

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

**APLICAÇÃO DO CE-QUAL-W2 PARA A MODELAGEM DA  
ESTRUTURA TÉRMICA DO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO  
DF/GO**

**RAMON PINTO DE BARROS**

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

**COORIENTADOR: SERGIO KOIDE**

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

**BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2019**

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

**APLICAÇÃO DO CE-QUAL-W2 PARA A MODELAGEM DA  
ESTRUTURA TÉRMICA DO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO  
DF/GO**

**RAMON PINTO DE BARROS**

**APROVADA POR:**

---

**Prof Ricardo Tezini Minoti, Dr (ENC-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof Sergio Koide, PhD (ENC-UnB)  
(Coorientador)**

---

**Prof. Lenora Nunes Ludolf Gomes, Dra (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Carlos Ruberto Fragoso Júnior, Dr. (CTEC-UFAL)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, AGOSTO DE 2019**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

BARROS, RAMON PINTO DE. Aplicação do CE-QUAL-W2 para a modelagem da estrutura térmica do Reservatório do Descoberto DF/GO.

xvii, 116p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2019).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. Modelagem bidimensional    | 2. Calibração automática |
| 3. Manancial de abastecimento | 4. Algoritmo genético    |
| I. ENC/FT/UnB                 | II. Título (série)       |

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

BARROS, R. P. (2019). Aplicação do CE-QUAL-W2 para a modelagem da estrutura térmica do Reservatório do Descoberto DF/GO, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Ramon Pinto de Barros.

TÍTULO: Aplicação do CE-QUAL-W2 para a modelagem da estrutura térmica do Reservatório do Descoberto DF/GO.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

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

---

Ramon Pinto de Barros  
pbarrosramon@gmail.com

*Dedico  
ao melhor pai do mundo  
Nelson Alves de Barros.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família: Áurea – minha irmã, Graças – minha mãe e Nelson – meu finado pai, por todo o apoio, amor e carinho incondicionais. Vocês são a minha base e o meu lar.

À Tayane, minha companheira de aventuras, por toda a paciência durante o período de mestrado, pela confiança e por fazer meus dias especiais sempre.

Aos meus grandes parceiros de modelagem hidrodinâmica Gilliard e Laís pela amizade que construímos, pelas ajudas e conselhos e por toda ciência que pudemos fazer juntos até aqui.

Às grandes amigas Dandara, Déborah, e Vanesa por dividirem o dia-a-dia dessa experiência chamada Mestrado. Sei que a distância é grande entre nossas casas, mas vou levar vocês comigo sempre.

A todos da turma de Mestrado e Doutorado de 2017, em especial: Pedro, Gustavo, Tadeu, Guilherme, Vinicius, Vanessa, Aninha, Kamilla e Osmar pelos momentos de estudo nas salas de estudo do PTARH.

À Sara e Carla e ao já aposentado Boy do laboratório no SG-12.

À Professora Lenora pelo apoio à candidatura ao Mestrado, por toda a experiência prévia ao mestrado, pelos ensinamentos passados até aqui.

Ao Professor Dirceu por todas as sugestões durante a fase do seminário para a formulação desse trabalho.

Aos meus orientadores Professores Ricardo Minoti e Sergio Koide, pela paciência, confiança e apoio que foram imprescindíveis durante esse processo. Deixo aqui minha profunda admiração pelo trabalho de vocês.

À engenheira ambiental Beatriz Lisboa Vêras por disponibilizar seu banco de dados para a efetuação desse trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação por todo o conhecimento passado.

À CAESB pela disponibilização de dados da bacia do Descoberto.

À ADASA pela disponibilização de dados da bacia do Descoberto.

Ao INMET pelos dados climatológicos da região de Brasília.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado.

## RESUMO

O Reservatório do Descoberto, situado entre o estado de Goiás e o Distrito Federal, é o principal abastecedor de água para consumo humano do DF e tem sofrido diversos impactos advindos do rápido crescimento populacional e alteração no uso do solo em suas bacias afluentes. Nesse contexto, para auxiliar na avaliação dos impactos causados, modelos matemáticos se mostram como uma importante ferramenta. No presente trabalho buscou-se calibrar o módulo hidrodinâmico do simulador CE-QUAL-W2 para o Descoberto ao ajustar as séries de temperatura simuladas às observadas no período de 2013 a 2016. Para isso, foi elaborada uma rotina computacional para a amostragem automática dos parâmetros acoplada ao algoritmo genético de otimização SCE-UA, e para análise de sensibilidade. A revisão do banco de dados conduzida nesse estudo exibiu evidências de um possível não entendimento de trabalhos anteriores às aplicações das condições de contorno do simulador. Foi adicionada a estrutura da barragem do reservatório do Descoberto à malha de simulação e alcançou-se satisfatória simulação do balanço hídrico do lago ( $NSE = 0,9$ ). A rotina automática mostrou-se eficiente, alcançando o número de 7128 amostras e um razoável ajuste da temperatura do modelo às séries observadas ( $NSE = 0,59$ ). A simulação calibrada exibiu o padrão monomítico, demonstrando maiores valores para o Índice de Schmidt durante o período chuvoso e quente (Outubro a Abril), e valores próximos a zero durante o período seco e frio (Maio a Setembro). Ainda, foi possível observar curtos períodos de quebra da estabilidade térmica da coluna d'água durante os meses quentes. O aumento da intensidade eólica e o aumento das vazões afluentes durante o período de estratificação foram apontados como possíveis causadores desse fenômeno. Por fim, a análise de sensibilidade corroborou com o Manual do CE-QUAL-W2 e com trabalhos anteriores, no qual o parâmetro WSC – Coeficiente de Abrigo do Vento mostrou-se mais sensível às saídas de temperatura do modelo. O parâmetro que rege as trocas de calor de fundo (CBHE) também se mostrou significativamente sensível.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem bidimensional, Calibração automática, Manancial de abastecimento, Algoritmo genético.

## ABSTRACT

The Descoberto Reservoir, located between the state of Goiás and Brazil's Federal District, is the main water supply for human consumption of the region. However, it has suffered impacts from the rapid population growth and changes in land use in its tributary basins. In this context, in order to understand the processes in the reservoir and the impacts of these changes, mathematical models prove to be an important tool. The present work aimed to calibrate the hydrodynamic module of the CE-QUAL-W2 simulator for the Descoberto Reservoir by adjusting the simulated temperature series to the observed ones in the 2013 – 2016 period. A computational routine was elaborated coupled to the SCE-UA genetic optimization algorithm for the automatic sampling of the parameters, and for sensitivity analysis. The database and bibliographic review conducted in this study showed evidence that, on previous research carried out in the reservoirs of the Federal District, a misunderstanding of the application of the simulator boundary conditions may have occurred. The Descoberto dam structure was added to the simulation grid and the satisfactory simulation of the lake water balance was achieved (NSE = 0.9). The automatic routine was efficient, reaching a number of 7128 samples and a reasonable adjustment of the simulated temperature to the observed series (NSE = 0.59). The calibrated simulation exhibited a monomitic pattern for the reservoir, showing higher Schmidt Index values during the hot-rainy season (October to April), and values close to zero during the cool-dry season (May to September). Yet, it was possible to observe short periods of stability disruption during the warmer months. The intensification of wind speed and the increased inflows during the season was appointed as the causes for this phenomena. The sensitivity analysis corroborated with the CE-QUAL-W2 Manual and previous works, in which the parameter WSC - Wind Shelter Coefficient was more sensitive to the temperature outputs of the model. The parameter that guides the bottom heat exchanges (CBHE) was also significantly sensitive.

**KEYWORDS:** Two-dimensional modelling, automatic calibration, drinking-water source, genetic algorithm

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Objetivos .....	4
2.1	Objetivo geral .....	4
2.2	Objetivos específicos .....	4
3	Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica: .....	5
3.1	Aspectos limnológicos de lagos e reservatórios .....	5
3.1.1	Estratificação térmica .....	9
3.2	O Modelo CE-QUAL-W2 .....	16
3.2.1	Aplicações do CE-QUAL-W2.....	19
3.3	Aspectos básicos de algoritmos genéticos para problemas de otimização .....	21
3.4	Análise de sensibilidade visual por gráficos de dispersão .....	24
4	Metodologia .....	26
4.1	Caracterização da área de estudo .....	26
4.2	revisão e adequação do Banco de Dados ao CE-QUAL-W2.....	32
4.2.1	Condições iniciais.....	32
4.2.2	Dados geométricos .....	33
4.2.3	Condições de Contorno .....	36
4.2.4	Parâmetros hidráulicos .....	39
4.2.5	Parâmetros hidrodinâmicos e termodinâmicos.....	43
4.3	Elaboração da rotina computacional para calibração e análise de sensibilidade .....	45
4.3.1	Definição da função objetivo.....	46
4.3.2	Algoritmo de otimização SCE-UA.....	47
4.3.3	Índice de estabilidade de Schmidt .....	49
4.4	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros .....	49
5	Resultados e Discussão .....	51
5.1	Abordagem metodológica.....	51
5.2	Simulação do Lago Descoberto por meio do CE-QUAL-W2 .....	57
5.2.1	Simulação da cota e do balanço hídrico do modelo .....	57
5.2.2	Calibração automática das saídas de temperatura .....	59
5.3	Dinâmicas longitudinais e verticais da temperatura presentes na porção principal do modelo calibrado.....	63
5.4	Análise de sensibilidade dos parâmetros de temperatura .....	77

6	Conclusões .....	86
7	Recomendações.....	89
	Bibliografia Consultada.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
	Apêndices .....	97

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Efeitos positivos e negativos da construção de represas, por (Tundisi & Tundisi, 2008).....	8
Tabela 3.2 Equações governantes do modelo CE-QUAL-W2 para corpos de água com canal sem declividade e com declividade. Retirada de Liporoni (2012) .....	18
Tabela 3.3 Detalhes dos conjuntos da Figura 3.7. O conjunto mais bem avaliado é o #5. ....	22
Tabela 4.1 Resumo das condições de contorno afluentes, arquivos necessários e características das condições de contorno presentes no CE-QUAL-W2. ....	37
Tabela 4.2 Resumo das condições de contorno efluentes, arquivos necessários e características das condições de contorno presentes no CE-QUAL-W2. ....	38
Tabela 4.3 Parâmetros, valores <i>default</i> e limites utilizados na etapa de calibração. ....	44
Tabela 5.1 Síntese dos dados obtidos para composição do banco de dados para modelagem do lago Descoberto, adaptado de Vêras (2017).....	55
Tabela 5.2 Valores médios mensais e Coeficiente de Variação – entre parênteses – da temperatura do ar e da velocidade do vento para o período entre 03/2013 e 03/2016. ....	68
Tabela 5.3 Valores médios mensais e Coeficiente de Variação – entre parênteses – da temperatura da água e das vazões de entrada para o período entre 03/2013 e 03/2016. ....	68
Tabela 5.4 Valores de NSE para a melhor simulação em cada uma das profundidades e para “o todo”. ....	77
Tabela 5.5 Conjuntos de parâmetros utilizados na melhor simulação para cada uma das profundidades e para “o todo”, média e coeficiente de variação entre os conjuntos. ....	78
Tabela 5.6 Melhores ajustes da simulação aos dados observados de temperatura alcançados durante a calibração e os valores de AX – Viscosidade turbulenta longitudinal; e DX – Difusividade turbulenta longitudinal; referentes a cada ajuste.....	83
Tabela 5.7 Valores calibrado e melhor ajuste na análise de sensibilidade do presente modelo e valores estimados e calibrados encontrados na literatura para EXH2O (Coeficiente de atenuação da luz) e BETA (Radiação solar absorvida na superfície d’água).....	84

## Lista de Figuras

Figura 3.1 Representação das zonas do lago. Adaptadas de (Tundisi e Tundisi, 2008).....	6
Figura 3.2 Distribuição das camadas verticais de um perfil estratificado termicamente (adaptada de Tundisi e Tundisi, 2008).....	10
Figura 3.3 Perfis observados de (a) temperatura, (b) transparência e (c) oxigênio dissolvido para o Lago Lugano, antes (17 de agosto de 1994) e poucos dias depois (15 a 17 de setembro de 1994) do evento de cheia (12 de setembro de 1994) (De Cesare, Boillat e Schleiss, 2006). ....	12
Figura 3.4 a) Fluxo de volume vertical total para cima integrado espacial-temporalmente no modelo numérico em relação à duração do evento de cheia de 12 de setembro de 1994 no Lago Lugano; b) Derivadas dos Fluxo de volume total vertical na profundidade $z$ , que mostra a água em direção ascendente (+) e descendente (-) (De Cesare, Boillat e Schleiss, 2006).....	13
Figura 3.5 Séries observadas de temperatura a 0,2m (vermelho), 0,4m (laranja), 0,6m (amarelo), 0,8m (verde), 1m (azul) durante a temporada de crescimento da macrófitas <i>P. crispus</i> . a) 2014-2015 e b) 2015-2016; e valores médios de biomassa (barras cinzas) e altura relativa (círculos verdes) durante as temporadas c) 2014-2015 e d) 2015-2016. As setas indicam o ponto a partir do qual foi observado estratificação consistente durante o diurno (Vilas <i>et al.</i> , 2018).....	14
Figura 3.6 Gráficos de área de perfil de temperatura para os reservatórios Funil e Lajes (período entre Junho/2002 e Junho/2003); A linha pontilhada demonstra a zona eufótica (disco de Secchi) dos lagos e a linha sólida a zona de mistura identificada pelo perfil de temperatura (Soares <i>et al.</i> , 2008).....	15
Figura 3.7 Probabilidade de seleção de cada conjunto. O algoritmo genético seleciona aleatoriamente os conjuntos que irão para a fase de reprodução baseando-se nessa divisão. ....	22
Figura 3.8 Exemplo de combinação de conjuntos parentais para a geração de soluções filiais e do efeito de um operador mutagênico gerando novas características. Adaptado de (Mirjalili, 2018).....	23
Figura 3.9 Gráficos de dispersão de Y versus $Z_1$ , $Z_2$ , $Z_3$ e $Z_4$ . A uniformidade de pontos nos quatro quadrantes é considerado um sintoma de não sensibilidade do parâmetro ao resultado do modelo. Fonte: (Saltelli <i>et al.</i> , 2008).....	25
Figura 3.10 Valores médios de Y em relação aos parâmetros $Z_1$ , $Z_2$ , $Z_3$ e $Z_4$ . A variação média do resultado do modelo em relação a cada um dos parâmetros é um ótimo indicador de sua sensibilidade Fonte: (Saltelli <i>et al.</i> , 2008). ....	25

Figura 4.1 Fluxograma contendo as etapas do trabalho. ....	26
Figura 4.2 Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do lago Descoberto (Ferrigo, 2014). .....	27
Figura 4.3 Mapa das sub bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto (ADASA, 2018).....	28
Figura 4.4 Média 2010-2017 da temperatura máxima e mínima do ar, temperatura observada no Lago Descoberto (CAESB) nas profundidades de 1m, 5m, 10m, 15m e 1m do fundo e precipitação média diária (INMET). A região na qual o reservatório está inserido possui duas estações bem definidas: uma fria e seca (Maio-Setembro) e uma quente e úmida (Outubro-Abril). O Lago Descoberto demonstra característica térmica de lagos monomíticos, havendo uma aproximação das temperaturas da coluna d'água durante a estação fria. ....	29
Figura 4.5 Séries de vazão média mensal utilizadas como condição de contorno no modelo CE-QUAL-W2 (Fonte: CAESB e ADASA).....	30
Figura 4.6 Séries mensais de temperatura utilizadas como condição de contorno no modelo CE-QUAL-W2 (Fonte: CAESB e ADASA).....	30
Figura 4.7 Representação longitudinal da segmentação do lago Descoberto no modelo CE-QUAL-W2 e a indicação dos principais afluentes em cada um de seus braços. ....	33
Figura 4.8 Representação vertical do lago Descoberto no modelo CE-QUAL-W2. Os tamanhos dos segmentos estão apresentados com tamanho relativo. ....	34
Figura 4.9 Contornos batimétricos do Reservatório do Descoberto confeccionado por Livramento (2014). ....	35
Figura 4.10 Esquema representativo das especificações da Barragem utilizadas no modelo CE-QUAL-W2. ....	42
Figura 4.11 Cotas observadas no período entre Janeiro/2013 e Abril/2016. A cota máxima do lago alcançou valores de 40cm acima do vertedor. ....	42
Figura 4.12 Fluxograma das etapas do SCE-UA retirado de (Brêda, Bravo e Paiva, 2017).....	48
Figura 5.1 Consistência dos dados de qualidade da água para o período entre 2010 e 2017. Período selecionado (03/2013 – 03/2016). ....	54
Figura 5.2 Localização das estações de monitoramento da CAESB das quais foram obtidos os dados que compõem o banco de dados deste trabalho (Fonte: Google Earth). ....	56
Figura 5.3 Cota observada e simulada utilizando a condição de contorno no segmento 19. ....	58

Figura 5.4 Cota observada e simulada para o lago Descoberto.....	58
Figura 5.5 Séries simuladas e medições observadas. a) Modelo calibrado automaticamente. b) Modelo calibrado manualmente por Vêras (2017).....	61
Figura 5.6 Temperatura observada e gráficos de área para o modelo de Vêras (2017) e para o modelo calibrado neste trabalho. Vêras (2017) produziu um gradiente de temperatura intensificado se comparado com os resultados observados e o modelo calibrado no presente trabalho. ....	62
Figura 5.7 Gráfico de área do modelo de Pinto (2018) para o ano simulado de 2010. O resultado no CE-QUAL-W2 do presente trabalho se aproxima do resultado produzido no GLM pela autora. ....	63
Figura 5.8 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.....	64
Figura 5.9 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.....	65
Figura 5.10 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.....	66
Figura 5.11 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades	

positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.....	67
Figura 5.12 Séries médias mensais (03/2013 – 03/2016) utilizadas como condição de contorno do braço principal do modelo do Reservatório Descoberto e o Coeficiente de variação (CV) para cada série. Pode-se verificar uma diminuição da média das vazões na série conjunta dos Córregos Olaria, Chapadinha e Rio Descoberto durante os meses de seca (Maio a Setembro). .....	69
Figura 5.14 Séries anuais (03/2013 – 03/2016) da série conjunta dos Córregos Olaria, Chapadinha e Rio Descoberto. Os meses chuvosos (Outubro a Abril) demonstram significativa variação seguindo uma tendência de diminuição entre os anos de 2013 a 2015. O ano de 2016 demonstra um aumento das vazões nos meses de Fevereiro e Abril.....	70
Figura 5.15 Séries médias mensais de temperatura do ar, dos afluentes a montante (Olaria, Chapadinha e Descoberto) e do Segmento 13 (Córrego Coqueiro) e o Coeficiente de variação (CV) de cada uma das séries.....	71
Figura 5.16 - Dados de velocidade do vento (média diária) utilizados como dados de entrada do modelo. As setas apontam os picos anuais de velocidade para os três anos simulados. Todos ocorreram durante a estação quente.....	73
Figura 5.17 Série de Índice de Schmidt ( $S_c$ ) calculada pela utilização dos dados de saída do modelo CE-QUAL-W2 calibrado.....	74
Figura 5.18 Capturas de tela do pós processador do CE-QUAL-W2. a) Padrão de temperatura no braço principal do lago Descoberto às 06:00; b) Padrão de temperatura às 18:00; A incidência solar atua intensificando a termóclina ao longo do dia. A legenda de cores não é a mesma das figuras no apêndice A e foi ajustada para demonstrar a pequena variação entre dia e noite. ...	76
Figura 5.19 – Gráficos de dispersão dos parâmetros de temperatura do CE-QUAL-W2. ....	79
Figura A.1 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Abril/2013 – Junho/2013. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em	

direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	98
Figura A.2 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2013 – Setembro/2013. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	99
Figura A.3 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Outubro/2013 – Dezembro/2013. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	100
Figura A.4 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Janeiro/2014 – Março/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	101
Figura A.5 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Abril/2014 – Junho/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	102
Figura A.6 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2014 – Setembro/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em	

direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	103
Figura A.7 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Outubro/2014 – Dezembro/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	104
Figura A.8 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Janeiro/2015 – Março/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	105
Figura A.9 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Abril/2015 – Junho/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	106
Figura A.10 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Setembro/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	107
Figura A.11 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Outubro/2015 – Dezembro/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas	

verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã. ....	108
Figura A.12 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Janeiro/2016 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã, com exceção da última imagem que é referente ao dia 10/03/2016 simulado.....	109
Figura B.1 Início da classe “ <i>spot_setup</i> ”, função “ <i>paramcontrol()</i> ”, e o objeto “ <i>w2con_settings</i> ” .....	111
Figura B.2 Função “ <i>parameters()</i> ”, que gera o vetor <i>x</i> que contém os valores aleatórios dos parâmetros e as partes mais importantes da função “ <i>simulation()</i> ” a qual executa o modelo CE-QUAL-W2 e lê os arquivos de saída para guarda-los no banco de dados “.csv” .....	112
Figura B.3 Função “ <i>evaluation()</i> ” lê os dados observados e os prepara para o cálculo da função objetivo. ....	113
Figura B.4 Função “ <i>objctivefunction()</i> ” recebe os dados simulados e observados e os utiliza para o cálculo da função objetivo. Aqui, a função utilizada foi o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe.....	114
Figura B.5 Após a preparação da classe “ <i>spot_setup</i> ”, basta utilizar as entradas acima para executar automaticamente o CE-QUAL-W2.....	115
Figura C.1 Perfis das estruturas da barragem do Descoberto. a) Vista de montante e de jusante da barragem; b) Planta da barragem; c) Planta e cortes diversos da estrutura do vertedouro. ....	116

## Lista de Equações

Eq. 4.1.....	40
Eq. 4.2.....	40
Eq. 4.3.....	41
Eq. 4.4.....	41
Eq. 4.5.....	41
Eq. 4.6.....	41
Eq. 4.7.....	47
Eq. 4.8.....	48
Eq. 4.9.....	48
Eq. 4.10.....	48
Eq. 4.11.....	48
Eq. 4.12.....	49
Eq. 4.13.....	49
Eq. 5.1.....	80
Eq. 5.2.....	83

## Lista de Abreviaturas

AS – Análise de Sensibilidade

AX – Coeficiente de Viscosidade turbulenta longitudinal (CE-QUAL-W2)

BETA – Radiação solar absorvida na camada de superfície da água (CE-QUAL-W2)

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CE-QUAL-W2 - W2, *Corps of Engineers, Quality Model for 2D Waterbodies*

CV – Coeficiente de Variação

DX – Difusividade turbulenta longitudinal (CE-QUAL-W2)

EXH2O – Atenuação da luz devido à água (CE-QUAL-W2)

FRICT – Atrito de Fundo (Chezy ou Manning) (CE-QUAL-W2)

$f_w$  – Coeficiente de abrigo do vento no modelo GLM

GLM – *General Lake Model*

IWAS/ÁGUA-DF – *International Water Resarch Alliance Saxony / Água DF*

LARM – *Laterally Averaged Reservoir Model*

NSE – Coeficiente de Eficiência do modelo (Nash Sutcliffe)

PTARH – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Py3 – Linguagem de programação Python, versão 3

SWAT – *Soil Water Assessment Tool*

UnB – Universidade de Brasília

WSC – Coeficiente de abrigo do vento

# 1 INTRODUÇÃO

A cidade de Brasília apresenta-se como um polo de atração de imigrantes desde a sua criação e tornou-se a terceira maior capital do Brasil em menos de 60 anos, o que faz com que ocorra um aumento constante nos passivos de infraestrutura, saneamento básico, alteração do uso do solo e ampliação dos conflitos existentes entre os usos das águas, principalmente entre agricultura e disponibilidade de água para abastecimento humano (IBGE, 2010; Lorz *et al.*, 2012).

Para suprir as demandas de água da cidade, o Reservatório do Descoberto foi construído para ser o mais importante corpo para captação de água para consumo humano da região no ano de 1970. Atualmente o reservatório supre 1,8 milhões de habitantes (60% da população do Distrito Federal).

A ampliação da demanda hídrica, alterações do uso do solo, bem como os conflitos pelo uso da água, tornou as bacias hidrográficas do Distrito Federal objeto de estudos com a finalidade de distinguir os impactos dessas mudanças. O grupo *International Water Research Alliance Saxony* (IWAS/ÁGUA-DF) publicou uma série de estudos relacionado à depleção dos recursos hídricos da região e mostraram uma forte correlação entre a diminuição das vazões e o aumento da atividade rural nas bacias hidrográficas (Lorz *et al.*, 2012, 2016). Além disso, De Amorim Borges *et al.* (2014) utilizaram conjuntos de Modelos de Circulação Geral Oceano-Atmosféricos (em inglês – GCM) para dar início à análise dos efeitos das mudanças climáticas na região e evidenciaram a existência de uma possível tendência negativa para a precipitação da região do Distrito Federal e a necessidade da continuação dessa frente de estudo.

Nesse contexto, em vista de evidentes mudanças, monitorar as características dos corpos d'água a nível regional pode ser financeiramente custoso. Os modelos matemáticos se apresentam como uma alternativa para o entendimento das dinâmicas físico-bioquímicas dos corpos d'água frente a cenários hipotéticos, pois resumem o conhecimento e funcionamento desses sistemas.

Nos últimos 50 anos, o advento do computador pessoal e de tecnologias computacionais cada vez mais potentes teve como consequência a acessibilidade do uso dos modelos para a gestão dos recursos hídricos. Os modelos tornaram-se sofisticados, acoplando, assim, diversos fenômenos às suas soluções numéricas. Importantes revisões sobre o tema são Vinçon-Leite e

Casenave, (2019), Anagnostou, Gianni e Zacharias (2017), Hipsey *et al.*, (2015) e Mooij *et al.*, (2010).

Dentre os modelos numéricos, tem-se o CE-QUAL-W2 v4.1 (Cole e Wells, 2017), o qual é um modelo numérico, longitudinal-vertical de lagos, rios e estuários capaz de simular a hidrodinâmica, a qualidade da água e processos ecológicos das comunidades aquáticas. O modelo tem sido atualizado desde sua criação e, apesar de sua complexidade, existem trabalhos que comunicam o sucesso em sua aplicação para avaliar o estado trófico de reservatórios (Afshar e Saadatpour, 2009; Kim, Kim e Kim, 2019; Mateus *et al.*, 2014; Ziaie *et al.*, 2019) e para estimar ou simular a estrutura térmica (Soleimani *et al.*, 2018; Threadgill *et al.*, 2017).

Para utilizar o CE-QUAL-W2, são necessários dados em uma alta resolução espacial-temporal, e a necessidade de se estimar valores para diversos parâmetros do modelo. A obtenção desses dados pode ser difícil, pois necessitam da obtenção de equipamentos específicos para as medições e de pessoal capacitado para a utilização dos mesmos (Anagnostou, Gianni e Zacharias, 2017; Cole e Wells, 2017; Vinçon-Leite e Casenave, 2019).

Logo, a ausência de valores estimados para os parâmetros do modelo cria a necessidade de calibração desses parâmetros. Geralmente, um processo de “tentativa e erro” é realizado manualmente para se estipular esses valores, mas tal processo pode elevar o tempo de calibração especialmente de modeladores com pouco conhecimento sobre os processos que governam o sistema modelado (Brêda, Bravo e Paiva, 2017; Cole e Wells, 2017; Houska *et al.*, 2015).

Com vistas à calibração, modeladores desenvolveram algoritmos de otimização e ferramentas de automatização para a calibração dos parâmetros dos modelos em relação a uma função objetivo (ou função de adequação). Um exemplo é o o algoritmo evolutivo *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) desenvolvido por Duan, Sorooshian e Gupta, (1992). O algoritmo é uma técnica robusta capaz de fazer uma busca global para os  $n$  parâmetros que necessitam ser calibrados, e que está disponível em diversos pacotes de otimização.

Nos trabalhos recentes de Livramento (2014) e Vêras (2017), o CE-QUAL-W2 foi utilizado para simular o lago Descoberto e ambos os trabalhos demonstraram grande esforço para calibrar manualmente o modelo com base nas séries de temperatura observadas. Seus trabalhos reportam

diversas dificuldades para a calibração como a edição do extenso arquivo de entrada do CE-QUAL-W2 que pode conter mais de 900 linhas, por possuir uma diversidade de parâmetros biológicos, físicos e químicos, e a falta de clareza do Manual do CE-QUAL-W2 ao explicar a aplicação de cada um dos parâmetros utilizados na simulação.

Assim, este trabalho obteve o modelo e banco de dados construído, de maneira preliminar, por Vêras (2017) e, visando obter melhores ajustes de temperatura para o desenvolvimento do modelo bidimensional, foram realizados a revisão dos dados utilizados e o aprimoramento do modelo. Desenvolveu-se uma rotina automática capaz de utilizar o algoritmo de otimização SCE-UA (Duan, Sorooshian e Gupta, 1992) para calibração dos parâmetros de temperatura e capaz de fazer uma análise de sensibilidade por meio de amostragem aleatória com densidade uniforme. Por último, realizou-se uma análise da termodinâmica e hidrodinâmica do principal segmento do lago no modelo calibrado.

No intuito de explicitar a pesquisa desenvolvida e seus resultados, a presente dissertação está organizada em seis Capítulos, sendo o primeiro a Introdução. No capítulo 2, são definidos o Objetivo Geral e os Objetivos Específicos, seguido pelo Capítulo 3, onde há a fundamentação Teórica e a Revisão Bibliográfica. Já no Capítulo 4, é possível visualizar a metodologia desenvolvida. O Capítulo 5 apresenta os Resultados e a Discussão sobre os mesmos e, finalmente, o Capítulo 6 a Conclusão.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Calibrar o módulo hidrodinâmico do simulador computacional CE-QUAL-W2 com vistas ao desenvolvimento do modelo bidimensional do reservatório do Descoberto.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estabelecer procedimento para a execução automática do simulador computacional CE-QUAL-W2 e calibração do modelo do reservatório do Descoberto;
- Avaliar a sensibilidade dos parâmetros do simulador CE-QUAL-W2 que conduzem o resultado de temperatura do Modelo do Reservatório do Descoberto;
- Analisar o comportamento longitudinal-vertical térmico e hidrodinâmico ao longo do braço principal do reservatório do Descoberto por meio do modelo calibrado;

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

O presente capítulo apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica a que se refere o tema dessa dissertação. Assim, a seguir, buscou-se abordar os seguintes temas:

- 1) Aspectos limnológicos de lagos e reservatórios e das dinâmicas que envolvem sua estratificação térmica;
- 2) Modelagem numérica da qualidade da água e as aplicações do modelo CE-QUAL-W2
- 3) Aspectos básicos de algoritmos genéticos para problemas de otimização;
- 4) Análise de sensibilidade visual por gráficos de dispersão;

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

Lagos e lagoas são corpos d'água continentais que não possuem ligação direta com os oceanos e que detém baixa concentração de íons, se comparados às concentrações verificadas nos ambientes marinhos. Os lagos ocupam apenas 3% da superfície do planeta e são corpos d'água relativamente efêmeros, mantendo-se na paisagem em um tempo relativamente curto da escala geológica. Além do mais, as dinâmicas que ocorrem nesses ambientes são complexas e interdependentes entre si. Algumas delas são a estratificação vertical, distribuição de microrganismos, concentração de nutrientes e concentração de gases.

Esses são uma importante fonte de água potável no planeta. Nos últimos 200 anos, por todo o mundo, diversos lagos foram artificialmente criados para mitigar as necessidades da humanidade. Tais represas apresentam qualidades distintas dos lagos naturais e sua existência influencia os ciclos hidrológicos naturais. (Tundisi & Tundisi, 2008).

O estudo geomorfológico desses corpos hídricos é necessário para estabelecer relações entre as condições naturais e as condições causadas por atividades antrópicas. Fisicamente, as principais características de um lago são suas dimensões: profundidade, comprimento e largura; e a sua forma: dentrítico (ou ramificado), circular e longitudinal; bioquimicamente as principais características são as concentrações de nutrientes, concentrações de gases, os íons disponíveis na água e as populações de organismos. Em suma, essas características são fortemente dependentes da origem geomorfológica do lago.

O ambiente lacustre pode ser didaticamente dividido em três zonas principais: região litorânea, região limnética e região profunda (Figura 3.1). Cada uma dessas regiões possui características biofísicoquímicas distintas que merecem atenção.

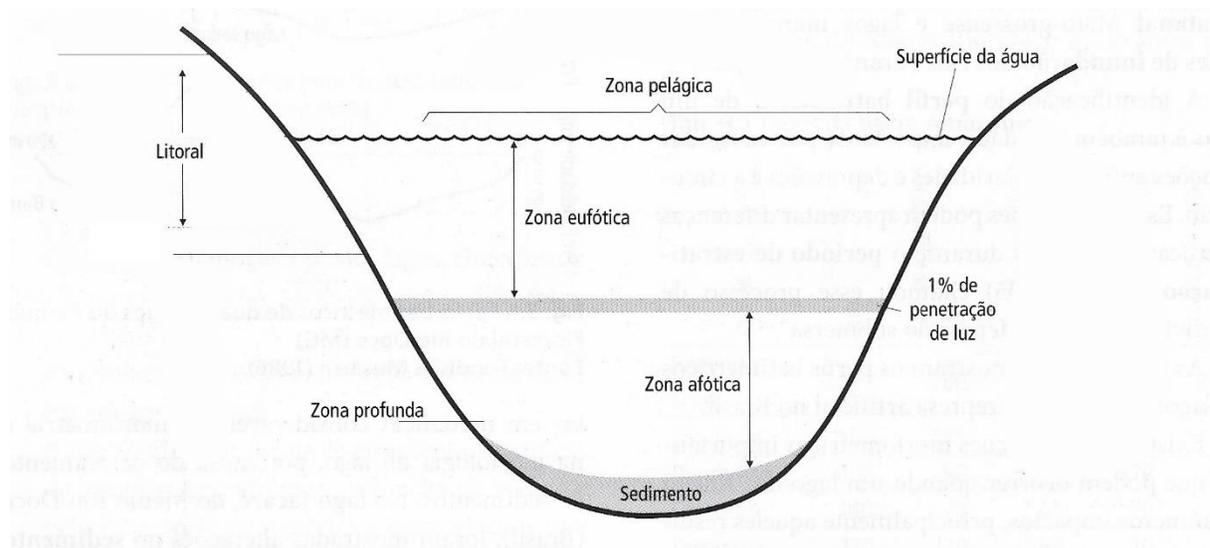


Figura 3.1 Representação das zonas do lago. Adaptadas de (Tundisi e Tundisi, 2008)

A região litorânea é caracterizada pela presença de luz por toda a coluna d'água, mantendo, assim, a presença de macrófitas aquáticas as quais podem ser abrigo para espécies de peixes e também de microrganismos uni e multicelulares. Em alguns lagos, a região litoral pode ter alguns metros de profundidade.

A região limnética é a zona superficial de lagos profundos e que sofre pouca influência do fundo do lago. Essa região pode ser dividida entre zona eufótica (iluminada) e zona afótica (não iluminada) em razão da quantidade de luz que é capaz de penetrar a coluna d'água. As duas zonas são bastante dinâmicas e suas dimensões podem variar em virtude de condições climatológicas e ao longo do dia. A relação entre essas duas zonas é importante para o entendimento da atividade vertical lacustre. Em lagos profundos, dificilmente a coluna estará iluminada em sua totalidade, mas, em virtude de águas transparentes, a região eufótica pode chegar a dezenas de metros de profundidade. Por outro lado, também é possível que, devido à

constituição da água ou a eventos que diminuam significativamente a transparência da água – como a entrada de sedimentos carregados pela chuva, o lançamento de esgotamento sanitário, ou a floração de cianobactérias – a região eufótica possui apenas alguns centímetros de profundidade (Tundisi & Tundisi, 2008).

A região profunda dos lagos constitui-se da deposição de partículas muito finas sedimentares, restos mortais de organismos e da comunidade biológica dos bentos, a qual é extremamente importante para a ciclagem do carbono proveniente da matéria orgânica morta que se depõe. Além disso, algumas populações presentes nos bentos são sensíveis à falta de oxigênio e podem desaparecer. A perda de biodiversidade é um ótimo indicador de impactos às condições naturais da água. Ainda, a região profunda é raramente iluminada e, em períodos de escassez de gás oxigênio, pode acumular concentrações de metano e gás sulfídrico advindos de reações de oxirredução.

A presença de cada uma dessas zonas no lago depende de suas características físicas previamente mencionadas. Por fim, embora as regiões tenham características próprias, todas estão intimamente ligadas pelos processos que ocorrem no ambiente.

No concomitante aos represamentos, esses são planejados estrategicamente para suprir um conjunto de demandas da sociedade, entre elas: água para consumo, água para irrigação, regulação de vazões à jusante e controle de cheias. Dessa forma, as características físicas e bioquímicas mencionadas nos parágrafos anteriores e a posição da estrutura de descarga da barragem são de imensa importância para o gerenciamento da represa.

As dimensões físicas da represa podem ser utilizadas para estabelecer relações hidrológicas importantes para o seu gerenciamento. Uma delas é a profundidade hidrológica do lago (Jørgensen *et al.*, 2005). Essa característica é uma relação entre a profundidade do reservatório e a intensidade eólica da região. Assim, chama-se um reservatório de hidrológicamente raso quando a ação eólica é capaz de misturar o lago verticalmente em sua totalidade, e hidrológicamente profundo quando a ação eólica não é capaz de eliminar a estratificação térmica. Outra relação importante para as dinâmicas do reservatório é o tempo de retenção hidráulico (R) calculado pela razão entre o volume do reservatório ( $m^3$ ) pela vazão média diária efluente ( $m^3.d^{-1}$ ). Essa relação teórica contribui para o gerenciamento da represa, já que as

vazões podem ser controladas e o (R) modificado para cumprir requisitos de qualidade da água inerentes aos objetivos do reservatório.

A construção de lagos artificiais pode gerar um conjunto de consequências positivas e negativas – dispostas na Tabela 3.1. Dentre as negativas está o aumento da área urbana em torno do reservatório que pode acarretar em problemas sociais. A evolução das condições de uso da terra da bacia na qual a represa está inserida, tem grande impacto sobre o processo de sedimentação no lago e sobre a qualidade da água. Basicamente, a sedimentação diminui o volume do reservatório, limitando, inclusive, o seu tempo de vida e é intensificada com a diminuição das áreas verdes na bacia – principalmente as matas ciliares e matas de galeria em torno dos corpos d’água que teriam capacidade de conter o excesso de sedimentos trazidos pela chuva e pelo vento.

Tabela 3.1 Efeitos positivos e negativos da construção de represas, por (Tundisi & Tundisi, 2008)

<b>Efeitos positivos</b>	<b>Efeitos negativos</b>
Produção de energia (Hidroeletricidade)	Deslocamento de populações
Criação de purificadores de água com baixa energia	Emigração humana excessiva
Retenção de água para uma região	Prejuízos às populações humanas originais
Fonte de água potável para sistemas de abastecimento	Problemas de saúde por propagação de doenças hidricamente transmissíveis
Representativa diversidade biológica	Perda de espécies nativas de peixes de rios
Maior prosperidade para setores da população local	Perda de terras férteis e madeira
Criação de oportunidade de lazer e turismo	Perda de várzeas e ecótonos terra/água – estruturas naturais úteis
Proteção contra cheias à jusante	Perda de terrenos alagáveis e alterações em habitats de animais selvagens
Aumento da possibilidade de pesca	Perda da biodiversidade; deslocamento de animais selvagens
Armazenamento de água para períodos de seca	Perda de terras agrícolas cultivadas por gerações, como arrozais
Navegação	Excessiva migração humana para a região do reservatório com consequentes problemas sociais, econômicos e de saúde

Tabela 3.1 Efeitos positivos e negativos da construção de represas, por (Tundisi & Tundisi, 2008) - Continuação.

