

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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO E  
TEMPERATURA DO AR NA DINÂMICA TÉRMICA DO  
RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO-DF POR MEIO DO  
MODELO GLM**

**ANA ALÍCIA DE SÁ PINTO**

**ORIENTADORA: LENORA NUNES LUDOLF GOMES**

**CO-ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

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

**BRASÍLIA/DF: Setembro – 2018**

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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO E  
TEMPERATURA DO AR NA DINÂMICA TÉRMICA DO  
RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO-DF POR MEIO DO  
MODELO GLM**

**ANA ALÍCIA DE SÁ PINTO**

**APROVADA POR:**

---

**Prof.<sup>a</sup> Lenora Nunes Ludolf Gomes, Dra. (ENC-UnB)  
(Orientadora)**

---

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

---

**Prof. Sérgio Koide, PhD (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof.<sup>a</sup> Talita Fernanda das Graças Silva, Dra. (UFMG)  
(Examinadora Externa)**

**BRASÍLIA/DF, 18 DE SETEMBRO DE 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

PINTO, ANA ALÍCIA DE SÁ. Avaliação da influência da precipitação e temperatura do ar na dinâmica térmica do reservatório do Descoberto-DF por meio do modelo GLM, 2018.

xvii, p 87 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2018).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Modelagem hidrodinâmica

2. Modelo unidimensional

3. Manancial de abastecimento

4. *Particle Swarm Optimization*

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PINTO, A. A. de S. (2018). Avaliação da influência da precipitação e temperatura do ar na dinâmica térmica do reservatório do Descoberto-DF por meio do modelo GLM. PTARH. DM-217/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana Alícia de Sá Pinto.

TÍTULO: Avaliação da influência da precipitação e temperatura do ar na dinâmica térmica do reservatório do Descoberto-DF por meio do modelo GLM,

GRAU: Mestre ANO: 2018

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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Ana Alícia de Sá Pinto

analicia2@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Vera e Carlos e aos meus irmãos: Ariana, Adriana e André por todo amor e apoio durante toda minha vida.

Agradeço ao meu marido Guilherme por todo amor e paciência nos bons e maus momentos. Agradeço por acreditar em mim e não me deixar desistir.

Agradeço as minhas amigas Dani, Laurinha, Bru e Nathy pela amizade de sempre apesar da distância.

Agradeço aos amigos que o PTARH me presenteou: Alice, Thays, Marília, Rafinha, Hélio, Zé, Dai, Andriane e Bah. Obrigada por toda alegria que vocês me proporcionaram dentro e fora da “caverna”, vou levá-los para sempre dentro do meu coração desejando sucesso a todos.

Agradeço à Andreia pela amizade e pelas inúmeras vezes em que a parei nos corredores pedindo ajuda e conselhos.

Agradeço ao Daniel pela amizade e pela ajuda com a linguagem R.

Agradeço à Carolina Barbosa por me ajudar nos primeiros contatos com o modelo.

Agradeço ao Bruno Távora pela ajuda com a automatização da calibração do modelo.

Agradeço minha orientadora professora Lenora pela confiança e paciência na execução deste trabalho. Agradeço por me dar suporte durante a finalização do trabalho mesmo estando do outro lado do oceano.

Agradeço ao Professor Ricardo também pela paciência e confiança para executar este trabalho. Agradeço por aceitar o desafio de me orientar na reta final da conclusão do trabalho.

Agradeço ao professor Oscar pelas contribuições durante o Seminário 1 deste trabalho.

Agradeço à Professora Talita Silva por aceitar ser banca deste trabalho. Agradeço antecipadamente por todas as contribuições que virão.

Agradeço as entidades CAESB, INMET e INPE por disponibilizar dados para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a CAPES/ANA pela concessão da bolsa.

