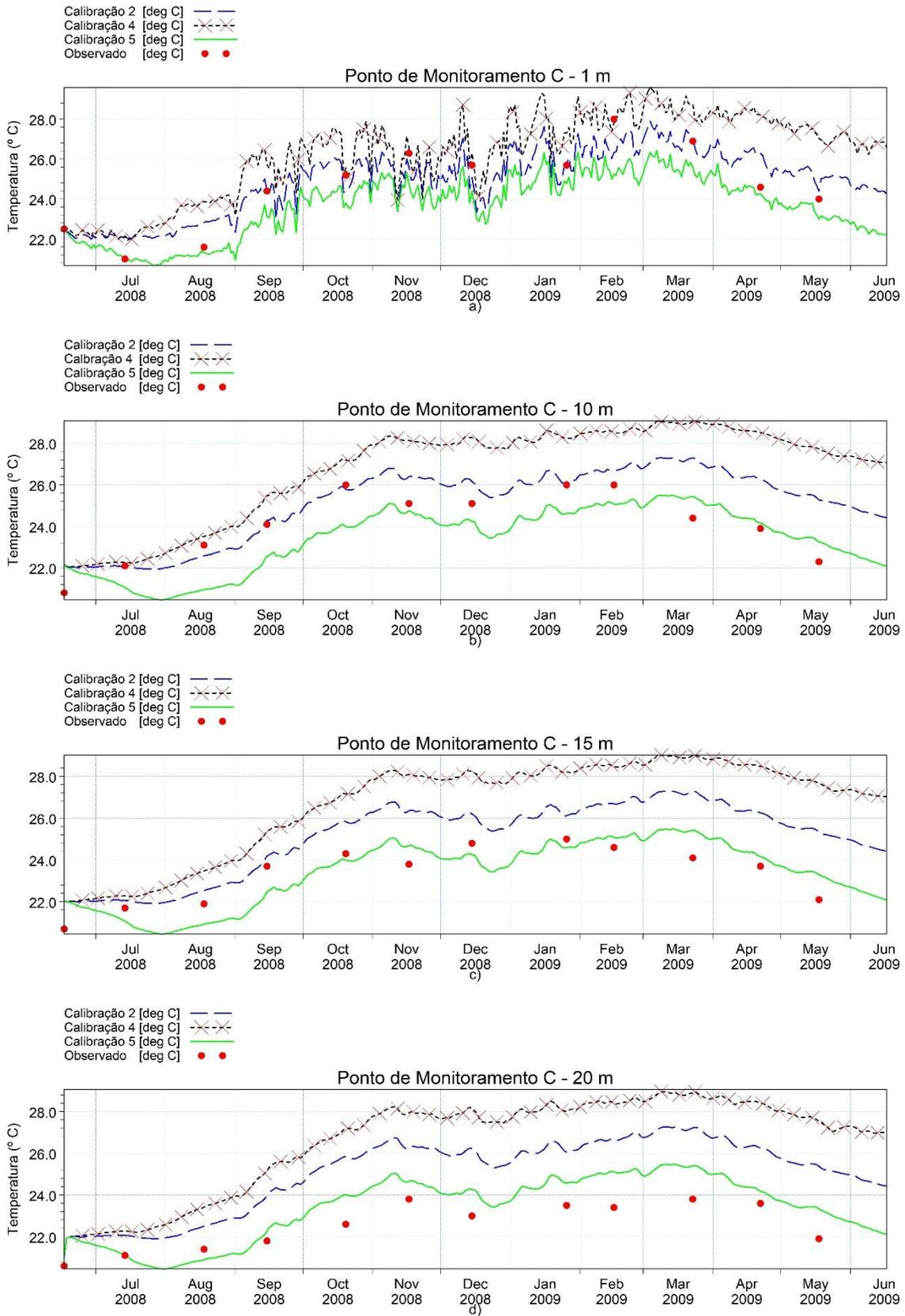


Figura 5.10 – Comparação das calibrações 2,4 e 5 para as diversas profundidades do ponto de monitoramento C.

Tabela 5.4 – Avaliação das diferentes calibrações

CALIBRAÇÃO	1 m			10 m			15			20		
	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>									
2	0,69	0,91	0,82	1,14	1,54	0,60	1,7	1,96	0,73	2,41	2,61	0,88
4	1,35	1,75	0,71	2,51	3,00	0,55	3,17	3,52	0,69	3,82	4,16	0,852
5	1,01	1,25	0,93	1,15	1,28	0,52	0,81	0,89	0,64	0,94	1,07	0,89

Ainda para a calibração 4, as elevadas temperaturas superficiais, se comparadas aos resultados das calibrações 2 e 5, podem estar relacionadas ao valor inferior de **WD**, coeficiente da equação de calor latente.

Melhores resultados foram observados para as calibrações 2 e 5 (Tabela 5.4) com os valores da calibração 2 melhores ajustados para a profundidade de 1 metro, evidenciado pelo menor valor de MAE e RMSE, enquanto que a calibração 5 parece ter tido um melhor resultado para as profundidades de 10, 15 e 20 m. A calibração 5 se ajustou evidentemente bem para profundidades de 15 m, com uma diferença média de apenas 0,81 °C apesar do valor razoável de R<sup>2</sup>. Para a profundidade de 20 m a discrepância entre a calibração 2 e 5 se torna mais evidente, com os valores da calibração 2 diferindo em média 2,41°C do valor real em contrapartida de um erro médio de apenas 0,94 °C da calibração 5.

Quando os parâmetros foram ajustados era esperado que a calibração 2 se ajustasse melhor às temperaturas profundas, já que o coeficiente de dispersão vertical **VP** era bem menor que o da calibração 5. Aparentemente, para a distribuição de temperatura o termo difusivo tem menor impacto se comparado aos termos advectivos. Avaliando os parâmetros ajustados da calibração 2 e 5, os únicos que diferem, além de **VP**, são o valor de **HEV** e **β**. **HEV** se refere à viscosidade turbulenta, relacionada aos termos advectivos, podendo ser responsável pelo menor transporte de turbulência às zonas profundas. **β** deve ter importância significativa já que para maiores valores de **β** menos luz é absorvida próximo a superfície.

No geral, das calibrações executadas, a calibração 5 se ajustou melhor aos dados, sendo portanto, a utilizada para o restante das simulações.

Para analisar a calibração para a profundidade a 1 m do fundo, teve que se obter um outro ponto cuja profundidade fosse de 29 m. O resultado é exposto pela Figura 5.11 e Tabela 5.5.

É possível ver que o modelo não conseguiu simular bem as temperaturas a essa profundidade, indicando uma superestimação das temperaturas na média de quase 2 °C, com R<sup>2</sup> de apenas 0,5. O que indica que o modelo talvez não esteja simulando adequadamente a troca de calor com o sedimento.

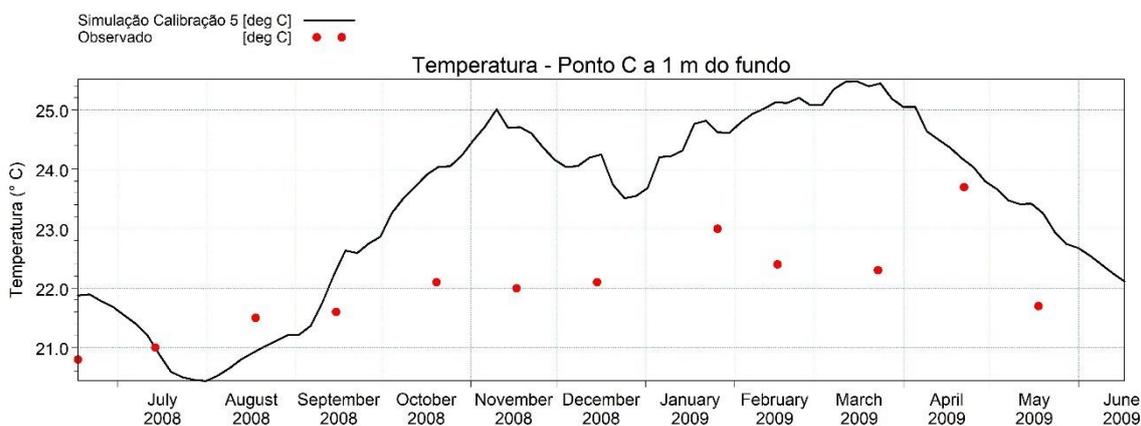


Figura 5.11 – Gráfico comparativo das temperaturas simuladas a 1 m do fundo e das temperaturas observadas.