<b>Efeitos positivos</b>	<b>Efeitos negativos</b>
Aumento do potencial para irrigação	Necessidade de compensação pela perda de terras agrícolas, locais de pesca e habitações, bem como de peixes, atividades de lazer e subsistência
Geração de empregos	Degradação da qualidade hídrica local
Promoção de novas alternativas	Redução das vazões a jusante do reservatório e aumento em suas variações
Controle de enchentes	Redução da temperatura e do material em suspensão nas vazões liberadas para jusante
Aumento da produção de peixes por aquicultura	Redução do oxigênio no fundo e nas vazões liberadas (zero, em alguns casos)
	Aumento do H <sub>2</sub> S e do CO <sub>2</sub> no fundo e nas vazões liberadas
	Barreira à migração de peixes
	Perda de valiosos recursos hídricos e culturais.
	Perda de valores estéticos
	Perda da biodiversidade terrestre, especialmente em represas da Amazônia
	Aumento da emissão de gases de efeito estufa, principalmente em represas onde a floresta nativa não foi desmatada
	Introdução de espécies exóticas nos ecossistemas aquáticos
	Impactos sobre a biodiversidade aquática
	Retirada excessiva de água

Tabela 3.1

Outro impacto causado pelas modificações no uso da terra é a diminuição das vazões dos corpos hídricos, como mostrado em Ferrigo (2014), Ferrigo *et al.*, (2014) e Lorz *et al.*, (2012, 2016). Esses autores demonstraram que o aumento da atividade de irrigação nas bacias hidrográficas do Distrito Federal estava relacionado à depleção das vazões dos córregos, rios e riachos da região.

### 3.1.1 Estratificação térmica

A vida nos lagos depende significativamente da radiação eletromagnética advinda do sol. Essa energia, é estocada em compostos orgânicos por intermédio da fotossíntese, absorvida ou dissipada na forma de calor pela água e seus constituintes. A quantidade de energia disponível

modifica o metabolismo lacustre atuando sobre ciclos de nutrientes e movimentações de massas de água, de gases dissolvidos, e de microrganismos (Tundisi e Tundisi, 2008; Wetzel, 2001).

Parte da radiação solar – componentes de onda longa – é absorvida ainda nos primeiros centímetros da coluna d'água, enquanto o que sobra é extinguido verticalmente de maneira exponencial. Dessa forma, uma zona eufótica de menor dimensão está relacionada a uma maior taxa de absorção/extinção da energia solar e ocasiona maiores temperaturas em águas da superfície em relação às águas de camadas que não são iluminadas (Dake e Harleman, 1969). À essa condição de gradiente vertical de temperatura dá-se o nome de perfil estratificado e está representado pela Figura 3.2.

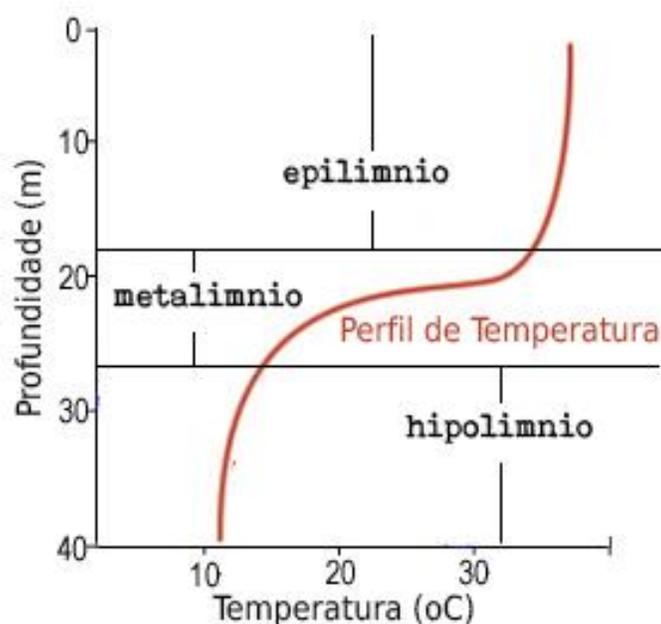


Figura 3.2 Distribuição das camadas verticais de um perfil estratificado termicamente (adaptada de Tundisi e Tundisi, 2008).

Enquanto estratificado, o gradiente de temperatura vertical é suficiente para promover, por diferença de densidade, uma estabilidade térmica na coluna d'água. Dessa forma, a turbulência causada pelo vento se restringe ao estrato superior, o epilímnio, uniformizando-o química e

fisicamente. A contínua absorção de energia e aumento da temperatura no epilímnio se limita a uma camada de queda abrupta da temperatura, o metalímnio, que se torna uma barreira física separadora do epilímnio e do hipolímnio.

O hipolímnio é a camada mais profunda e relativamente mais estável por não estar sob a ação de forças atuantes externas na mesma proporção que o epilímnio e o metalímnio. Ainda assim, a dimensão de cada uma das três camadas é modificada dinamicamente ao longo do ciclo circadiano e das estações do ano, e sua dinâmica depende de características morfológicas e climatológicas da região do lago (Tundisi e Tundisi, 2008; Wetzel, 2001).

Em lagos tropicais, a estratificação pode desaparecer devido ao resfriamento noturno e/ou sazonal das águas superficiais ou pela ação de ventos intensos o suficiente para quebrar a estabilidade do metalímnio, dando lugar a um período de isoterminia e circulação vertical das águas do lago. Ambos os períodos de estratificação e de circulação são acompanhados de alterações físico-químicas e causam implicações importantíssimas para as comunidades biológicas e qualidade da água do reservatório.

Um outro processo importante para a dinâmica térmica dos lagos está relacionado ao encontro das águas dos afluentes com as águas lacustres e é denominado intrusão. As águas afluentes chegam ao lago com uma dada temperatura e densidade própria e podem ser deslocadas verticalmente em razão da diferença de densidade entre as águas ingressantes e as águas do lago.

De Cesare, Boillat e Schleiss (2006) demonstraram efeitos intensos da intrusão ao estudarem um evento de cheia que ocorreu em 1994 no Lago Lugano, Itália. Dados medidos na época mostram que o principal afluente do lago chegou a vazões exageradas que causaram a entrada de uma grande carga de sedimentos. Essas cargas se distribuíram em pontos diferentes de intrusão em razão do perfil de densidade do rio e do lago. Na Figura 3.3 pode-se ver claramente que parte dos sedimentos se manteve acima do metalímnio causando a perda da transparência da água nos primeiros 25 metros do lago e que outra parte se situou entre 80 e 160m, aquecendo as águas de fundo.

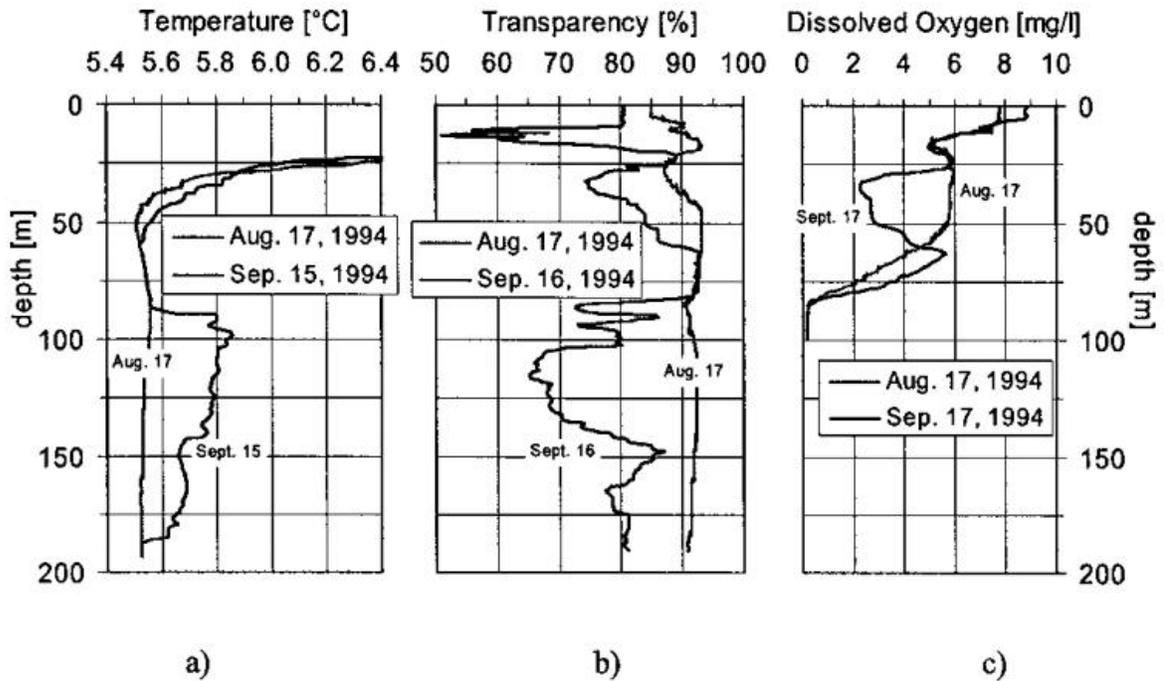


Figura 3.3 Perfis observados de (a) temperatura, (b) transparência e (c) oxigênio dissolvido para o Lago Lugano, antes (17 de agosto de 1994) e poucos dias depois (15 a 17 de setembro de 1994) do evento de cheia (12 de setembro de 1994) (De Cesare, Boillat e Schleiss, 2006).

Dessa forma, pode-se inferir que as águas que intrudiram por um ponto mais profundo do lago possuíam uma densidade maior em virtude dos sólidos dissolvidos. Em consequência, o aquecimento da água causou a movimentação ascendente das águas de fundo, pobres em oxigênio, as quais causaram a depleção das concentrações de oxigênio no metalímnion nos dias seguintes.

Ainda, os autores utilizaram um modelo numérico tridimensional para simular o evento e encontraram evidências de que cheias como a estudada podem causar, além da desestabilização térmica observada na Figura 3.3a, importantes movimentos de mistura do hipolímnion em razão de turbilhonamentos Figura 3.4b causados pela corrente inserida.

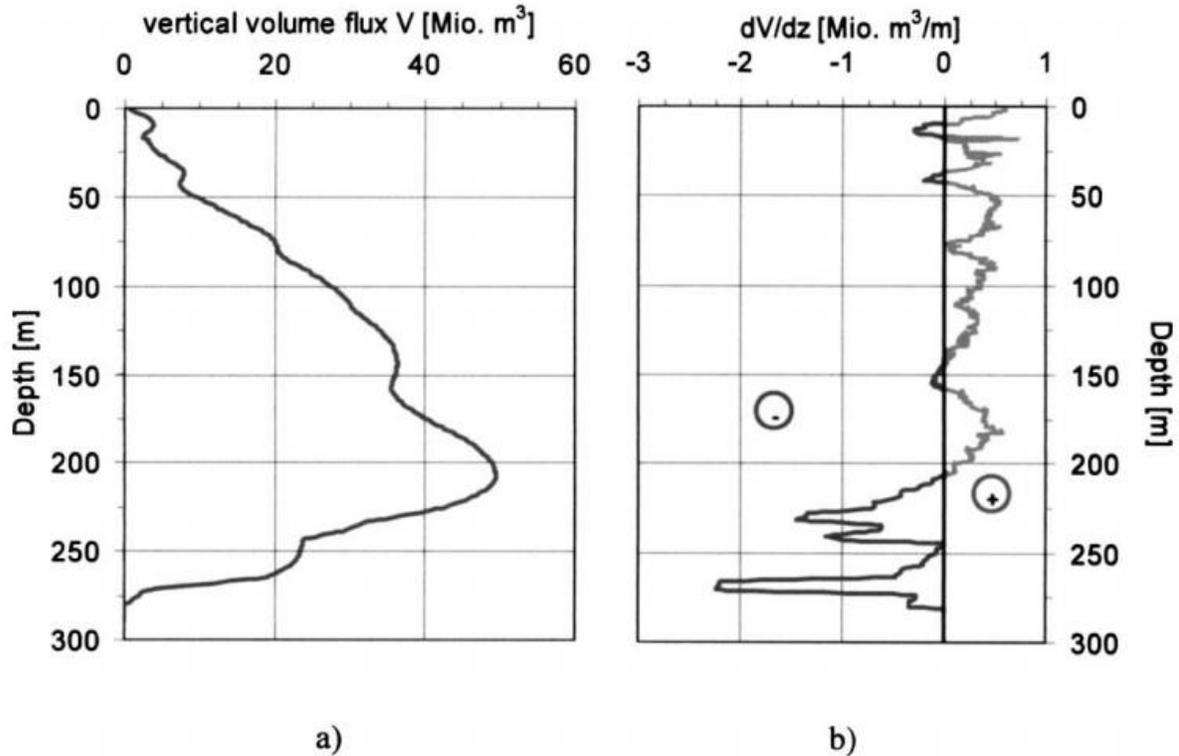


Figura 3.4 a) Fluxo de volume vertical total para cima integrado espacial-temporalmente no modelo numérico em relação à duração do evento de cheia de 12 de setembro de 1994 no Lago Lugano; b) Derivadas dos Fluxo de volume total vertical na profundidade  $z$ , que mostra a água em direção ascendente (+) e descendente (-) (De Cesare, Boillat e Schleiss, 2006).

Variáveis biológicas também podem influenciar os perfis de temperatura. Nesse contexto, (Vilas *et al.*, 2018) relataram eventos de estratificação térmica causados pela presença de macrófitas submersas em um lago raso na Austrália (Figura 3.5). Os autores concluíram que as macrófitas absorviam a energia cinética transferida pelos ventos, e impediam o transporte da energia turbulenta que circularia verticalmente a coluna d'água. Assim, a estabilização das águas superficiais e a incidência contínua de radiação solar durante o dia causou o aumento do gradiente de temperatura e a formação de um gradiente que tornava o Lago Monger estratificado durante o dia e desestratificado durante a noite.

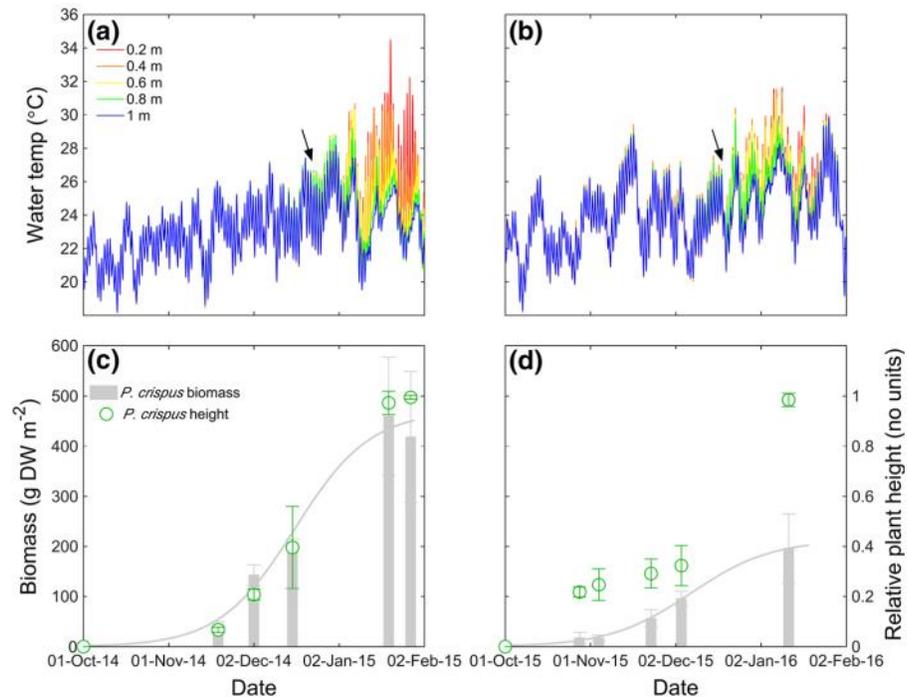


Figura 3.5 Séries observadas de temperatura a 0,2m (vermelho), 0,4m (laranja), 0,6m (amarelo), 0,8m (verde), 1m (azul) durante a temporada de crescimento da macrófitas *P. crispus*. a) 2014-2015 e b) 2015-2016; e valores médios de biomassa (barras cinzas) e altura relativa (círculos verdes) durante as temporadas c) 2014-2015 e d) 2015-2016. As setas indicam o ponto a partir do qual foi observado estratificação consistente durante o diurno (Vilas *et al.*, 2018).

No caso de represamentos, além das causas naturais, a estratificação térmica também é influenciada pela sua operação que, ao tomar a água do reservatório ou vertê-la sobre a barragem, pode retirar uma camada d'água de uma determinada faixa de profundidade-temperatura-densidade, conseqüentemente estratificando ou desestratificando a coluna d'água (Tundisi e Tundisi, 2008).

O tempo de retenção do reservatório também tem o seu papel sobre a estratificação. (Soares *et al.*, 2008) compararam os reservatórios do Funil e Ribeirão das Lajes no estado do Rio de Janeiro. Ambos os reservatórios possuem as mesmas condições climáticas e dimensão, tendo como principal divergência o fato de que o Funil recebe águas servidas da região mais populosa do Brasil, enquanto o Ribeirão das Lajes está em uma área de proteção ambiental e seu tempo de retenção é naturalmente 30 vezes maior que o do primeiro. Embora sobre as mesmas condições climatológicas, o curto tempo de retenção do reservatório do Funil intensifica as

dinâmicas térmicas do lago que estratifica e desestratifica mais de uma vez ao ano, enquanto o reservatório Lajes permanece em uma condição estável de estratificação, havendo apenas a modificação da relação de dimensão vertical do hipolímion/epilímion (Figura 3.6).

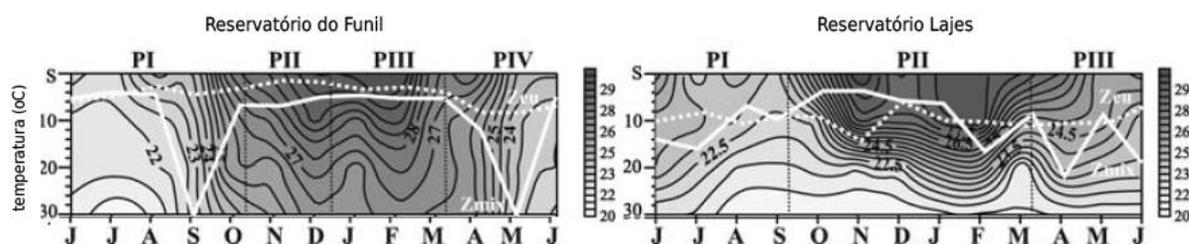


Figura 3.6 Gráficos de área de perfil de temperatura para os reservatórios Funil e Lajes (período entre Junho/2002 e Junho/2003); A linha pontilhada demonstra a zona eufótica (disco de Secchi) dos lagos e a linha sólida a zona de mistura identificada pelo perfil de temperatura (Soares *et al.*, 2008).

Em geral, os reservatórios profundos brasileiros são monomíticos. Ou seja, desenvolvem um único ciclo regular de circulação da coluna d'água, que ocorre geralmente durante o resfriamento das águas superficiais nas estações frias e secas (Soares *et al.*, 2008; Tundisi e Tundisi, 2008).

Em relação à previsão do comportamento da estrutura térmica de reservatórios, modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água são apresentados como uma importante ferramenta. Uma extensiva variedade de modelos de sistemas lacustres foi desenvolvida nos últimos 50 anos para atender específicos problemas, demonstrando o interesse de diversos grupos científicos em representar situações específicas de interesse (Mooij *et al.*, 2010; Tsakiris e Alexakis, 2012).

Dentre os modelos, o CE-QUAL-W2 é um modelo gratuito e de código aberto desenvolvido pela *Portland State University*, Estados Unidos, em conjunto com a *U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station*. O mesmo possui dois módulos, hidrodinâmico e de qualidade da água, capazes de simular rios, lagos e estuários em perfis longitudinal e vertical garantindo que processos importantes sejam visualizados em ambos. O modelo foi criado em 1975 e está em contínuo desenvolvimento desde então, sendo apresentado na versão 4.1 (Cole & Wells, 2017).

### 3.2 O MODELO CE-QUAL-W2

Os primeiros modelos numéricos de qualidade da água procuravam prever concentrações de nutrientes de maneira individual, negligenciando quaisquer interrelações naturais entre os mesmos. Nos anos 70, os modelos de eutrofização procuravam relacionar de forma empírica as concentrações de fósforo com as concentrações de clorofila, e se mostraram úteis no estabelecimento de metas para a redução da eutrofização nos lagos.

Esses modelos tornaram-se mais complexos conforme o avanço da tecnologia e a ampliação da capacidade de computação. Modelos dinâmicos uni, bi e tridimensionais foram desenvolvidos e a eles foi adicionada a possibilidade de simular grupos biológicos, com a finalidade de integrar o conhecimento químico e ecológico dos sistemas lacustres à modelagem.

Nos dias atuais, os objetivos da modelagem podem ser complexos o suficiente para necessitar que diferentes modelos – hidrológicos, hidrodinâmicos, biogeoquímicos e ecológicos – sejam integrados em um único pacote (Hipsey *et al.*, 2015). Ainda, existe uma forte tendência de abordagem publicada nos trabalhos da última década em aumentar a resolução espaço-temporal e o número de variáveis de estado no monitoramento. Muitas vezes isso requer utilizar novos meios de detecção/observação (ex: imagens de satélite), comparar os dados obtidos com resultados modelados e *vice-versa*. Essa tendência pode ser vista nas revisões de Hipsey *et al.*, (2015) e Vinçon-Leite e Casenave, (2019).

O extenso número de modelos publicados na comunidade científica não significa que as abordagens são necessariamente diferentes. Mooij *et al.* (2010) alerta sobre a necessidade científica de utilizar modelos disponíveis na comunidade e parar de “reinventar a roda”. Utilizar exaustivamente os modelos já construídos, expandindo-os e redirecionando as suas abordagens, é uma atividade científica necessária para a criação de conhecimento sobre os sistemas lacustres e sobre as mecânicas inerentes aos modelos.

Ainda, o número de abordagens existentes se traduz na possibilidade de aplicar múltiplas abordagens a um mesmo caso de estudo. Existe uma grande incerteza em termos de se identificar quanta complexidade é necessária para um modelo responder uma dada questão e, dessa forma,

a utilização de diversas abordagens se mostra como um meio de identificar o nível de complexidade necessário e, ainda, para a obtenção de um resultado maior integrador dos resultados de diferentes modelos (Hipsey *et al.*, 2015; Mooij *et al.*, 2010).

Assim, o Departamento de Engenharia Ambiental e Civil da Universidade de Brasília produziu dissertações de mestrado e bacharelado nas quais foram aplicados os modelos CE-QUAL-W2 – bidimensional – e GLM – unidimensional – para a simulação do Lago Descoberto. Parte da discussão desse trabalho leva em consideração os resultados obtidos nos mesmos.

O CE-QUAL-W2 é resultado de derivações produzidas sobre o modelo LARM (*Laterally Averaged Reservoir Model*). Enquanto o LARM havia sido desenvolvido para simular reservatórios sem braços, foi adicionada ao CE-QUAL-W2 a capacidade de simular reservatórios com múltiplos braços e de complexa geometria, condições de estuários e a qualidade da água.

No subsequente desenvolvimento do CE-QUAL-W2, adicionaram-se diversas melhorias como a capacidade de simular diferentes corpos d'água simultaneamente, diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade da água, e diferentes resoluções temporais e espaciais, além de novos e mais eficientes métodos matemáticos. O histórico de melhorias do modelo pode ser encontrado em seu manual (Cole e Wells, 2017).

Seu módulo hidrodinâmico é capaz de, por exemplo, simular a densidade da água e suas variações devido à salinidade, temperatura e sólidos suspensos e dissolvidos, e também o movimento e a mistura gerada por tais variações. Em paralelo, o módulo de qualidade da água tem o propósito de simular diversos parâmetros químicos, físicos e biológicos de qualidade. Entre os parâmetros possíveis de serem simulados estão: OD, DBO, ortofosfato, nitrogênio amoniacal, sólidos totais dissolvidos, penetração de luz solar, ferro total dissolvido, clorofila A, carbono orgânico, sílica dissolvida, coliformes, entre outros. Mais de 20 variáveis de estado estão disponíveis para simulação no módulo de qualidade da água. A

Tabela 3.2 contém as equações que governam o modelo CE-QUAL-W2 (Cole e Wells, 2017; Liporoni, 2012).

Tabela 3.2 Equações governantes do modelo CE-QUAL-W2 para corpos de água com canal sem declividade e com declividade. Retirada de Liporoni (2012)

Equação	Equação governante assumindo a não existência de declividade no canal e sem conservação do momento nas intersecções da ramificação.	Equação governante, assumindo uma declividade arbitraria no canal e conservação do momento nas intersecções da ramificação.
Equação da quantidade de movimento em x	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} =$ $gB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}$	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha$ $g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x$
Equação da quantidade de movimento em z	$0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$	$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$
Equação da conservação de massa ou continuidade	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$
Equação de estado ou complementar	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$
Equação da superfície livre	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$
<p><math>U</math> = velocidade horizontal, <math>ms^{-1}</math>    <math>\tau_x</math> = média lateral da tensão de cisalhamento na direção x  <math>W</math> = velocidade vertical, <math>ms^{-1}</math>    <math>\tau_y</math> = média lateral da tensão de cisalhamento na direção y  <math>B</math> = largura do canal                      <math>\rho</math> = densidade  <math>P</math> = pressão                                      <math>\eta</math> = superfície da água</p>		

O transporte de massa de água e dos constituintes de qualidade da água são simulados a partir de equações derivadas dos princípios de quantidade de movimento e da conservação de massa. A solução numérica de diferenças finitas é a base para resolução dessas equações.

O CE-QUAL-W2 possui algumas limitações inerentes às simplificações assumidas em seu código. A primeira é referente a sua aplicação a corpos d'água dos quais os dados de campo demonstram significativa variação lateral. Tal situação pode ser encontrada em corpos nos quais as margens laterais se encontram muito espaçadas. Como o modelo negligencia qualquer variação lateral, é necessário que o usuário julgue se o CE-QUAL-W2 é realmente o melhor modelo a ser aplicado no caso específico.

Dentre as vantagens de se utilizar um modelo bidimensional como o CE-QUAL-W2 está a possibilidade de avaliar as respostas do modelo por toda a extensão do corpo d'água. Em compensação, diferentes dados de monitoramento são necessários para o estabelecimento de condições iniciais e de contorno ao modelo, e podem não estar disponíveis, assim demandando a coleta ou estimativa empírica desses dados.

### **3.2.1 Aplicações do CE-QUAL-W2**

Segundo Liporoni (2012) o CE-QUAL-W2 é um dos modelos de qualidade de água com alta frequência de atualização. O *website* (<http://www.ce.pdx.edu/w2>) dos desenvolvedores do modelo registra 123 aplicações ocorridas em solo brasileiro, entretanto, esse registro parece defasado, pois consta com o mesmo valor no trabalho de Liporoni (2012). Devido às características do CE-QUAL-W2 previamente mencionadas, suas aplicações na literatura são muito variadas e, assim, este tópico procura apresentar algumas das aplicações do modelo CE-QUAL-W2 em trabalhos brasileiros e estrangeiros voltados à análise da estratificação térmica e da eutrofização de lagos e reservatórios.

Entre os objetivos mais comuns do uso do CE-QUAL-W2 estão a análise da estratificação térmica e da eutrofização dos lagos. Para esses objetivos, uma etapa de calibração do módulo hidrodinâmico ou, seguidamente, dos módulos hidrodinâmicos e da qualidade da água do modelo é necessária para que o modelo exiba as características limnológicas do objeto de estudo. Em um trabalho recente Ziaie *et al.*, (2019) investigou os impactos da estratificação e a eutrofização do reservatório Zayandeh Roud, Irã, estabelecendo relações entre as temperaturas

do ar durante o ano, a presença da estratificação térmica e os perfis de concentração de nutrientes na coluna d'água.

Outros trabalhos utilizando o CE-QUAL-W2 que compartilham desse objetivo são Afshar e Saadatpour (2009), Kim, Kim e Kim (2019), Mateus *et al.* (2014), Threadgill *et al.* (2017); Zouabi-Aloui, Adelana e Gueddari (2015) e oferecem importante subsídio para o gerenciamento de seus objetos de estudo, tais como: relações entre efeitos climáticos e as cargas de nutrientes que entram no lago; impacto da operação de estações de tratamento de esgoto às comunidades planctônicas lacustres; redução da poluição necessária para satisfazer uma meta preestabelecida de qualidade da água; impactos de tomadas de água para produção sobre o perfil térmico; e evolução do perfil térmico durante o ano.

Na região do Distrito Federal, a simulação do Lago Descoberto e do Lago Paranoá no CE-QUAL-W2 aparecem como objeto de estudo pela primeira vez nos trabalhos de Silva (2009) e Liporoni (2012) respectivamente. Esses trabalhos são o marco inicial da utilização do CE-QUAL-W2 nos dois lagos e abriram caminho para os trabalhos de Livramento (2014) e Vêras (2017) que desenvolveram um outro modelo CE-QUAL-W2 para o Reservatório do Descoberto.

Em geral, os trabalhos publicados em periódicos não relatam os desafios de simular um lago com o CE-QUAL-W2, porém, os trabalhos acima são dissertações de mestrado e bacharelado e relatam diversos desafios para desenvolver os modelos, entre eles: a obtenção dos dados necessários para a definição das condições de contorno dos constituintes da água, a dificuldade no estabelecimento da estabilidade hidrodinâmica por meio da grelha numérica - causando a interrupção das simulações, a difícil calibração das temperaturas e das concentrações de nutrientes nas diferentes profundidades, a falta de clareza do Manual do CE-QUAL-W2 em explicar a aplicação de seus parâmetros em seus processos internos e a falta de ferramentas robustas para a edição dos arquivos de entrada e para leitura dos arquivos de saída do modelo.

Mesmo com todas as dificuldades, o CE-QUAL-W2 se apresenta como um potencial simulador dos lagos do Distrito Federal, pois os autores constatam que os modelos desenvolvidos são capazes de seguir as tendências dos dados observados, adquirindo, assim, uma adequação aceitável dos dados de saída aos dados observados.

Uma forma de investir em direção à calibração de um modelo complexo como o CE-QUAL-W2 é utilizar técnicas de otimização para encontrar os melhores valores para os parâmetros. Essas técnicas auxiliam o modelador a testar diferentes valores para os parâmetros e avaliar a adequação dos dados de saída do modelo aos dados medidos em campo e em relação a uma função objetivo (também chamada de função de adequação).

### **3.3 ASPECTOS BÁSICOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO**

Conceitua-se otimização como um método de busca do valor de  $n$  variáveis para o estabelecimento de um melhor resultado para uma função  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Em geral, a proposição dos problemas de otimização busca encontrar o máximo ou mínimo resultado da função, e, assim, técnicas foram desenvolvidas para as suas resoluções.

Tais técnicas podem ser tipificadas em razão de suas características. Dentre essas, as técnicas de otimização global são robustas o suficiente para garantir a localização do máximo/mínimo global.

Segundo Tucci, (1998), duas técnicas globais utilizadas são:

- a) Técnicas aleatórias baseadas em extensivo uso computacional;
- b) Algoritmos genéticos baseados em conceitos da evolução biológica e seleção natural dos melhores valores dos parâmetros.

Assim, os algoritmos genéticos se baseiam nas observações de Charles Darwin sobre a evolução das espécies: os indivíduos adaptados a um determinado ambiente têm maiores chances de sobrevivência e de serem “selecionados naturalmente”, e gerar prole.

Em geral, os algoritmos evolutivos seguem os seguintes passos (Mirjalili, 2018):

- a) Avaliação: Cada conjunto de parâmetros da população amostrada recebe um valor calculado de função objetivo. Os conjuntos são ranqueados de forma que os piores avaliados tenham menores chances de serem selecionados para a próxima etapa;
- b) Seleção: Os conjuntos recebem um valor de “probabilidade de seleção” baseado no ranqueamento anterior, e o algoritmo genético utiliza a probabilidade para selecionar

aleatoriamente os conjuntos que seguirão para a etapa de reprodução (Figura 3.7) (Tabela 3.3).

- c) Eliminação e regeneração: Nessa etapa, os conjuntos que não foram selecionados: i) podem ser eliminados e substituídos por um igual número de novos conjuntos; ii) podem ser parcialmente eliminados e substituídos; e iii) podem não ser eliminados e continuar na população;
- d) Reprodução: Os conjuntos selecionados podem ser: i) modificados por um conjunto de passos pré-definidos (*mutação*); ii) podem ser combinados  $n$  a  $n$  para a criação de novos conjuntos (*crossing-over*); ou iii) podem passar pelos dois processos (Figura 3.8).
- e) Parada: Quando o critério de parada previamente estabelecido for satisfeito, o algoritmo encontrou o resultado ótimo para a função objetivo;
- f)



Figura 3.7 Probabilidade de seleção de cada conjunto. O algoritmo genético seleciona aleatoriamente os conjuntos que irão para a fase de reprodução baseando-se nessa divisão.

Tabela 3.3 Detalhes dos conjuntos da Figura 3.7. O conjunto mais bem avaliado é o #5.

Identificação do conjunto	Valor de função objetivo	% do total
1	22,85	5
2	45,7	10
3	68,55	15
4	114,25	25
5	205,65	45
Total	457	100

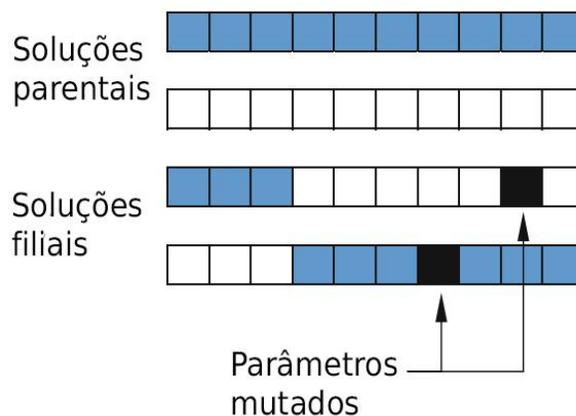


Figura 3.8 Exemplo de combinação de conjuntos parentais para a geração de soluções filiais e do efeito de um operador mutagênico gerando novas características. Adaptado de (Mirjalili, 2018)

Dentre os algoritmos evolutivos, o *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) foi desenvolvido por Duan, Sorooshian e Gupta (1992). O método é capaz de uma robusta busca global pelo ponto ótimo do objetivo, vencendo dificuldades como a interdependência dos parâmetros e múltiplas regiões de atração. Outra vantagem do SCE-UA é o menor número necessário de execuções do modelo para encontrar o ponto ótimo.

Finalmente, para verificar se os valores encontrados durante a otimização são valores fisicamente consistentes, o modelador pode se basear no seu conhecimento sobre o sistema simulado. Entretanto, sendo o modelo uma simplificação, torna-se importante avaliar o impacto da variação de cada um dos parâmetros em relação ao resultado do modelo.

Nesse sentido, a Análise de Sensibilidade pode ajudar o modelador a entender os comportamentos do modelo e sua coerência em relação ao sistema que ele representa, revelar erros técnicos do modelo, simplificá-lo e estabelecer prioridades de pesquisa.

### 3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE VISUAL POR GRÁFICOS DE DISPERSÃO

Análise de sensibilidade (AS) pode ser definida basicamente como o estudo do quanto o resultado de um determinado modelo depende de seus parâmetros.

Os métodos de AS podem ser divididos em duas escolas: AS local e AS global. A AS local – também chamada como AS derivativa, a resposta do modelo é analisada variando-se um de seus parâmetros por vez e calculando-se a derivada parcial normalizada por um valor nominal – central à faixa de variação do parâmetro. Na segunda, a variação dos parâmetros é realizada concomitantemente e a análise das variações do resultado do modelo é realizada em relação à variação de todos os parâmetros e da resposta do modelo a essa variação (Saltelli *et al.*, 2008).

Embora a abordagem local por derivativas parciais seja muito eficiente computacionalmente, ela é incapaz de garantir que o parâmetro é realmente sensível, principalmente quando a saída do modelo é não-linear. Por outro lado, uma análise visual em gráficos de dispersão de uma coleção de pontos, amostrados aleatoriamente nas  $n$  dimensões do modelo, pode informar mais robustamente sobre a influência de um determinado parâmetro sobre o resultado do modelo que a forma anterior (Saltelli *et al.*, 2008).

Para exemplificar a técnica, utilizar-se-á um caso hipotético, presente em (Saltelli *et al.*, 2008): 1000 amostras aleatórias dos parâmetros  $Z_1, Z_2, Z_3$  e  $Z_4$  foram obtidas de um modelo dito linear, e os resultados  $Y = f(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)$  foram dispostos na Figura 3.9. Ao analisar a figura, pode-se dizer que o parâmetro  $Z_4$  é o mais sensível dos parâmetros pois os pontos se dispõem em uma “forma”, e se dispõem de maneira não uniforme nos quatro quadrantes da imagem, ao invés da completa uniformidade exibida pelo parâmetro  $Z_1$ . Pode-se dizer, baseado na técnica, que a ordem de sensibilidade dos quatro parâmetros é  $Z_4 > Z_3 > Z_2 > Z_1$ .

Para uma visualização ainda mais robusta dos efeitos de cada parâmetro sobre o resultado do modelo, pode-se dividir o eixo X (os valores de  $Z_1, Z_2, Z_3$  e  $Z_4$ ) em  $p$  fatias e calcular o valor médio de Y em cada uma das fatias (no exemplo  $p = 10$ ). O resultado obtido desse processo é a média da variação de Y em relação ao parâmetro analisado (Figura 3.10). Ao analisar os gráficos de dispersão, tem-se que a variação média de Y em  $Z_4$  é maior que a de todos os outros parâmetros, demonstrando que  $Z_4$  é o principal condutor do resultado do modelo.

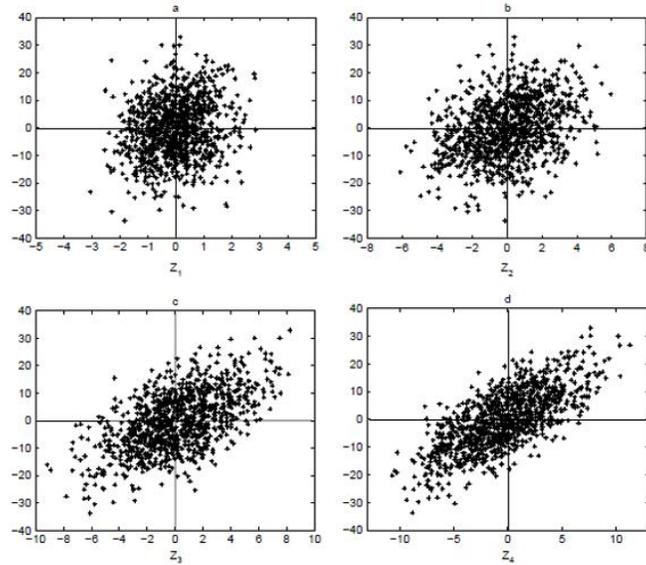


Figura 3.9 Gráficos de dispersão de Y versus  $Z_1, Z_2, Z_3$  e  $Z_4$ . A uniformidade de pontos nos quatro quadrantes é considerado um sintoma de não sensibilidade do parâmetro ao resultado do modelo. Fonte: (Saltelli *et al.*, 2008)

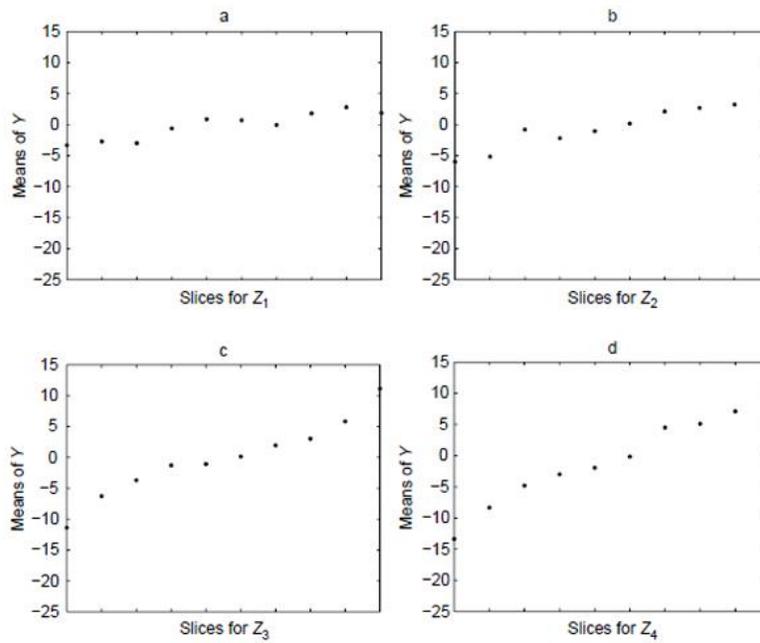


Figura 3.10 Valores médios de Y em relação aos parâmetros  $Z_1, Z_2, Z_3$  e  $Z_4$ . A variação média do resultado do modelo em relação a cada um dos parâmetros é um ótimo indicador de sua sensibilidade. Fonte: (Saltelli *et al.*, 2008).