Agradeço, em especial, ao Professor Sérgio Koide que não mediu esforços para conseguir uma bolsa quando descobriu que eu estava sem, agradeço também por tirar dinheiro da própria carteira para comprar a bateria do *nobreak* que eu usei. Deixo aqui a minha admiração por esse professor, mais que um pesquisador, um ser humano sensível que não poupa esforços para ajudar todos os alunos, mesmo não sendo seus orientandos, para tenham condições de avançar em suas pesquisas, seja emprestando equipamentos, fornecendo materiais ou conhecimento.

## RESUMO

Entre os anos de 2015 e 2016 o reservatório do Descoberto-DF sofreu grande redução de volume em decorrência da redução de precipitação. Ademais, estudos mostram que a variação de precipitação e temperatura do ar podem afetar a dinâmica térmica de lagos e reservatórios. Portanto, o modelo hidrodinâmico unidimensional vertical *General Lake Model*-GLM foi parametrizado para avaliar a influência da variação da precipitação e temperatura do ar no regime térmico do reservatório do Descoberto-DF. Para isso, um banco de dados foi organizado para realizar a modelagem. Além disso, foram identificados os parâmetros sensíveis usando o método LH-OaT -*Latin Hipercube- One factor At a Time* e a calibração automatizada com *Particle Swarm Optimization*-PSO. O período de calibração foi de 2007 a 2012 e o ano de 2013 foi empregado para a verificação. Foram propostos 5 cenários com diferentes condições de precipitação e temperatura atmosférica: aumento de 1 grau na temperatura do ar (C1), redução de 15% da precipitação (C2), aumento de 1 grau na temperatura do ar e redução de 15% da precipitação (C3), aumento de 15% da temperatura do ar (C4) e redução de 30 % da precipitação (C5). Os sete parâmetros mais sensíveis foram  $C_K$ ,  $f_w$ ,  $C_S$ ,  $K_w$ ,  $C_W$ ,  $C_D$  e  $C_T$ , exceto  $K_w$  todos estão relacionados ao vento. Foi obtida uma boa calibração na simulação com GLM, na qual o RMSE foi 1,01°C para todo período de 2007 a 2012. Na verificação o RMSE foi 1,05 °C, os melhores ajustes ocorreram em profundidades intermediárias. O modelo GLM mostrou-se uma boa ferramenta para a representação da dinâmica térmica do reservatório do Descoberto-DF. Foi possível perceber a influência da temperatura do sedimento de fundo no aquecimento de regiões mais profundas. Os diferentes cenários de variação de precipitação e temperatura do ar mostraram que: a redução da precipitação provoca a redução da temperatura de águas mais profundas e o aumento da temperatura do ar exerce maior influência em regiões mais superficiais. Em nenhum dos cenários foi possível observar variação significativa de nível.

**Palavras-chaves:** manancial de abastecimento, *Particle Swarm Optimization*, modelo unidimensional

## ABSTRACT

Between 2015 and 2016, the Descoberto-DF reservoir suffered a great reduction in volume due to the decrease in precipitation. In addition, studies show that the variation of precipitation and air temperature can affect the thermal dynamics of lakes and reservoirs. Therefore, the General Lake Model-GLM vertical one-dimensional hydrodynamic model was parameterized to evaluate the influence of precipitation variation and air temperature on the thermal regime of the Descoberto-DF reservoir. A database was organized to perform the modeling. The sensitive parameters were identified using the LH-OaT -Latin Hipercube-One factor At a Time method and the automated calibration with Particle Swarm Optimization-PSO. The calibration period was from 2007 to 2012 and the year 2013 was used for verification. Five scenarios with different precipitation and atmospheric temperature conditions were proposed: 1 degree increase in air temperature (C1), 15% reduction in precipitation (C2), 1 degree increase in air temperature and 15% reduction in precipitation (C3), a 15% increase in air temperature (C4) and a 30% reduction in precipitation (C5). The seven most sensitive parameters were CK, fw, CS, Kw, CW, CD and CT, except Kw, all of them are related to wind. A good calibration was obtained in the GLM simulation, in which the RMSE was 1.01 ° C for the whole period from 2007 to 2012. In the verification the RMSE was 1.05 °C, the best adjustments occurred at intermediate depths. The GLM model proved to be a good tool for the representation of the thermal dynamics of the Descoberto-DF reservoir. It was possible to notice the influence of the sediment temperature on the heating of deeper regions. The different scenarios of variation of precipitation and air temperature showed that: the reduction of precipitation causes the reduction of the temperature of deeper water and the increase of the temperature of the air has greater influence in more superficial regions. In none of the scenarios was it possible to observe significant level variation.