Tabela 5.5 – Análise estatística para o ajuste da calibração 5 com os dados de temperatura a 1 m do fundo

Estatística	Valor
ME	-1,49
MAE	1,56
RMSE	1,84
R <sup>2</sup>	0,50

#### 5.4 AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA TEMPERATURA

Apesar dos dados serem calibrados ao ponto C, onde se tem as medidas de temperatura a diversas profundidade, é importante que o modelo seja capaz de representar a distribuição espacial de temperatura adequadamente. Portanto, os dados calibrados foram comparados às séries históricas de temperatura dos outros pontos de monitoramento de qualidade da água. A performance do modelo frente aos dados observados pode ser conferida na Tabela 5.6.

As curvas de temperatura ao longo do ano para os outros pontos de monitoramento podem ser vistas na Figura 5.12.

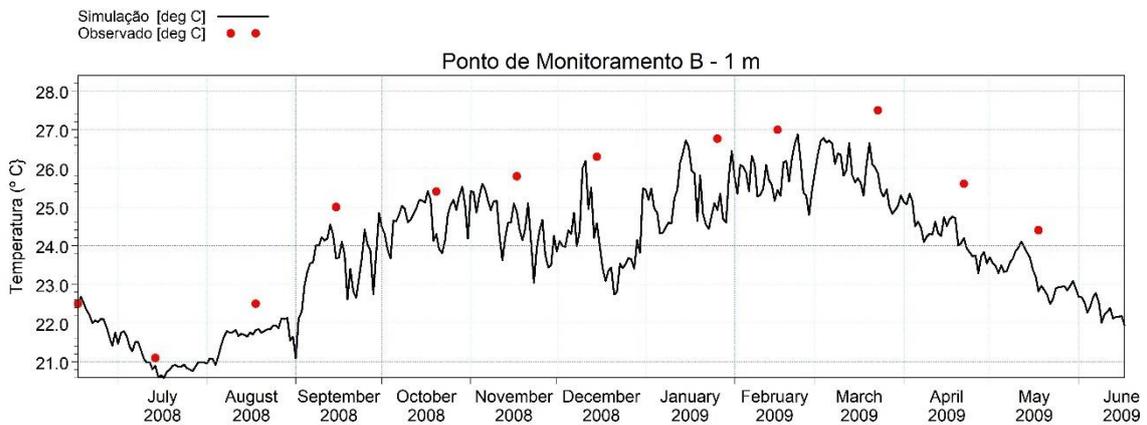
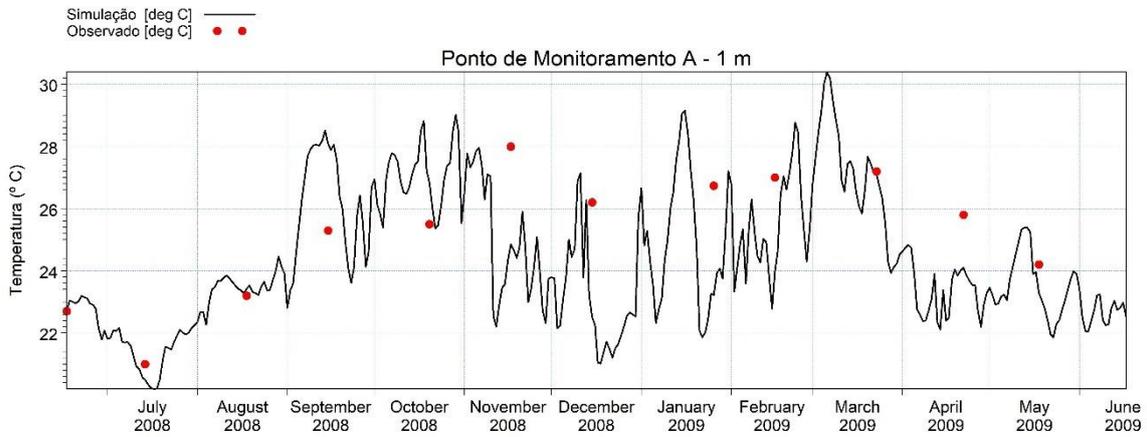


Figura 5.12 – Temperatura nos diversos pontos de monitoramento

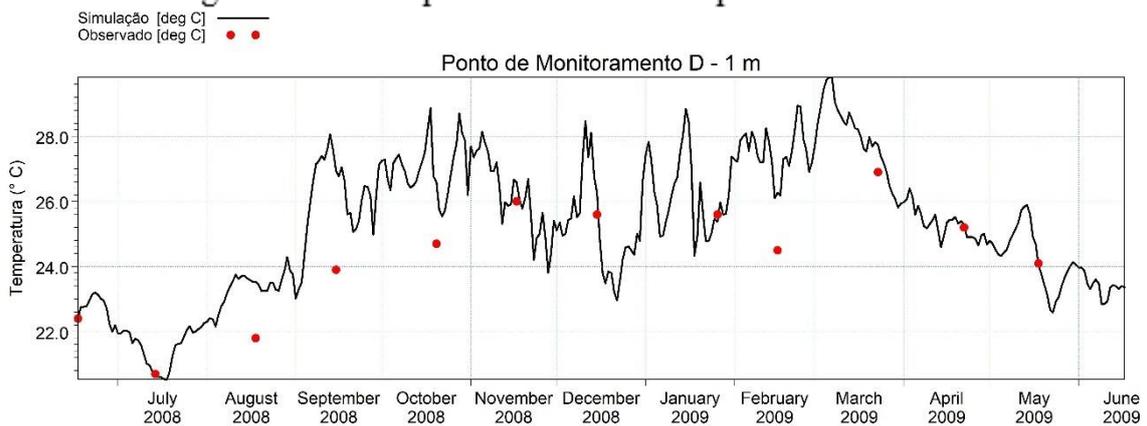


Figura 5.12 – Temperatura nos diversos pontos de monitoramento'

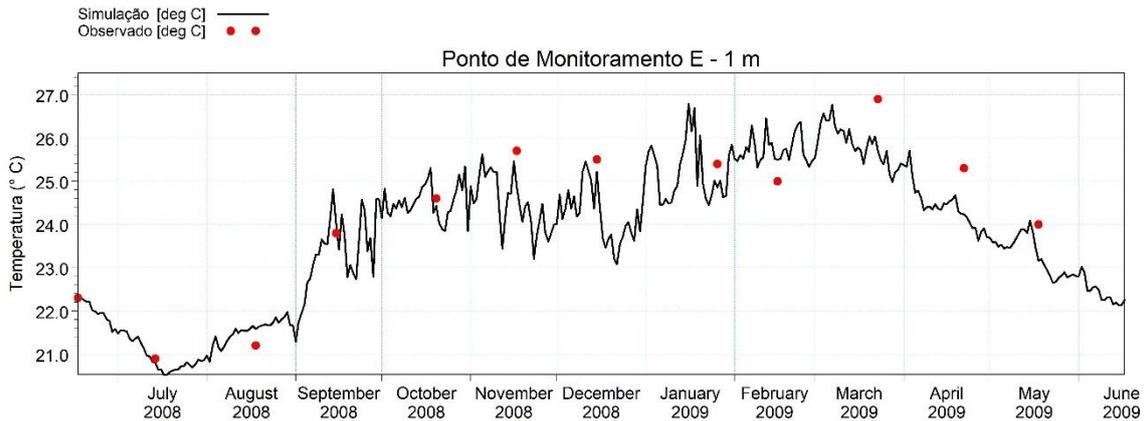


Figura 5.12 – Temperatura nos diversos pontos de monitoramento

Tabela 5.6 – Avaliação estatística do modelo calibrado para a distribuição espacial

ESTATÍSTICA	PONTO DE MONITORAMENTO			
	A	B	D	E
ME	1,02	1,16	-0,87	0,33
MAE	1,75	1,16	0,92	0,51
RMSE	2,2	1,30	1,31	0,63
R <sup>2</sup>	0,29	0,96	0,75	0,92

Para o começo da simulação até julho, para todos os pontos, o modelo consegue simular a descida gradual de temperatura decorrente do progresso do inverno. Em agosto com o aumento das temperaturas, discrepâncias entre o modelo e os dados observados começaram a aparecer. Pelos dados da Tabela 5.6, o ponto A obteve o pior índice de ajuste dentre todos, enquanto que para os outros pontos, o modelo conseguiu ajustar bem. Isso evidencia a importância dos parâmetros  $\beta$ , TCC e WD para a calibração de temperaturas superficiais. Em relação ao ponto B, é possível inferir que o modelo, para a calibração adotada, subestimou os valores de temperatura numa diferença média de 1,16 °C, com uma concordância de 0,96; indicando um bom ajuste para os dados observados. Para o ponto D, o modelo tende a superestimar (ME<0) os valores de temperatura numa magnitude 0,92 °C. O ponto E demonstrou o melhor ajuste com menores índices de erro e uma concordância aos dados observados de 0,92.