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo elucida os métodos utilizados para a produção deste trabalho, apresentado em cinco estágios:

- a) Caracterização da área de estudo;
- b) Obtenção do banco de dados e sua adequação ao objetivo do trabalho;
- c) Construção e adequação do *script* de calibração e análise de sensibilidade para os arquivos de entrada do CE-QUAL-W2;
- d) Calibração dos parâmetros influenciadores da temperatura da água no modelo e
- e) Análise de sensibilidade dos parâmetros.

Abaixo, o fluxograma (Figura 4.1) apresenta as etapas da metodologia.

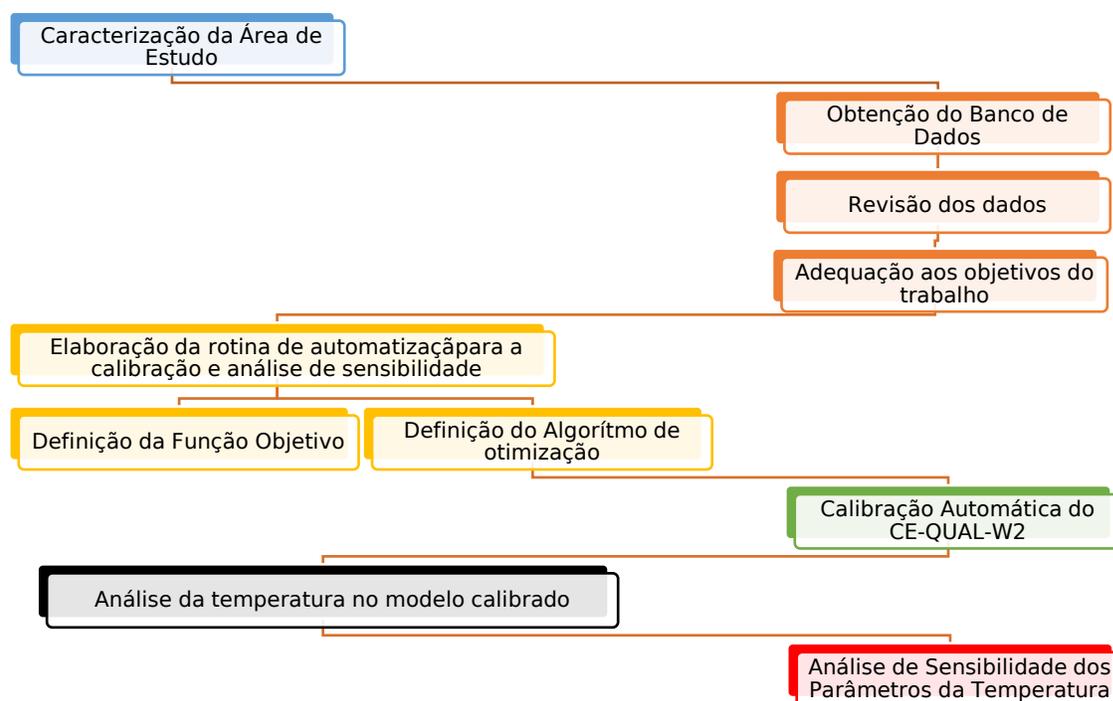


Figura 4.1 Fluxograma contendo as etapas do trabalho.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O reservatório do Descoberto se inclui na Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto, situada no limite oeste do Distrito Federal – com o estado de Goiás. Parte de sua área é pertencente ao

estado vizinho – cerca de 30%. As águas do rio Descoberto brotam nas coordenadas 15°37'S e 48°10'W e é formado pelo encontro dos córregos Barroirão e Capão da Onça. As Figura 4.2 e Figura 4.3 exibem a localização da bacia e sua divisão em sub bacias.

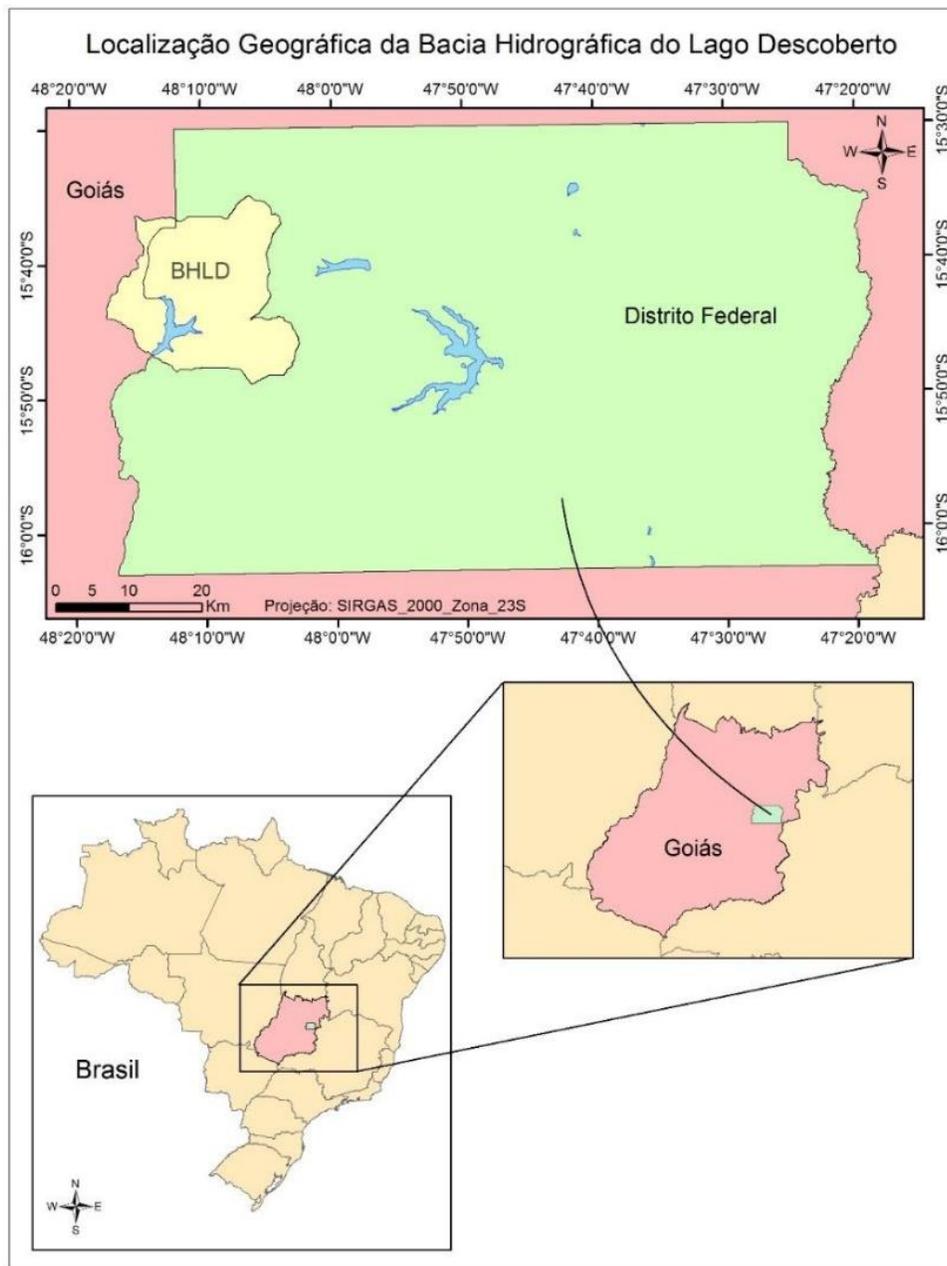


Figura 4.2 Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do lago Descoberto (Ferrigo, 2014).

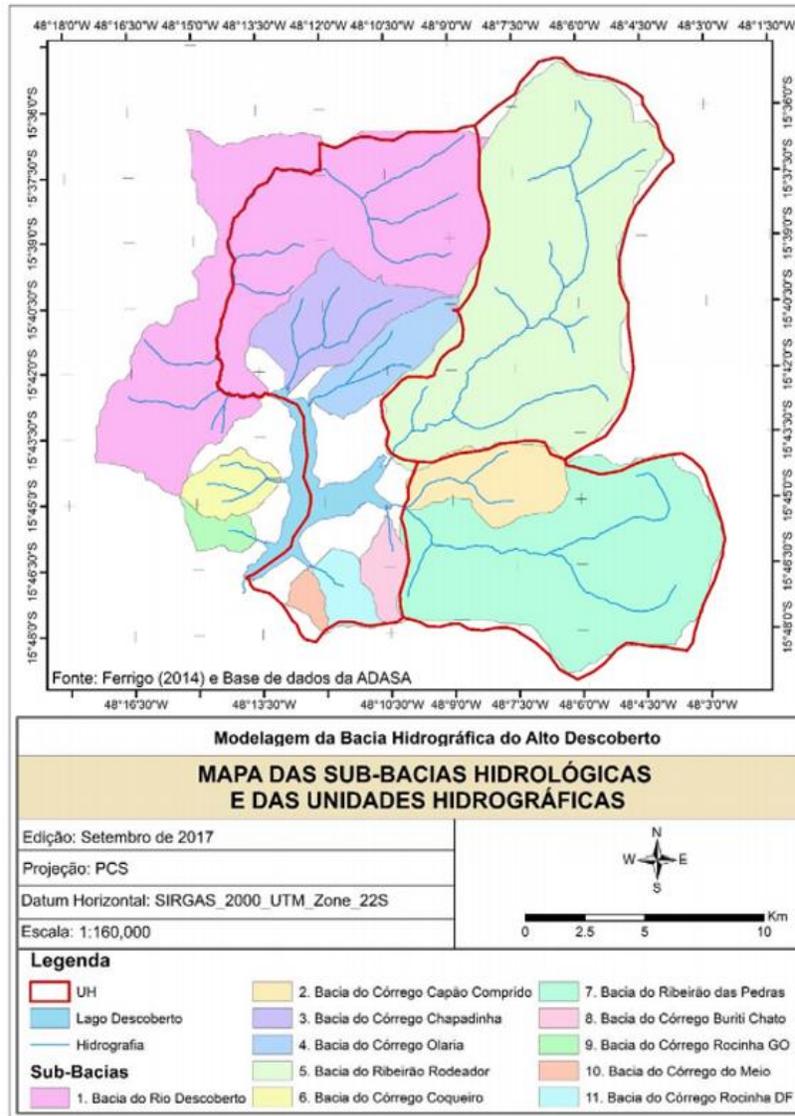


Figura 4.3 Mapa das sub bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto (ADASA, 2018)

Inaugurado em 1974, com área alagada de 12km<sup>2</sup>, volume máximo de 102,3 hm<sup>3</sup>, e tempo de retenção de 125 dias, o reservatório do Descoberto possui a função estratégica de abastecer 60% da população do Distrito Federal (1,8 milhões de habitantes) (Cavalcanti, 2018). O lago está localizado em região de clima classificado, como região tropical savânica Aw (Köppen) com duas estações bem definidas: quente e úmida – de Outubro a Abril, e fria e seca – de Maio a Setembro. Por estar em uma região com essas características, o lago Descoberto apresenta

características térmicas de lagos monomíticos quentes com o seu período de circulação ocorrendo no inverno (Figura 4.4).

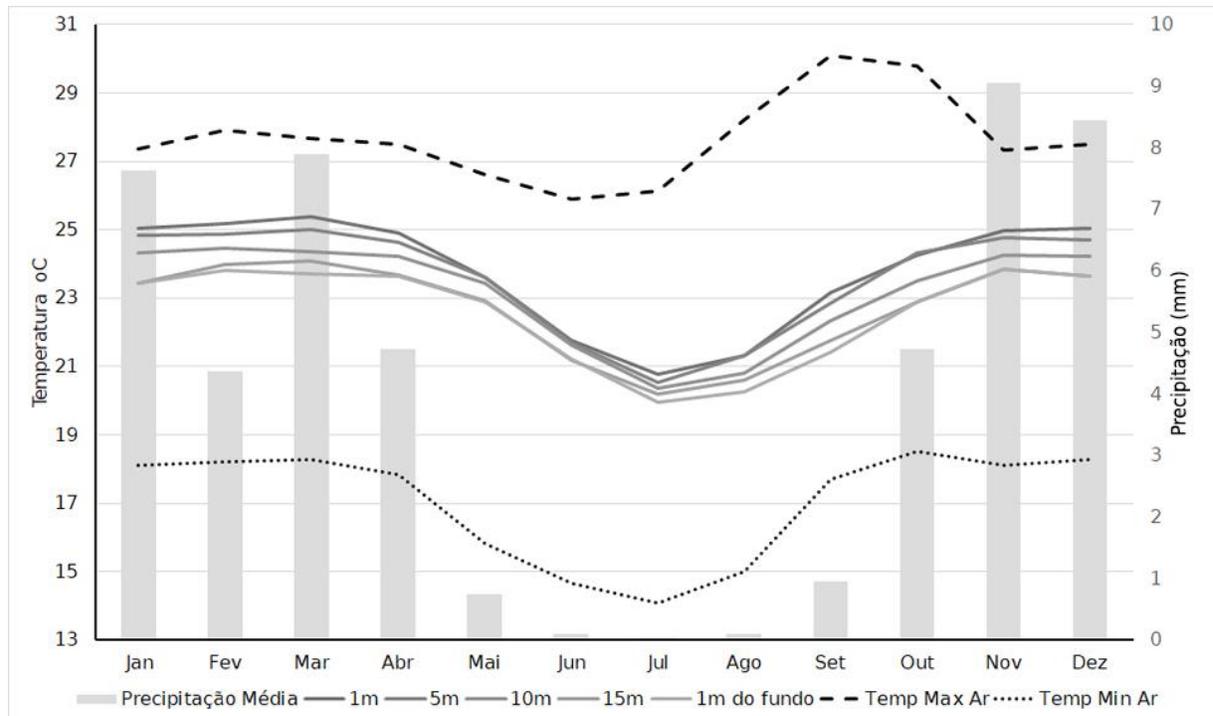


Figura 4.4 Média 2010-2017 da temperatura máxima e mínima do ar, temperatura observada no Lago Descoberto (CAESB) nas profundidades de 1m, 5m, 10m, 15m e 1m do fundo e precipitação média diária (INMET). A região na qual o reservatório está inserido possui duas estações bem definidas: uma fria e seca (Maio-Setembro) e uma quente e úmida (Outubro-Abril). O Lago Descoberto demonstra característica térmica de lagos monomíticos, havendo uma aproximação das temperaturas da coluna d'água durante a estação fria.

Dados de vazão e temperatura obtidos com a CAESB, demonstram que, durante a temporada chuvosa, a sub bacia do Rio Descoberto se torna a principal fonte do volume de água que escoar até o Reservatório. Em contra partida, durante os períodos secos, o Ribeirão das Pedras possui a maior vazão (Figura 4.5). Ainda, os dados demonstram que a temperatura da água nos tributários do reservatório aumenta durante a estação chuvosa (Outubro a Abril) (Figura 4.6).

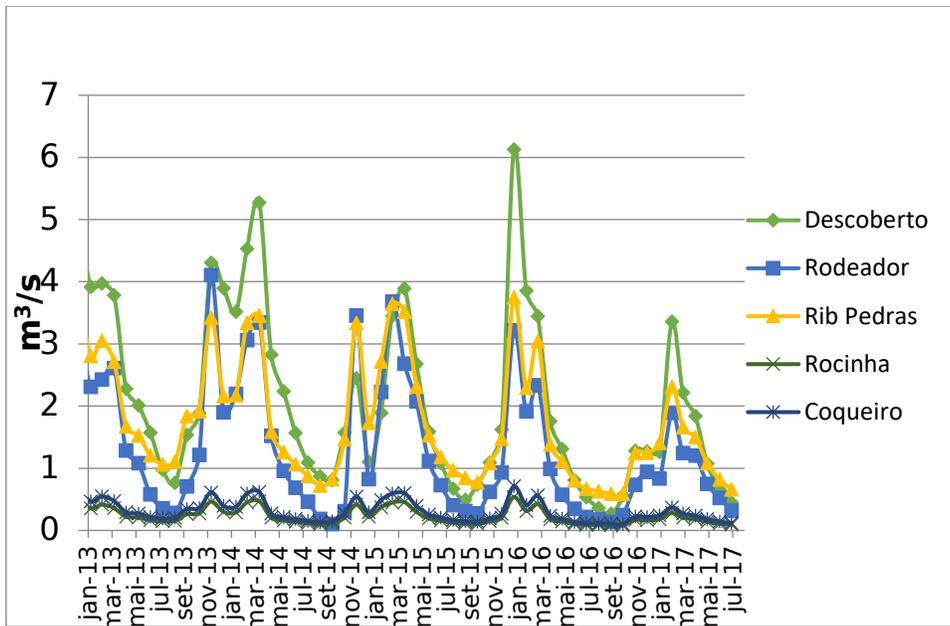


Figura 4.5 Séries de vazão média mensal utilizadas como condição de contorno no modelo CE-QUAL-W2 (Fonte: CAESB e ADASA)

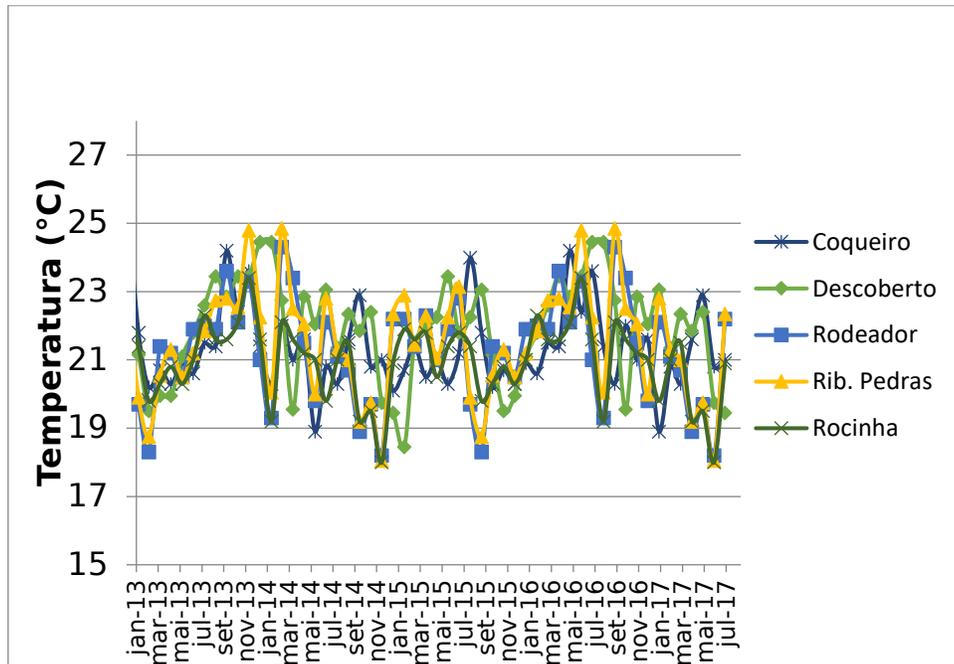


Figura 4.6 Séries mensais de temperatura utilizadas como condição de contorno no modelo CE-QUAL-W2 (Fonte: CAESB e ADASA)

No tocante ao interesse público na manutenção dos sistemas ecológicos e da qualidade da água do reservatório, essa se demonstra pelo decreto 88.940 de 7 de novembro de 1983 (Brasil, 1983), o qual constituiu a Área de Proteção Ambiental (APA) da Bacia do Descoberto. Entretanto, devido à intensa demanda agrícola e urbana da região, o uso do solo na bacia sofreu mudanças intensas desde a definição da APA.

A montante do lago, encontram-se, em geral, ocupações urbanas de baixa densidade populacional, embora loteamentos de alta densidade também sejam encontrados na sub-bacia do Ribeirão das Pedras.

Também são encontrados loteamentos rurais utilizados na agricultura extensiva, produção de gado bovino e suinocultura em escala comercial, reflorestamentos com eucaliptos e pinheiros também são encontrados, assim como loteamentos voltados à agricultura familiar (hortifrutigranjeiros). (Ferrigo, 2014) fez uma detalhada tipificação das ocupações e usos no território da bacia, apontando a localização de ocupações urbanas, rurais, rodovias, áreas de reflorestamento, áreas de cerrado preservado, matas de galeria, cascalheiras e açudes.

O ano de 2017 foi marcado pelo início de uma grave crise hídrica no Distrito Federal. A crise durou 1 ano e 4 meses e, de acordo com o Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica consolidado pelo governo do Distrito Federal (Distrito Federal, 2018), a principal causa da crise foram as chuvas abaixo da média que ocorreram de 2013 a 2016, as quais ocasionaram a redução das vazões dos principais tributários do lago. Embora não exista literatura extensa sobre o período da crise hídrica, trabalhos anteriores à crise já demonstravam tendências de diminuição das vazões e do aumento da entrada de sedimentos na bacia em razão da intensificação do uso agrícola e urbano do solo e de mudanças climáticas (Amorim Borges, de *et al.*, 2014; Ferrigo, 2014; Ferrigo *et al.*, 2014; Lorz *et al.*, 2012, 2016), constatando a necessidade de políticas para o controle da ocupação na bacia em favorecimento da manutenção das qualidades do reservatório.

## 4.2 REVISÃO E ADEQUAÇÃO DO BANCO DE DADOS AO CE-QUAL-W2

Após a caracterização da área de estudo, seguiu-se para a obtenção do banco de dados e adequação aos objetivos propostos. O banco de dados empregado neste trabalho foi construído por (Livramento, 2014) e complementado e disponibilizado por (Véras, 2017).

Para a simulação hidrodinâmica do lago Descoberto no CE-QUAL-W2, foi necessário o estabelecimento de:

- a) Condições Iniciais;
- b) Dados geométricos;
- c) Condições de contorno;
- d) Parâmetros hidráulicos;
- e) Parâmetros termodinâmicos e hidrodinâmicos

O entendimento de como cada um dos conjuntos de dados contribui para o modelo é imprescindível para a simulação. Por essa razão, essa seção tem o objetivo de esclarecer de forma resumida a confecção dos arquivos utilizados no CE-QUAL-W2 e a definição de seus parâmetros.

### 4.2.1 Condições iniciais

As condições iniciais são: a) o período de simulação (TMSTART – início do período; TMEND – fim do período); b) a temperatura inicial das águas do modelo (IT2) e o tipo de corpo d'água simulado (água doce, ou salgada) (WTYPE), e essas informações foram adicionadas diretamente no arquivo de controle “w2\_con.npt”.

A determinação do período de simulação foi realizada apoiada sobre a análise da frequência dos dados contidos no banco de dados. A princípio, objetivava-se utilizar o módulo de qualidade de água do CE-QUAL-W2, e por essa razão os dados de qualidade da água também participaram da análise.

A temperatura inicial da água foi definida utilizando-se os dados observados no mês da data de início da simulação (24 °C), e o tipo de corpo d'água foi definido como de água doce.

#### 4.2.2 Dados geométricos

A geometria do lago é definida dentro da malha de simulação do modelo (bth.npt) confeccionado por Livramento (2014), no qual dados topográficos providos pela CAESB foram utilizados. A malha está dividido em quatro braços (Figura 4.7): o braço principal (segmentos 1 a 20), o braço 2 (segmentos 21 a 29), o braço 3 (segmentos 30 a 35) e o braço 4 (segmentos 36 a 41).

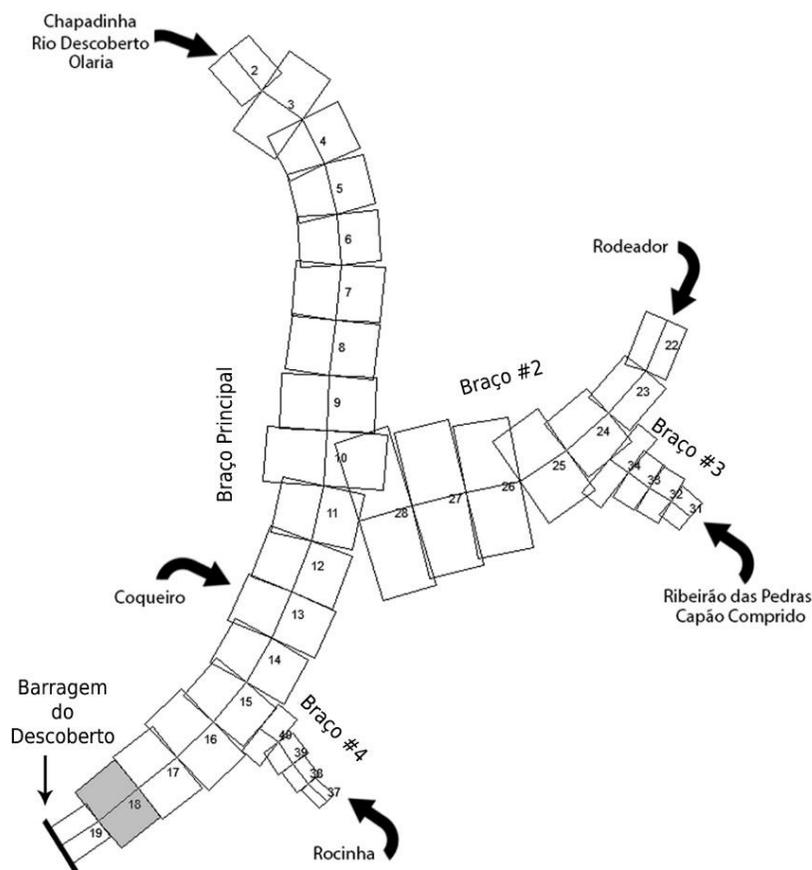


Figura 4.7 Representação longitudinal da segmentação do lago Descoberto no modelo CE-QUAL-W2 e a indicação dos principais afluentes em cada um de seus braços.

Os segmentos 1, 20, 21, 29, 30, 35, 36 e 41 possuem largura igual a zero e são utilizados pelo CE-QUAL-W2 como condição de contorno entre os braços. Cada segmento é dividido em camadas – a depender da sua profundidade, tendo definido a cada uma delas um metro de profundidade (Figura 4.8). As extremidades superior e inferior são condições de contorno e possuem profundidade igual a zero.

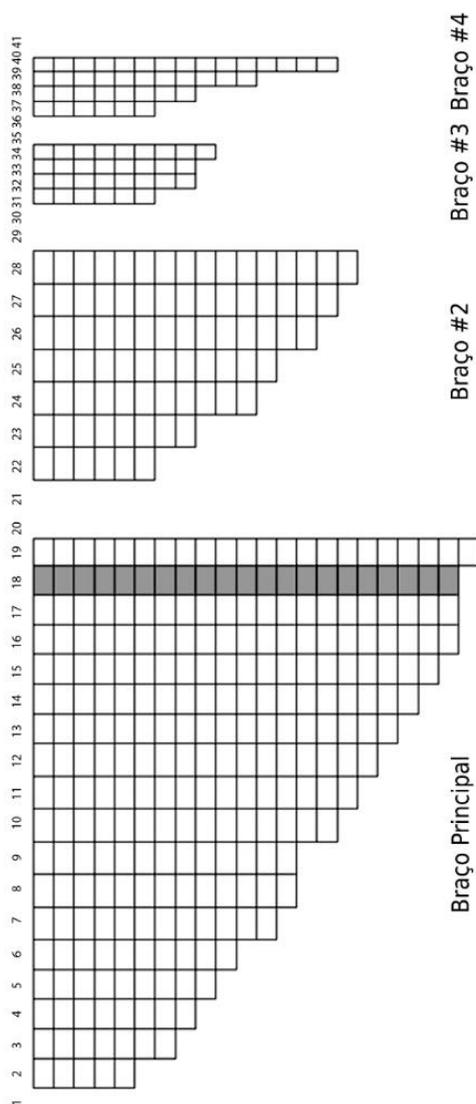


Figura 4.8 Representação vertical do lago Descoberto no modelo CE-QUAL-W2. Os tamanhos dos segmentos estão apresentados com tamanho relativo.

Os contornos batimétricos confeccionados por Livramento (2014) e utilizados para a construção da malha de simulação encontram-se na Figura 4.9.

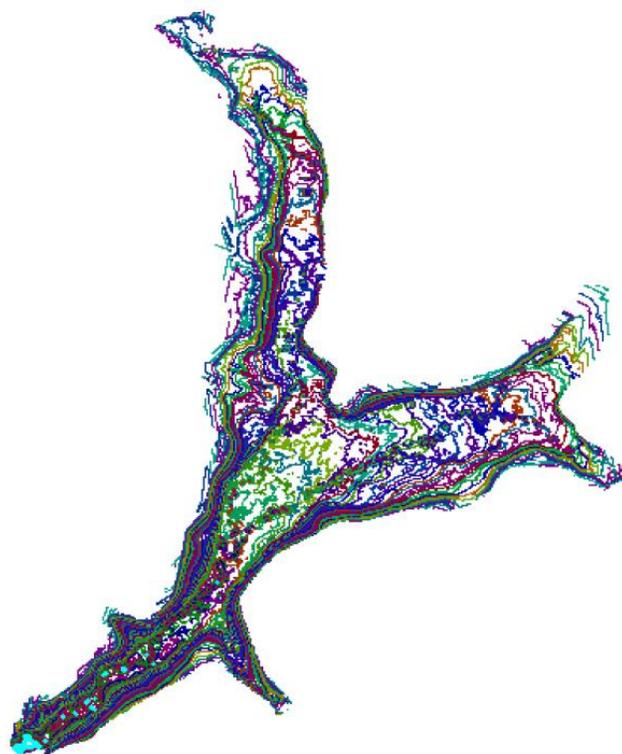


Figura 4.9 Contornos batimétricos do Reservatório do Descoberto confeccionado por Livramento (2014).

A malha de simulação obtida foi alterada para a adição de uma condição de contorno que não estava presente nos trabalhos anteriores: o vertedouro da barragem do Descoberto. Os trabalhos de Livramento (2014) e Vêras (2017) definiram a cota 1030m como condição de contorno (profundidade infinitesimal) e o modelo não aceitava a adição do vertedouro na dita cota (por ter profundidade infinitesimal).

Assim, criou-se a camada 1031m infinitesimal, e modificou-se a camada 1030m para profundidade de 1m. Ainda que a camada tenha 1 metro de profundidade, o vertedor extravasa água sempre que a cota está acima de 1030m, garantindo que a cota do lago não exceda para valores irreais.

As fórmulas utilizadas pelo CE-QUAL-W2 para calcular as vazões extrapoladas pela barragem serão apresentadas posteriormente na subseção de parâmetros hidráulicos.

### **4.2.3 Condições de Contorno**

As condições de contorno para o modelo são divididas em três categorias: de afluentes, de efluentes, de superfície e de fundo.

#### **4.2.3.1 Condições de contorno afluente e efluente**

O CE-QUAL-W2 reconhece as seguintes condições de contorno afluentes:

- a) À montante;
- b) Tributário;
- c) Não pontual;
- d) Precipitação;
- e) Internas;
- f) Externas;

E reconhece as seguintes condições efluentes:

- a) À jusante;
- b) Captação de água;
- c) Evaporação;
- d) Internas;
- e) Externas;

Nesse trabalho foram utilizadas as seguintes condições de contorno afluentes e resoluções temporais:

- a) À montante, mensal (Afluentes do lago – CAESB e Córrego Rocinha por Veras, 2017) – presentes na Figura 4.7;
- b) Tributário, mensal (Córrego Coqueiro - VERAS, 2017);
- c) Precipitação, horário (INMET).

E efluentes:

- a) Captação de água bruta, média mensal (CAESB);
- b) Evaporação (Calculado pelo CE-QUAL-W2);
- c) Vertedouro da barragem (Calculado pelo CE-QUAL-W2);

Dessa forma, arquivos na extensão “.npt” foram confeccionados contendo a data (em dia juliano) e o dado de contorno (vazão, temperatura ou constituintes). O CE-QUAL-W2 aceita a entrada desses dados em formato separado por vírgula (.csv), o que facilita a edição em softwares de planilha como o *Microsoft Excel*.

Por fim, para condensar todo o conjunto de condições de contorno (afluentes e efluentes, aplicadas ao trabalho), as características de cada uma e os arquivos a serem confeccionados, as Tabela 4.1 e Tabela 4.2 foram confeccionadas. Os arquivos de constituintes apresentados na tabela não foram utilizados pois o módulo de qualidade da água permaneceu desligado. Uma síntese dos dados obtidos pode ser visualizada na seção de Resultados e Discussão.

Tabela 4.1 Resumo das condições de contorno afluentes, arquivos necessários e características das condições de contorno presentes no CE-QUAL-W2.

<b>Condição de Contorno</b>	<b>Arquivos</b>	<b>Características</b>	<b>Presente</b>	<b>Resolução temporal e Fonte</b>
À montante	Vazão (Qin.npt), Temperatura (Tin.npt), Contituintes (Cin.npt)	Entrada no segmento mais à montante do braço. Opção de distribuir a vazão proporcionalmente à profundidade dos segmentos ou simular intrusão por densidade	Nas entradas dos rios à montante (Figura 4.7).	Mensal – CAESB e Veras (2017)
Tributário	Vazão (Qtr.npt), Temperatura (Tr.npt), Constituintes (Ctr.npt)	Entrada pontual em qualquer segmento definido pelo usuário. Mesmas opções de distribuição da vazão que a condição “À montante”	Córrego Coqueiro (Segmento 13). (Figura 4.7)	Mensal - (Véras, 2017)
Precipitação	Vazão (Qpc.npt), Temperatura (Tpc.npt), Constituintes (Cpc.npt)	Precipitação. Dividida proporcionalmente à área de cada segmento.	Sim.	Horário - INMET

Tabela 4.1 Resumo das condições de contorno afluentes, arquivos necessários e características das condições de contorno presentes no CE-QUAL-W2. - Continuação

Condição de Contorno	Arquivos	Características	Presente	Resolução temporal e Fonte
Internas	Nenhum.	Condições de contorno entre braços ou corpos d'água e estruturas hidráulicas (dutos, bombas, comportas, etc). Calculadas internamente. Vazões de estruturas podem ser direcionadas para qualquer segmento no modelo.	Nos Segmentos 1, 20, 21, 29, 30, 35, 36 e 41.	Passo de tempo do modelo.

Tabela 4.2 Resumo das condições de contorno efluentes, arquivos necessários e características das condições de contorno presentes no CE-QUAL-W2.

Condição de Contorno	Arquivos	Características	Presente neste modelo?	Resolução temporal utilizada e Fonte
À jusante	Vazão (Qout.npt).	Saída no segmento mais à jusante do braço. Opção de definir uma faixa de profundidades nas quais o escoamento não ocorre.	Na vazão regular de saída da barragem.	Mensal - CAESB
Captação de água	Vazão (Qwd.npt)	Captação de água. Opção de definir a profundidade da captação.	Na captação de produção de água da CAESB	Média Mensal - ADASA
Evaporação	Temperatura do ar, T. do ponto de orvalho e velocidade eólica (Met.npt)	Evaporação. Calculada internamente.	Sim	Média diária (INMET e INPE)
Internas	Nenhum	Condições de contorno entre braços ou corpos d'água e estruturas hidráulicas (dutos, bombas, comportas, etc). Calculadas internamente. Vazões de estruturas podem ser direcionadas para qualquer segmento no modelo.	No vertedouro da barragem e segmentos 1, 20, 21, 29, 30, 35, 36 e 41.	Passo de tempo do modelo.

#### 4.2.3.2 Condições de contorno da superfície da água e fundo

As condições de contorno de superfície da água são:

- a) Troca de calor entre ar e superfície da água;

- b) Stress de superfície causado pelo vento;
- c) Trocas gasosas entre ar e superfície da água;
- d) Absorção da radiação solar;

E a condição de contorno de fundo que o CE-QUAL-W2 utiliza é:

- e) Temperatura do sedimento;

As condições de contorno (a), (b) e (c) são calculadas automaticamente pelo CE-QUAL-W2 e exigiram a confecção de séries de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, cobertura de nuvens, e radiação solar de ondas curtas. Todas essas séries foram inseridas no arquivo “*met.npt*” (o mesmo utilizado para o cálculo da evaporação). Além disso, a localização geográfica do Reservatório foi inserida no arquivo de controle do modelo “*w2\_con.npt*”: Latitude: -15,749 e Longitude: -48,208; para a simulação da posição do sol em relação ao modelo.

Ainda para as condições (b) e (c), foi definido o parâmetro do coeficiente de abrigo do vento (no arquivo “*wsc.npt*”). O coeficiente tem a função de alterar (multiplicar) a velocidade do vento do arquivo de meteorologia, como uma forma de corrigir dados de vento medidos em estações de medição eólica distantes do corpo hídrico simulado, e simular o efeito de abrigamento causado pelo dossel arbóreo ou cadeias montanhosas próximas ao lago.

Para a condição (d) foram definidos os parâmetros da parcela de radiação solar absorvida na camada de superfície do modelo (parâmetro BETA) e do coeficiente de atenuação da luz devido à água (EXH2O).

A condição de contorno de fundo (e) é utilizada para calcular o fluxo de energia térmica na interface água-solo. Foi definido, assim, o parâmetro CBHE – Coeficiente de troca de calor de fundo – que rege a intensidade dos fluxos verticais na interface.

#### **4.2.4 Parâmetros hidráulicos**

A definição de três parâmetros hidráulicos no arquivo de controle do modelo e um no arquivo de batimetria “*bat.npt*” é obrigatória. Ainda assim, dependendo das estruturas hidráulicas adicionadas ao modelo, outros grupos de parâmetros tornam-se necessários à simulação. Os

obrigatórios são: o coeficiente de viscosidade turbulenta longitudinal (AX), o coeficiente de difusão turbulenta longitudinal (DX), e o coeficiente de atrito de fundo (FRICT - que pode ser o coeficiente de Chezy ou de Manning). Os dois primeiros são invariantes espacial e temporalmente. Porém, o coeficiente de atrito de fundo pode ser especificado a cada segmento no arquivo de batimetria.

Embora o Manual do CE-QUAL-W2 apresente os parâmetros AX e DX como insensíveis às mudanças, os mesmos foram empregados no processo de calibração do modelo por serem fundamentais ao transporte de momento e temperatura do modelo.

Como dito anteriormente, foi adicionado ao modelo o vertedouro da Barragem do Descoberto e, dessa forma, um conjunto de parâmetros precisou ser estimado/definido. Estes são: Cota altimétrica da soleira do vertedouro, coeficiente empírico *A* e coeficiente empírico *B*. Aqui, pretende-se explicar como os coeficientes são utilizados pelo *software*, e como ambos foram estimados.