No geral, o modelo foi capaz de representar relativamente bem as temperaturas superficiais, para os dados observados nos pontos de monitoramento. Uma visualização da distribuição espacial da temperatura pode ser vista na Figura 5.13. Pela figura, observa-se o aquecimento gradual e predominante da zona fluvial, de menores profundidades, com a distribuição para a zona de transição e lacustre.

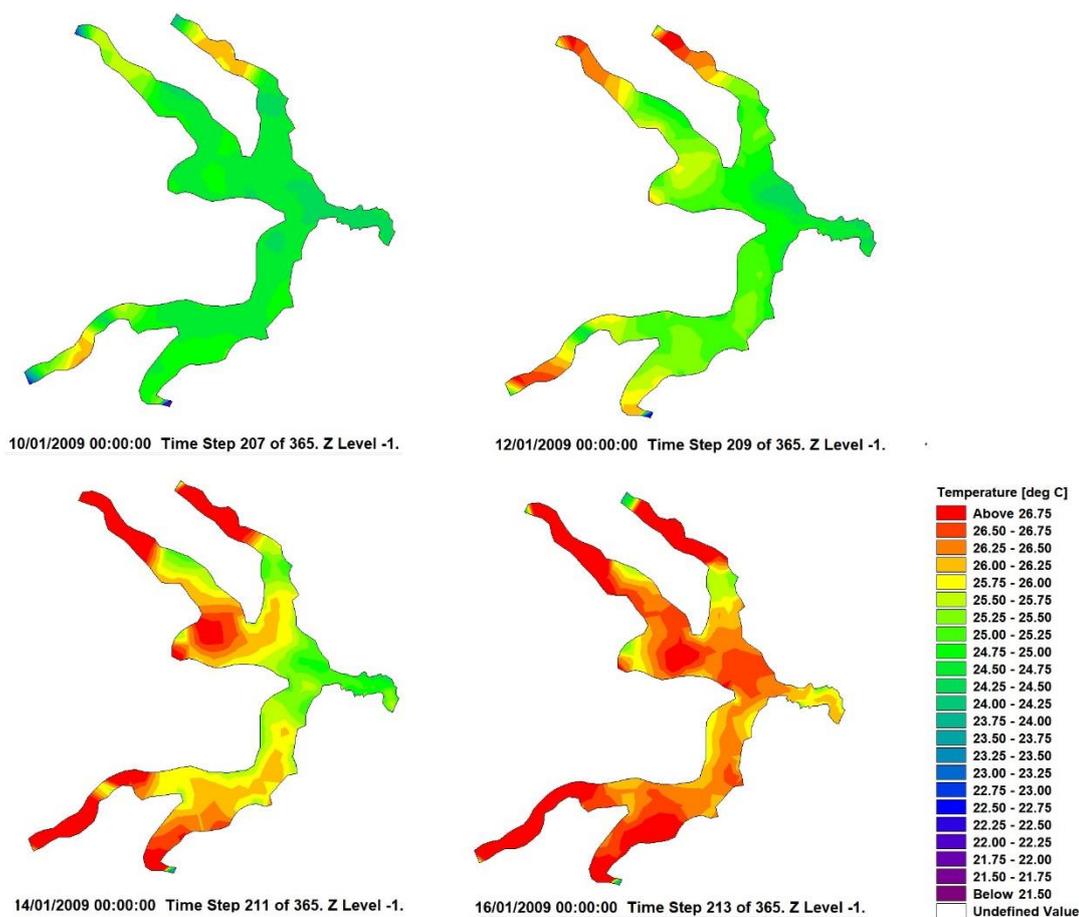


Figura 5.13 – Visualização da distribuição espacial da temperatura durante 10/01/2009 a 16/01/2009.

## 5.5 INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA E INFLUÊNCIA DO VENTO

A análise da distribuição vertical da temperatura é feita para investigar se o modelo é capaz de simular o efeito de estratificação, e junto a ela foi analisado a influência da força dos ventos nos processos hidrodinâmicos. Após o ajuste dos parâmetros, o modelo foi rodado para o ano de 17/06/2008 a 17/06/2009, em um cenário sem vento, para que se pudesse avaliar a sua influência na estratificação e mistura do reservatório.

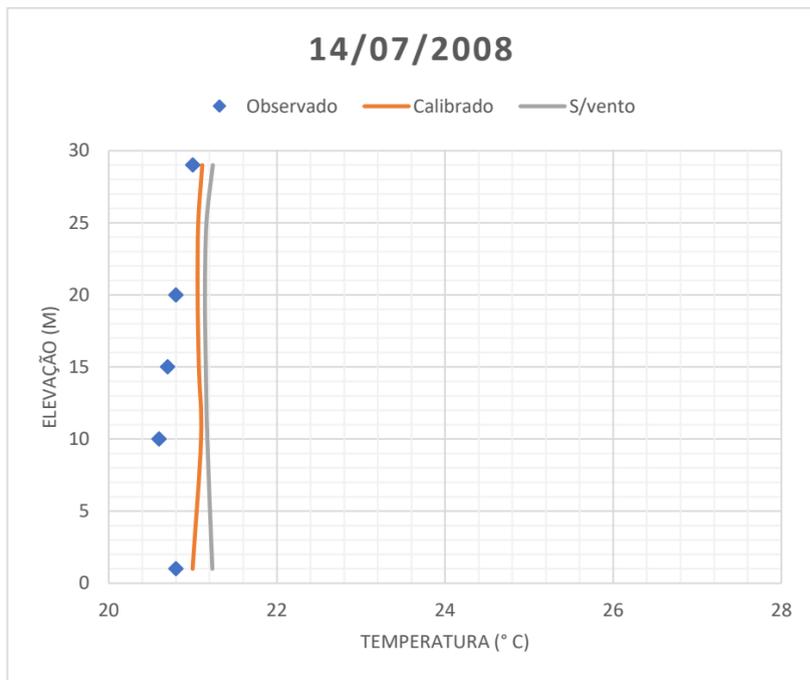
Para tal análise, os dados aferidos de temperatura ao longo da coluna d'água no ponto C de monitoramento foram comparados com os valores simulados. Os resultados são expostos na Figura 5.14.

Os itens de a) a f) da Figura 5.14 mostram o desenvolvimento do perfil térmico do Lago ao longo do ano. Os dados observados mostram que o comportamento do Lago inicia o ano

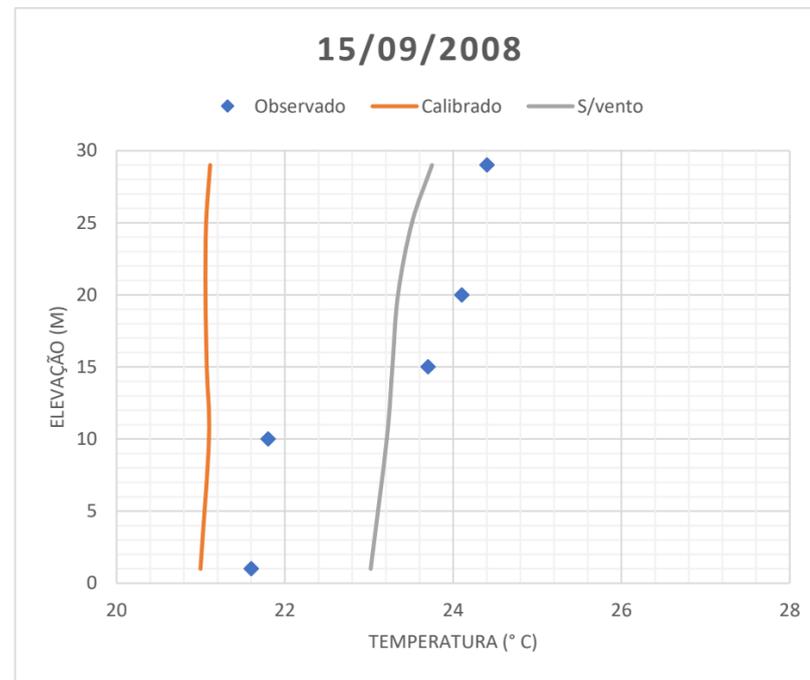
hidrológico em julho de 2008 com mistura completa, passando pela estratificação a partir de setembro com a termoclina bem pronunciada na profundidade aproximada de 15 metros.

Olhando a curva da simulação base (calibrada e com vento) é possível perceber que o modelo não foi capaz de simular a estratificação, já que para todo o período da simulação, as diferenças de temperatura entre a superfície e o fundo, não foram suficientes para a formação da termoclina. Alguns fatores podem ser elencados como prováveis responsáveis:

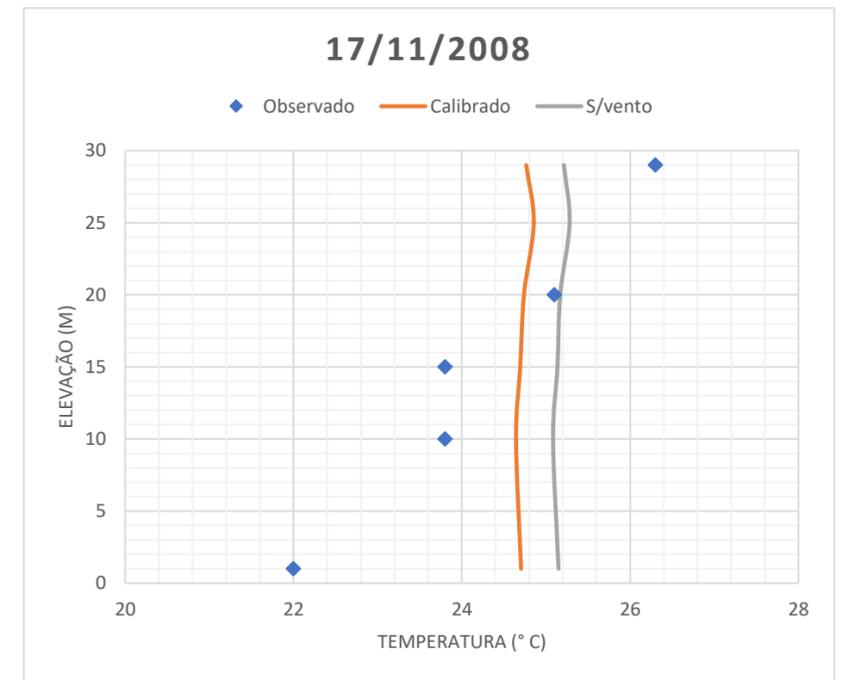
- Troca de calor com o fundo não foi configurada adequadamente;
- Parâmetros como, a fração da luz que é absorvida ( $\beta$ ) e coeficiente de extinção da luz ( $\lambda$ ) não foram configurados adequadamente, sendo necessário mais ajustes nos parâmetros, na etapa de calibração;
- As simulações no geral, subestimaram as temperaturas superficiais. Na etapa da calibração, o parâmetro da troca de calor por convecção entre a interface ar-água, **TCH**, não foi ajustado.
- Parâmetros de viscosidade turbulenta estão relacionados à transferência de energia e momento, sendo importante para a difusividade e dispersão da temperatura.



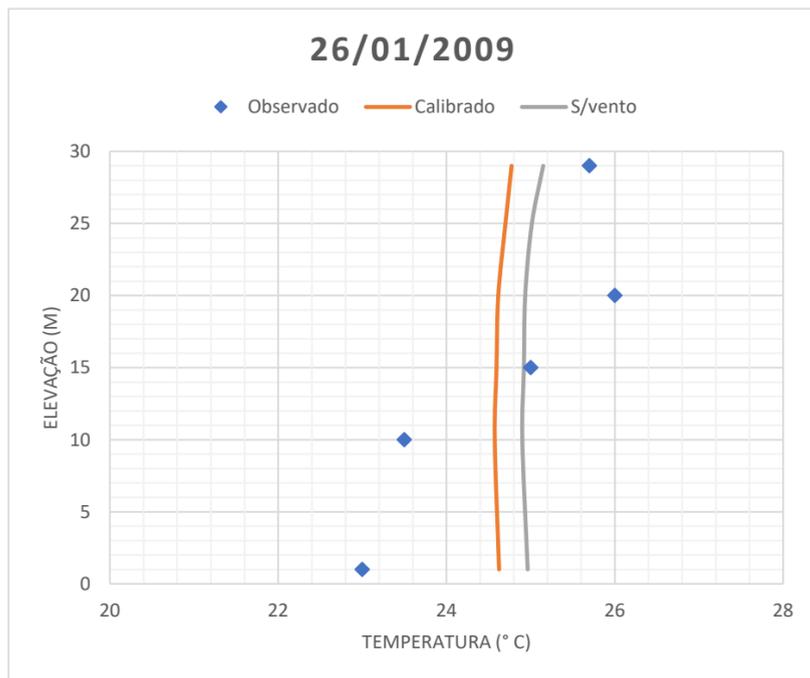
a) Perfil julho de 2008



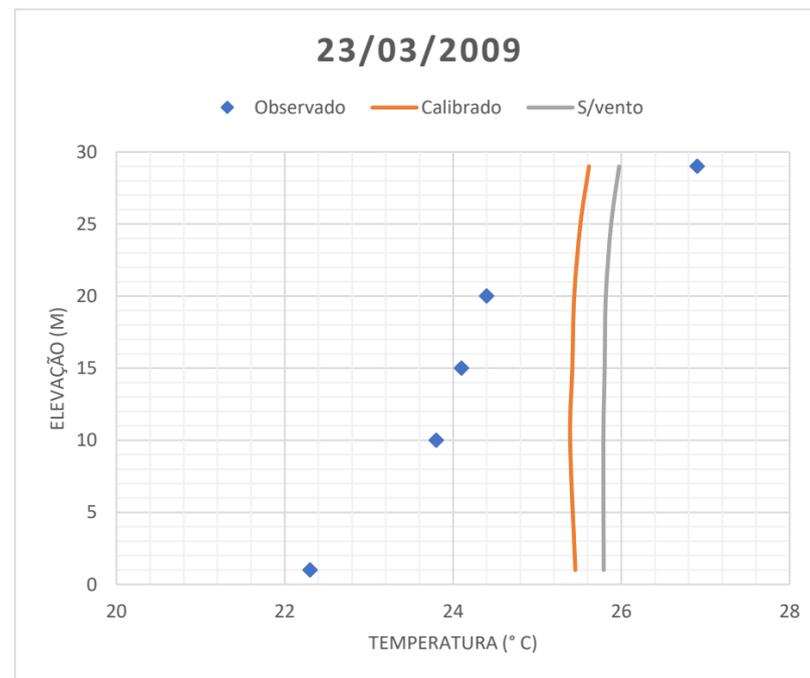
b) Perfil setembro de 2008



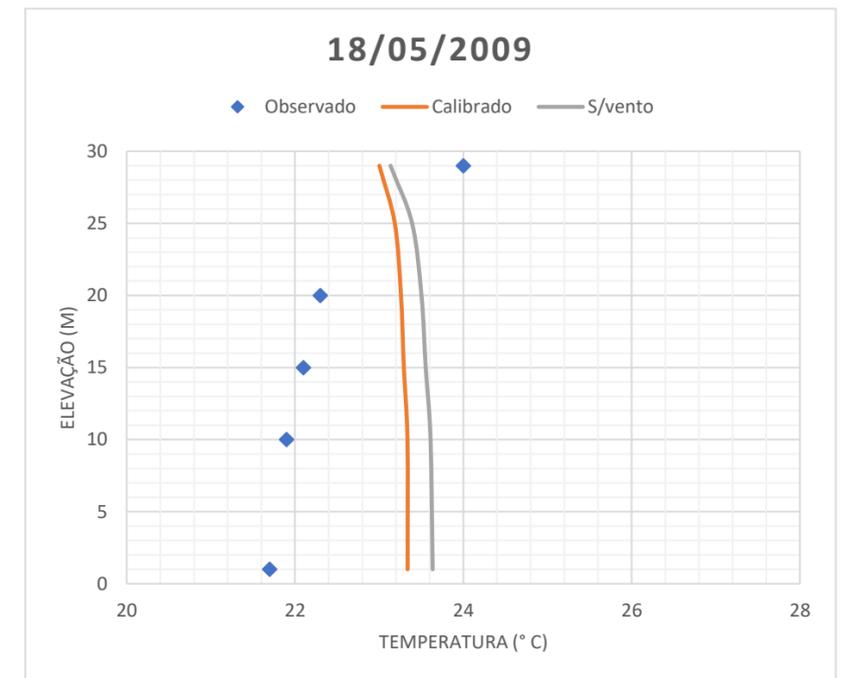
c) Perfil novembro de 2008



d) Perfil janeiro de 2009



e) Perfil março de 2009



f) Perfil maio de 2009

Figura 5.14 – Gráficos dos perfis de temperatura no Ponto C de monitoramento. Comparação entre os dados observados, simulação base e simulação sem vento para o ano de 2008 a 2009

Apesar do modelo não ter conseguido simular a estratificação no ponto C, o modelo passa por períodos de “semi-estratificação” com temperaturas mais elevadas à superfície e frias ao fundo, embora com gradientes de temperatura não tão elevados para se ter a formação da termoclina (Figura 5.15).