O CE-QUAL-W2 utiliza os dois coeficientes em uma equação genérica na qual a vazão vertida *Q* é igual:

$$Q = A(z_u - z_s)^B, \text{ m.s}^{-3} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Em que  $z_u$  é a cota altimétrica da superfície d'água do segmento da barragem em metros,  $z_s$  é a cota da soleira do vertedouro, *A* e *B* são os coeficientes empíricos *A* e *B*.

Para ajustar os coeficientes *A* e *B* da Eq. 4.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, utilizou-se a fórmula da vazão de barragens retangulares de crista afinada:

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} W (z_u - z_s)^{3/2} \quad \text{Eq. 4.2}$$

$C_d$  = Coeficiente de descarga;

$g$  = aceleração da gravidade,  $m.s^{-2}$ ;

$W$  = Largura do vertedouro, metros;

Ao relacionar a Eq. 4.1 com a Eq. 4.2, temos a relação presente em Eq. 4.3 e Eq. 4.4:

$$A = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} W \quad \text{Eq. 4.3}$$

$$B = 3/2 \quad \text{Eq. 4.4}$$

Onde o coeficiente de descarga  $C_d$  é dado pela Eq. 4.5:

$$C_d = 0,611 + 0,075 \times (z_u - z_s) / (z_s - z_b) \quad \text{Eq. 4.5}$$

Sendo:

$Z_b$  = Cota altimétrica da base da barragem, em metros;

As especificações técnicas do projeto da barragem do Descoberto foram obtidas juntamente à CAESB (Apêndice C), e estão representadas pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, para complementar os dados que faltavam para a equação:

$Z_s$  = 1030 metros;

$W$  = 55 metros;

$Z_b$  = 1010 metros;

Formando, após a álgebra, a Eq. 4.6, função da elevação da superfície d'água  $z_u$ :

$$Q = \left( 0,611 + \frac{0,075 \times (z_u - 1030)}{20} \right) 162,33 \times 55 (z_u - 1030)^{3/2} \quad \text{Eq. 4.6}$$

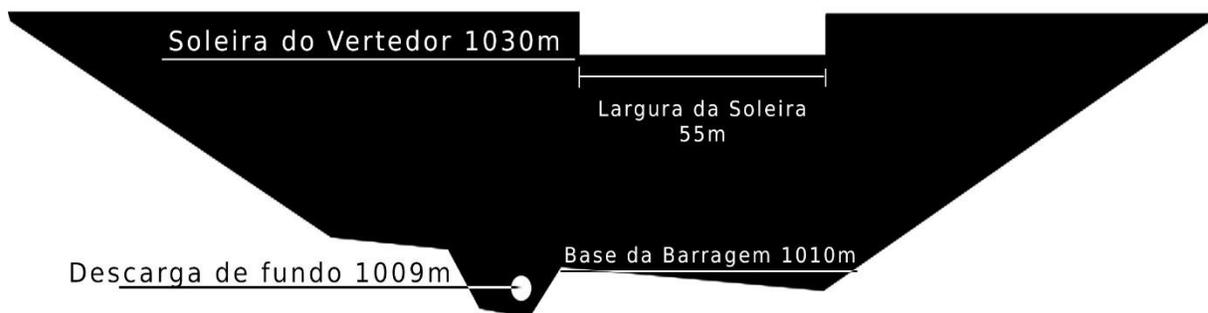


Figura 4.10 Esquema representativo das especificações da Barragem utilizadas no modelo CEQUAL-W2.

Com a finalidade de estipular o valor do coeficiente empírico  $A$ , utilizou-se uma planilha no *software Microsoft Excel* para comparar dados observados de cota-vazão a valores calculados pela Eq. 4.6. Constatou-se na série histórica obtida com a CAESB que a superfície da água no lago Descoberto não ultrapassa algumas dezenas de centímetros sobre a cota 1030 Figura 4.11, tem-se que  $C_d \approx 0,611$  e calculou-se o valor do parâmetro  $A = 99,2$ .

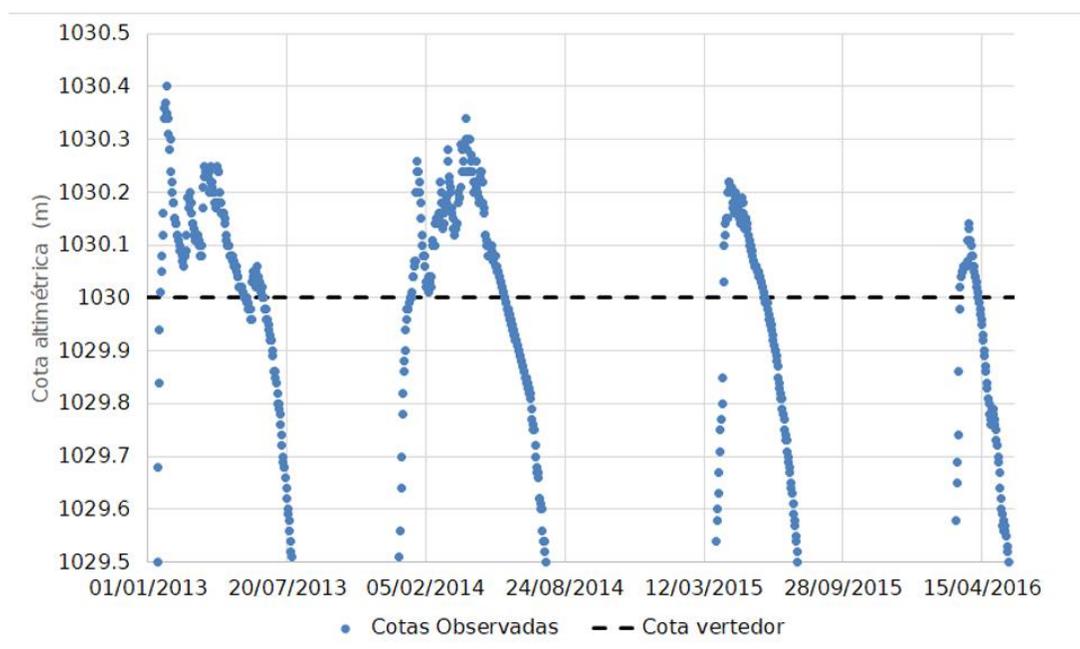


Figura 4.11 Cotas observadas no período entre Janeiro/2013 e Abril/2016. A cota máxima do lago alcançou valores de 40cm acima do vertedor.

#### 4.2.5 Parâmetros hidrodinâmicos e termodinâmicos

O modelo CE-QUAL-W2 possui um grande número de parâmetros que influenciam a hidrodinâmica e termodinâmica do modelo, relacionadas à formação de gelo, taxas evaporativas, atritos entre interfaces água-fundo, viscosidade turbulenta, atenuação da luz, entre outros. Entretanto, o Manual contém diretrizes para a calibração do modelo, indicando os parâmetros os quais a estipulação é mais importante. Esses são:

- i) AX – Viscosidade turbulenta longitudinal
- ii) DX – Difusividade turbulenta longitudinal
- iii) FRICT – Atrito de Fundo (Coeficiente de Chezy ou de Manning)
- iv) BETA – Radiação solar absorvida na camada de superfície da água
- v) EXH2O – Atenuação da luz devido à água
- vi) WSC – Coeficiente de abrigo do vento

O parâmetro FRICT é variável espacialmente, e, por essa razão as suas entradas estão dentro do arquivo de batimetria do modelo *bth.npt*. O WSC é variável espacial e temporalmente e possui um arquivo próprio para a sua entrada: *wsc.npt*. Todos os outros parâmetros tem seus valores indicados no arquivo de controle do modelo *w2\_con.npt*.

A seleção dos parâmetros a participarem do processo de calibração foi realizada sob a luz do Manual do CE-QUAL-W2, de resultados de trabalhos anteriores e da restrição temporal para a execução desse trabalho.

Cada parâmetro teve seu limite mínimo e máximo baseado em valores do Manual do CE-QUAL-W2, com exceção do parâmetro EXH2O, o qual os limites foram definidos baseados em dados de disco de Secchi do trabalho de (Pinto, 2018).

Além desses parâmetros, baseou-se em relatos de Pinto (2018), Vêras (2017), que demonstraram sensibilidade do resultado de temperatura do CE-QUAL-W2 e do modelo GLM ao fluxo de calor na interface água-sedimentos, e adicionou-se o CBHE – Coeficiente de troca de calor de fundo – à calibração.

Estando esclarecidos os dados necessários, o período de simulação, as condições de contorno e os parâmetros essenciais para a simulação do modelo CE-QUAL-W2, os arquivos necessários

foram preparados e o modelo foi executado em *default* para avaliar a variação da cota altimétrica da superfície da água como meio de estimar se as entradas e saídas de vazão do lago estavam coerentes.

Essas primeiras rodadas de simulação também tinham a finalidade de avaliar a existência de erros causados pela falta de algum dos arquivos ou entradas incorretas no arquivo de controle. Em seguida, com o modelo preparado, foi confeccionado o *script* de calibração automática, explicado na seção a seguir.

Ademais, o parâmetro FRICT – Coeficiente de Chezy, ou “N” de Manning para o atrito de fundo, foi mantido em seu valor *default* pois não houve tempo de implementar a edição de mais um arquivo ao *script*.

Por fim, a Tabela 4.3 contém os parâmetros que conduzem a simulação da temperatura, seus valores *default* e os limites mínimos e máximos que foram utilizados durante a etapa de calibração.

Tabela 4.3 Parâmetros, valores *default* e limites utilizados na etapa de calibração.

<b>Nome</b>	<b>Id</b>	<b>Default</b>	<b>Limite Max</b>	<b>Limite Min</b>	<b>Arquivo de entrada</b>
Viscosidade turbulenta longitudinal	AX	1,0m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	1,5	0,005	W2_con.npt
Difusividade turbulenta longitudinal	DX	1,0m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	1,5 m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	0,005 m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	W2_con.npt
Atrito de fundo	FRICT	70	-	-	Bth.npt
Radiação solar absorvida na camada de superfície	BETA	45%	100%	0,1%	W2_con.npt
Atenuação da luz devido à água	EXH2O	0,45 m <sup>-1</sup>	5,0 m <sup>-1</sup>	0,001 m <sup>-1</sup>	W2_con.npt

Abrigo do vento	WSC	-	2,0	0,1	Wsc.npt
Troca de calor de fundo	CBHE	$0,3 \text{ W.m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$1,0 \text{ W.m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$0,1 \text{ W.m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	W2_con.npt

---

### 4.3 ELABORAÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL PARA CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para agilizar o processo de edição dos arquivos de entrada e execução do modelo CE-QUAL-W2, a rotina desenvolvida em *python3* segue um conjunto de passos que será explicada na seção 4.4 Calibração Automática.

Um *script* em linguagem de programação *Python 3* (py3) para automatizar a rotina de amostragem e execução do *software* CE-QUAL-W2 foi elaborado. O código desenvolvido importa módulos do pacote de otimização SPOTPY (Houska *et al.*, 2015), disponível para download no web sítio (<https://pypi.python.org/pypi/spotpy/>).

O SPOTPY dispõe de variados métodos para calcular a performance do modelo, e analisar e otimizar parâmetros nos diferentes tipos de modelos. Entre os métodos de otimização estão o *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992), Monte Carlo via cadeia de Markov (MCMC) (Metropolis *et al.*, 1953) e o algoritmo de Estimativa Robusta de Parâmetros (ROPE – em inglês) (BÁRDOSSY & SINGH, 2008), e entre as funções de performance estão os coeficientes de correlação (r), determinação ( $r^2$ ), eficiência (Nash e Sutcliffe, 1970), entre outros. Para mais detalhes sobre o SPOTPY, consulte (Houska *et al.*, 2015).

Para a calibração da temperatura do modelo CE-QUAL-W2, dados de saída de 5 diferentes profundidades (1m, 5m, 10m, 15m e 1m do fundo) do segmento de número 18 – ponto relativo à estação de amostragem de dados da CAESB – foram comparados aos dados observados.

A rotina de automatização desse processo foi desenvolvida e o processo segue os seguintes passos:

- 1) Seleção dos parâmetros que participarão da etapa de calibração, seus limites máximos e mínimos e a definição de um valor fixo para quando o parâmetro não estiver sendo amostrado aleatoriamente. Esse processo é feito editando a função “*paramControl*” no código;
- 2) Início do algoritmo de otimização, o qual faz a amostragem dos parâmetros a serem calibrados e gera os arquivos “w2\_con.npt” e “wsc.npt” contendo os dados amostrados;
- 3) Execução o modelo;
- 4) Após execução, o arquivo de saída é lido pelo *script* e comparado com dados observados para o cálculo da função objetivo;
- 5) Armazenamento dos valores de parâmetros, das séries simuladas e das funções objetivos calculadas em um *database* em arquivo .csv.

Assim que todo o *script* estava definido, utilizou-se o modelo – arquivos, parâmetros e toda a estrutura necessária – com os parâmetros e arquivos disponibilizados por Vêras (2017) para calcular os valores de NSE que serviram para comparar o ganho quantitativo da calibração automática.

A definição da função objetivo, bem como do algoritmo de otimização estão presentes adiante.

#### **4.3.1 Definição da função objetivo**

A função objetivo é crucial para a interpretação dos resultados do modelo em relação ao objetivo proposto pelo trabalho, pois é uma forma de prover estimativas quantitativas dos resultados e de prover meios de comparação quanto a resultados de trabalhos anteriores.

Para a definição da função objetivo utilizada nesse trabalho, baseou-se nas dificuldades para calibrar a temperatura de camadas menos profundas – e com valores superiores – da coluna d’água, de trabalhos anteriores (Livramento, 2014; Pinto, 2018; Vêras, 2017) e assumiu-se que o Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (1970) seria o melhor quantificador de objetivo para a calibração. O coeficiente de eficiência tende a superestimar os erros de valores mais altos e negligenciar os de valores mais baixos, por utilizar a variância dos dados observados como normalizador (Beven, 2011; Krause, Boyle e Bäse, 2005). Este é calculado por:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_o^t - E_c^t)^2}{\sum_{i=1}^n (E_o - \overline{E_o})^2} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Em que  $E_o$  é o valor observado no tempo  $t$ ,  $E_c$  é o valor computado relacionado ao tempo  $t$  e  $\overline{E_o}$  é a média de toda a série observada.

Seus valores variam entre 1 – o modelo reproduz perfeitamente os dados observados; e  $-\infty$  - onde valores abaixo de zero indicam que a média dos dados observados é um melhor preditor que o modelo construído.

Para os objetivos desse trabalho, as séries de cinco diferentes profundidades (1m, 5m, 10m, 15m e 1m do fundo) foram transformados em uma única série (a partir daqui chamada de “o todo”) e o NSE de “o todo” foi utilizado como a função objetivo. Ainda assim, o *script* foi programado para calcular cada um dos NSE das cinco profundidades individualmente e adicioná-los ao banco de dados com a finalidade de comparação da adequação do modelo às diferentes profundidades.

### 4.3.2 Algoritmo de otimização SCE-UA

O método de otimização *Shuffled Complex Evolution* – University of Arizona (SCE-UA) (Duan, Sorooshian e Gupta, 1992) foi utilizado nesse trabalho por ser um algoritmo evolutivo capaz de fazer uma busca global para o conjunto ótimo de parâmetros. Esse algoritmo combina noções de busca aleatória, evolução de subpopulações (aqui chamada de “complexos”) e de seleção competitiva. Graças a essas características, o SCE-UA pode superar os obstáculos da calibração, tais quais as múltiplas zonas de atração, a interdependência entre parâmetros, sensibilidade variável e a rugosidade de superfície causada por derivativas descontínuas.

Resumidamente, o SCE-UA gera  $s$  conjuntos de parâmetros e os avalia em uma função objetivo. Essa população de conjuntos é ordenada – baseado em seus valores de função objetivo, e dividida em  $p$  complexos de  $m$  conjuntos. Cada complexo evolui seguindo um conjunto de passos chamado Evolução Competitiva dos Complexos (CCE – em inglês).

No CCE,  $q$  conjuntos são selecionados em cada complexo para formar um “subcomplexo” e novos conjuntos são gerados a partir do centroide do subcomplexo, de forma similar ao método

SIMPLEX (Nelder e Mead, 1965). O CCE se repete  $\beta$  vezes e os novos parâmetros gerados iniciam uma nova rodada do SCE-UA. Os parâmetros do CCE ( $p$ ,  $m$ ,  $q$  e  $\beta$ ) foram mantidos em seus valores padrão como em (Duan, Sorooshian e Gupta, 1992):

$$p \geq 1; (p = 10 \text{ neste trabalho}); \quad \text{Eq. 4.8}$$

$$m = 2n + 1; \quad \text{Eq. 4.9}$$

$$q = n + 1; \quad \text{Eq. 4.10}$$

$$\beta = 2n + 1; \quad \text{Eq. 4.11}$$

Em que  $n$  é o número de parâmetros que serão calibrados.

Dessa forma, o algoritmo se repete até que um critério de convergência, ou um número máximo de repetições seja satisfeito. A convergência foi dita estabelecida quando o conjunto com o melhor valor de objetivo tenha superado os anteriores 100 melhores em menos de 0,001%, e o número de repetições máximo foi definido como 1000.

A Figura 4.12 contém um fluxograma dos passos do algoritmo.

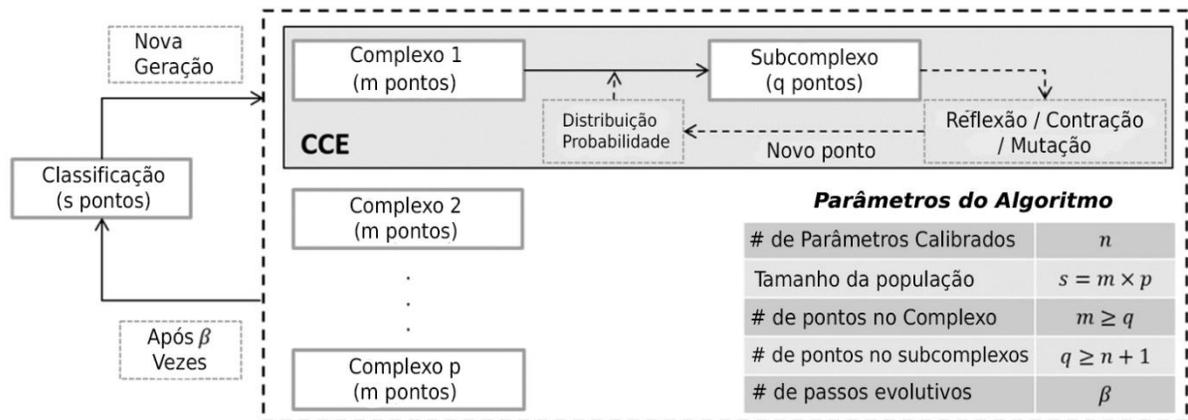


Figura 4.12 Fluxograma das etapas do SCE-UA retirado de (Brêda, Bravo e Paiva, 2017)

### 4.3.3 Índice de estabilidade de Schmidt

O índice de estabilidade de Schmidt ( $S_c$ ) é um indicador hidrodinâmico que aponta a resistência da coluna d'água à mistura mecânica devido à sua estratificação. Utilizou-se o código em linguagem R disponibilizado por Read *et al.* (2011) para calcular a densidade da água e o índice de Schmidt ( $S_c$ ) utilizando as séries de temperatura simuladas pelo modelo calibrado. Assim, obteve-se uma série diária da evolução da estabilidade da coluna d'água.

A estabilidade térmica  $S_c$  é calculada pela Eq. 4.12, e representa a energia necessária por unidade de área para quebrar a estabilidade e homogeneizar a densidade da coluna d'água:

$$S_c = \frac{g}{A_S} \int_0^{z_D} (z - z_v) / (\rho_i - \rho_z) A_z \partial_z \quad \text{Eq. 4.12}$$

Onde:

$S_c$  = Índice de estabilidade de Schmidt, J/m<sup>2</sup>;

$g$  = a aceleração da gravidade m/s<sup>2</sup>;

$A_S$  = a área do espelho d'água do reservatório, m<sup>2</sup>;

$A_z$  = a área do reservatório na camada  $z$ , m<sup>2</sup>;

$z_D$  = a profundidade máxima do reservatório, m;

$z_v$  = a profundidade do centro volumétrico do reservatório, m;

$\rho_i$  = a densidade da água inicial, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_z$  = a densidade da água na profundidade  $z$ , kg/m<sup>3</sup>;

A profundidade do centro volumétrico  $z_v$  é calculada pela Eq. 4.13:

$$S_c = \frac{\int_0^{z_D} z A_z \partial_z}{\int_0^{z_D} A_z \partial_z} \quad \text{Eq. 4.13}$$

## 4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

Este trabalho empregou uma análise de sensibilidade simples, porém robusta o suficiente para demonstrar sintomas de sensibilidade de cada um dos parâmetros, embasada em direções presentes em (Saltelli *et al.*, 2008), elucidadas abaixo.

O script de calibração foi alterado para fazer a amostragem aleatória de densidade uniforme de todos os parâmetros. O modelo foi executado 1000 vezes e o resultado da função objetivo foi disposto em gráficos de dispersão *versus* os valores de entrada de cada parâmetro.

Os parâmetros foram comparados pela uniformidade dos pontos no gráfico, onde a falta de uniformidade – pontos com alto grau de dispersão – são considerados indícios de insensibilidade do parâmetro quanto ao resultado do modelo. Ao contrário, a presença de uniformidade pode ser um sintoma de sensibilidade do parâmetro em conduzir o modelo ao objetivo se o gráfico de dispersão exibe algum tipo de forma uniforme.

Ainda, os 1000 resultados foram arrolados em razão dos valores amostrados, e divididos em 10 grupos. Calculou-se a média de cada grupo, formando, assim, uma série de valores médios de NSE. O objetivo é a conferência da variação média do valor de função objetivo ao modificar os valores de cada parâmetro. Uma alta diferença entre o valor máximo e mínimo de NSE na série média, é, também, um sintoma de que o resultado do modelo é sensível ao parâmetro analisado. Enquanto uma baixa diferença, é um sintoma de insensibilidade do parâmetro.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos:

- 1) Abordagem metodológica utilizando o banco de dados disponibilizado por Vérias (2017);
- 2) Simulação do lago Descoberto utilizando o CE-QUAL-W2
  - a. Resultados da adição da barragem/vertedouro ao modelo do Descoberto;
  - b. Comparação dos resultados obtidos por meio da rotina automática de calibração, com resultados de trabalhos anteriores;
- 3) A análise das dinâmicas da temperatura presentes no modelo calibrado;
- 4) Os resultados obtidos pela análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo;

### 5.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

O *database* disponibilizado demonstrava uma boa organização e os dados foram acomodados aos objetivos e ao conhecimento criado pelo repetitivo uso do *software* neste trabalho. As adequações são citadas nos parágrafos abaixo juntamente com a discussão.

Ao longo das primeiras execuções do modelo, foi necessário ajustar alguns arquivos de entrada em relação ao trabalho anterior de Vérias (2017). O primeiro ajuste foi feito para aprimorar o balanço hídrico do modelo. Antes, o único efluente contabilizado era a captação de água da CAESB, que foi utilizada como uma saída a jusante não-pontual. O modelo não contabilizava a saída a jusante real (regular + vertedouro), e, assim, o volume afluente era muito maior que o efluente, causando elevações da coluna d'água não condizentes com a realidade.

Apesar de não mencionado em Vérias (2017), seu banco de dados demonstra que houve a utilização de uma condição de contorno externa para controlar a cota do modelo de maneira artificial. Nos parágrafos seguintes procura-se discutir a utilização desse recurso como forma de conduzir o modelo aos resultados esperados.

Embora cada uma das condições de contorno do modelo seja opcional, é necessário ao menos uma condição afluente e uma efluente em razão da solução numérica aplicada. Também passa

a ser obrigatória a confecção de arquivos com as séries de vazão e temperatura para cada condição adicionada – com exceção da vazão de evaporação que não requer uma série de temperatura e das condições de contorno internas que são calculadas pelo CE-QUAL-W2. Nos casos em que o modelador deseja simular a qualidade da água, torna-se obrigatório a confecção de séries de concentração de constituintes para as condições de contorno afluentes.

As condições de contorno “Externas” são condições especiais nas quais o CE-QUAL-W2 exige a confecção de séries de perfis de temperatura, constituintes e da cota da superfície da coluna d’água do corpo d’água localizado a montante ou jusante. Com esses dados, o modelo é capaz de utilizar dados observados para substituir um segmento de contorno. O Manual do CE-QUAL-W2 indica que o uso das condições de contorno “Externas” é recomendado à simulação de estuários e rios, embora o uso para lagos também seja possível (Cole e Wells, 2017). Essas condições, ao contrário de todas as outras, são as únicas a exigir a confecção de séries dos perfis da temperatura e de constituintes e uma série de cota altimétrica, enquanto todas as outras necessitam de valores individuais em detrimento dos perfis e também não necessitam da cota.

A partir do mencionado, entende-se que essas condições são utilizadas para simular as condições de um corpo d’água (ou do trecho/braço de um corpo d’água de imensa proporção – ex: Rio Amazonas) à montante ou jusante do trecho estudado, com a finalidade de diminuir o custo em recurso humano de produzir um arquivo batimétrico de proporções desnecessárias para um estudo pontual, e o custo computacional de simular um corpo hídrico de grande proporção.

O trabalho que definiu a base de estudos do CE-QUAL-W2, por se tratar da primeira aplicação do simulador no PTARH/UNB foi o de Liporoni (2012). Seu trabalho resultou na adequação perfeita da cota simulada aos valores observados durante a calibração e a verificação do modelo CE-QUAL-W2 para o lago Paranoá. Apesar de nenhuma condição de contorno externa ser mencionada em seu trabalho, tamanha perfeição entre os dados observados e simulados de cota trouxe o questionamento de que uma condição externa pode ter sido utilizada. Aqui, a crítica não é direcionada a utilização da condição externa, mas a uma condição causada pela falta de clareza das aplicações no Manual do CE-QUAL-W2. O entendimento dessa possibilidade de falha no estabelecimento das condições de contorno do modelo foi fundamental para o aprimoramento da modelagem do reservatório do Descoberto no presente trabalho.

Seguindo a mesma linha, os trabalhos de Livramento (2014) e Vérias (2017) utilizaram da mesma técnica para alcançar melhores resultados na calibração, a utilização dos dados de cota observada como condição de contorno. Ademais, Livramento (2014) cita em seu trabalho que as condições externas (a qual ele nomeia como condições de contorno de carga) são extremamente importantes para a etapa de calibração do balanço hídrico do modelo, pois conduziram o modelo a um melhor resultado.

O desentendimento da condição de contorno externa está relacionado ao local de aplicação da condição, o qual pode direcionar o resultado do modelo construído para as condições observadas. Em um trabalho recente, Ziaie *et al.* (2019) apresenta resultados de calibração da cota do modelo 99% ajustadas. Entretanto, nesse caso, os dados publicados em seu trabalho não são suficientes para a avaliação do uso da condição de contorno, e são citados aqui por mera suspeita de que esse desentendimento esteja disseminado em trabalhos publicados em periódicos.

Retornando aos trabalhos do Distrito Federal, os trabalhos de Liporoni (2012), Livramento, (2014) e Vérias (2017) aplicaram a condição externa em um mesmo segmento: o da barragem. O segmento da barragem, tanto no lago Paranoá, quanto no lago Descoberto, é relativo ao principal ponto de monitoramento da Companhia, e utilizar uma condição de contorno à jusante desse ponto a qual possui os perfis monitorados pela companhia não pode ser considerada uma etapa de calibração do modelo, pois claramente o modelo irá inclinar-se a reproduzir os dados observados.

Então, entende-se que a utilização dos perfis da barragem seriam melhor aproveitados nos casos de calibração de outro ponto de monitoramento, distante da barragem, o qual não seria diretamente influenciado pela condição. Entretanto, no caso do lago Descoberto, os dados da CAESB são referentes a um único ponto de monitoramento próximo da barragem, e, assim, neste trabalho, foi necessário retirar a condição de contorno externa no segmento e adicionar a estrutura hidráulica necessária para controlar o volume máximo do modelo: o vertedouro da barragem.

Com o intuito de melhorar o balanço hídrico do lago, os dados de precipitação foram inseridos com seus valores horários no lugar das médias diárias utilizadas anteriormente por Vérias (2017).

O objetivo foi utilizar a maior resolução temporal disponível para que o modelo pudesse calcular os efeitos da chuva sobre o lago sem a perda de dados causada pela média diária.

Seguindo adiante, outras modificações também foram necessárias. O *database* continha dados duplicados propositalmente com a finalidade de gerar um período de aquecimento prévio ao período que foi simulado por Vêras (2017). No presente trabalho tal método não foi utilizado. Retirou-se as séries duplicadas pois, como o modelo utiliza condições de contorno de temperatura e constituintes dos afluentes do reservatório, da precipitação e do ar (apenas temperatura), assumiu-se que o período de aquecimento seria curto o suficiente para não prejudicar a simulação e as análises futuras. Além disso, essa decisão visava diminuir o tempo de execução do modelo.

Dados de temperatura da estação de monitoramento do lago, por algumas vezes, continham erros de digitação e foram corrigidos sempre que o valor digitado pôde ser relacionado a um valor insuspeito (ex: 2,20 °C corrigido para 22,0 °C). Do contrário, o valor foi retirado da série temporal.

Por fim, justifica-se a seleção do período de simulação pela análise de consistência dos dados de qualidade do reservatório do Descoberto, que possuíam muitas falhas e por longos períodos. Objetivando esse trabalho como base para trabalhos futuros para a calibração e simulação da qualidade da água do Reservatório, selecionou-se o período entre Mar/2013 a Mar/2016, por conter o menor número de falhas nos diferentes constituintes da água medidos (

Figura 5.1).

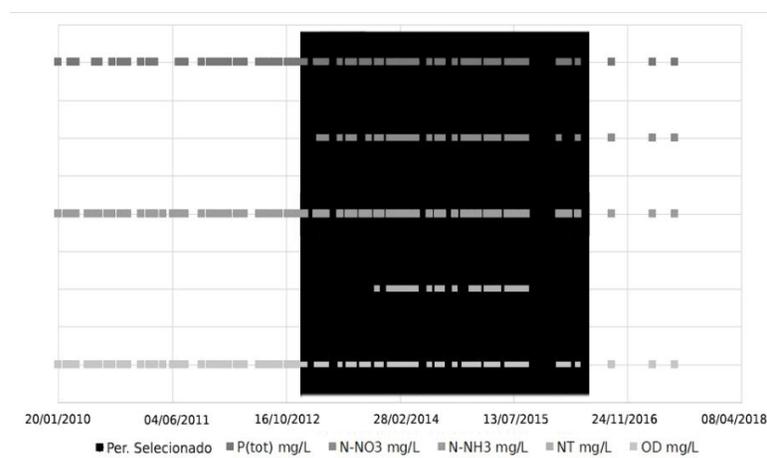


Figura 5.1 Consistência dos dados de qualidade da água para o período entre 2010 e 2017. Período selecionado (03/2013 – 03/2016).

O banco de dados disponibilizado por Vêras (2017) e revisado para este trabalho está sintetizado na Tabela 5.1, e a localização das estações de monitoramento do Reservatório do Descoberto se encontram na Figura 5.2.

Tabela 5.1 Síntese dos dados obtidos para composição do banco de dados para modelagem do lago Descoberto, adaptado de Vêras (2017).

<b>Dado</b>	<b>Local</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Fonte</b>	<b>Período</b>	<b>Freq</b>
Hidrológico	Chapadinha	Do afluente	ADASA	Jan/1986 a Set/2017	Mensal
Hidrológico	Rio Descoberto	Do afluente	ADASA	Jan/1986 a Set/2017	Mensal
Hidrológico	Olaria	Do afluente	ADASA	Jan/1986 a Set/2017	Mensal
Hidrológico	Rodeador	Do afluente	ADASA	Jan/1986 a Set/2017	Mensal
Hidrológico	Capão Cumprido	Do afluente	ADASA	Jan/1986 a Set/2017	Mensal
Hidrológico	Ribeirão das Pedras	Do afluente	ADASA	Jan/1986 a Set/2017	Mensal
Hidrológico	Rocinha	Calculado (Regionalização)	Vêras (2017)	Jan/2013 a Jul/2017	Mensal
Hidrológico	Coqueiro	Calculado (Regionalização)	Vêras (2017)	Jan/2013 a Jul/2017	Mensal
Qualidade	Descoberto Jusante	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Descoberto Montante	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Ribeirão das Pedras	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Chapadinha	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Coqueiro	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Lajinha	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Rocinha	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Rodeador	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Olaria	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Qualidade	Capão Comprido	Do lago	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Mensal
Captação	Barragem do Descoberto	Captação de água bruta	ADASA	Jan/2004 a Out/2017	Mensal (Média)

Cotas	Barragem do Descoberto	Cotas	CAESB	Jan/2004 a Out/2017	Diária
-------	---------------------------	-------	-------	------------------------	--------

Tabela 5.1 Síntese dos dados obtidos para composição do banco de dados para modelagem do lago Descoberto, adaptado de Vêras (2017). Continuação.

<b>Dado</b>	<b>Local</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Fonte</b>	<b>Período</b>	<b>Freq</b>
Precipitação	Estação Brasília 15°47'22.00"S e 47°55'32.00"O	Precipitação	INMET	Mai/2000 a Jul/2017	Horária
Metereológicos	Estação Brasília 15°47'22.00"S e 47°55'32.00"O	Temperatura do ar e do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, insolação	INMET	Mai/2000 a Jul/2017	Diária
obs: dados de temperatura obtidos com as mesmas características dos dados de qualidade					

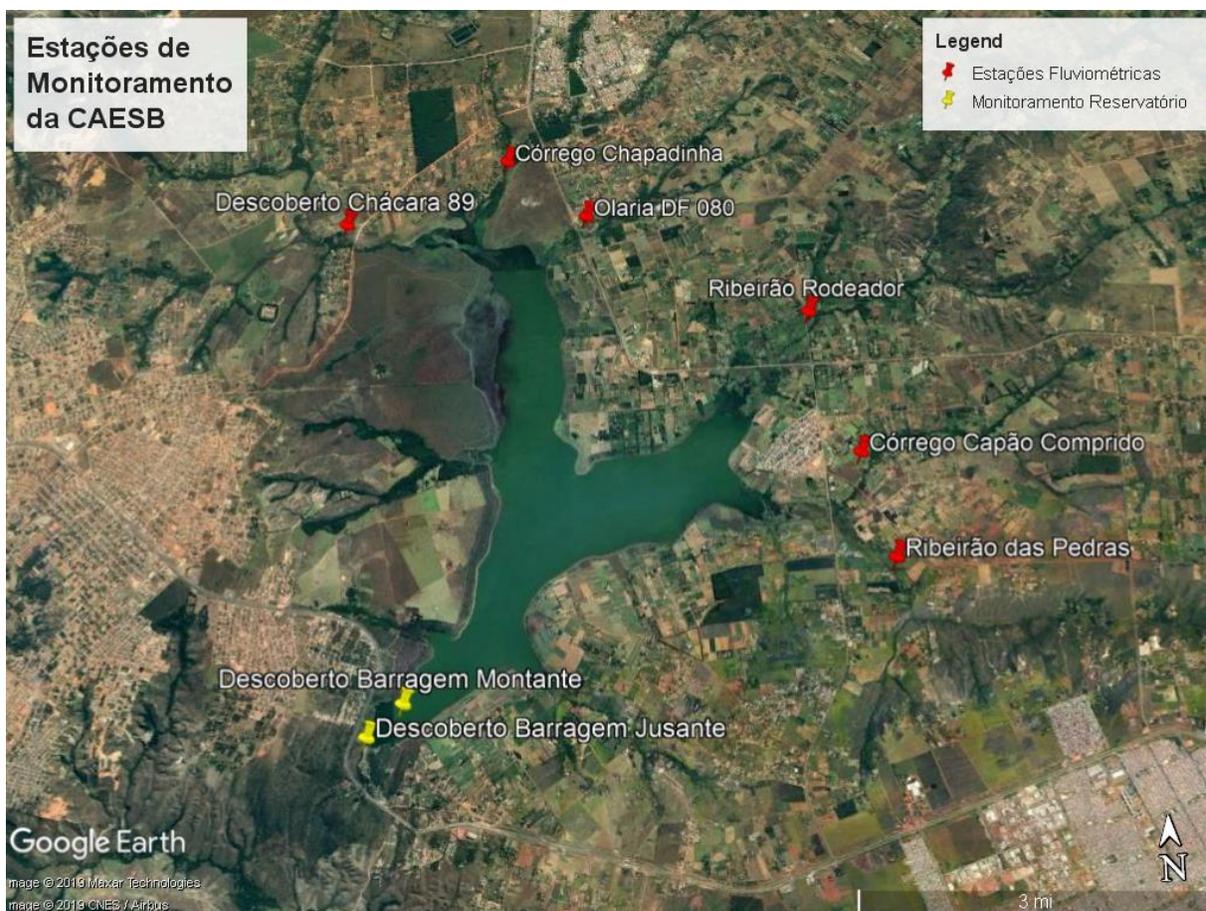


Figura 5.2 Localização das estações de monitoramento da CAESB das quais foram obtidos os dados que compõem o banco de dados deste trabalho (Fonte: Google Earth).

## 5.2 SIMULAÇÃO DO LAGO DESCOBERTO POR MEIO DO CE-QUAL-W2

Este trabalho obteve os resultados mencionados abaixo após vários ciclos de execução do modelo, correção dos dados e reexecução. As correções foram descritas no item anterior, e, aqui, mantém-se o foco nos resultados obtidos durante todo o processo.

Ao obter o banco de dados disponibilizado por Vêras (2017), executou-se o modelo e calculou-se o valor de NSE para cada uma das séries de temperatura (1m, 5m, 10m, 15m, 1m do fundo e “o todo”) com a finalidade de utilizá-las como base comparativa para os resultados de calibração automática do modelo do lago Descoberto. Logo após, iniciou-se a avaliação da simulação da cota.

### 5.2.1 Simulação da cota e do balanço hídrico do modelo

A simulação da cota do lago Descoberto foi utilizada como meio de verificar se os dados de entrada para as vazões afluentes, vazões efluentes e a batimetria do reservatório reproduziam resultados adequados. A cota é função do balanço hídrico do modelo, ou seja, é função apenas dos dados de vazão (condição de contorno) e dos parâmetros hidráulicos da estrutura de saída d'água da crista do vertedouro. A calibração desses parâmetros não foi necessária pois dados de projeto da barragem disponibilizados pela CAESB foram utilizados para definir seus valores empiricamente.

Previamente à calibração, o balanço hídrico era conduzido pela condição de contorno de cota inserida no segmento da barragem (segmento 19), e, por essa razão, sua cota se comportava perfeitamente ( $NSE = 0,99$ ) (

Figura 5.3).

Sem a condição de contorno jusante, o balanço hídrico perdia uma importante vazão de saída e, dessa forma, o modelo passou a acumular água e aumentar a cota indefinidamente até causar a interrupção da simulação e a perda da série simulada.

Na

Figura 5.4 é apresentado o resultado de simulação da cota em comparação com os dados observados no ponto de monitoramento na barragem. O modelo apresenta um atraso na sua resposta e, também, uma ausência de variações pontuais bruscas – formando uma superfície com variações suaves. Esse resultado pode ser relacionado às entradas dos rios afluentes (os principais volumes de entrada), em resolução mensal, à captação de água para produção (principal volume de saída ao longo do ano), em série de média mensal, e ao uso da opção disponível no CE-QUAL-W2 de interpolar linearmente os dados de entrada de vazão afluente.

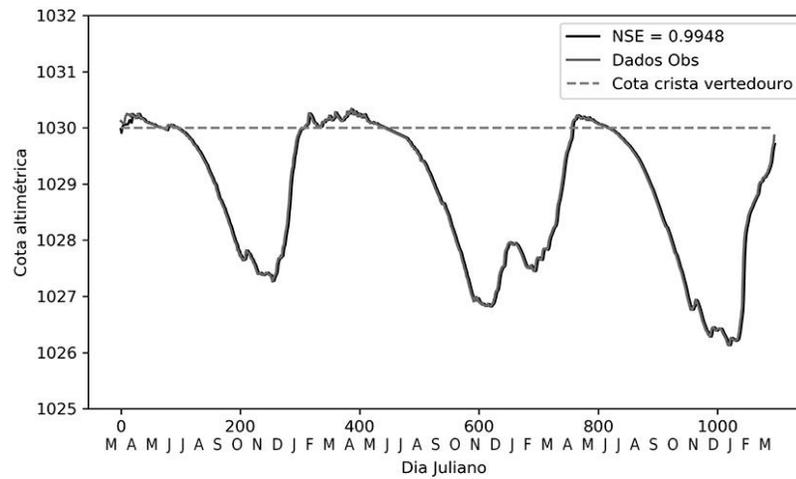


Figura 5.3 Cota observada e simulada utilizando a condição de contorno no segmento 19.

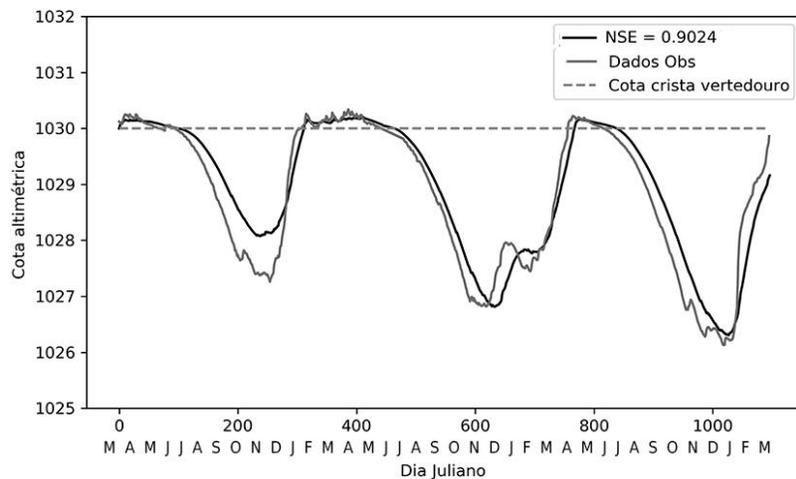


Figura 5.4 Cota observada e simulada para o lago Descoberto.

Ainda assim, os dados de entrada e o modelo batimétrico utilizados no CE-QUAL-W2 foram capazes de simular adequadamente a variação do volume do lago. O valor do coeficiente de eficiência alcançado foi de  $NSE = 0,9$ .

### 5.2.2 Calibração automática das saídas de temperatura

A elaboração do código da rotina de calibração do modelo do Reservatório do Descoberto foi um processo que se estendeu por cerca de seis meses. O principal arquivo de entrada do CE-QUAL-W2 `w2_con.npt` utiliza uma formatação em colunas fixas de oito caracteres cada, justificadas à direita. A criação de uma rotina que edite o arquivo precisa levar em conta a necessidade de manter os 8 caracteres. A princípio pretendia-se editar o arquivo de forma pontual, editando apenas os dados dos parâmetros a serem calibrados durante a rotina de amostragem. Entretanto, devido à formatação supracitada, a solução encontrada foi editar todo o arquivo de controle e suas 900 linhas durante a rotina. Tal solução mostrou-se acertada, gerando poucos erros que podiam ser depurados no próprio código *Python*. Ainda, a edição pontual e manual do arquivo de controle certamente levaria mais tempo para alcançar o número execuções do modelo conseguidos nesse trabalho. O conteúdo dos scripts está no ANEXO B

Considerando a temperatura como variável de controle da calibração do módulo hidrodinâmico do CE-QUAL-W2, o algoritmo SCE-UA foi utilizado para buscar valores ótimos para os parâmetros do modelo. Ao total, o modelo foi executado 7108 vezes e seus resultados salvos em banco de dados (arquivo `.csv`). O programa do CE-QUAL-W2 foi interrompido (do inglês – *crashed*) com frequência durante os primeiros meses de calibração. Essas paradas bruscas paralisavam o algoritmo de otimização e o processo precisava ser iniciado novamente.

O CE-QUAL-W2 se mostrou um modelo pouco amigável ao usuário por não possuir ferramentas de qualidade para a depuração dos problemas contidos nos arquivos de entrada. Alguns erros são indicados apenas pelo software “*PreProcessor.exe*” que vem junto do pacote do modelo, indicando erros de entrada, como a falta de um arquivo ou a digitação errada de uma linha no arquivo de controle. Os erros que acontecem durante a simulação são indicados por uma tela de erro que exhibe linguagem FORTRAN. Assim, para entender a razão do acontecimento do erro, primeiramente ter-se-ia que entender o código fonte do modelo e isso atrasaria o progresso em direção às metas propostas para esse trabalho.

De qualquer maneira, a introdução da barragem ao modelo e a retirada dos arquivos de condição de contorno externas causou o fim dos *crashes* durante a calibração. Aqui, assumiu-se que as condições externas à jusante e à montante estavam causando a desestabilização da solução

numérica do programa. A partir de então, foi possível utilizar o *script* de calibração durante dias de processo, onde o potencial do SCE-UA foi utilizado verdadeiramente.

Após todo o período de aplicação do modelo (7108 execuções em diferentes rodadas de ajuste do banco de dados e execução), alcançou-se o melhor valor de NSE igual a 0,59, demonstrando satisfatória adequação das séries simuladas com as observadas. Entre as cinco profundidades simuladas, a que melhor se adequou aos dados observados foi a de 15m (NSE = 0,61) e todas as séries obtiveram  $NSE > 0,5$  (Figura 5.5a).

A (Figura 5.5b) exibe a simulação calibrada do modelo de Vêras (2017) e do modelo calibrado neste trabalho em relação às séries observadas, e a Figura 5.6 exibe gráficos de área para uma melhor compreensão da evolução térmica nos dois modelos. Os valores de NSE alcançados durante a calibração automática do modelo superam os valores encontrados no trabalho anterior. Esse resultado demonstra a utilidade da rotina computacional como uma ferramenta para testar diferentes parâmetros e ajustar o modelo aos dados observados.

Os dados observados do lago Descoberto sugerem que este tenha um padrão monomítico de mistura da coluna d'água. Como era esperado, os dados de temperatura da saída do modelo exibiram um padrão de acordo com o padrão monomítico – no qual a temperatura da água ao longo da coluna d'água possui um gradiente menor durante a estação fria e maior durante a estação quente.

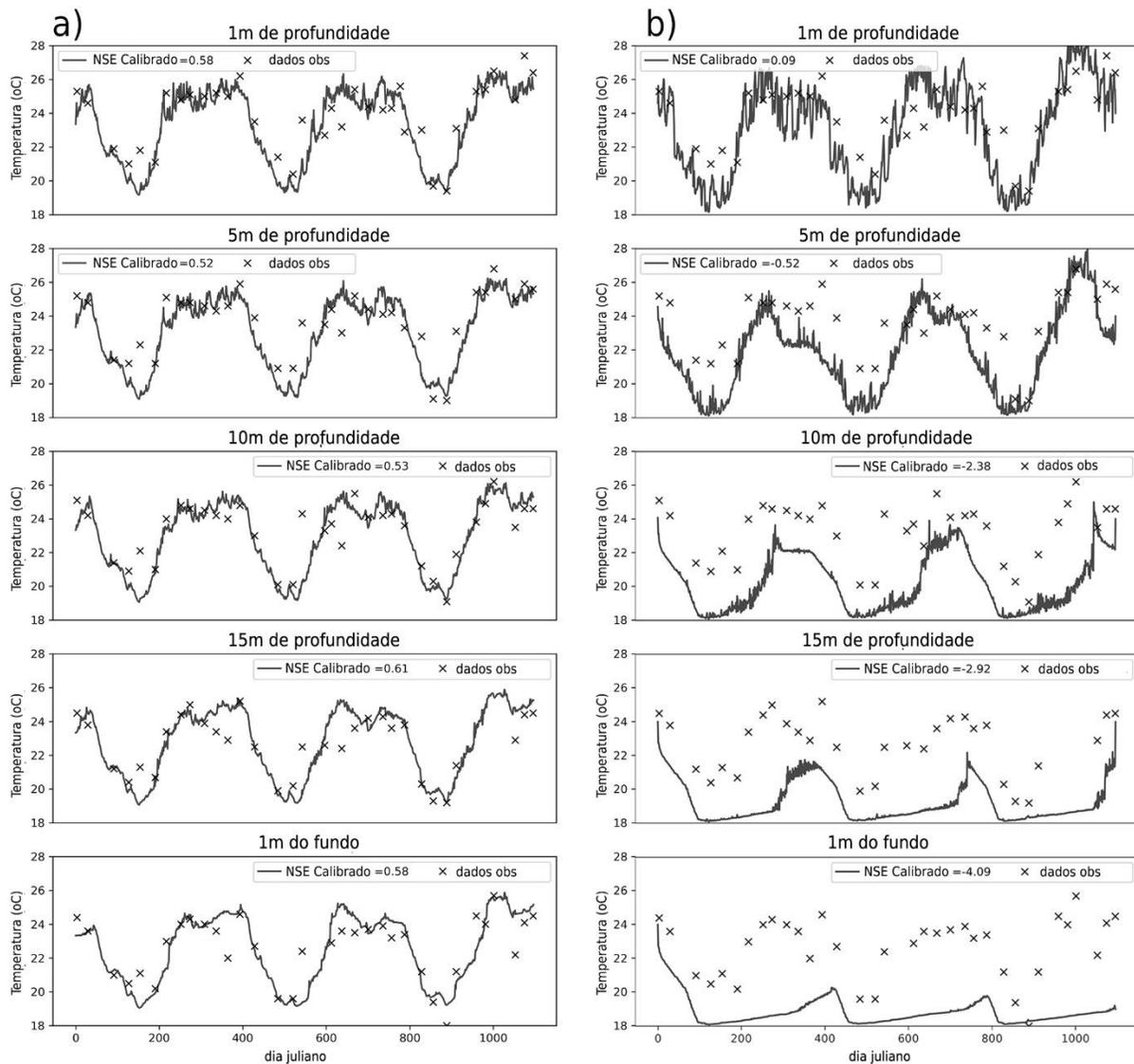


Figura 5.5 Séries simuladas e medições observadas. a) Modelo calibrado automaticamente. b) Modelo calibrado manualmente por Vêras (2017)

Na Figura 5.6, o modelo calibrado exibe um gradiente próximo do que foi medido pela CAESB. O gráfico exibe um padrão de temperatura onde a diferença entre o topo e o fundo do lago é  $\leq 3^{\circ}\text{C}$ . Esse mesmo padrão foi encontrado por Pinto (2018) (Figura 5.7), onde a autora utilizou o modelo unidimensional *General Lake Model* (GLM) para simular o lago Descoberto durante os anos de 2007 e 2012. Em seu trabalho, a autora obteve resultados de temperatura onde a coluna d'água tende a estar praticamente isotérmica, com o metalímnion ocorrendo em altas profundidades.

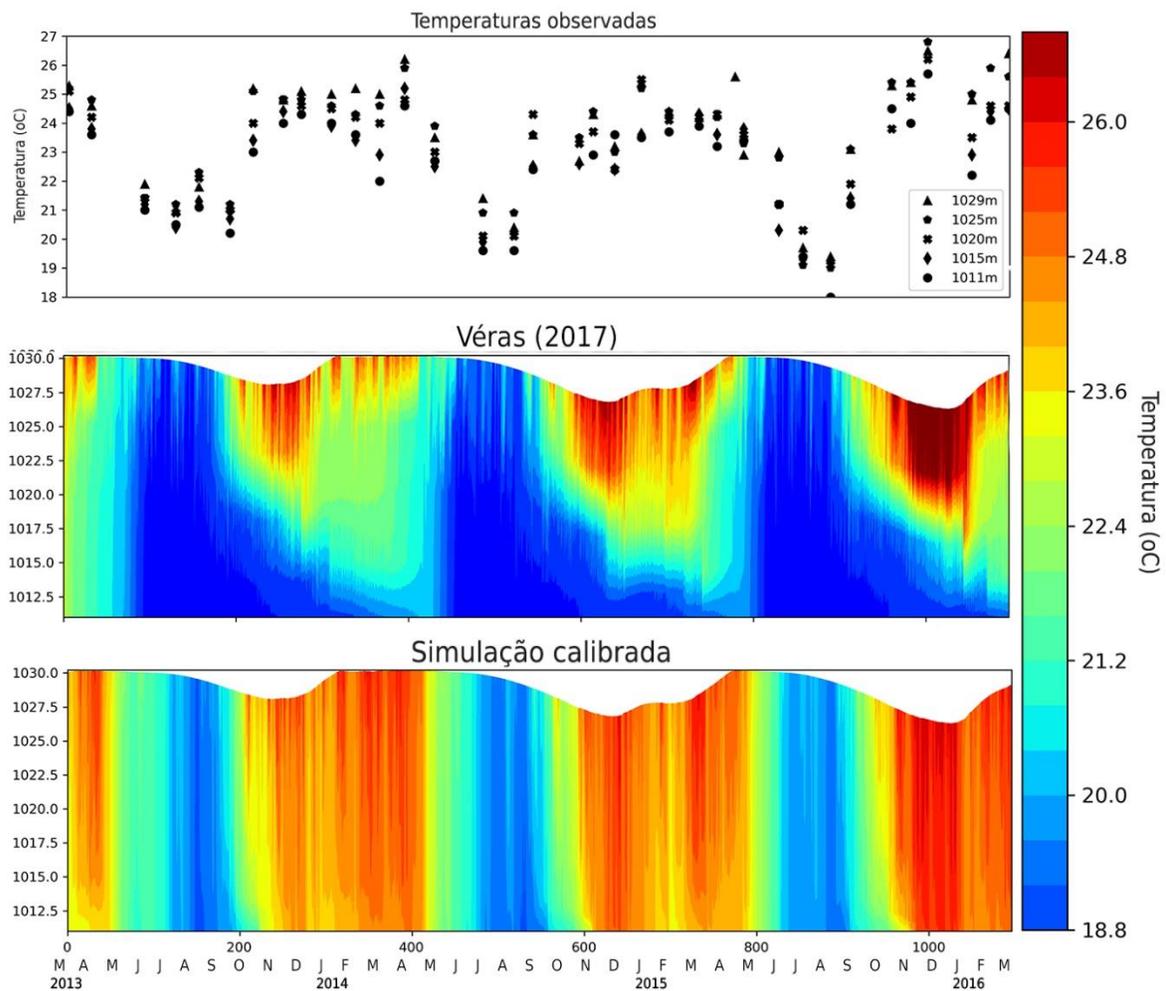


Figura 5.6 Temperatura observada e gráficos de área para o modelo de Véras (2017) e para o modelo calibrado neste trabalho. Véras (2017) produziu um gradiente de temperatura intensificado se comparado com os resultados observados e o modelo calibrado no presente trabalho.

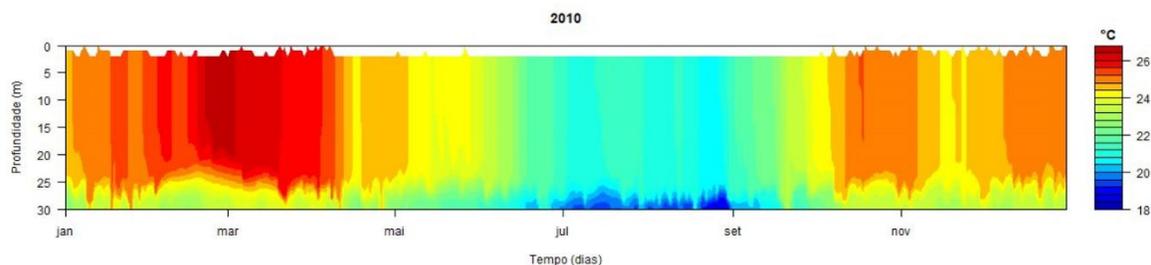


Figura 5.7 Gráfico de área do modelo de Pinto (2018) para o ano simulado de 2010. O resultado no CE-QUAL-W2 do presente trabalho se aproxima do resultado produzido no GLM pela autora.

### 5.3 DINÂMICAS LONGITUDINAIS E VERTICAIS DA TEMPERATURA PRESENTES NA PORÇÃO PRINCIPAL DO MODELO CALIBRADO

Uma das vantagens de se utilizar um modelo 2-D, em comparação aos modelos 1-D, é utilizá-lo como meio de compreender as dinâmicas espaciais que ocorrem nos modelos criados. Dessa forma, capturou-se 36 telas (uma para cada mês simulado) do pós-processador do CE-QUAL-W2 – contendo variação térmica, velocidade longitudinal e vertical – com o intuito de avaliar suas variações por todo braço principal do lago Descoberto. As imagens estão dispostas nessa seção em conjuntos de nove telas (Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11) e presentes em melhor resolução no Apêndice A deste trabalho.

O braço principal do modelo continha como condição de contorno a soma das vazões dos córregos Chapadinha, Olaria e do Rio Descoberto à montante e a entrada do Córrego Coqueiro no segmento 13 da malha de simulação.

Para associar os dados observados aos dados de saída do modelo, a média mensal e o coeficiente de variação dos dados de condição de contorno de temperatura da água e vazão afluente, bem como os dados de entrada da velocidade do vento e da temperatura do ar utilizados no braço principal do modelo estão presentes nas Tabela 5.2 e Tabela 5.3.

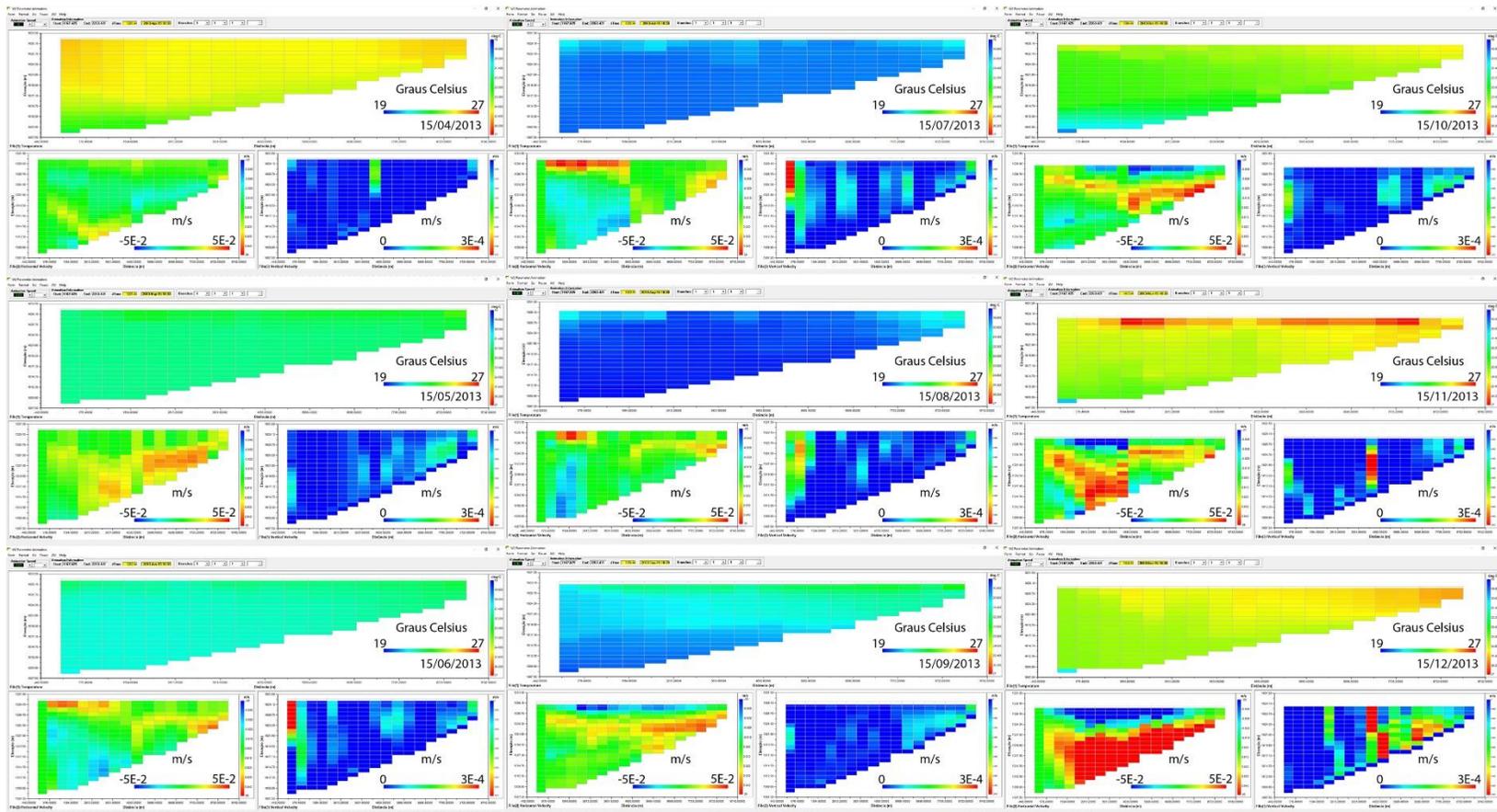


Figura 5.8 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

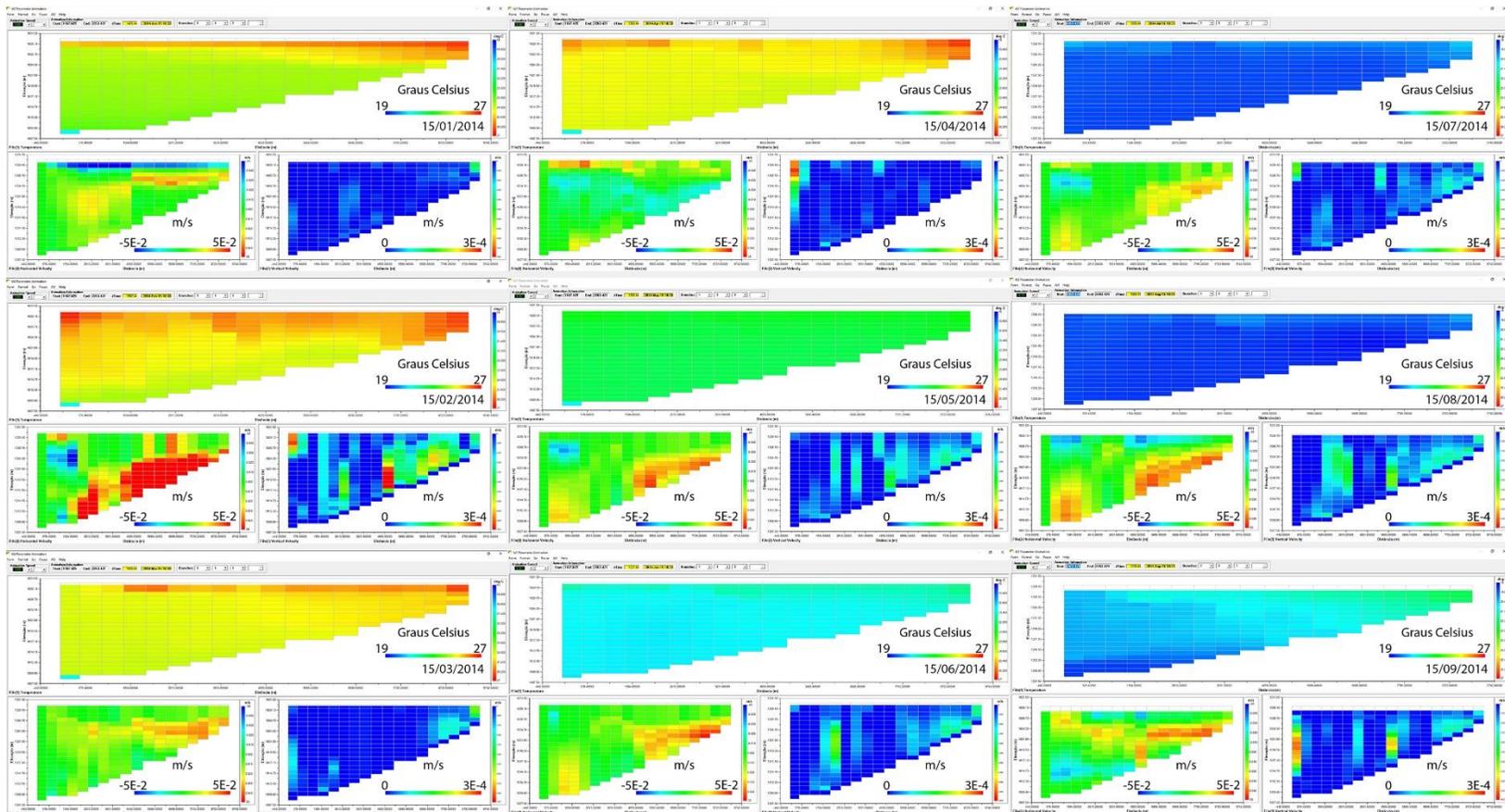


Figura 5.9 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

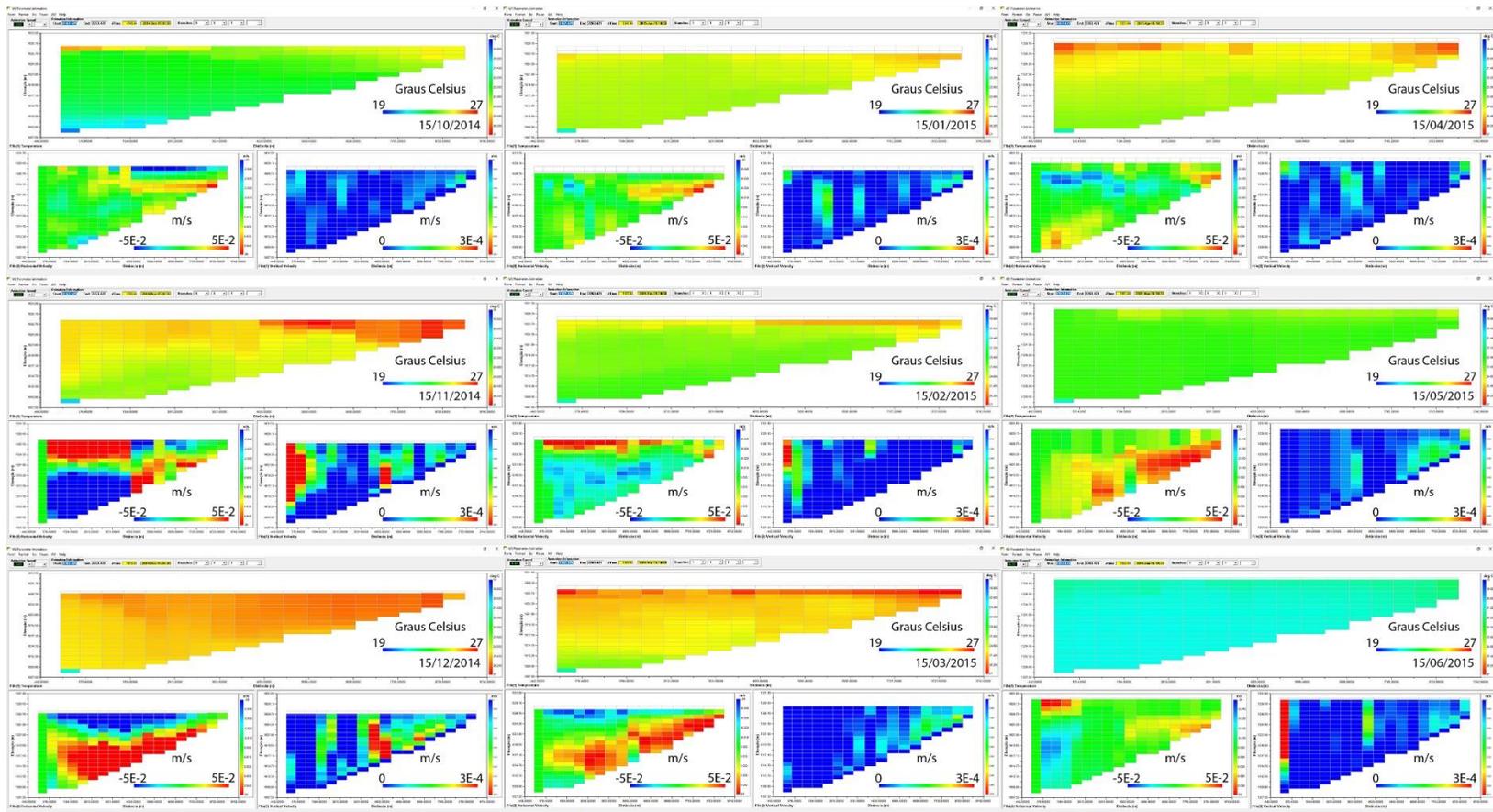


Figura 5.10 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

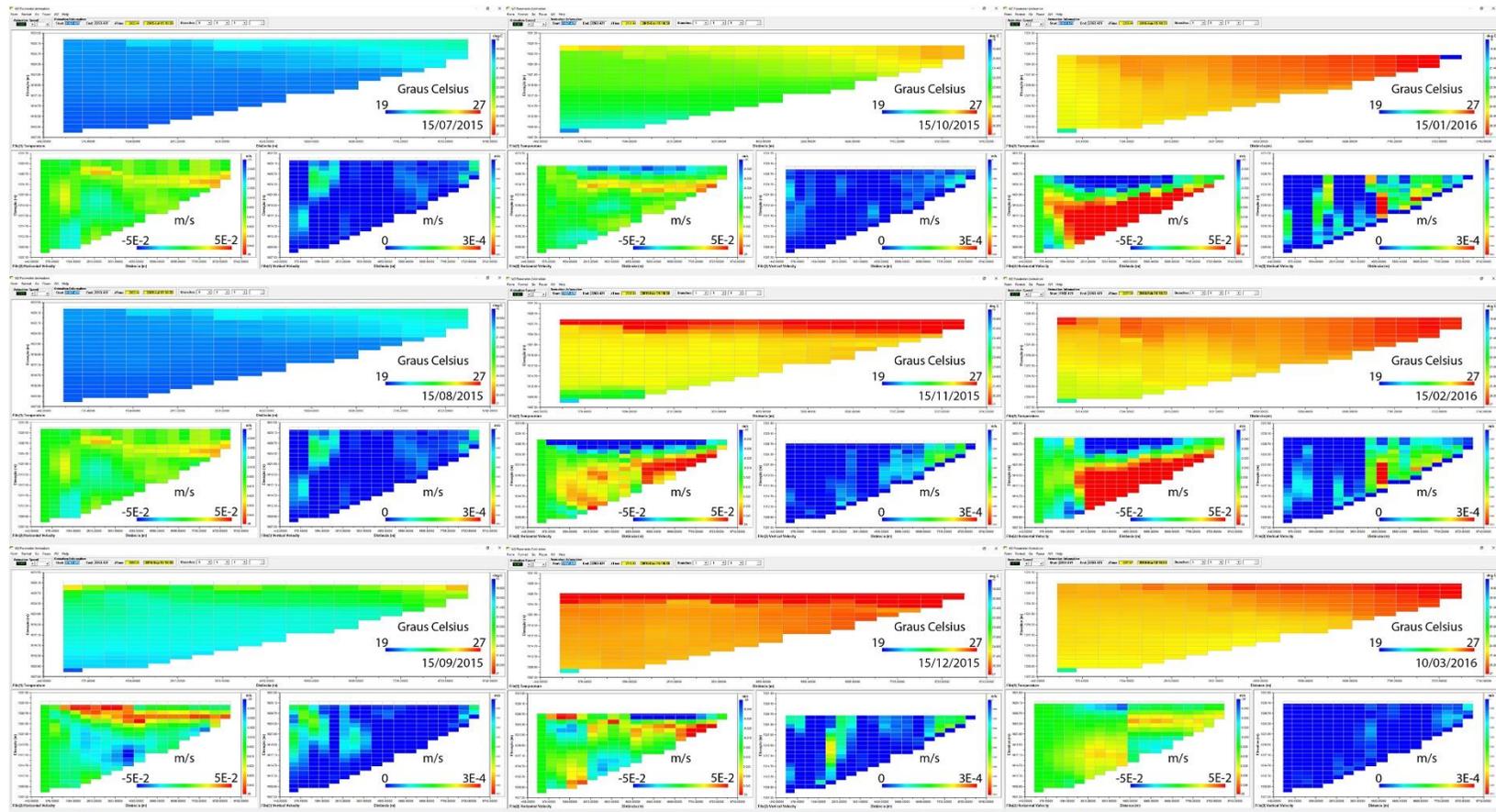


Figura 5.11 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem (cor vermelha) e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água (cor vermelha). Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

Tabela 5.2 Valores médios mensais e Coeficiente de Variação – entre parênteses – da temperatura do ar e da velocidade do vento para o período entre 03/2013 e 03/2016.

	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>
<b>Temp do Ar (°C)</b>	23.16	22.58	22.79	22.40	20.80	20.03
	(± 4%)	(± 5%)	(± 5%)	(± 4%)	(± 4%)	(± 5%)
<b>Velocidade do Vento (m/s)</b>	2.53	2.56	2.79	2.54	2.22	2.05
	(± 29%)	(± 40%)	(± 32%)	(± 25%)	(± 24%)	(± 17%)
	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>Temp do Ar (°C)</b>	20.25	21.35	24.19	24.60	23.49	22.88
	(± 5%)	(± 6%)	(± 6%)	(± 8%)	(± 6%)	(± 6%)
<b>Velocidade do Vento(m/s)</b>	2.09	1.94	2.45	2.48	3.17	3.48
	(± 22%)	(± 16%)	(± 32%)	(± 35%)	(± 30%)	(± 35%)

Tabela 5.3 Valores médios mensais e Coeficiente de Variação – entre parênteses – da temperatura da água e das vazões de entrada para o período entre 03/2013 e 03/2016.

<b>Afluente</b>		<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>
<b>Descoberto + Olaria + Chapadinha</b>	<b>Temp Água</b>	25.13	24.55	25.45	25.28	23.10	23.00
	<b>(°C)</b>	(± 1%)	(± 2%)	(± 3%)	(± 4%)	(± 0%)	(± 2%)
	<b>Vazão (m³/s)</b>	2.79	3.71	3.29	3.85	3.68	2.59
		(± 36%)	(± 47%)	(± 21%)	(± 10%)	(± 26%)	(± 8%)
<b>Coqueiro</b>	<b>Temp Água</b>	20.20	22.07	22.23	22.73	22.15	21.30
	<b>(°C)</b>	(± 4%)	(± 6%)	(± 6%)	(± 3%)	(± 3%)	(± 2%)
	<b>Vazão (m³/s)</b>	0.48	0.47	0.43	0.58	0.49	0.32
		(± 29%)	(± 35%)	(± 10%)	(± 2%)	(± 34%)	(± 16%)
		<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>Descoberto + Olaria + Chapadinha</b>	<b>Temp Água</b>	20.93	20.67	22.97	24.33	25.10	24.25
	<b>(°C)</b>	(± 2%)	(± 4%)	(± 5%)	(± 4%)	(± 2%)	(± 5%)
	<b>Vazão (m³/s)</b>	1.95	1.41	0.91	0.71	1.03	1.52
		(± 12%)	(± 15%)	(± 18%)	(± 21%)	(± 33%)	(± 19%)
<b>Coqueiro</b>	<b>Temp Água</b>	20.60	20.37	20.50	21.43	20.70	21.37
	<b>(°C)</b>	(± 2%)	(± 1%)	(± 1%)	(± 2%)	(± 1%)	(± 1%)
	<b>Vazão (m³/s)</b>	0.25	0.20	0.17	0.16	0.21	0.27
		(± 9%)	(± 7%)	(± 8%)	(± 19%)	(± 42%)	(± 20%)

A média mensal das vazões obteve seus maiores valores durante os meses chuvosos de Fevereiro, Março e Abril. Ainda, os meses de Janeiro e Fevereiro foram os que obtiveram a maior dispersão da série, respectivamente 36% e 47%. Os meses da temporada fria e seca (Maio

a Setembro), em geral, obtiveram valores de coeficiente de variação abaixo dos 20%. Entretanto o mês de Maio demonstrou variação acima dessa faixa.

Considerando-se o maior desvio entre a série conjunta do Rio Descoberto, Córrego Olaria e Córrego Chapadinha e a série do Córrego Coqueiro, os meses de Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro obtiveram valores de 34%, 16%, 12%, 15% e 18% respectivamente (Figura 5.12).

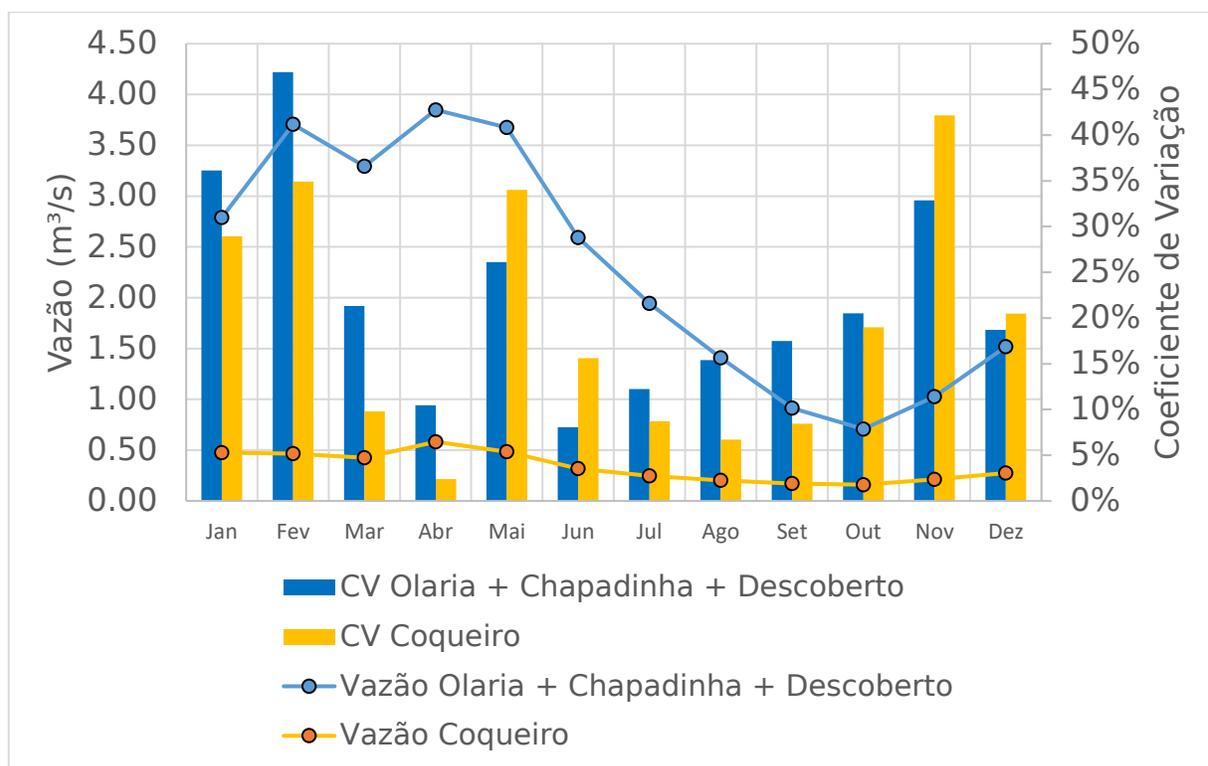


Figura 5.12 Séries médias mensais (03/2013 – 03/2016) utilizadas como condição de contorno do braço principal do modelo do Reservatório Descoberto e o Coeficiente de variação (CV) para cada série. Pode-se verificar uma diminuição da média das vazões na série conjunta dos Córregos Olaria, Chapadinha e Rio Descoberto durante os meses de seca (Maio a Setembro).