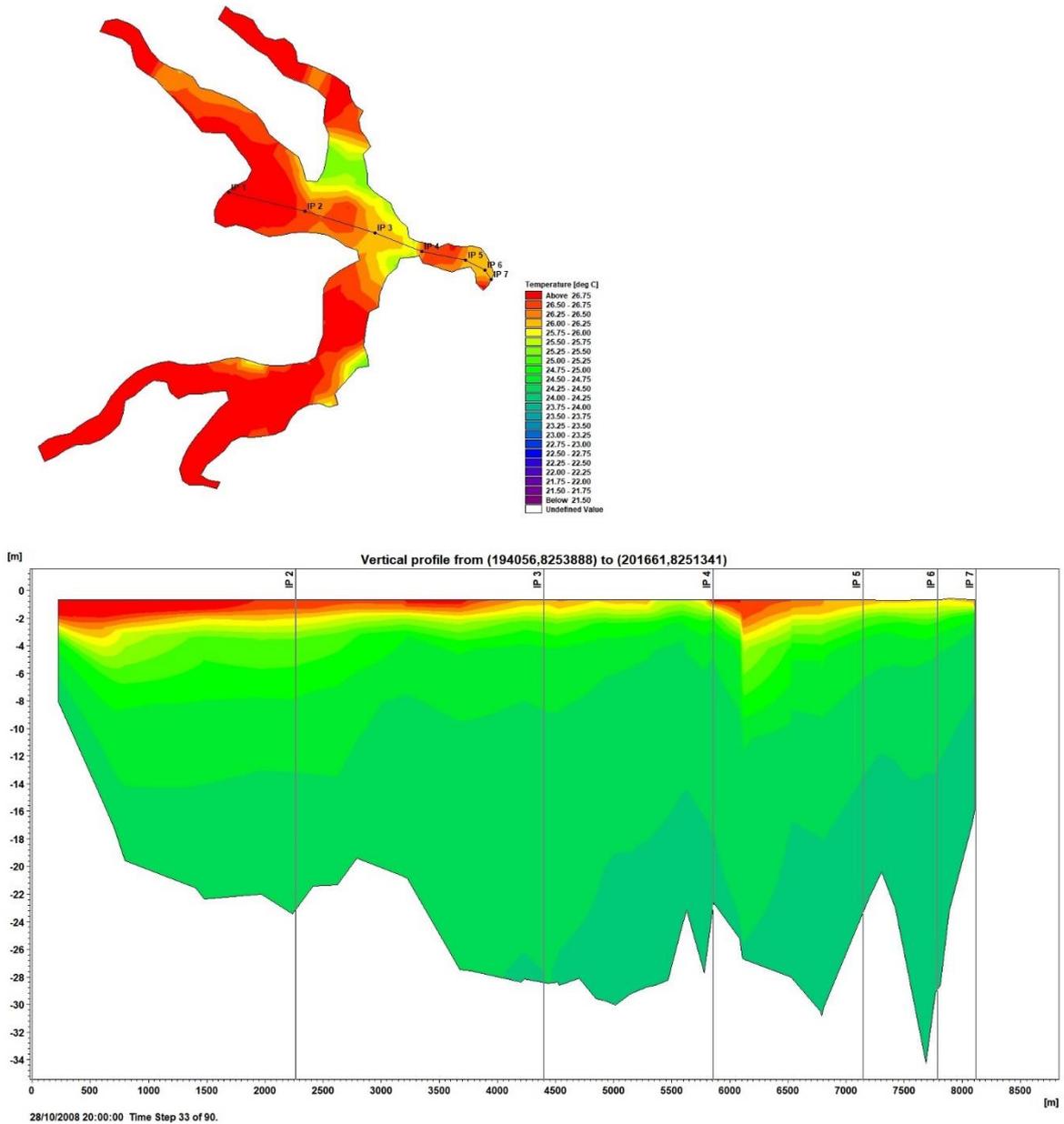


Figura 5.15 – Perfil Longitudinal do Lago.

Para a simulação sem vento, o modelo também não representou estratificação observada, onde que o resultado esperado, seria a estratificação mais pronunciada e com a termoclina

mais próxima à superfície da água, já que não teria a transferência de momento por difusão turbulenta do ar para as zonas mais profundas, proporcionada pelos ventos.

No geral, as temperaturas sem a consideração do vento se mostraram superiores que as simulações com os ventos, com a diferença máxima de 2 °C acontecendo em setembro. Isso evidencia a necessidade de mais ajustes aos parâmetros **WD** e **WF**, já que governam a troca de calor por convecção do vento com a água.

## **5.6 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DA MALHA NOS RESULTADOS DE TEMPERATURA**

Uma das principais questões a serem respondidas ao se tratar de um modelo numérico, é a questão da qualidade da malha *versus* custo computacional. Portanto, foi analisada a influência de uma malha mais refinada aos resultados de temperatura do corpo d'água. Essa análise busca responder se o aprimoramento dos resultados justifica tempos de simulação extensos, como mostrado pela Tabela 5.1. Após a calibração do modelo, para os mesmos parâmetros, foi configurada uma simulação também para o ano de 2008 a 2009 com a Malha 3 (Figura 5.2). Os resultados foram comparados diretamente aos resultados da malha grossa (Figura 5.16).

A comparação só foi realizada para o ponto C, já que o detalhamento só se deu na área da garganta, com o restante do domínio tendo a mesma discretização para ambas as malhas (Figura 5.2 e Figura 5.1). Pode-se perceber que o refinamento da malha apenas na garganta foi irrelevante para a distribuição de temperatura ao longo da coluna d'água. No geral, a diferença relativa média entre uma malha e outra não ultrapassou 1% (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Métrica para avaliar o desempenho de uma malha em relação a outra

<b>Profundidade do ponto C (m)</b>	<b>Diferença relativa entre as malhas (%)</b>
<b>1</b>	0,58
<b>10</b>	0,52
<b>15</b>	0,47
<b>20</b>	0,44
<b>1 m do fundo</b>	0,41

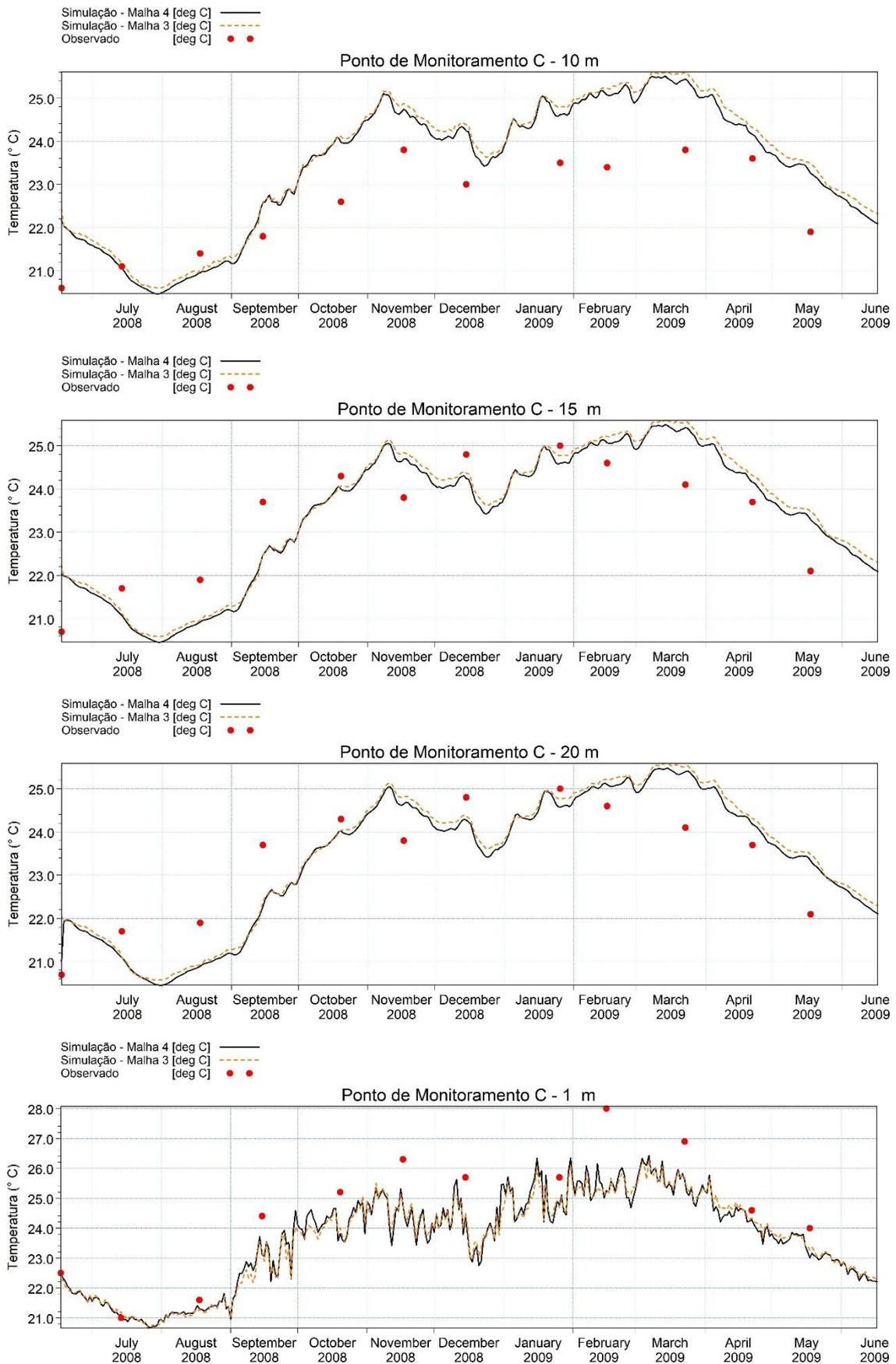


Figura 5.16 – Efeito da malha fina sobre os resultados de temperatura no ponto C.

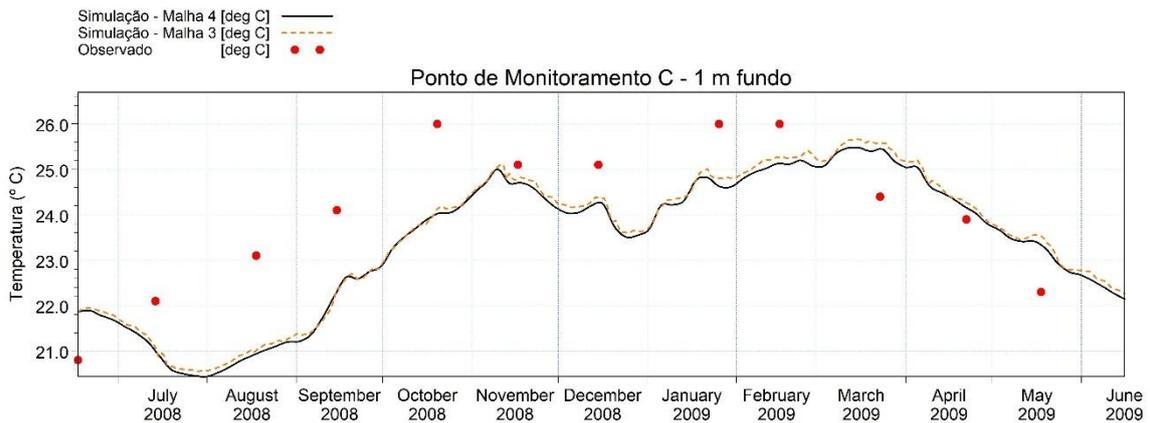


Figura 5.16 – Efeito da malha fina sobre os resultados de temperatura no ponto C.

Assim como para a temperatura, para a simulação do nível d'água, a malha refinada não apresentou diferenças significativas como observado na Figura 5.17. A análise estatística mostra um ajuste levemente melhorado para a Malha 3 (Tabela 5.8), embora não seja justificado pelo alto custo computacional intrínseco a essa malha.

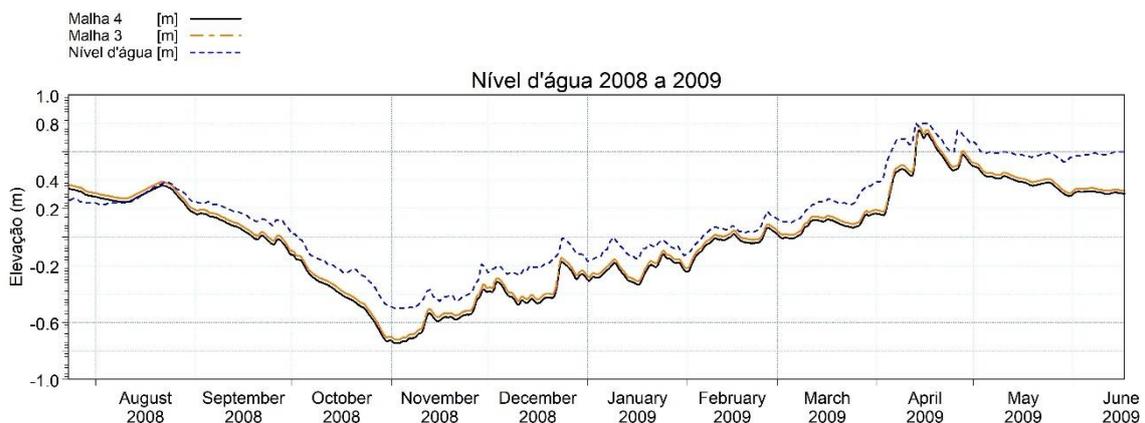


Figura 5.17 – Comparativo da Malha 3 com a Malha 4 na simulação do nível d'água.

Tabela 5.8 – Avaliação de performance das duas malhas para a simulação do nível d'água

<b>ESTATÍSTICA</b>	<b>Malha 4</b>	<b>Malha 3</b>
<b>ME</b>	0,12	0,0937
<b>MAE</b>	0,14	0,13
<b>RMSE</b>	0,16	0,14
<b>R<sup>2</sup></b>	0,91	0,91

## 6. CONCLUSÕES

Durante construção desse trabalho, o MIKE 3 demonstrou ser um *software* eficaz para a modelagem hidrodinâmica tridimensional de corpos hídricos, por resolver as equações de Navier-Stokes através de técnicas numéricas avançadas, como o método dos volumes finitos por discretização não-estruturada.

O MIKE 3 foi utilizado no intuito de estudar as suas capacidades e limitações na simulação do comportamento hidrodinâmico do Lago Paranoá. O domínio computacional do Lago foi construído através de malhas triangulares não sobrepostas, o que permitiu a representação da geometria complexa do Lago e flexibilidade no refinamento da malha.

Para a avaliação das capacidades e limitações, o presente trabalho buscou em simular os níveis d'água do Lago Paranoá e a distribuição de temperatura ao longo da coluna d'água, condicionado às forçantes externas que atuam sobre o Lago, como os fenômenos climatológicos e hidrológicos. Esses dados são provenientes do monitoramento por órgãos e instituições públicas de âmbito distrital e nacional e constituíram um fator importante para a construção e calibração do modelo.

Com esses dados, pôde-se construir o banco de dados próprio do MIKE cobrindo o período de 2000 até 2017. Esse banco foi constituído pela malha numérica, condições de contorno, condições iniciais e forçantes meteorológicas.

Os resultados obtidos para a variação do nível d'água se mostraram satisfatórios após a etapa de aquecimento do modelo, com diferença média no nível d'água entre o observado e simulado de 0,15 cm para os anos de 2008 a 2009. Já para a temperatura, para os ajustes realizados, o modelo não conseguiu representar satisfatoriamente o ciclo de estratificação e mistura completa. As simulações indicaram uma condição de mistura completa por todo o período de 2008 a 2009, mesmo quando simulado sem os ventos, indicando que são necessários mais ajustes aos parâmetros de troca de calor com o fundo, com o ar, dispersão, coeficiente de arrasto do vento e os parâmetros de radiação solar.