Pode-se afirmar que as vazões conjuntas observadas dos afluentes Rio Descoberto, Córrego Olaria, Córrego Chapadinha utilizadas nos três anos simulados (03/2013 - 03/2016) variaram significativamente durante os meses chuvosos.

Ao verificar visualmente a série de vazões conjuntas (Figura 5.13), essa demonstra uma tendência negativa das vazões afluentes durante o período chuvoso nos anos de 2013, 2014 e

2015. As quedas bruscas dos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março justificam o alto coeficiente de variação. Além disso, a Figura 5.14 exibe um valor fora da tendência para o mês de Fevereiro/2016, que demonstra um aumento significativo das vazões.

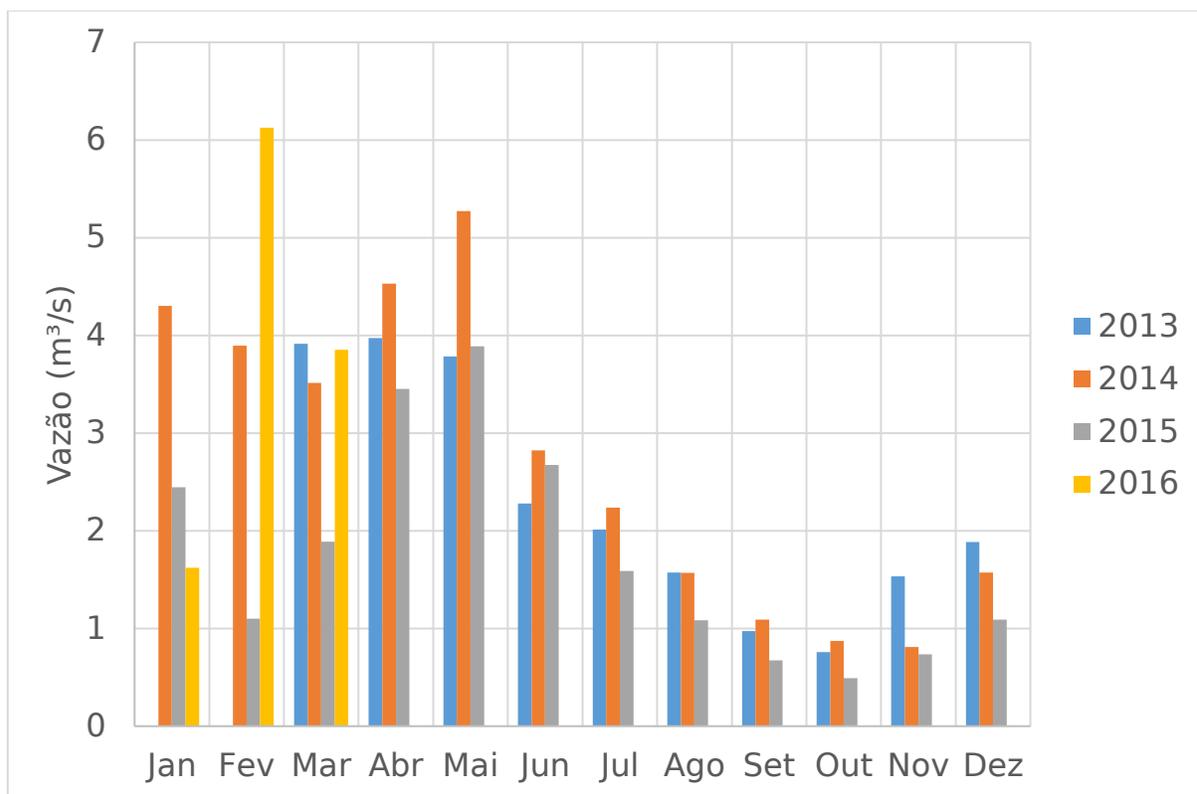


Figura 5.13 Séries anuais (03/2013 – 03/2016) da série conjunta dos Córregos Olaria, Chapadinha e Rio Descoberto. Os meses chuvosos (Outubro a Abril) demonstram significativa variação seguindo uma tendência de diminuição entre os anos de 2013 a 2015. O ano de 2016 demonstra um aumento das vazões nos meses de Fevereiro e Abril.

Em relação à temperatura da água e do ar, os valores de coeficiente de variação obtiveram baixos valores e não chegaram a superar o 10% (Figura 5.14). Isso demonstra que a diminuição anual gradativa das vazões durante o período de chuva não causou significativo impacto à temperatura média observada nos afluentes durante o período simulado.

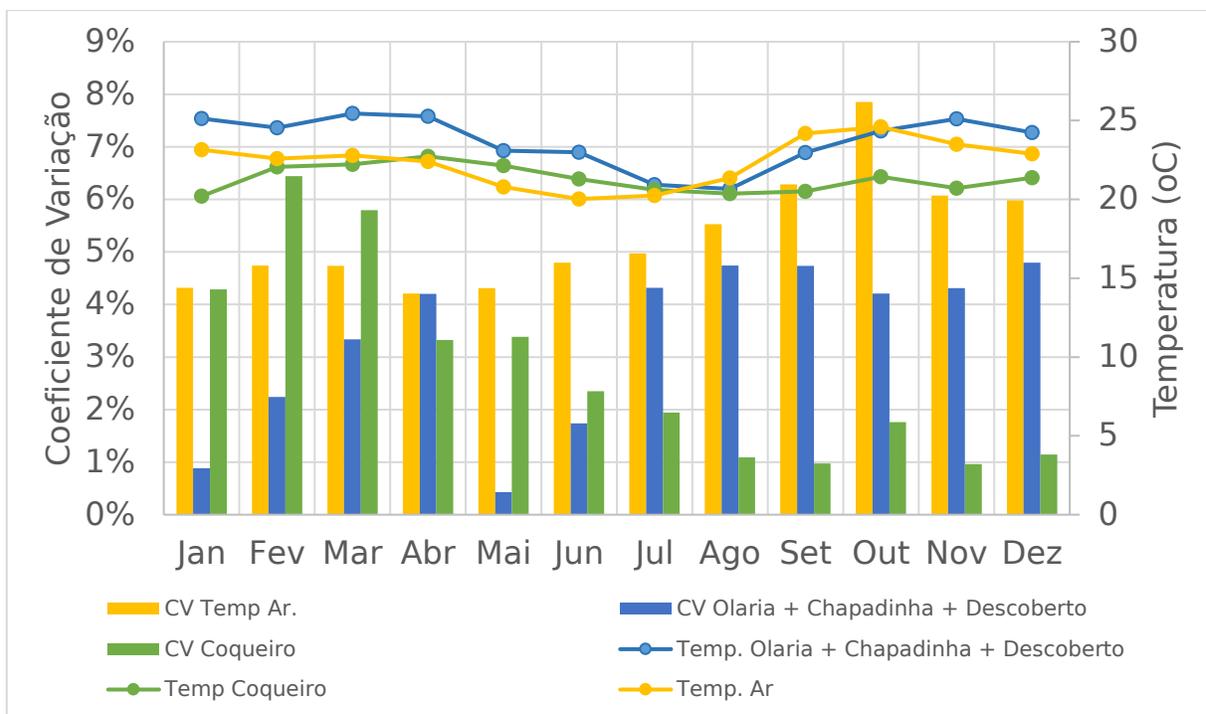


Figura 5.14 Séries médias mensais de temperatura do ar, dos afluentes a montante (Olaria, Chapadinha e Descoberto) e do Segmento 13 (Córrego Coqueiro) e o Coeficiente de variação (CV) de cada uma das séries.

Os próximos parágrafos têm o objetivo de discorrer sobre efeitos sazonais que foram visualizados. Um mesmo padrão sazonal foi visto para todos os três anos simulados. Iniciou-se o modelo com temperatura homogênea de 24°C e este tornou-se estratificado já no primeiro mês de simulação (março-abril) apresentando gradiente térmico entre 22°C e 25°C e revelando um início de simulação bem ajustada ao período quente e úmido do ano (Figura 5.8). Esse mesmo padrão de temperatura foi observado para o mesmo mês nos anos seguintes da simulação (Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11).

Em seguida, os dados de entrada de temperatura atmosférica começam a ter menores valores e, conseqüentemente, o modelo esfria. Nos três anos, durante os meses de maio, o modelo exibiu um lago praticamente isotérmico, no qual as velocidades verticais e horizontais, quase ausentes no mês anterior, tornam-se mais presentes principalmente nos segmentos da parte mais rasa do braço, e raras vezes nos segmentos do trecho mais profundo.

A baixa temperatura é mantida durante todos os meses da temporada fria e seca da região, sendo que a partir do mês de julho é possível observar velocidades verticais por todo o braço principal. É possível verificar também que, enquanto há incidência de raios solares sobre a superfície da água, todos os segmentos longitudinais exibem temperaturas mais quentes nos primeiros 2-4 metros da coluna d'água. Esse comportamento era esperado pois a incidência solar é a responsável por aquecer os primeiros metros da coluna (Henderson-Sellers, 1986; Tundisi e Tundisi, 2008), e demonstra que, mesmo durante a temporada fria, a incidência solar cria um gradiente de temperatura nas primeiras profundidades durante o dia.

A partir de setembro, início da estação quente, é perceptível o aquecimento de profundidades intermediárias também. Esse aquecimento se inicia pelo ponto mais raso do braço, e depois se prolonga por todo o braço atingindo camadas superficiais e camadas profundas. É possível observar também um incremento das velocidades verticais e horizontais das massas de água do reservatório.

As velocidades horizontais exibiram uma relação com as velocidades verticais, estando presentes ou ausentes de forma conjunta. Nos meses de novembro ambas são observadas com maior intensidade na simulação. É possível verificar um padrão de velocidade horizontal no qual as águas da superfície possuem sentido oposto das águas do fundo com a presença de um trecho intermediário no qual o componente horizontal da velocidade da água é próximo a zero.

Esse padrão “de oposição” se assemelha ao componente horizontal de um movimento circular, mas ao verificar os movimentos verticais, o movimento bidimensional passa a não ser tão simples de descrever. Ainda assim, como o modelo é bidimensional (longitudinal-vertical) e cada segmento exibe uma média lateral, supõe-se que as velocidades exibidas demonstrem fluxos de mistura da coluna d'água.

Esse padrão observado pode ser explicado pela atividade do vento durante a estação quente. A Figura 5.15 exibe os dados de média diária da velocidade do vento utilizados como dado de entrada para a simulação e as setas apontam os picos anuais da série que ocorrem, nos meses da estação quente (setembro a abril).

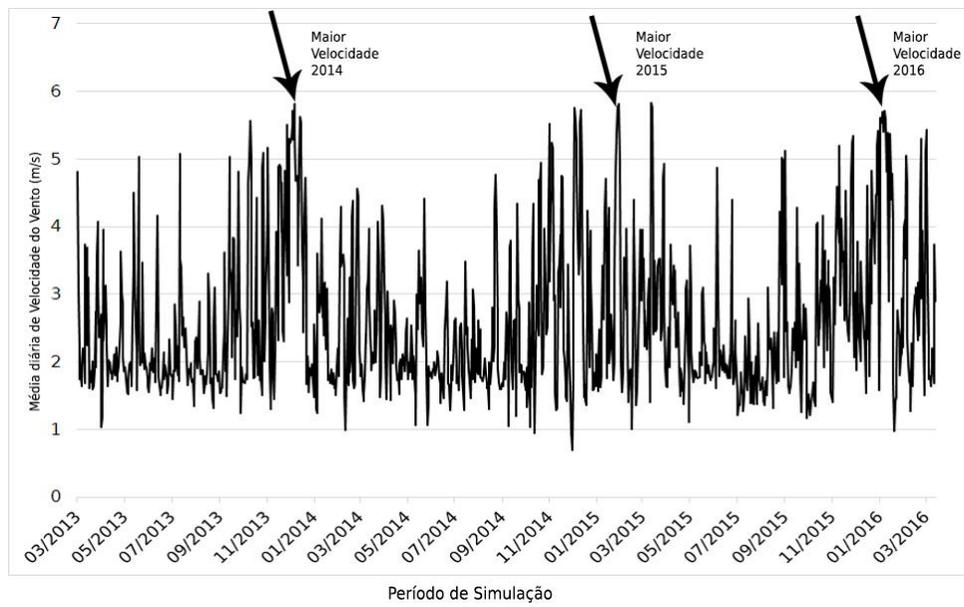


Figura 5.15 - Dados de velocidade do vento (média diária) utilizados como dados de entrada do modelo. As setas apontam os picos anuais de velocidade para os três anos simulados. Todos ocorreram durante a estação quente.

Admitindo-se que a simulação é capaz de representar a hidrodinâmica do reservatório do Descoberto, verifica-se um perfil de movimentação vertical que ocorre em diversos pontos do braço principal durante a temporada quente. Porém esses movimentos raramente ocorrem nos pontos mais profundos dos três segmentos próximos à barragem, o que dá evidências de que o efeito de mistura simulado pode não alcançar os pontos mais fundos do modelo durante a temporada quente.

Ainda nesse contexto, o índice de estabilidade de Schmidt ( $S_c$ ) foi utilizado como indicador hidrodinâmico. A série de temperatura simulada foi utilizada para calcular o  $S_c$ , e os resultados plotados estão exibidos na Figura 5.16.

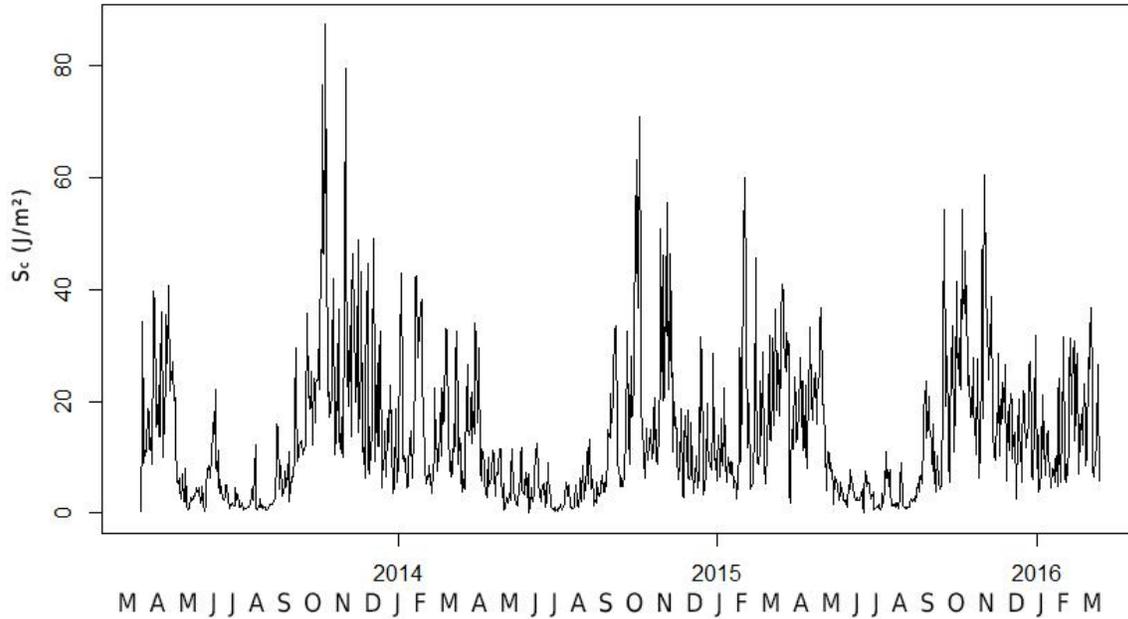


Figura 5.16 Série de Índice de Schmidt ( $S_c$ ) calculada pela utilização dos dados de saída do modelo CE-QUAL-W2 calibrado.

Em geral, os meses de calor-umidade (Outubro – Abril) exibiram os maiores valores de  $S_c$ , enquanto os meses frios-secos (Maio – Setembro) exibiram valores de  $S_c$  menores que  $20 \text{ J/m}^2$ , e próximos a  $0 \text{ J/m}^2$ . O padrão de  $S_c$  apresentado na Figura se assemelha ao de reservatórios que misturam uma vez ao ano – monomíticos. Entretanto, mesmo durante os períodos de estratificação, pode-se observar valores abaixo de  $20 \text{ J/m}^2$ .

Esses valores podem indicar que o Reservatório não se encontra estável termicamente durante todo o período de quente. Assim, o perfil estratificado pode ser substituído por curtos períodos de mistura, embora exista a tendência à manutenção do perfil estratificado devido às variáveis meteorológicas do período, e ao aumento da cota altimétrica da superfície da coluna d'água.

Ainda, a temporada quente é, também, a estação chuvosa da região onde ocorrem os picos de precipitação e vazão dos afluentes do reservatório. Dessa forma, não se pode negligenciar os prováveis efeitos causados – no modelo – pela intrusão dos rios afluentes no braço principal (Córrego Olaria, Córrego Chapadinha e Rio Descoberto).

A simulação exibiu velocidades de fundo em direção à barragem. Essas velocidades são visíveis nos quadros de velocidade horizontal das Figura 5.8 Figura 5.9 Figura 5.10 e Figura 5.11, e estão

representadas pelas cores amarelo, laranja e vermelho que se inicia nas camadas mais fundas dos segmentos mais rasos. Esse padrão pode ser evidência de que uma corrente intrusiva de fundo poderia estar ocorrendo no modelo.

Em seguida, foi observada a mudança térmica nictemeral na simulação do CE-QUAL-W2. Essas geraram um padrão de aquecimento das camadas superficiais durante o dia, criando uma termoclina que perde intensidade durante o resfriamento noturno. No verão, a variação no primeiro metro da coluna d'água alcança valores próximos de 1 °C entre dia e noite. A Figura 5.17 contém duas capturas de tela da simulação do mês de fevereiro – estação quente. Nela, é possível ver a variação de temperatura nos primeiros metros da coluna d'água por todo o trecho do braço principal

Esse comportamento de aquecimento das águas superficiais é bem descrito na literatura e ocorre com maior intensidade em lagos protegidos do vento, gerando um processo de microestratificação que provoca importantes impactos químico-biológicos ao lago (Gasol *et al.*, 1991; Hare e Carter, 1984; Tundisi e Tundisi, 2008).

Woolway *et al.* (2016) demonstraram uma forte correlação inversa entre a grandeza da área de 100 lagos boreais e temperados e a variação térmica das águas superficiais durante os dias de verão, onde, em lagos com cerca de 100 m<sup>2</sup> de área, a faixa de variação da temperatura poderia ser 10 vezes maior que em lagos de área 10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>. Essa relação pode ser relacionada com a condição de abrigo do vento, onde lagos de área menor possuem um pequeno perímetro e, possivelmente, estão mais protegidos do vento que lagos de área maior.

Além disso, o trabalho de (Vilas *et al.*, 2018) demonstrou o incremento da temperatura de águas superficiais quando o vento é impedido de inserir energia cinética nas águas do lago por conta da densidade de macroalgas.

Assim, entende-se que, na simulação, as águas superficiais do modelo do Reservatório do Descoberto estão sobre o efeito de fatores capazes de desestabilizar o perfil estratificado da coluna d'água, e que, conseqüentemente, a energia absorvida na superfície é dissipada para as camadas abaixo.

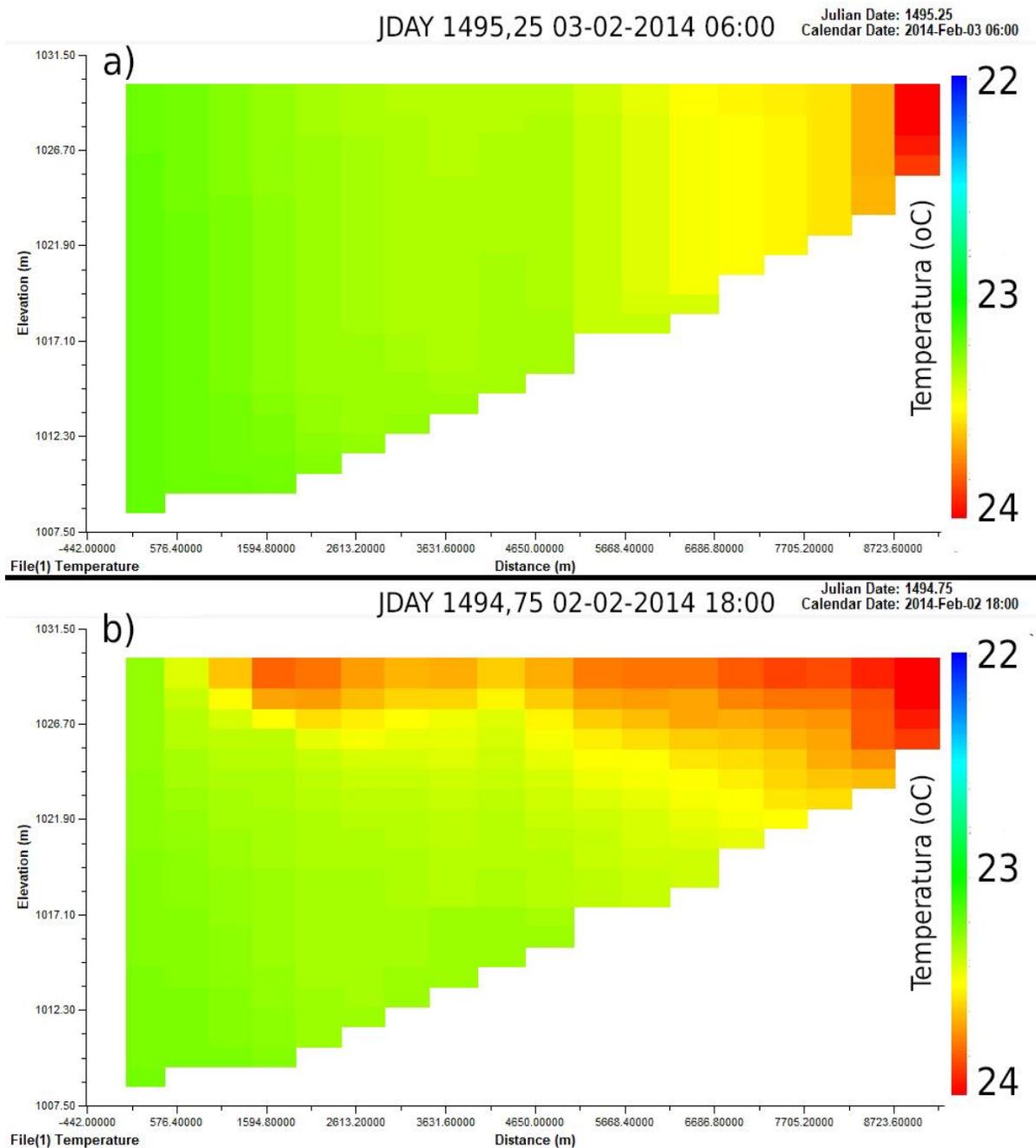


Figura 5.17 Capturas de tela do pós processador do CE-QUAL-W2. a) Padrão de temperatura no braço principal do lago Descoberto às 06:00; b) Padrão de temperatura às 18:00; A incidência solar atua intensificando a termóclina ao longo do dia. A legenda de cores não é a mesma das figuras no apêndice A e foi ajustada para demonstrar a pequena variação entre dia e noite.

## 5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE TEMPERATURA

Com o número de execuções do modelo concluídas durante os processos de calibração, apresenta-se uma primeira avaliação de como os parâmetros inseridos no arquivo de entrada influenciaram o ajuste das séries das diferentes profundidades.

As Tabela 5.4 e Tabela 5.5 exibem o melhor ajuste para cada uma das séries de temperatura e o conjunto de parâmetros relacionado respectivamente. Foi calculado também a média e o coeficiente de variação dos conjuntos de parâmetros com o objetivo de ter uma primeira avaliação do impacto da variação dos parâmetros sobre o resultado da função objetivo. O baixo valor de coeficiente de variação para o WSC em relação aos outros parâmetros foi considerado uma primeira indicação de que o ajuste ótimo das séries simuladas estava ocorrendo apenas numa faixa de variação do WSC. Evidências mais claras serão apresentadas a seguir.

A Tabela 5.4 exhibe uma troca (*trade-off*) de ajuste entre as profundidades. Por exemplo: O melhor valor de NSE para a série “1m do fundo” (NSE = 0,69) é caracterizada por valores mais baixos de NSE para as profundidades 1m, 5m e 10m. Assim como os melhores resultados para as séries 1m e 5m, obtiveram valores menores de NSE para as profundidades de 15m e 1m do fundo. Esse mesmo comportamento de *trade-off* entre as profundidades também é descrito na calibração manual executada por Livramento (2014), na qual o autor afirma que modificações no WSC foram cruciais para o ajuste do modelo.

Tabela 5.4 Valores de NSE para a melhor simulação em cada uma das profundidades e para “o todo”.

		Coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe					
		"O todo"	1m	5m	10m	15m	1m do fundo
Melhor ajuste	“O todo”	<u>0.598</u>	0.58	0.52	0.53	0.61	0.58
	1m & 5m	0.52	<u>0.61</u>	<u>0.57</u>	0.47	0.38	0.33
	10m	0.54	0.58	0.54	<u>0.56</u>	0.58	0.28
	15m	0.59	0.56	0.43	0.51	<u>0.65</u>	0.66
	1m do fundo	0.46	0.24	0.21	0.42	0.63	<u>0.69</u>

Tabela 5.5 Conjuntos de parâmetros utilizados na melhor simulação para cada uma das profundidades e para “o todo”, média e coeficiente de variação entre os conjuntos.

		<b>Parâmetros de temperatura</b>					
		<b>AX</b>	<b>DX</b>	<b>WSC</b>	<b>BETA</b>	<b>EXH2O</b>	<b>CBHE</b>
<b>Melhor ajuste</b>	“O todo”	1.17	0.9	1.13	0.7	0.22	0.41
	1m & 5m	0.14	0.47	1.09	0.22	0.04	0.6
	10m	0.53	0.84	1.02	0.66	0.31	0.56
	15m	0.5	0.52	1.24	0.89	0.02	0.3
	1m do fundo	1.48	0.77	1.54	0.5	0.02	0.87
	Média	0.764	0.7	1.204	0.594	0.122	0.548
	Coeficiente de Variação	71%	28%	17%	42%	110%	39%

AX – Viscosidade turbulenta longitudinal; DX – Difusividade turbulenta longitudinal; WSC – Coeficiente de Abrigo do Vento; BETA – Radiação solar absorvida na superfície d’água; EXH2O – Coeficiente de extinção da luz para a água; CBHE – Coeficiente de troca de calor de fundo;

Para a análise de sensibilidade, o *script* em *python3* foi modificado para fazer 1000 amostragens aleatórias com densidade uniforme. Gráficos de dispersão foram gerados para relacionar o valor de cada parâmetro ao valor de função objetivo alcançado. O conjunto amostral foi arrolado, em razão do valor dos parâmetros, e dividido em 10 grupos com 100 amostras e calculou-se a média de cada grupo para ter-se uma visão da variação média da função objetivo causada pela variação do parâmetro. Ainda, a interdependência entre os parâmetros foi ignorada e essa análise foi realizada considerando que os parâmetros influenciam o modelo de forma independente.

A Figura 5.18 apresenta os gráficos utilizados na análise de sensibilidade. Foi acrescentado a cada um dos gráficos o valor calibrado na etapa anterior, e sinalizado o melhor resultado de adequação atingido durante a análise de sensibilidade. Para uma melhor visualização, os limites dos parâmetros foram ajustados entre 0 e 1, sendo 0 o limite mínimo e 1 o limite máximo presente na Tabela 4.3 na Metodologia do trabalho.

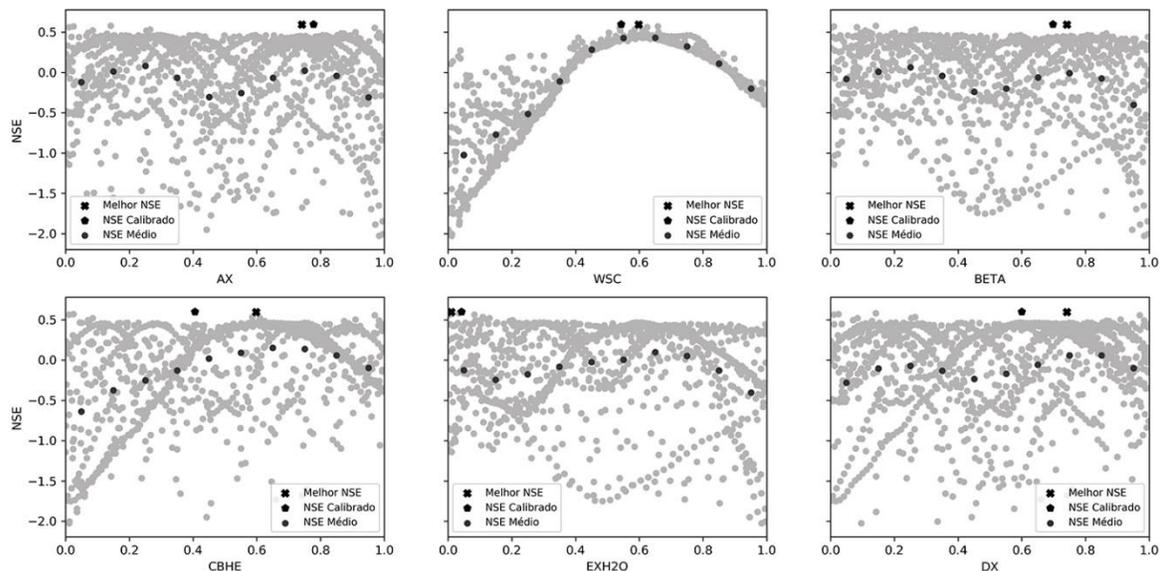


Figura 5.18 – Gráficos de dispersão dos parâmetros de temperatura do CE-QUAL-W2.

a) Coeficiente de Abrigo do Vento (WSC)

Dentre os parâmetros avaliados, apenas o Coeficiente de Abrigo do Vento obteve uma forma menos dispersa, mais homogênea, seguindo o formato aproximado de uma parábola com a concavidade virada para baixo. Há também uma faixa de valores onde a função objetivo alcança seus maiores valores (normalizada: 0,5 ~ 0,65; regular: 1,0 ~1,35). Ainda, o WSC é o único parâmetro em que a série de médias varia significativamente ( $-1,1 \leq NSE \leq 0,59$ ), demonstrando que o WSC pode ser o principal parâmetro a conduzir o resultado de temperatura do modelo.

O parâmetro WSC tem a função de simular efeitos de abrigo que podem ser causados pelo dossel arbóreo ou por montanhas ao redor do corpo d'água. Para simular essas condições, o modelador deve selecionar um valor entre 0 e 1, no qual 0 é o “total abrigo do vento”, e 1 significa nenhum abrigo. Além disso, valores acima de 1 podem ser usados para intensificar os dados de vento inseridos no modelo.

O modelo GLM calibrado por Pinto (2018) utilizou dados de vento da mesma estação deste trabalho, distante 28km da área de estudo. A autora corrigiu os dados de vento pelo parâmetro  $f_w$  – o qual é similar ao WSC – e o valor utilizado foi de 1,99, demonstrando que a simulação no GLM necessitava de velocidades do vento duas vezes maior que as obtidas. Aqui, ao contrário, os melhores resultados do modelo ocorreram com o WSC próximo de 1,0 e, esse fato demonstra que os dados de vento obtidos foram suficientes para alcançar uma adequação satisfatória do resultado no modelo CE-QUAL-W2.

Finalmente, esse resultado corrobora com o que foi proposto pelo Manual do CE-QUAL-W2 (Cole e Wells, 2017), e com os trabalhos de Livramento (2014) e Liporoni (2012), os quais afirmam que o WSC tem forte influência durante a calibração da temperatura.

Considerando os outros parâmetros, seus gráficos exibiram múltiplas parábolas distribuídas pela área do gráfico e pontos que parecem dispersos aleatoriamente. A falta de uniformidade foi um indicativo de que o resultado do modelo foi insensível às mudanças de valor nesses parâmetros.

b) Coeficiente de troca de calor de fundo (CBHE)

O coeficiente de troca de calor de fundo – CBHE – foi o parâmetro que demonstrou a segunda maior variação da série de médias (de -0,6 a 0,2), embora esse parâmetro não conste nas diretrizes do Manual como um parâmetro importante para a calibração da temperatura do modelo. Sua função é reger a intensidade do fluxo de calor na interface água-sedimento, e, segundo o Manual do CE-QUAL-W2, o valor *default* ( $0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) é razoável para a simulação de qualquer corpo hídrico. A título de esclarecimento, a taxa de troca de calor na interface água-sedimento é calculada no modelo pela Eq. 5.1:

$$H_{sw} = -CBHE(T_w - T_s) \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde:

$H_{sw}$  = taxa de troca de calor entre sedimento e água,  $W.m^{-2}$ ;

CBHE = Coeficiente de troca de calor de fundo,  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ ;

$T_w$  = Temperatura da água,  $^{\circ}C$ ;

$T_s$  = Temperatura do sedimento,  $^{\circ}C$ ;

Na literatura, outros trabalhos que estimaram ou calibraram os valores de CBHE no CE-QUAL-W2 são poucos. Alguns trabalhos encontrados utilizam valores com – no mínimo – 1 ordem de magnitude de diferença em relação ao valor *default* ou o próprio valor default.

Por exemplo, (Choi, Jeong e Park, 2007), simularam o reservatório Obong, Coréia do Sul; e Gelda; Owens; Effler (1998), o reservatório Cannonsville, NY, Estados Unidos. Os dois trabalhos utilizaram valores de CBHE iguais a  $7,0E-9$  e  $7,0E-8$  respectivamente. Esses valores estão quase 10 ordens de magnitude abaixo do valor sugerido pelo Manual. A partir daqui duas assunções podem ser realizadas: a) que o objetivo de valores tão baixos era “desligar” a troca de calor no fundo (taxa de troca  $\approx 0$ ) durante o período simulado, embora essa informação não esteja clara nos trabalhos; ou b) que houve um desentendimento dos modeladores em relação ao parâmetro, e o valor inserido era, na verdade, um valor fixo de fluxo de calor previamente estimado pelos autores.

Ainda, o trabalho de Zouabi-Aloui, Adelana e Gueddari (2015), utilizaram o CE-QUAL-W2 para simular o Sejnane Dam, Tunisia. O valor de CBHE calibrado no trabalho foi de 2,75. A intensa condução de energia – 10 vezes maior que a sugerida no Manual – faria a interface sedimento-água entrar em equilíbrio térmico com facilidade e o sedimento deixaria de ter a função de retirar ou ceder calor de forma lenta para as águas profundas como demonstrado no trabalho de (Fang e Stefan, 1996) e sintetizado na livro de (Tundisi e Tundisi, 2008). Novamente, não há informação se havia alguma intenção dos autores em utilizar um valor tão alto para simular as trocas de fundo do lago.

Todos os trabalhos supracitados reportam resultados satisfatórios da simulação da temperatura, entretanto os autores, por alguma razão não especificada, negligenciaram a importância da troca de calor na interface sedimento-água.

Em trabalhos feitos na região do Distrito Federal, as evidências demonstram que não se pode negligenciar a troca de calor de fundo para se ter uma boa simulação da qualidade da água. Liporoni (2012) – no lago Paranoá; e Livramento (2014) e Vêras (2017) – no lago Descoberto, entenderam que o resultado de temperatura era sensível ao parâmetro CBHE no CE-QUAL-W2. Ainda, Pinto (2018), utilizando o GLM, compreendeu que a simulação térmica das águas profundas do lago Descoberto só obtinha resultados razoáveis quando a função de trocas de calor da interface água-sedimento estava ativada.

c) Viscosidade turbulenta longitudinal (AX) e difusidade turbulenta longitudinal (DX)

Os parâmetros hidrodinâmicos AX e DX são responsáveis pelo transporte longitudinal de momento e de constituintes. Os dois parâmetros demonstraram ser insensíveis à simulação da temperatura na coluna d'água.

Segundo o Manual do modelo, ambos os parâmetros tem pouca importância na hidrodinâmica de lagos, pois a velocidade longitudinal das águas é muito próxima de zero. Por essa razão, muitos trabalhos realizados com o CE-QUAL-W2, utilizam o valor default de  $1\text{m}^2\text{s}^{-1}$  para ambos os parâmetros (Afshar e Saadatpour, 2009; Choi, Jeong e Park, 2007; Gelda, Owens e Effler, 1998; Lee *et al.*, 2012; Rangel-Peraza, 2015; Ziaie *et al.*, 2019; Zouabi-Aloui, Adelana e Gueddari, 2015).

A Tabela 5.6 contém os valores de AX e DX para os 10 melhores ajustes obtidos durante a análise de sensibilidade. Pode-se ver uma completa aleatoriedade entre os valores e uma alta dispersão dos valores demonstrada pelo desvio padrão. Essas são indicações da falta de sensibilidade dos dois parâmetros para as saídas de temperatura do modelo.

Ainda assim, a análise de sensibilidade efetuada nesse trabalho não levou em conta a interdependência entre os parâmetros calibrados, dando espaço para que trabalhos futuros possam fazer uma análise de sensibilidade dessas relações e estabelecer a sensibilidade dos parâmetros com um método superior.

Tabela 5.6 Melhores ajustes da simulação aos dados observados de temperatura alcançados durante a calibração e os valores de AX – Viscosidade turbulenta longitudinal; e DX – Difusividade turbulenta longitudinal; referentes a cada ajuste.

<b>NSE</b>	<b>AX</b>	<b>DX</b>
0.59	1.11	1.11
0.58	0.21	0.21
0.57	0.04	0.04
0.56	0.01	0.02
0.55	1.45	1.45
0.53	0.40	0.4
0.52	0.13	0.13
0.51	0.38	0.38
0.50	1.36	1.36
Média	0.56	0.56
Desvio Padrão	0.57	0.57

d) Coeficiente de extinção da luz para água (EXH2O) e Radiação solar absorvida na superfície d'água (BETA)

Os parâmetros EXH2O e BETA conduzem a quantidade de luz que penetra a coluna d'água, bem como o seu alcance. Os componentes de ondas longas da luz incidente são rapidamente absorvidos nos primeiros centímetros da coluna d'água (BETA) e a luz remanescente (1 – BETA) é exponencialmente atenuada em função da profundidade.

A luz disponível em função da profundidade é calculada no modelo pela Eq. 5.2:

$$I_z = (1 - BETA)I_0e^{-\alpha z} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Em que:

$I_z$  = luz disponível na profundidade  $z$ ,  $W.m^{-2}$

$z$  = profundidade, m;

$I_0$  = radiação solar na superfície da coluna d'água,  $W.m^{-2}$

$\alpha$  = soma dos coeficientes de atenuação da água (neste trabalho, apenas EXH2O),  $m^{-1}$

Ambos os parâmetros não demonstraram sintomas de sensibilidade dentro das faixas calibradas (0% a 100% para BETA; 0,001 a 5,0 para EXH2O) e o valor calibrado e o de melhor ajuste durante a análise de sensibilidade (Melhor A.S) para os dois parâmetros se mostraram distantes dos valores utilizados na literatura (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 Valores calibrado e melhor ajuste na análise de sensibilidade do presente modelo e valores estimados e calibrados encontrados na literatura para EXH2O (Coeficiente de atenuação da luz) e BETA (Radiação solar absorvida na superfície d'água).