A complexidade computacional do modelo demonstrou ser fator impeditivo na calibração, devido ao longo tempo de processamento de cada simulação. No entanto, foi observado que, para a região da garganta do Lago, o nível de refinamento do Lago é irrelevante, permitindo a aplicação da malha mais esparsa para a maior parte das simulações

## 7. RECOMENDAÇÕES

Para o aprimoramento da modelagem do Lago Paranoá com o MIKE 3 recomenda-se realizar simulações com diferentes configurações de discretização verticais distintas a fim de se verificar a influência da discretização e distribuição da malha sobre os resultados de temperatura ao longo da coluna d'água. Recomenda-se também a utilização da discretização vertical combinada  $\sigma$  +z-level, com o objetivo de reduzir o custo computacional.

Recomenda-se que, para os dados de precipitação, seja utilizado os dados das séries históricas das estações pluviométricas próximas, garantindo maior acurácia no balanço hídrico

Recomenda-se o ajuste dos parâmetros através da ferramenta *Auto Calibration*, que permite otimização de parâmetros e calibração automática. Esta ferramenta avalia a performance do modelo para um conjunto de parâmetros através de análises estatísticas entre os dados observados e simulados. Após o ajuste ótimo dos parâmetros, o modelo poderá ser validado e simulado para diferentes cenários.

Após calibrado e validado, recomenda-se que seja realizada simulações comparando a influência do vento no perfil de temperatura da coluna d'água.

Recomenda-se que após a calibração e validação do modelo, seja acoplado o módulo MIKE ECO Lab. Esse módulo simula os aspectos de qualidade da água no ecossistema aquático, como processos químicos, físicos e biológicos, transporte de contaminantes no corpo aquático e processos de suspensão e sedimentação, sendo uma ferramenta propícia para o entendimento da dinâmica complexa do ecossistema aquático do Lago Paranoá.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, J., Kahforoushan, D., Fatehifar, E., Benis, K. Z., & Nadjafi, M. (2016). "Drying of Urmia Lake: modeling of level fluctuations". *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 3(1), 23-28.
- Anderson, E. J., Schwab, D. J., & Lang, G. A. (2010). "Real-Time Hydraulic and Hydrodynamic Model of the St. Clair River, Lake St. Clair, Detroit River System". *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(8), 507-518.
- Araujo, M., Costa, M. F., Aureliano, J. T., & Silva, M. A. (2008). "Mathematical Modelling of Hydrodynamics and Water Quality in a Tropical Reservoir, Northeast Brazil". *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 12(1), 19-30.
- Belolipetsky, P. V., Belolipetskii, V. M., Genova, S. N., & Mooij, W. M. (2010). "Numerical Modeling of Vertical Stratification of Lake Shira in Summer". *Aquatic Ecology*, 44(3), 561-570.
- Bonnet, M.-P., Poulin, M., & Devaux, J. (2000). "Numerical modeling of thermal stratification in a lake reservoir. Methodology and case study". *Aquatic Sciences*, 62, 105-124.
- Borges, G. B., Siqueira, I. R., Carvalho, J. L., Nielsen, J.-F., & Rispoli, V. C. (s.d.). "[http://fga.unb.br/articles/0001/2190/ismrm2016\\_borges\\_siqueira\\_nielsen\\_carvalho\\_rispoli\\_id718.pdf](http://fga.unb.br/articles/0001/2190/ismrm2016_borges_siqueira_nielsen_carvalho_rispoli_id718.pdf)". Acesso em 20 de 9 de 2020, disponível em [http://fga.unb.br/articles/0001/2190/ismrm2016\\_borges\\_siqueira\\_nielsen\\_carvalho\\_rispoli\\_id718.pdf](http://fga.unb.br/articles/0001/2190/ismrm2016_borges_siqueira_nielsen_carvalho_rispoli_id718.pdf)
- Brebbia, C. A., & Dominguez, J. (1992). *Boundary Elements: An Introductory Course*. Soutampton, Reino Unido: WIT PRESS.
- Brunetti, F. (2008). *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo, Brasil: Pearson.
- Campos, J. E. (2004). "Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos". *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1), 41-48.
- Causon, D. M., & Mingham, C. G. (2010). *Introductory Finite Difference Methods for PDES*. Ventus Publishing ApS.
- Causon, D. M., Mingham, C. G., & Qian, L. (2011). *Introductory Finite Volume Methods for PDEs*. Ventus Publishing ApS.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações*. AMGH.

- Chapra, S. C. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Long Grove, E.U.A.: Waveland Press, Inc.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2011). *Métodos Numéricos para Engenharia*. São Paulo, Brasil: AMGH.
- Chen, L., D'Aoust, P. M., Rennie, C. D., Poulain, A., Pick, F., Wang, R., & Delatolla, R. (2019). Numerical investigation on the impact of wind-induced hydraulics on dissolved oxygen characteristics in a shallow stormwater pond. *Water Quality Research Journal*, 54(4), 17.
- Christofoletti, A. (1999). *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo, Brasil: Blucher.
- Dodds, W. K. (2002). *Freshwater Ecology Concepts and Environmental Applications*. Orlando, E.U.A.: Academic Press.
- Dodson, S. I. (2005). *Introduction to Limnology*. Nova Iorque, E.U.A.: McGraw-Hill Higher Education.
- Donea, J., & Huerta, A. (2003). *Finite Element Methods for Flow Problems*. Chinchester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Esteves, F. d. (2011). *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro, Brasil: Interciência.
- FABIANI, A.L.T. (2016). *Estudo da Equação de Boussinesq em Duas Dimensões Horizontais*. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 152p.
- Fenner, R. T. (1996). *Finite Element Methods for Engineers*. Londres, Inglaterra: Imperial College Press.
- Fenocchi, A., & Sibilla, S. (2016). "Hydrodynamic modelling and characterisation of a shallow fluvial lake: a study on the Superior Lake of Mantua". *J. Limnol.*, 75(3), 455-471.
- Fenocchi, A., Petaccia, G., & Sibilla, S. (2016). "Modelling flows in shallow (fluvial) lakes with prevailing circulations in the horizontal plane: limits of 2D compared to 3D models". *Journal of Hydroinformatics*, 18(6), 928-945.
- Ferrarina, C., Umgiesser, G., Cucco, A., Hsu, T.-W., Roland, A., & Amos, C. L. (2008). "Development and validation of a finite element morphological model for shallow water basins". *Coastal Engineering*, 55(9), 716-731.
- Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlim, Alemanha: Springer-Verlag.

- Girault, V., & Raviart, P.-A. (1979). *Finite Element Approximation of the Navier-Stokes Equations*. LNM .
- Governo do Distrito Federal – GDF (2020a). *Atlas do Distrito Federal: Capítulo 2, Caracterização Ambiental*. Brasília – DF. 28p.
- Governo do Distrito Federal – GDF (2020b). *Atlas do Distrito Federal: Capítulo 3, Histórico de Ocupação*. Brasília – DF. 22p.
- Götzinger, J., & Bárdossy, A. (2008). Generic error model for calibration and uncertainty estimation of hydrological models. *Water Resources Research*, 44, 1-18.
- Goyal, R., & Rathod, P. (2011). "Hydrodynamic Modelling for Salinity of Singapore Strait and Johor Strait using MIKE 3FM". *2nd International Conference on Environmental Science and Development*. 4, pp. 295-300. Singapura: IACSIT Press.
- Gunzburger, M. D. (1989). *Finite Element Methods for Viscous Incompressible Flows*. San Diego, E.U.A.: Academic Press.
- Guyon, E., Hulin, J.-P., Petit, L., & Mitescu, C. D. (2001). *Physical Hydrodynamics*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.
- Hassanzadeh, E., Zarghami, M., & Hassanzadeh, Y. (2011). "Determining the Main Factors in Declining the Urmia Lake Level by Using System Dynamics Modeling". *Water Resources Management*, 26(1), 129-145.
- Henderson-Sellers, B. (1993). "A hierarchy of mathematical models: towards understanding the physical processes in reservoirs". Em M. Straškraba, J. G. Tundisi, & A. Duncan (eds.), *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management* (pp. 93-97). Dordrecht, Holanda: Springer.
- Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Holanda, P. d., Blanco, C. J., Cruz, D. O., Lopes, D. F., Barp, A. R., & Secretan, Y. (2011). "Hydrodynamic Modeling and Morphological Analysis of Lake Água Preta: One of the Water Sources of Belém-PA-Brazil". *journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering*, 33(2), 117-124.
- Hu, H. H. (1999). Computational Fluid Dynamics. Em P. K. Kundu, & C. I. M., *Fluid Mechanics* (pp. 378-430). Academic Press.
- Huang, A., Rao, Y. R., Lu, Y., & Zhao, J. (2010). "Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models". *Journal of Geophysical Research*, 115, 1-16.