<b>Autores</b>	<b>Lago estudado</b>	<b>Clima</b>	<b>EXH2O (m<sup>-1</sup>)</b>	<b>BETA (%)</b>
Modelo calibrado			0,22	69
Melhor A.S.			0,06	73
Pinto (2018)*	Lago Descoberto (BRA)	Tropical	1,92	-
Véras (2017)			0,5	45
Livramento (2014)			0,5	45
(Rangel-Peraza, 2015)	Lago Aguamilpa (MEX)	Tropical	0,5	42
(Dake e Harleman, 1969)**	Lago Tahoe (EUA)	Temperado	0,05	40
(Dake e Harleman, 1969)**	Lago Castle (EUA)		0,27	40
(Threadgill <i>et al.</i> , 2017)	Lago Lost Creek (USA)	Temperado	0,55	55
(Gelda, Owens e Effler, 1998)	Reservatório Cannonsville (USA)	Temperado	-	45
(Zouabi-Aloui, Adelana e Gueddari, 2015)	Lago Sejnane (TUN)	Temperado	0,45	55
Ziaie <i>et al.</i> (2019)	Lago Zayandeh Roud (IRÃ)	Temperado	0,25	45
(Afshar e Saadatpour, 2009)	Karkheh reservoir (IRÃ)	Temperado	0,24	49
Média (Apenas literatura)	-	-	0,52	50,25

\*Pinto (2018) usou o General Lake Model, no qual o parâmetro EXH2O tem o nome de Kw

\*\* Dake & Harleman (1969) utilizaram fotômetros para estimar valores de BETA e EXH2O

Em geral, a literatura demonstra que os valores de BETA são aproximadamente 50%, enquanto o modelo calibrado e o melhor ajuste na A.S. obtiveram um valor de BETA  $\approx$  70%. Por outro

lado, os valores de EXH2O foram 0,22 e 0,06m<sup>-1</sup>; menores que a média na literatura, onde os valores tendem a estar próximos de 0,5m<sup>-1</sup> (Tabela 5.7).

Mais importante ainda, a atenuação da luz no reservatório do Descoberto no período entre 2007 e 2013 (calculadas pela utilização de dados de Disco de Secchi), demonstram que a atenuação variou entre 0,486 m<sup>-1</sup> e 3,778 m<sup>-1</sup> (Pinto, 2018), demonstrando que esses valores de EXH2O não são factíveis, embora estejam no conjunto melhor ajustados às séries observadas.

Assim, a interrelação entre BETA e EXH2O (Eq. 5.2) produziu uma condição na qual, para obter um bom ajuste em relação às séries de temperatura, um alto valor para um dos parâmetros conduz o outro a um baixo valor. Ou seja, utilizar limites melhor definidos para EXH2O fará o resultado de BETA – que não foi estimado para o lago Descoberto, mais acurado e menos incerto.

Uma outra forma de investir em busca da diminuição dessa incerteza é ativar a opção de entrada de valores variados temporalmente de EXH2O, disponível no CE-QUAL-W2. Assim, o modelador confecciona uma série de valores de atenuação calculados a partir da utilização do disco de Secchi *in situ*. Dessa forma, apenas existiria a necessidade de calibrar o valor de BETA.

Finalmente, é importante lembrar que o módulo de qualidade da água não foi utilizado neste trabalho. Outros coeficientes de atenuação como: EXSS – atenuação devido a sólidos suspensos; EXOM – atenuação devido a matéria orgânica suspensa; EXAL – atenuação devido a concentração de algas; passam a compor o coeficiente de atenuação total ( $\alpha$ ) (Eq. 5.2) quando seus módulos são ativados no CE-QUAL-W2.

Torna-se necessária uma nova avaliação sobre os coeficientes responsáveis pela atenuação/absorção da luz. Esperava-se que o único componente utilizado para o cálculo do coeficiente de atenuação total ( $\alpha$ ) no modelo, EXH2O, obtivesse valores ótimos análogos à soma de todos os outros coeficientes não participantes. Entretanto isso não aconteceu e, novamente, pode ser uma consequência da interrelação entre os parâmetros BETA – o qual o valor pode, também, estar fora da realidade (70%) – e EXH2O.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as seguintes contribuições

- a) Uma revisão e o aprimoramento do banco de dados disponível no PTARH/UnB utilizado em trabalhos anteriores para simular o lago Descoberto com a aplicação do simulador CE-QUAL-W2 (período: 2013-2016), a qual culminou com o acréscimo da estrutura da barragem ao modelo para o ajuste de seu balanço hídrico;
- b) Uma rotina computacional capaz de automatizar e agilizar os processos de calibração e análise de sensibilidade dos parâmetros do CE-QUAL-W2;
- c) Um modelo com ajuste aceitável ( $NSE = 0,59$ ) às condições térmicas demonstradas no lago Descoberto no período 2013-2016;
- d) Uma análise básica do braço principal do lago em relação às dinâmicas térmicas e hidrodinâmicas que ocorreram durante a simulação;
- e) Uma análise de sensibilidade robusta utilizando uma amostragem com densidade uniforme de 1000 conjuntos de parâmetros definidos aleatoriamente;

A revisão da base de dados disponibilizada por Vêras (2017) foi crucial para os avanços alcançados na simulação do reservatório do Descoberto e expôs evidências de um possível não entendimento das condições de contorno utilizadas pelo *software* em trabalhos anteriores, relacionados à aplicação do modelo CE-QUAL-W2 nos reservatórios do Distrito Federal. No modelo de Vêras (2017), essa situação foi capaz de desestabilizar a solução numérica do modelo nos primeiros meses deste trabalho e provocou a necessidade de modificação do modelo batimétrico e a remoção das condições de contorno que causavam a desestabilização.

Apesar de não ter sido avaliada a melhora de resultado em razão da utilização de dados horários de precipitação em substituição das médias diárias utilizadas anteriormente, os dados presentes nesse trabalho demonstram que o CE-QUAL-W2 entrega dados de saída com variação nictemeral. Ou seja, o dado de saída referente ao dia juliano 1,0 é referente à meia noite, ao início do dia, e 1,5 é referente ao meio dia. O CE-QUAL-W2 oferece a opção de interpolar linearmente os dados de entrada como uma forma de preencher as falhas entre as mensurações. No entanto, dependendo das características da bacia afluenta, o preenchimento linear pode não ser ideal para a simulação.

Regulou-se o balanço hídrico do modelo pelo ajuste das cotas simuladas às cotas observadas (NSE = 0,9), atestando que as modificações efetuadas ao modelo batimétrico de Livramento (2014) e a adição da estrutura da barragem à grelha do modelo como condição de contorno efluente foram investidas eficazes para o caso. Assim, obteve-se sucesso em representar a variabilidade de cota e volume do lago durante as épocas de seca e de chuva do período simulado (03/2013 - 03/2016).

O script de automatização escrito em linguagem de programação *python3* - utilizando o pacote de otimização SPOTPY (Houska *et al.*, 2015), se revelou uma eficiente ferramenta para a amostragem de conjuntos de parâmetros no CE-QUAL-W2, alcançando um número de amostras 100 vezes maior do que foi observado em outros trabalhos com a aplicação do CE-QUAL-W2 no lago Descoberto. O melhor ajuste dos parâmetros do modelo às temperaturas medidas no lago obteve NSE = 0,59 e obedeceu às tendências de aquecimento e resfriamento causado pelas estações fria e quente da região do Distrito Federal.

Aproveitou-se da característica bidimensional do modelo CE-QUAL-W2 para apresentar uma análise básica das dinâmicas de todo o braço principal do Reservatório do Descoberto. Assumindo-se os dados de saída do modelo como razoáveis, foi demonstrado que o perfil térmico do modelo do Reservatório segue o padrão monomítico pela análise do Índice de Schmidt. Também foi possível observar curtos períodos de mistura durante os períodos de estratificação.

Também, esse trabalho demonstrou que o aumento dos ventos e o aumento das vazões de entrada dos afluentes, durante o período quente-chuvoso, são possíveis fontes dos movimentos de mistura que transferiram o calor das camadas mais rasas para as camadas mais profundas.

Considerou-se os comportamentos observados no modelo como suficientes para explicar a pequena diferença de temperatura (1°C a 3°C) dos dados simulados por toda a coluna d'água, embora outros fatores não avaliados possam ter, também, a sua importância.

A análise de sensibilidade por meio de gráficos de dispersão (1000 amostras) foi capaz de ratificar o “Coeficiente de abrigo do vento” (WSC) como o principal parâmetro a ser calibrado no CE-QUAL-W2, pois é o mais importante condutor do resultado térmico do modelo. Também, foi ratificado que os parâmetros hidrodinâmicos “Viscosidade turbulenta

longitudinal” (AX) e “Difusividade turbulenta longitudinal” (DX) são relativamente insensíveis ao ajuste de temperatura. Também foi certificado que as trocas de calor de fundo (regidas pelo parâmetro CBHE) não podem ser negligenciadas, acompanhando o que outros autores já haviam mencionado em trabalhos de modelagem (CE-QUAL-W2 e GLM) na região do Distrito Federal, pois tem papel importante na condução térmica do modelo (Liporoni, 2012; Livramento, 2014; Pinto, 2018; Vêras, 2017).

Não foram observados sintomas de sensibilidade nas faixas utilizadas para os parâmetros de “Radiação solar absorvida na superfície d'água” (BETA) e “Extinção da luz na água” (EXH2O). A parametrização de ambos os parâmetros foram fontes de grande incerteza durante a análise de sensibilidade. Ademais, constatou-se que, apesar do bom ajuste de temperatura, os parâmetros BETA e EXH2O foram calibrados com valores fisicamente dúbios. A relação de interdependência dos dois parâmetros foi apontada como a principal origem desse resultado.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi desenvolvido em contato com outros modeladores do CE-QUAL-W2 no PTARH-UNB, e por essa razão, sugere-se a manutenção de uma equipe de modeladores no programa de pós graduação que, em contato, possam aprofundar o conhecimento sobre as ciências necessárias e sobre o software CE-QUAL-W2 para seguir desenvolvendo o modelo do lago Descoberto.

A utilização de valores de média diária ou mensal se constituem como perda de dados que podem ser importantes para os cálculos do modelo. Dessa forma, ainda que os dados mensais tenham alcançado um bom ajuste de simulação, sugere-se que os próximos trabalhos avaliem a utilização da maior resolução temporal possível para cada dado de entrada, sobre a hipótese de que a simulação terá melhores resultados caso conte com um conjunto de dados o mais próximo possível do contínuo, diminuindo a extensão preenchida linearmente pelo modelo.

Trabalhos futuros devem estender a análise que foi feita no presente trabalho aos outros braços do reservatório, desenvolvendo análises mais complexas dessas dinâmicas. Recomenda-se também que desenvolvam o modelo para a simulação de constituintes da qualidade da água.

A análise de sensibilidade empregada nesse trabalho é incapaz de analisar a sensibilidade de parâmetros dependentes entre si. Dessa forma, os resultados alcançados dão apenas indicações de sensibilidade dos parâmetros. Por essa razão, sugere-se que uma abordagem capaz de avaliar a interrelação dos parâmetros seja empregada para a obtenção de um índice de sensibilidade mais vigoroso

O WSC é um parâmetro que pode ser discriminado espacial e temporalmente, tornando o impacto do vento singularizado para cada segmento em cada passo de tempo do modelo. Como foi demonstrado que o WSC é o parâmetro mais importante para o resultado de temperatura do modelo, torna-se importante a análise da discriminação do WSC espacial e temporalmente. Entretanto, a tentativa de calibração de um valor individual de WSC para cada um dos 41 segmentos e 1100 dias de simulação consumiria uma fração colossal do tempo desse trabalho, e, por essa razão, sugere-se que trabalhos futuros instalem anemógrafos próximos à área do lago para obter estimativas do vento no lago e cessar a necessidade de calibração do WSC.

É possível estimar os valores de EXH<sub>2</sub>O através de dados de disco de Secchi. Dessa forma, recomenda-se a utilização de dados monitorados de disco de Secchi para criação de uma série temporal de EXH<sub>2</sub>O e inserção no modelo, trocando a obtusa incerteza de sua parametrização pela incerteza de sua mensuração *in-situ*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA. Documento Técnico Contendo Shapefiles e Mapas da subdivisão por trechos estratégicos da Bacia (Unidades Hidrográficas - UH) e Tabelaas Sínteses. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/regulacao/estudos>>. Acesso em: 19 set. 2019.
- AFSHAR, A.; SAADATPOUR, M. Reservoir Eutrophication Modeling, Sensitivity Analysis, and Assessment: Application to Karkheh Reservoir, Iran. *Environmental Engineering Science*, v. 26, n. 7, p. 1227–1238, 17 jun. 2009.
- AMORIM BORGES, P. DE; BARFUS, K.; WEISS, H.; BERNHOFER, C. Trend analysis and uncertainties of mean surface air temperature, precipitation and extreme indices in CMIP3 GCMs in Distrito Federal, Brazil. *Environmental earth sciences*, v. 72, n. 12, p. 4817–4833, 2014.
- ANAGNOSTOU, E.; GIANNI, A.; ZACHARIAS, I. Ecological modeling and eutrophication—A review. *Natural Resource Modeling*, v. 30, n. 3, p. e12130, 2017.
- BÁRDOSSY, A.; SINGH, S. Robust estimation of hydrological model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 12, 5 nov. 2008.
- BEVEN, K. J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons, 2011.
- BRASIL. Decreto N° 88.940, de 7 de novembro de 1983. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1980-1989/1980-1984/D88940.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1980-1984/D88940.htm)>. Acesso em: 1 ago. 2018.
- BRÊDA, J. P. L. F.; BRAVO, J. M.; PAIVA, R. C. D. DE. Efficient number of calibrated cross sections bottom levels on a hydrodynamic model using the SCE-UA algorithm. Case study: Madeira River. *RBRH*, v. 22, 2017.
- CAVALCANTI, C. M. P. Monitoramento comparativo da concentração de contaminantes emergentes nos principais mananciais utilizados no Distrito Federal. 2018.
- CHOI, J. H.; JEONG, S.-A.; PARK, S. S. Longitudinal-Vertical Hydrodynamic and Turbidity Simulations for Prediction of Dam Reconstruction Effects in Asian Monsoon Area 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 43, n. 6, p. 1444–1454, 2007.
- COLE, T. M.; WELLS, S. A. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 4.1. 2017.

- DAKE, J. M. K.; HARLEMAN, D. R. F. Thermal stratification in lakes: Analytical and laboratory studies. *Water Resources Research*, v. 5, n. 2, p. 484–495, 1969.
- DE CESARE, G.; BOILLAT, J.-L.; SCHLEISS, A. J. Circulation in Stratified Lakes due to Flood-Induced Turbidity Currents. *Journal of Environmental Engineering*, v. 132, n. 11, p. 1508–1517, 1 nov. 2006.
- DISTRITO FEDERAL. Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Plano-27%C2%AA-ciea.pdf>>. Acesso em: 20 maio. 2019.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, v. 28, n. 4, p. 1015–1031, 1992.
- FANG, X.; STEFAN, H. G. Dynamics of heat exchange between sediment and water in a lake. *Water Resources Research*, v. 32, n. 6, p. 1719–1727, 1 jun. 1996.
- FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago descoberto - DF. Brasília: Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 21 maio 2014.
- FERRIGO, S.; TÁVORA, B. E.; MINOTI, R. T.; LIMA, J. E. F. W.; KOIDE, S. Avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas e do uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacia hidrográfica no Distrito Federal. XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, João Pessoa, p. 1–15, 2014.
- GASOL, J. M.; GARCÍA-CANTIZANO, J.; MASSANA, R.; PETERS, F.; GUERRERO, R.; PEDRÓS-ALIÓ, C. Diel changes in the microstratification of the metalimnetic community in Lake Cisó. *Hydrobiologia*, v. 211, n. 3, p. 227–240, 1 mar. 1991.
- GELDA, R. K.; OWENS, E. M.; EFFLER, S. W. Calibration, Verification, and an Application of a Two-Dimensional Hydrothermal Model [CE-QUAL-W2(t)] for Cannonsville Reservoir. *Lake and Reservoir Management*, v. 14, n. 2–3, p. 186–196, 1 set. 1998.
- HARE, L.; CARTER, J. C. H. Diel and seasonal physico-chemical fluctuations in a small natural West African lake. *Freshwater Biology*, v. 14, n. 6, p. 597–610, 1984.

- HENDERSON-SELLERS, B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review. *Reviews of Geophysics*, v. 24, n. 3, p. 625–649, 1986.
- HIPSEY, M. R.; HAMILTON, D. P.; HANSON, P. C.; CAREY, C. C.; COLETTI, J. Z.; READ, J. S.; IBELINGS, B. W.; VALESINI, F. J.; BROOKES, J. D. Predicting the resilience and recovery of aquatic systems: A framework for model evolution within environmental observatories. *Water Resources Research*, v. 51, n. 9, p. 7023–7043, 2015.
- HOUSKA, T.; KRAFT, P.; CHAMORRO-CHAVEZ, A.; BREUER, L. SPOTting model parameters using a ready-made python package. *PloS one*, v. 10, n. 12, p. e0145180, 2015.
- IBGE. Ranking de municípios brasileiros. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em:  
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/pesquisa/23/25207?tipo=ranking>>. Acesso em: 18 nov. 2017.
- JØRGENSEN, S. E.; LÖFFLER, H.; RAST, W.; STRAŠKRABA, M. (EDS.). Chapter 6 - Management of Reservoirs. In: *Developments in Water Science. Lake and Reservoir Management*. Elsevier, 2005. v. 54p. 315–372.
- KIM, D.; KIM, Y.; KIM, B. Simulation of eutrophication in a reservoir by CE-QUAL-W2 for the evaluation of the importance of point sources and summer monsoon. *Lake and Reservoir Management*, v. 35, n. 1, p. 64–76, 2 jan. 2019.
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, v. 5, p. 89–97, 2005.
- LEE, H. W.; KIM, E. J.; PARK, S. S.; CHOI, J. H. Effects of climate change on the thermal structure of lakes in the Asian Monsoon Area. *Climatic Change*, v. 112, n. 3, p. 859–880, 1 jun. 2012.
- LIPORONI, L. M. Estudo preliminar da qualidade da água do Lago Paranoá, Brasília–DF, utilizando um modelo de qualidade da água bidimensional. 2012.
- LIVRAMENTO, C. C. M. DO. Modelagem matemática da qualidade da água com ênfase na carga de nutrientes e características térmicas do lago Descoberto utilizando o modelo CE-QUAL-W2. Brasília, DF: Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2014.

- LORZ, C. et al. Challenges of an integrated water resource management for the Distrito Federal, Western Central Brazil: climate, land-use and water resources. *Environmental Earth Sciences*, v. 65, n. 5, p. 1575–1586, 1 mar. 2012.
- LORZ, C.; AMORIM, P. B. DE; FRANZ, C.; HÖFER, R.; KOSCHKE, L.; LIMA, J. E. F. W.; MAKESCHIN, F.; STRAUCH, M.; WEIß, H. Dynamic Land Use Change as Challenge for IWRM: A Case Study in Central Brazil. In: BORCHARDT, D.; BOGARDI, J. J.; IBISCH, R. B. (Eds.). *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 541–566.
- MATEUS, M.; ALMEIDA, C.; BRITO, D.; NEVES, R. From Eutrophic to Mesotrophic: Modelling Watershed Management Scenarios to Change the Trophic Status of a Reservoir. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, n. 3, p. 3015–3031, mar. 2014.
- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, v. 21, n. 6, p. 1087–1092, 1953.
- MIRJALILI, S. Genetic Algorithm. In: MIRJALILI, S. (Ed.). *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications*. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 43–55.
- MOOIJ, W. M. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquatic Ecology*, v. 44, n. 3, p. 633–667, 1 set. 2010.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, v. 7, n. 4, p. 308–313, 1965.
- PINTO, A. A. DE S. Avaliação da influência da precipitação e temperatura do ar na dinâmica térmica do reservatório do Descoberto-DF por meio do modelo GLM. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 18 set. 2018.

- RANGEL-PERAZA, J. Análisis de sensibilidad e incertidumbre en la modelación de la calidad del agua de la presa de Aguamilpa. In: Tendencias de investigación en Limnología tropical. México: Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología, 2015. .
- READ, J. S.; HAMILTON, D. P.; JONES, I. D.; MURAOKA, K.; WINSLOW, L. A.; KROISS, R.; WU, C. H.; GAISER, E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, v. 26, n. 11, p. 1325–1336, 1 nov. 2011.
- SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons, 2008.
- SILVA, G. V. DA. Simulação bidimensional da qualidade da água do Lago do Descoberto (DF/GO). 2009.
- SOARES, M. C. S.; MARINHO, M. M.; HUSZAR, V. L.; BRANCO, C. W.; AZEVEDO, S. M. The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 13, n. 4, p. 257–269, 2008.
- SOLEIMANI, S.; BOZORG-HADDAD, O.; SAADATPOUR, M.; LOÁICIGA, H. A. Simulating thermal stratification and modeling outlet water temperature in reservoirs with a data-mining method. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, v. 68, n. 1, p. 7–19, 7 nov. 2018.
- THREADGILL, T. L.; TURNER, D. F.; NICHOLAS, L. A.; BUNCH, B. W.; TILLMAN, D. H.; SMITH, D. L. *Temperature Modeling of Lost Creek Lake Using CE-QUAL-W2: A Report on the Development, Calibration, Verification, and Application of the Model*. U.S. Army Engineer Research and Development Center Vicksburg United States, 1 abr. 2017. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/docs/citations/AD1032332>>. Acesso em: 30 jul. 2019.
- TSAKIRIS, G.; ALEXAKIS, D. Water quality models: an overview. *European Water*, v. 37, p. 33–46, 2012.
- TUCCI, C. E. Modelos hidrológicos. UFRGS, 1998.

- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. Oficina de textos, 2008.
- VÉRAS, B. Aplicação do modelo bidimensional hidrodinâmico de qualidade da água CE-QUAL-W2 no lago Descoberto. Brasília, DF: Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2017.
- VILAS, M. P.; MARTI, C. L.; OLDHAM, C. E.; HIPSEY, M. R. Macrophyte-induced thermal stratification in a shallow urban lake promotes conditions suitable for nitrogen-fixing cyanobacteria. *Hydrobiologia*, v. 806, n. 1, p. 411–426, 2018.
- VINÇON-LEITE, B.; CASENAVE, C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, v. 651, p. 2985–3001, 15 fev. 2019.
- WETZEL, R. G. Limnology: Lake and River Ecosystems. Elsevier Science, 2001.
- WOOLWAY, R. I. et al. Diel Surface Temperature Range Scales with Lake Size. *PLOS ONE*, v. 11, n. 3, p. e0152466, 29 mar. 2016.
- ZIAIE, R.; MOHAMMADNEZHAD, B.; TAHERIYOUN, M.; KARIMI, A.; AMIRI, S. Evaluation of Thermal Stratification and Eutrophication in Zayandeh Roud Dam Reservoir Using Two-Dimensional CE-QUAL-W2 Model. *Journal of Environmental Engineering*, v. 145, n. 6, p. 05019001, 1 jun. 2019.
- ZOUABI-ALLOUI, B.; ADELANA, S. M.; GUEDDARI, M. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea: a simulation approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 187, n. 5, p. 292, 25 abr. 2015.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

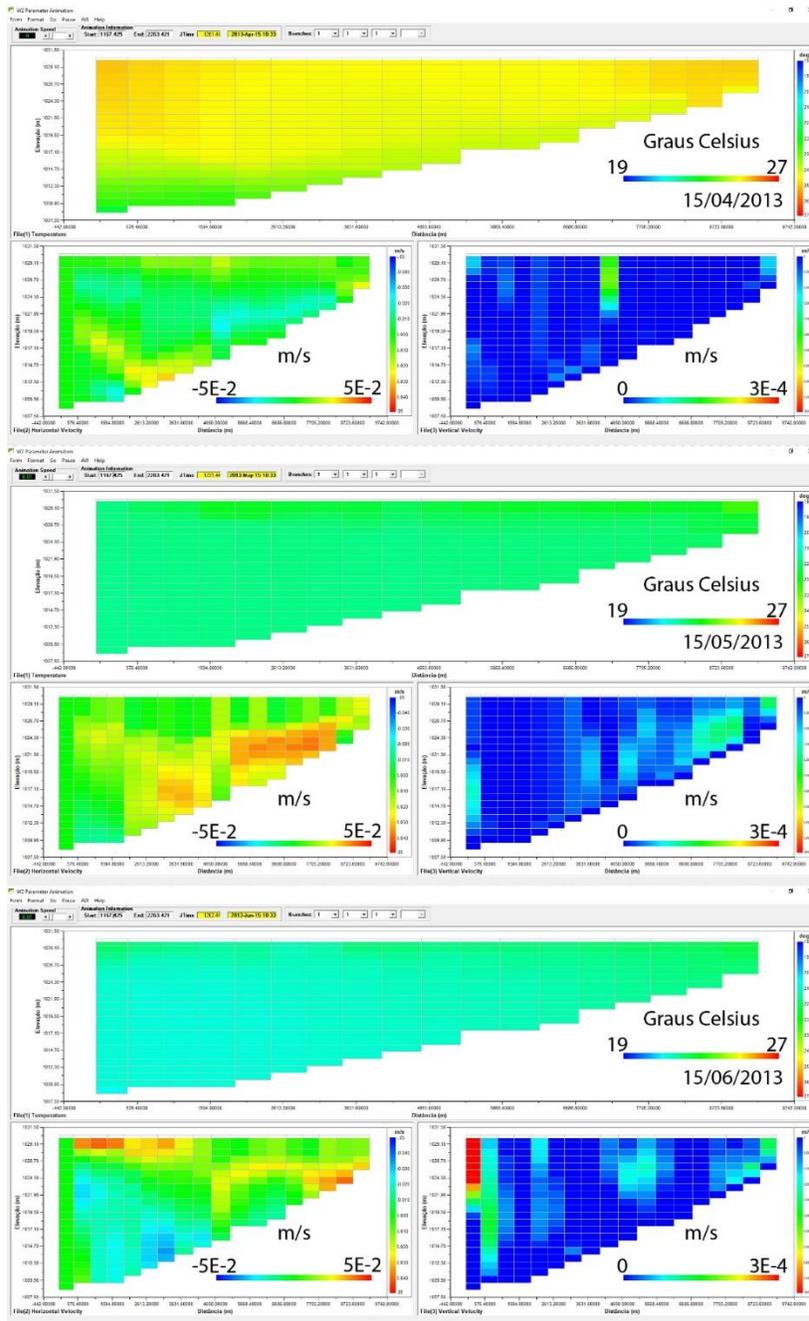


Figura A.1 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Abril/2013 – Junho/2013. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

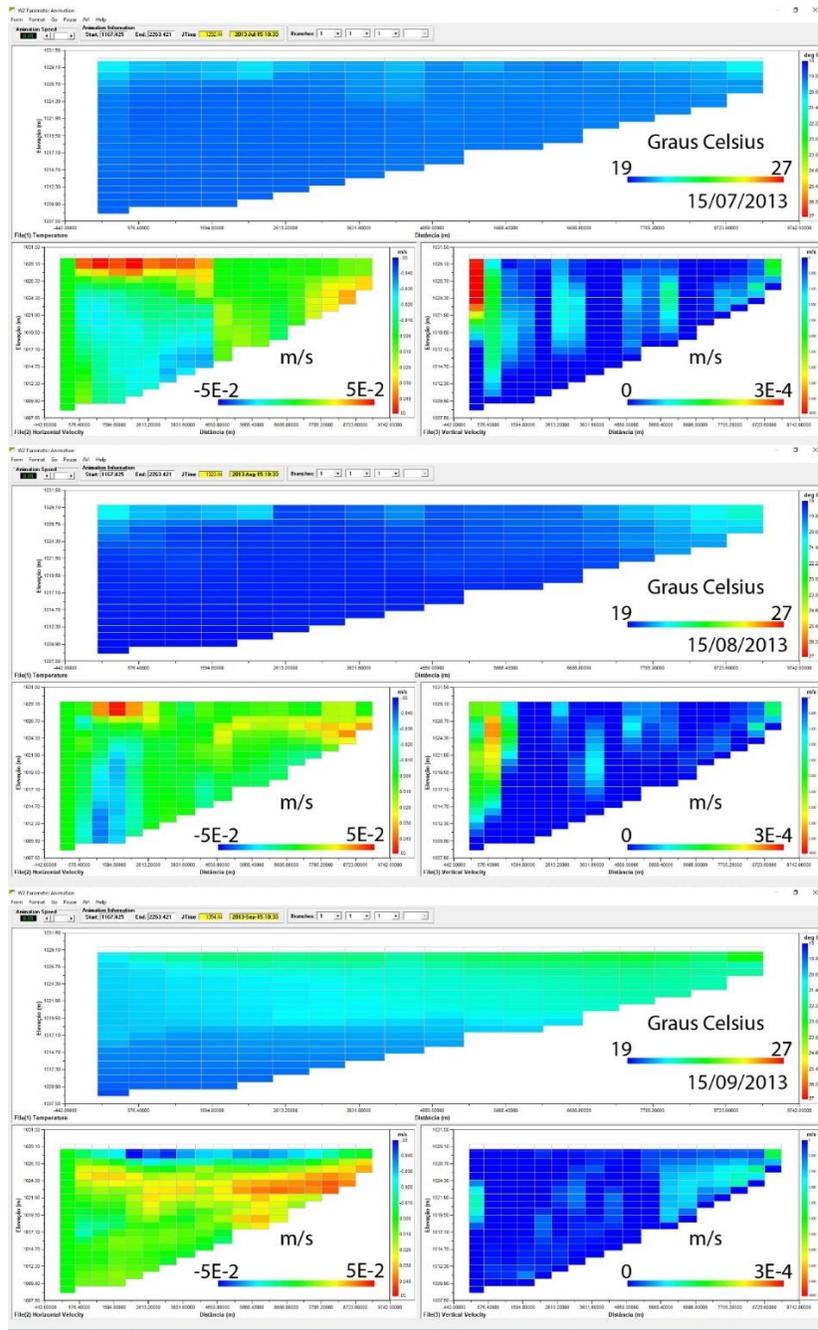


Figura A.2 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2013 – Setembro/2013. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

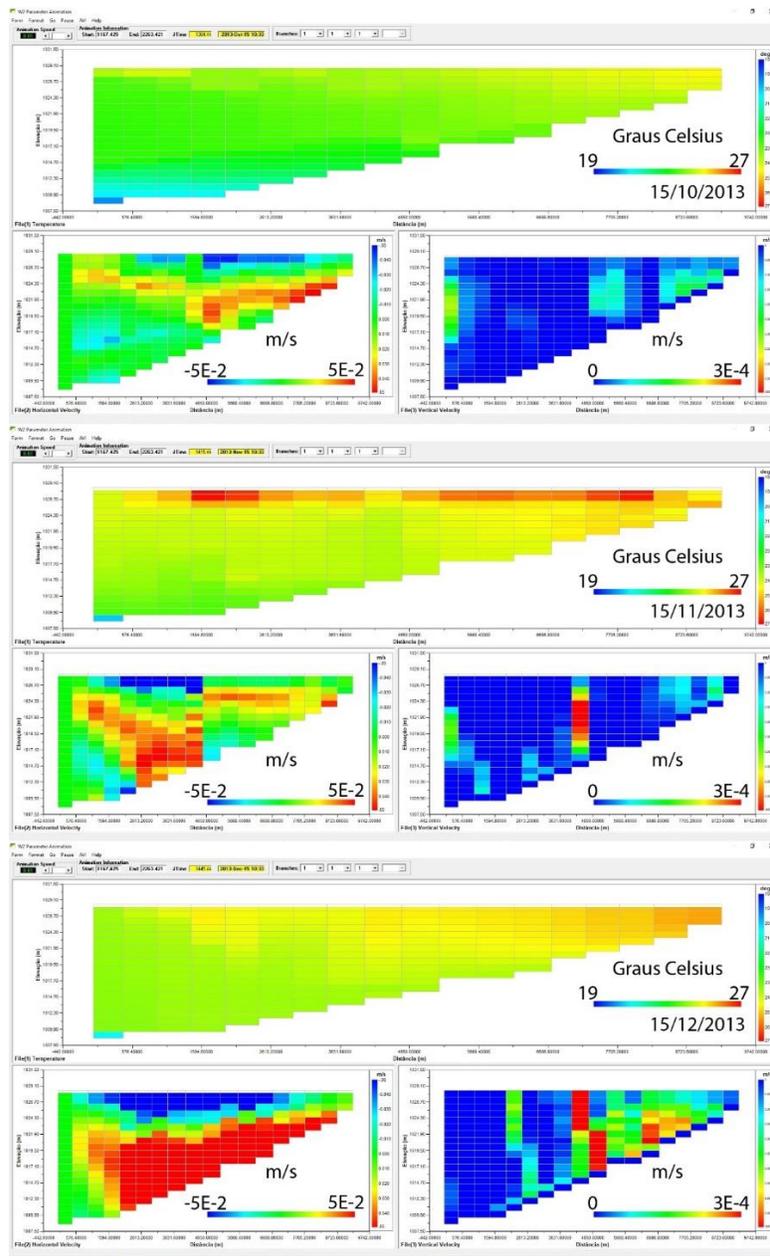


Figura A.3 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Outubro/2013 – Dezembro/2013. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

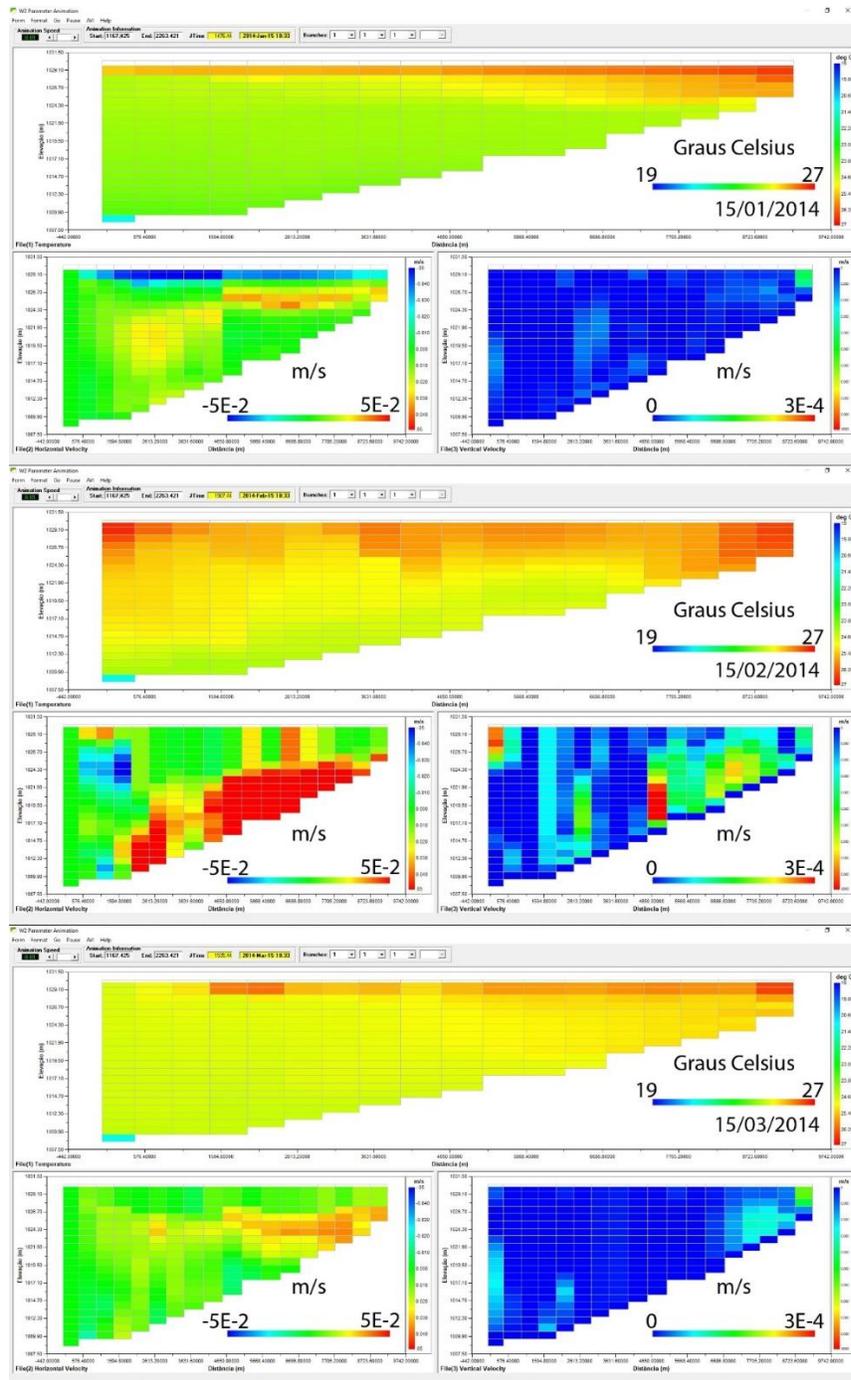


Figura A.4 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Janeiro/2014 – Março/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

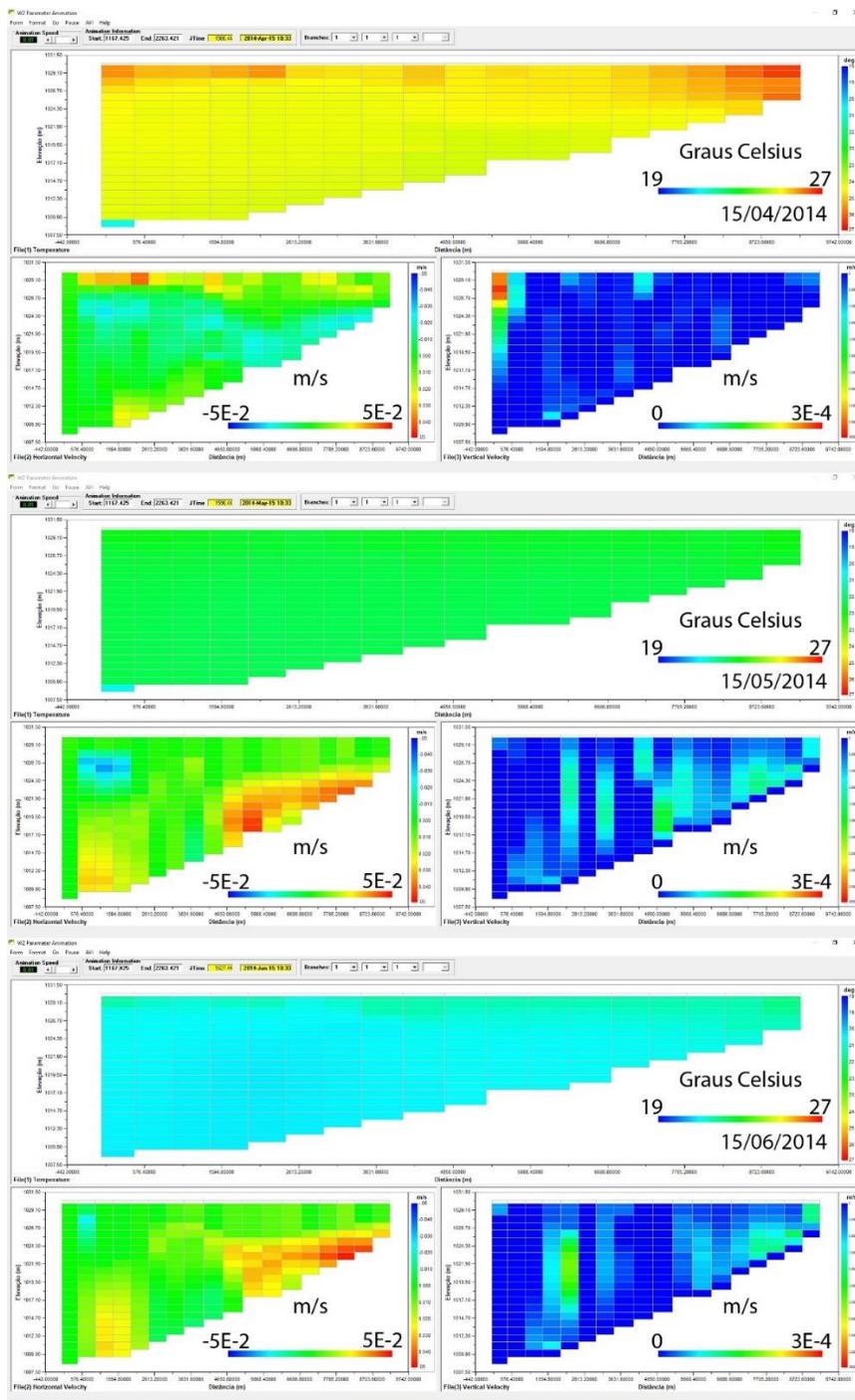


Figura A.5 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Abril/2014 – Junho/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

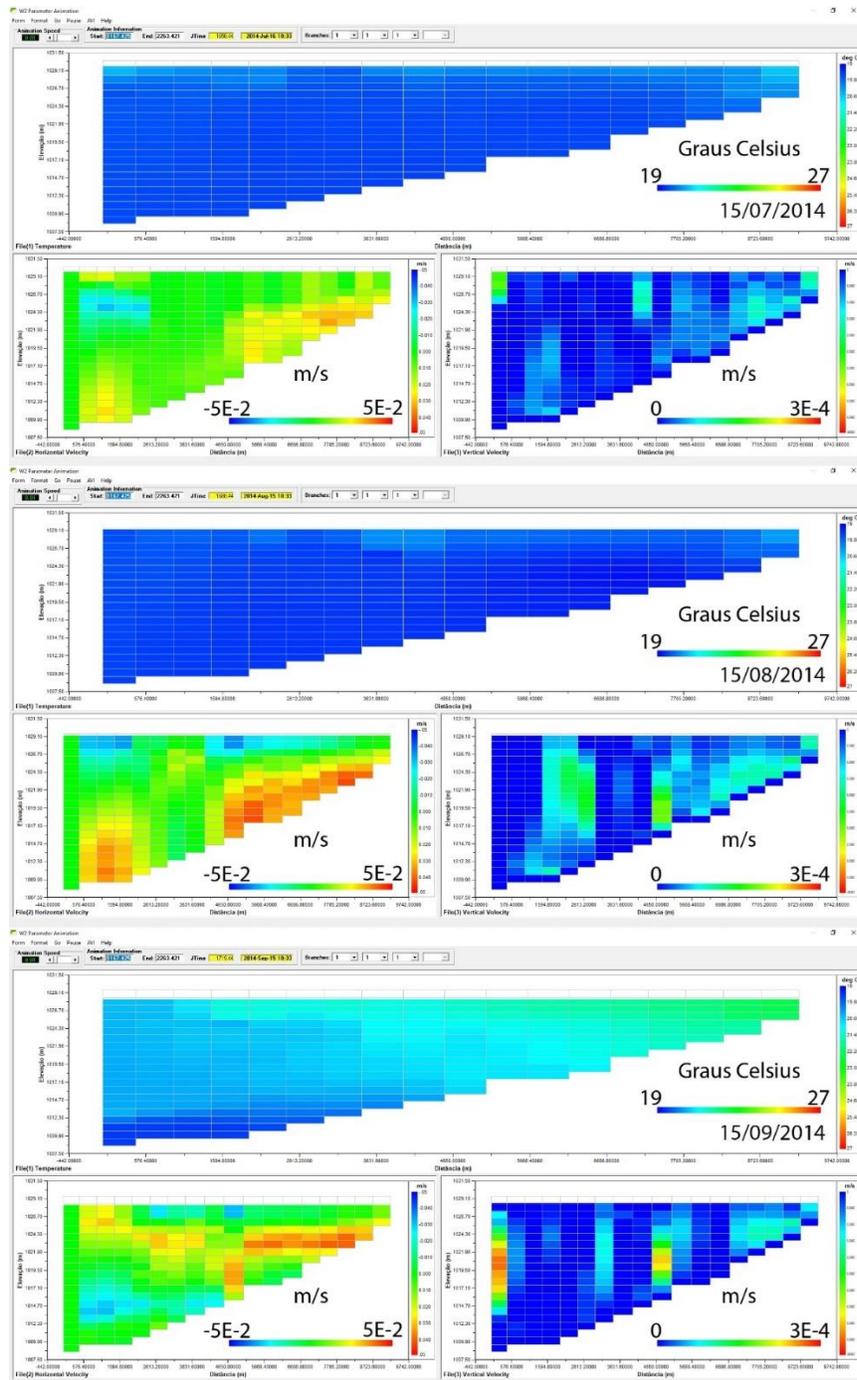


Figura A.6 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2014 – Setembro/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

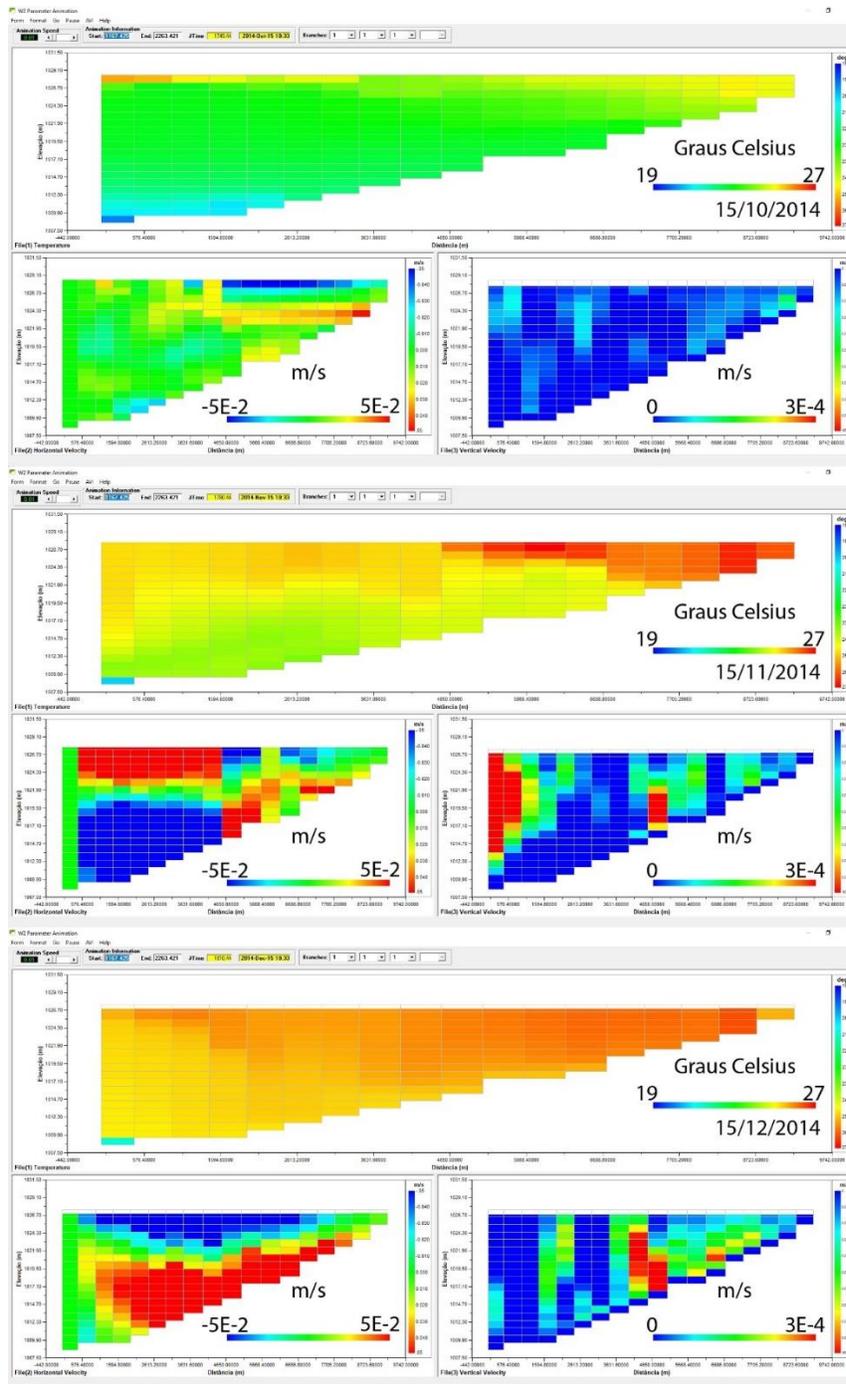


Figura A.7 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Outubro/2014 – Dezembro/2014. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

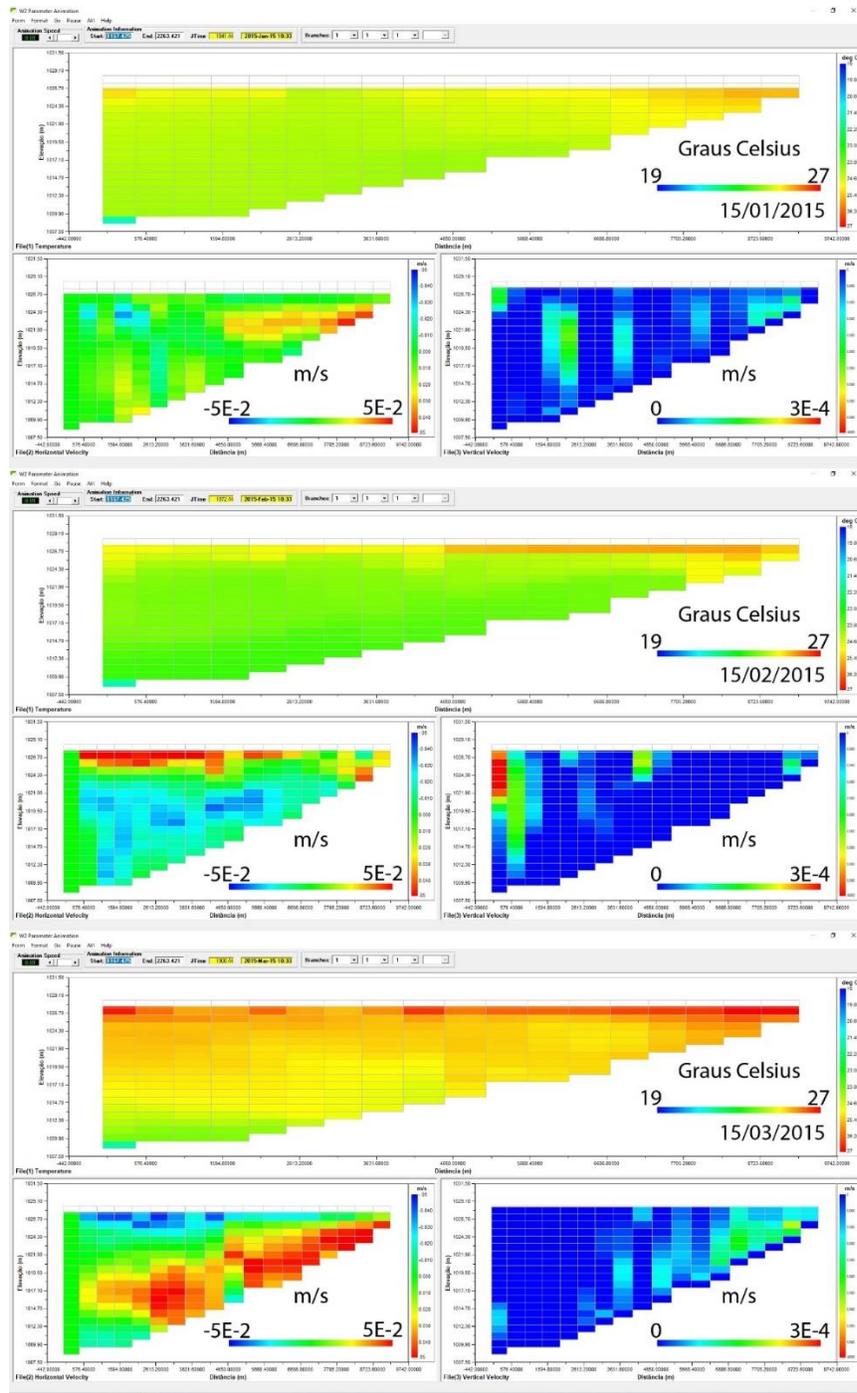


Figura A.8 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Janeiro/2015 – Março/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

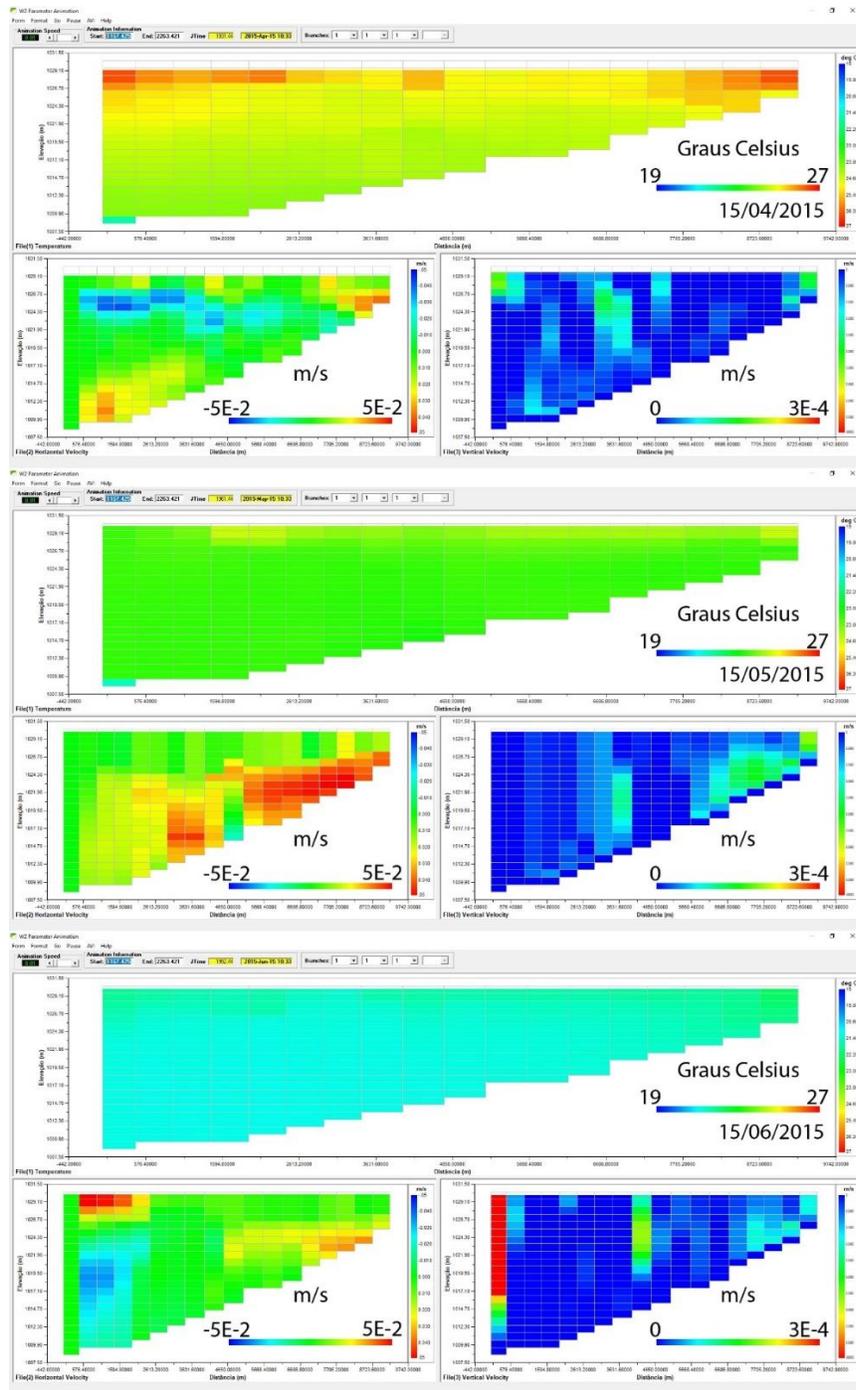


Figura A.9 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Abril/2015 – Junho/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

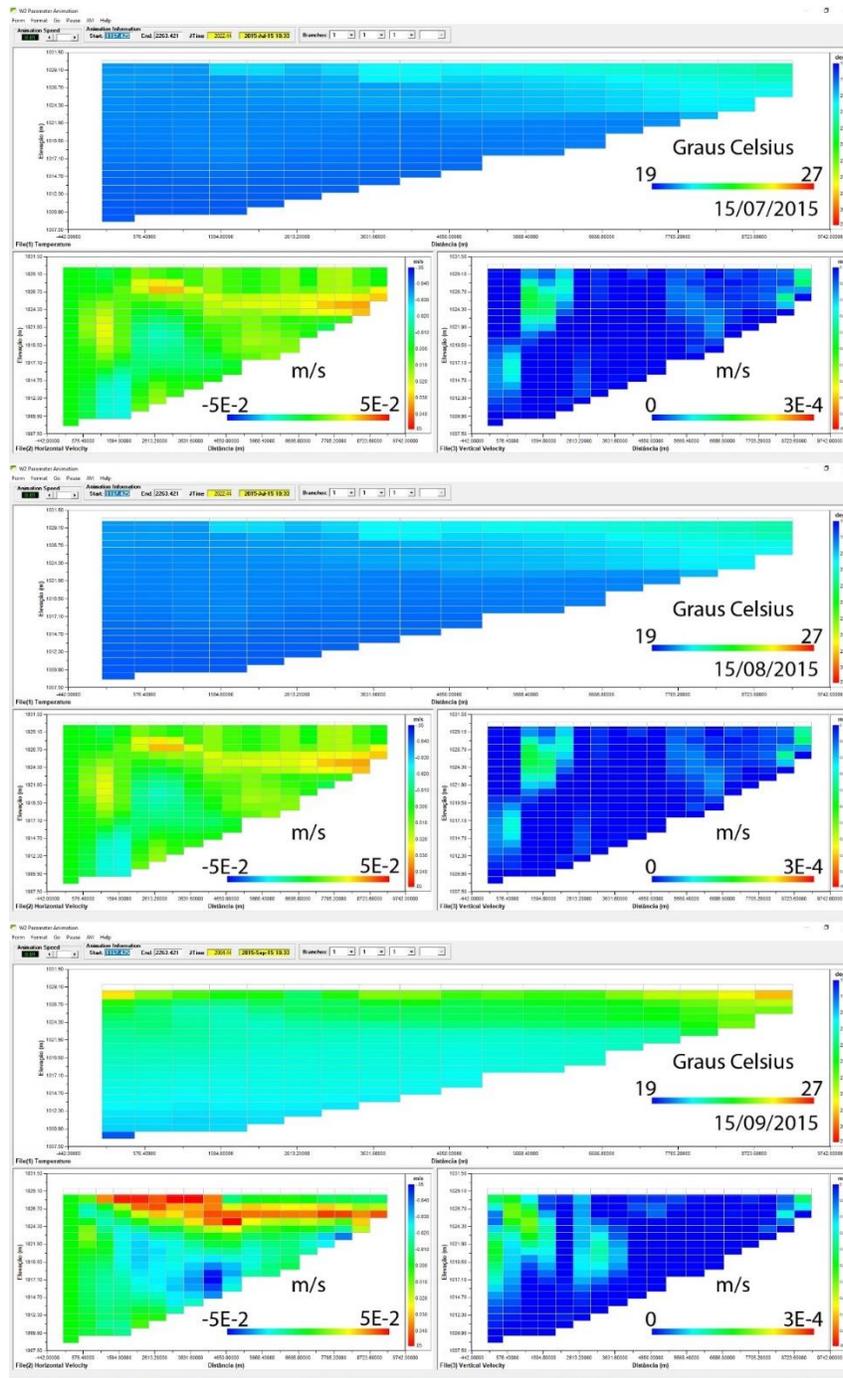


Figura A.10 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Julho/2015 – Setembro/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

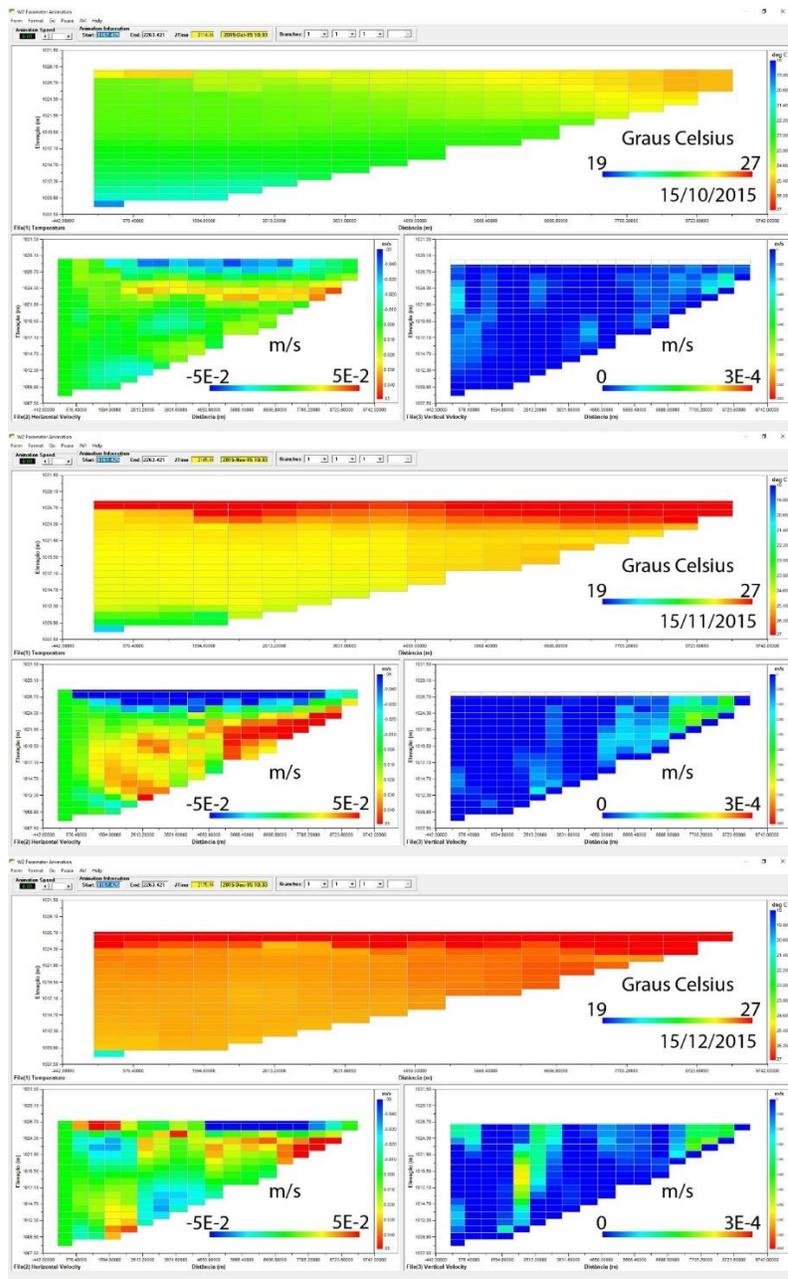


Figura A.11 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Outubro/2015 – Dezembro/2015. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã.

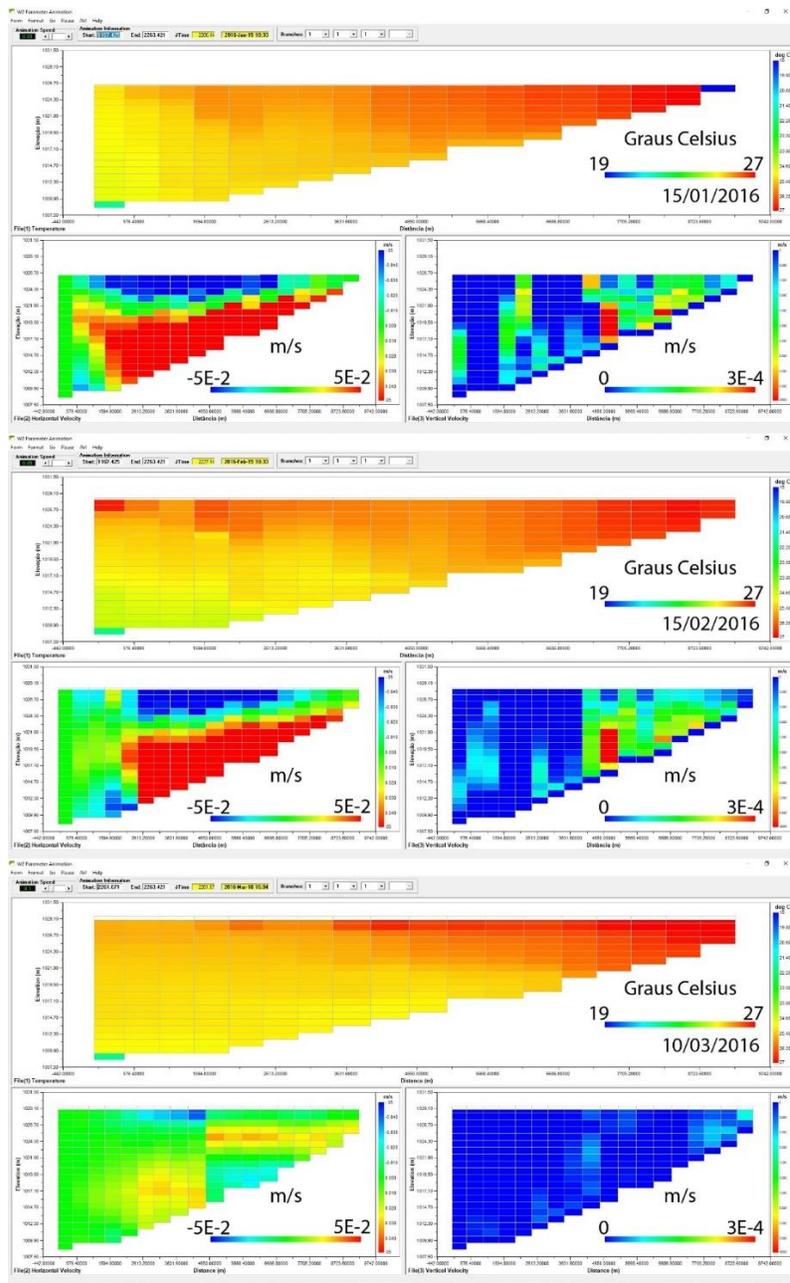


Figura A.12 Evolução do perfil térmico do braço principal do modelo durante o período: Janeiro/2016 – Março/2016. Acima: Perfil bidimensional de temperatura; À esquerda: Perfil bidimensional de velocidades horizontais; À direita: Perfil de velocidades verticais. Velocidades positivas horizontais têm sentido em direção à barragem e velocidade positivas verticais em direção à superfície da água. Todas as capturas são referentes ao dia 15 de cada mês às 10:00 da manhã, com exceção da última imagem que é referente ao dia 10/03/2016 simulado.

## APÊNDICE B

Nesse apêndice são apresentados trechos importantes do código em *python3* utilizado para calibrar e fazer a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo CE-QUAL-W2. O código completo possui mais de 2000 linhas contendo códigos implementados e códigos que foram ou estavam sendo testados até a data de conclusão deste trabalho.

O código desenvolvido é bastante específico para o modelo do Lago Descoberto utilizado nesse trabalho. Entretanto, com algumas pequenas modificações, pode-se adaptá-lo para qualquer outro modelo CE-QUAL-W2.

Disponibilizar-se-á o código completo em um repositório *online* em momento oportuno para que fique à disposição da comunidade científica.

Seguindo adiante, a classe “*spot\_setup*” contém todas as funções necessárias para utilizar o módulo SPOTPY. As principais funções estão na lista abaixo e serão exibidas em quadros logo abaixo (Figura B.1, Figura B.2, Figura B.3, Figura B.4 e Figura B.5):

- a) *paramcontrol(name, calibrate, value, low, high, guess)*: Função criada com o objetivo de facilitar a edição de parâmetros no *script*.
  - a. *name*: Nome do parâmetro
  - b. *calibrate*: Booleana
    - i. True: Parâmetro participará da otimização
    - ii. False: Parâmetro será mantido fixo com o valor de *value*
  - c. *value*: Valor fixo ou *default* para o parâmetro que não está participando do estágio de calibração
  - d. *low*: Valor mínimo a ser utilizado durante a otimização
  - e. *high*: Valor máximo a ser utilizado durante a otimização
  - f. *guess*: Provável valor ótimo suposto pelo utilizador
- b) *W2con\_settings*: Não é uma função, mas sim um objeto que contém informações sobre todos os parâmetros do modelo. A Figura B.1 contém alguns exemplos de parâmetros presentes nesse objeto.
- c) *parameters(self)*: Função do SPOTPY a qual gera o vetor (*x*) contendo os valores aleatórios dos parâmetros participantes da etapa de otimização.
- d) *simulation(self, x)*: Função que executa as edições aos arquivos de entrada do CE-QUAL-W2, executa o modelo e salva os dados de saída em um banco de dados “.csv”
- e) *evaluation(self)*: Função que lê os dados observados que serão utilizados para o cálculo da função objetivo
- f) *objectiveFunction*: Função que calcula os valores de função objetivo para as diferentes séries (profundidades) e um valor de função objetivo para todas (*overall*).

Estando a classe *spot\_setup* preparada (editada) para os objetivos do trabalho, basta utilizar os códigos presentes na Figura B.5 para que o modelo seja executado e os resultados guardados no banco de dados “.csv” automaticamente

```

class spot_setup(object):
    # spot_setup class contains all the functions needed to run SPOTPY module
    # also, "paramcontrol()" function was elaborated to define fast edit
    parameters.
    def __init__(self):

        self.w2_file = 'w2_con.npt' #w2 control file
        self.wsc_file = 'wsc.npt' #WSC file
        self.evaluation_file = 'EstA_2004-2017_Organizada.csv' # Observed
data -MUST BE A CSV FILE WITH COLUMNS [Date, Data] IN THIS WORK >> [DATE, 1m,
5m, 10m, 15m, 1m to bottom]
        self.result_path = 'Resultados\\modelo\\' #Path to output files
        self.result_file =
['time_series_1_seg18.opt', 'time_series_2_seg18.opt', 'time_series_3_seg18.opt
', 'time_series_4_seg18.opt', 'time_series_5_seg18.opt'] #output file names
        self.assessed_variables = ['T2(C)'] # Control variable column in the
output file which is used to calculate objective function

    def paramcontrol(name, calibrate, value, low, high, guess):
        '''
        name = Parameter or setting name,
        calibrate = boolean, True if the parameter must be calibrated
        (value will be not used)
        value = if calibrate = False, value will be inputed to the
parameter field
        low = minimum value for calibration purposes
        high = maximum value for calibration purposes
        guess = optimum guess for calibration purposes'''
        d = {'calibrate': calibrate,
            'value': value,
            'param': spotpy.parameter.Uniform(name, low=low,
high=high, optguess=guess)
            }
        return d
    self.w2con_settings = {
        'hor_eddy_visc': [ #The number of entries must be the number
in numb_water_bodies
            paramcontrol('AX_WB_1', True, '1', 0.001, 1.5,
1), #0.91460
            ],
        'hor_eddy_diff': [ #The number of entries must be the number
in numb_water_bodies
            paramcontrol('DX_WB_1', True, '1', 0.001, 1.5,
1), #1.47300
            ],
        'sediment_heat': paramcontrol('CBHE',
True, "0.46240", 0.01, 1, 0.3), #default = 0.30000
    }

```

Figura B.1 Início da classe “*spot\_setup*”, função “*paramcontrol()*”, e o objeto “*w2con\_settings*”

```

def parameters(self):
    parameters = spotpy.parameter.generate(self.params)
    self.paramnames = []
    for parameter in parameters:
        if parameter['name'] not in self.paramnames:
            self.paramnames.append(parameter['name'])
    return parameters

def simulation(self, x):
    #Runs CE-QUAL-W2!
    self.owd = os.path.realpath(__file__)+os.sep+'..'
    os.chdir(self.owd+call)
    print('Start:')
    print(datetime.now())
    os.system('w2_v4_64.exe')
    #Reading simulation results
    simulations = []
    columns = []
    for fl in self.result_file:
        with open(self.result_path + fl, 'rb') as csvfile:
            reader = csv.reader(csvfile)
            headers = reader.next()
            column = {}
            for header in headers:
                column[header] = []
            for row in reader:
                for h, v in zip(headers, row):
                    column[h].append(v)

            for header in column:
                if header in self.assessed_variables:
                    result_data = column[header]
                if header == 'JDAY':
                    jdays = column[header]
            for i in range(len(result_data)):
                result_data[i] = np.float(result_data[i])
            columns.append(result_data)

    return columns

```

Figura B.2 Função “*parameters()*”, que gera o vetor  $x$  que contém os valores aleatórios dos parâmetros e as partes mais importantes da função “*simulation()*” a qual executa o modelo CE-QUAL-W2 e lê os arquivos de saída para guarda-los no banco de dados “.csv”

```

def evaluation(self):
    #Reads observed data
    evaluation = []
    with open(self.evaluation_file) as f:
        csv_reader = csv.reader(f)
        try:
            dates = [datetime.strptime(row[0], '%m/%d/%Y') for row in
csv_reader]
        except:
            try:
                dates = [datetime.strptime(row[0], '%d/%m/%Y') for row in
csv_reader]
            except:
                raise Exception('Make sure data is formatted dd/mm/YYYY
or mm/dd/YYYY')
        startdate = datetime(int(self.w2con_settings['year']['value']), 1, 1)
        for j in range(len(self.result_file)):
            evals = list(np.genfromtxt(self.evaluation_file,
delimiter=',')[0:,j+1])
            evaluation_date = []
            evaluation_data = []
            for i in range(len(dates)):
                if dates[i] >= startdate +
timedelta(float(self.paramname_paramvalue['TMSTRT'])) and dates[i] <=
startdate + timedelta(float(self.paramname_paramvalue['TMEND'])):
                    evaluation_date.append(dates[i])
                    evaluation_data.append(evals[i])
            evaluation.append(evaluation_data)

    return evaluation

```

Figura B.3 Função “*evaluation()*” lê os dados observados e os prepara para o cálculo da função objetivo.

```

def objectivefunction(self, simulation, evaluation, params=None):
    #Calculates the objective function value for the 5 depths.
    likes = []
    evaluation_together = []
    simulation_together = []
    for i in range(len(evaluation)):
        evaluation_now = []
        simulation_now = []
        for j in range(len(evaluation[i])):
            if np.isnan(evaluation[i][j]):
                continue
            else:
                simulation_now.append(simulation[i][j])
                evaluation_now.append(evaluation[i][j])
                simulation_together.append(simulation[i][j])
                evaluation_together.append(evaluation[i][j])
        like = -
        spotpy.objectivefunctions.nashsutcliffe(evaluation_now, simulation_now)
        likes.append(like)
    like_tog =
    spotpy.objectivefunctions.nashsutcliffe(evaluation_together, simulation_together)
    return like_tog

```

Figura B.4 Função “*objscivefunction()*” recebe os dados simulados e observados e os utiliza para o cálculo da função objetivo. Aqui, a função utilizada foi o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

```

    sampler=spotpy.algorithms.sceua(spot_setup, dbname='CQW2_Calib',
dbformat='csv', dbappend=False, backup_every_rep=10, db_precision=np.float32)
    """
    Samples from parameter distributions using SCE-UA (Duan, 2004),
    converted to python by Van Hoey (2011), restructured and parallelized
    by Houska et al (2015).
    Parameters
    -----
    repetitions: int
        maximum number of function evaluations allowed during
optimization
    ngs: int
        number of complexes (sub-populations), take more than the number
of
        analysed parameters
    kstop: int
        the number of past evolution loops and their respective objective
value to assess whether the marginal improvement at the current loop (in
percentage) is less than pcento
    pcento: float
        the percentage change allowed in the past kstop loops below which
convergence is assumed to be achieved.
    peps: float
        Value of the normalized geometric range of the parameters in the
population below which convergence is deemed achieved.
    """

    sample = sampler.sample(repetitions=rep, ngs=10, kstop=100,
pcento=0.0001, peps=0.0001)

```

Figura B.5 Após a preparação da classe “*spot\_setup*”, basta utilizar as entradas acima para executar automaticamente o CE-QUAL-W2.

## APÊNDICE C

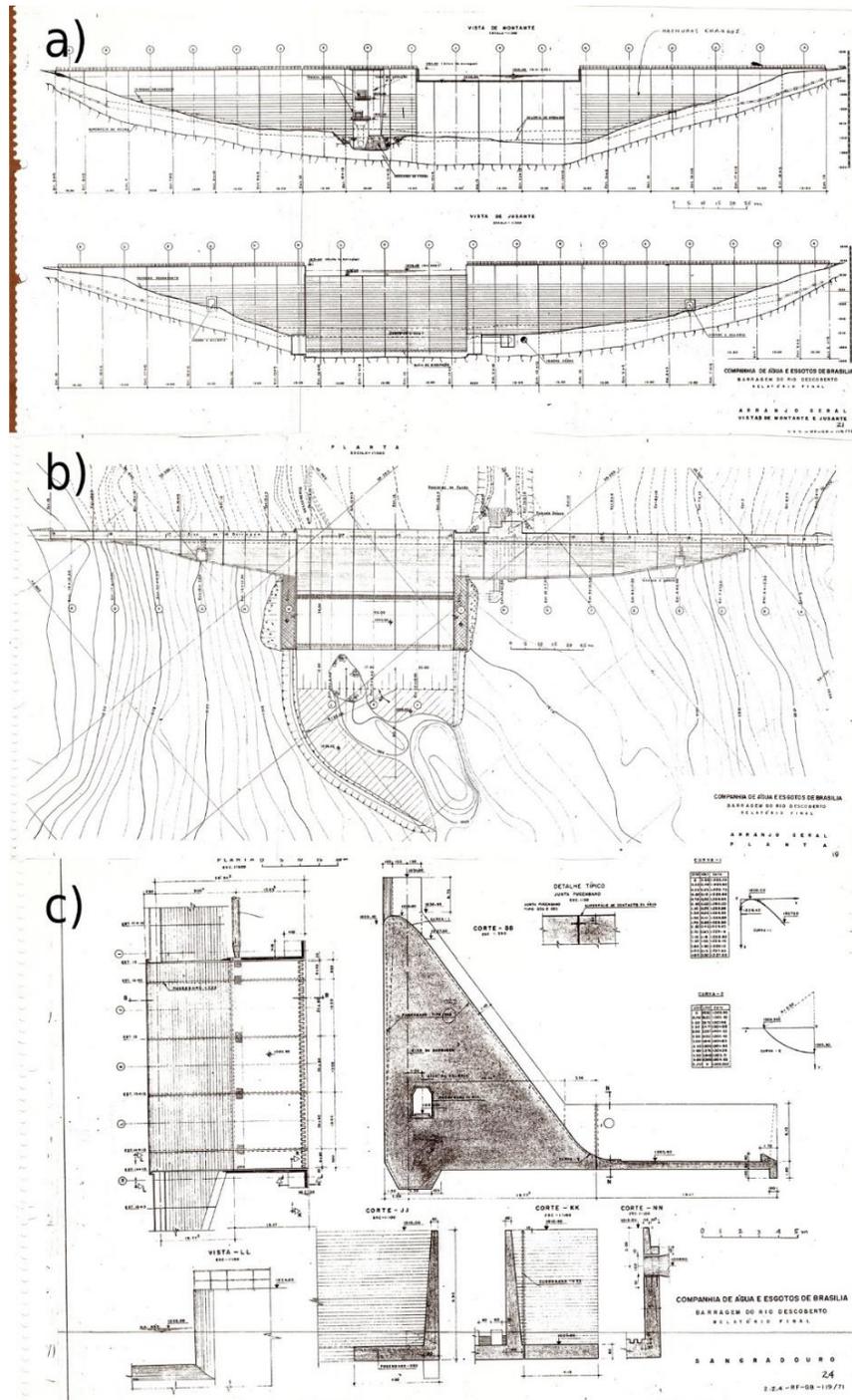


Figura C.1 Perfis das estruturas da barragem do Descoberto. a) Vista de montante e de jusante da barragem; b) Planta da barragem; c) Planta e cortes diversos da estrutura do vertedouro.