- Huang, L., Liu, L., Sun, X., Zheng, L., Jing, H., Zhang, X., & Li, C. (2017). "Numerical Simulation of Two Dimensional Flows in Yazidang Reservoir". *Earth and Environmental Science*, 108(3), p. 8.
- Imboden, D. M. (2004). "The Motion of Lake Waters". Em P. E. O'Sullivan, & C. S. Reynolds, *The Lakes Handbook Volume 1 Limnology and Limnetic Ecology* (pp. 115-152). Malden, E.U.A.: Blackwell Publishing.
- Ji, Z.-G. (2008). *Hydrodynamics and Water Quality Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*. Hoboken, E.U.A.: John Wiley & Sons, Inc.
- Jørgensen, S. E. (2010). "A review of recent developments in lake modelling". *Ecological Modelling*, 221, 689-692.
- Jørgensen, S.-E. (2005). "Models of Lakes and Reservoir". Em P. E. O'Sullivan, & C. S. Reynolds, *The Lakes Handbook Volume 2: Lake Restoration and Rehabilitation* (pp. 386-437). Oxford, Reino Unido: Blackwell Publishing.
- Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2002). *Fluid Mechanics*. San Diego, E.U.A.: Academic Press.
- Li, Y., Huang, T.-l., Zhou, Z.-z., Long, S.-h., & Zhang, H.-h. (2018). Effects of reservoir operation and climate change on thermal stratification of a canyon-shaped reservoir, in northwest China. *Water Science & Technology: Water Supply*, 18(2), 12.
- Lindell, T. (2004). Hydrographic characteristics. Em E. B. Welch, & J. M. Jacoby, *Pollutant Effects in Freshwater Applied Limnology* (pp. 21-55). Londres, Inglaterra: Spon Press.
- 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.
- Löhner, R. (2008). *Applied CFD Techniques An Introduction based on Finite Element Methods*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Machado, M. T., & Baptista, G. M. (2016). "Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF)". *Engenharia Sanitária Ambiental*, 21(2), 357-365.
- Martin, J. L., & McCutcheon, S. C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. Florida, E.U.A.: CRC Press.

- McGinnis, D. F., & Wuest, A. (2005). "Lake Hydrodynamics". Em McGraw-Hill, *McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 2005* (pp. 163-166). E.U.A.: The McGraw-Hill Companies Inc.
- MIKE Powered by DHI (b). "MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module – Step-by-step training guide". Disponível em: < <https://www.mikepoweredbydhi.com> >. Acesso em: 02/12/2020.
- MIKE Powered by DHI (c). "MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module – Product Flyer". Disponível em: < <https://www.mikepoweredbydhi.com> >. Acesso em: 02/12/2020.
- MIKE Powered by DHI (d). "MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module – Scientific Documentation". Disponível em: < <https://www.mikepoweredbydhi.com> >. Acesso em: 02/12/2020.
- MIKE Powered by DHI (e). "MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module – Scientific Documentation". Disponível em: < <https://www.mikepoweredbydhi.com> >. Acesso em: 17/04/2021.
- Moharir, R. V., Khairnar, K., & Paunekar, W. N. (2014). "MIKE 3 as a modeling tool for flow characterization: A review of applications on water bodies". *International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering*, 3(3), 32-43.
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2015). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and MATLAB*. Suíça: Springer International Publishing.
- Norato, H. G., & Duarte, A. R. (2011). Uma proposta para a detecção do adequado período de aquecimento em modelos de simulação. *GEPROS*(4), 16.
- 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).
- Nunes, G., Minoti, R. T., & Koide, S. (2020). "Mathematical Modeling of Watersheds as a Subsidy for Reservoir Water Balance Determination: The Case of Paranoá Lake, Federal District, Brazil". *Hydrology*, 7(85).
- Omstedt, A., & Murthy, C. R. (1994). "On Currents and Vertical Mixing in Lake Ontario during Summer Stratification". *Nordic Hydrology*, 25(3), 213-232.

- Pepper, D. W., Kassab, A. J., & Divo, E. A. (2014). *Introduction to Finite Element, Boundary Element, and Meshless Methods*. Nova Iorque, E.U.A.: ASME Press.
- PGIRH, Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Distrito Federal. *Relatório Síntese*. Brasília, DF, 2012. 98 p.
- PGIRH, Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Distrito Federal. Revisão e Atualização do PGIRH. *Relatório Final: Volume II - Prognóstico e Programas de Ação*. Brasília, DF, 2012a. 965 p.
- Phillips, N. A. (1957). "A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting". *Journal of Meteorology*, 14(2), 184-185.
- Pilotti, M., Valerio, G., & Leoni, B. (2013). "Data set for hydrodynamic lake model calibration: A deep prealpine case". *Water Resources Research*, 49(10), 7159-7163.
- Roig, H.L.; Garnier, J; Ianniruberto, M.; Minoti, R.; Koide, S. Estudo multidisciplinar do estado físico do Lago Paranoá: Topo-batimetria, Qualidade dos sedimentos e Balanço hídrico. 2019. 44 p. Relatório Técnico. Convênio No 01/2017 - ADASA - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal.
- Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Distrito Federal – SEBRAE (2004). *A Questão Ambiental no Distrito Federal*. Brasília – DF. 138 p.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2004). *Sensitivity Analysis in Practice*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Sokolova, E., Petterson, T. J., Bergstedt, O., & Hermansson, M. (2013). "Hydrodynamic modelling of the microbial water quality in a drinking water source as input for risk reduction management". *Journal of Hydrology*, 497, 15-23.
- Soudi, M., Ahmadi, H., Yasi, M., & Sibilla, S. (2019). "Investigation over the capability of MIKE 3 flow model FM to simulate the hydrodynamics and salinity distribution of hypersaline lakes: Lake Urmia (Iran) as case study". *Coastal Engineering*, 61(4), 486-501.
- Straškraba, M. (2005). Reservoirs and other Artificial Water Bodies. Em *The Lakes Handbook vol. 2: Lake Restoration and Rehabilitation* (pp. 300-329). Blackwell Publishing.
- Straškraba, M., Tundisi, J. G., & Duncan, A. (1993). "State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management". Em M. Straškraba, J. G. Tundisi, & A. Duncan, *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management* (pp. 213-288). Kluwe Academic Publishers.

- Strikwerda, J. C. (2004). *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*. Pacific Grove, E.U.A.: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tundisi, J. G., & Tundisi, T. M. (2008). *Limnologia*. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos.
- 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.
- Uusitalo, L., Lehtikoinen, A., Helle, I., & Myrberg, K. (2015). "An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support". *Environmental Modelling & Software*, 63, 24-31.
- Wei, X., Ni, P., & Zhan, H. (2013). Monitoring cooling water discharge using Lagrangian coherent structures: A case study in Daya Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 75, 9.
- Welch, E. B., Jacoby, J. M., & Lindell, T. (2004). *Pollutant Effects in Freshwater*. Londres: Spon Press.
- Wesseling, P. (2001). *Principles of Computational Fluid Dynamics*. Berlim, Alemanha: Springer-Verlag.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology Lake and River Ecosystems*. San Diego: Elsevier Academic Press.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. Nova Iorque, E.U.A.: McGraw-Hill.
- Winton, R. S., Calamita, E., & Wehrli, B. (2019). "Reviews and synthesis: Dams, water quality and tropical reservoir stratification". *Biogeosciences*, 16, 1657-1671.
- Yang, F., Liang, D., & Xiao, Y. (2018). "Influence of Boussinesq coefficient on depth-averaged modelling of rapid flows". *Journal of Hydrology*(559), 909-819.
- Zarein, M., & Naderkhanloo, V. (2014). "Modeling dam-break flows using a 3D MIKE 3 Flow Model". *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 5(6), 1-6.
- Zeinoddini, M., Bakhtiari, A., & Ehteshami, M. (2015). Long-term impacts from damming and water level manipulation on flow and salinity regimes in Lake Urmia, Iran. *Water and Environment Journal*, 29, 17.
- Zhang, F., Zhang, H., Bertone, E., Stewart, R., Lemckert, C., & Cinque, K. (2020). Numerical Study of the thermal structure of a stratified temperature monomictic drinking water reservoir. *Journal of Hydrology: Regional Studies*(30), 21.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method Volume 1: the Basis*.  
Oxford, Inlaterra: Butterworth-Heinemann.