**Keywords:** drinking water source, Particle Swarm Optimization, one-dimensional model

*“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo,  
mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim.”*

*— Chico Xavier*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA... 21</b>	
3.1 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS FORÇANTES NA MODELAGEM DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE AMBIENTES LACUSTRES.....	21
3.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM GLM .....	24
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.2 ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS .....	42
4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA POR MEIO DO GLM.....	45
4.3.1 Simulação com GLM1 .....	45
4.3.2 Automatização da calibração .....	47
4.3.3 Análise de sensibilidade .....	49
4.3.4 Verificação da Calibração e Análises de Cenários .....	50
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
5.1 ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS .....	52
5.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA POR MEIO DO GLM.....	56
5.2.1 Automatização da calibração .....	56
5.2.2 Análise de sensibilidade .....	63
5.2.3 Verificação da Calibração e Análises de Cenários .....	65
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Características principais dos trabalhos que utilizaram o General Lake Model.	37
Tabela 4.1 Descrição das fontes dos dados requeridos pelo modelo.....	44
Tabela 4.2 Valores padrões dos parâmetros recomendados pelo pacote glmtools e seus limiares empregados na calibração automática.....	48
Tabela 5.1 Valores das estatísticas empregadas para a verificação da simulação.....	57
Tabela 5.2 Parâmetros empregados na simulação do GLM: valores iniciais, finais, limiares e comparação com outros autores.....	58
Tabela 5.3 Classificação de sensibilidade dos parâmetros do GLM calibrados para o reservatório do Descoberto.....	62
Tabela 5.4 Estatísticas empregadas para análise dos cenários de variação de temperatura atmosférica e precipitação.....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema de simulação do domínio do GLM. Informações de entrada são apresentadas em texto na cor azul e processos simulados na cor preta. Fonte: Hypsey <i>et al.</i> (2014).....	34
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	39
Figura 4.2 - Dados meteorológicos históricos (1963-2015) de Brasília (A) Precipitação e Umidade relativa do ar (B) Temperatura máxima e mínima. Fonte: INMET, 2018.....	40
Figura 4.3 - Localização da Área de Estudo: reservatório do Descoberto.....	41
Figura 4.4 - Localização das Estações de Monitoramento: (A) limnológica: Barragem, (B) Chapadinha, (C) Olaria, (D) Ribeirão das Pedras, (E) Rodeador, (F) Descoberto, (G) Capão Comprido, (H) climática SONDA/INPE e (I) climática: INMET. Fonte: <i>Google Earth Pro</i> , 2018.....	44
Figura 5.1 - Percentual de falhas dos dados meteorológicos. (A) Falhas de ondas curtas e longas, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. (B) Percentual anual de falhas dos dados de ondas longas e ondas curtas.....	51
Figura 5.2 - Gráficos dos dados brutos de ondas longas e ondas curtas do ano de 2008.....	52
Figura 5.3- Dados brutos de ondas longas do ano de 2008.....	53
Figura 5.4 - Dados meteorológicos após tratamento e preenchimento das lacunas: (A) Ondas curtas, (B) Ondas longas, (C) Temperatura do ar, (D) Umidade relativa do ar, (E) velocidade do vento e (F) Precipitação.....	54
Figura 5.5 - Perfil de temperatura simulada pelo GLM após a calibração do reservatório do Descoberto (2007-2012).....	56
Figura 5.6 - Comparação entre as temperaturas simuladas pelo modelo e observadas por profundidade (2007-2012). (A) temperatura superficial, (B) temperatura a 1 metro, (C) temperatura a 5 metros, (D) temperatura a 10 metros, (E) temperatura a 15 metros e (F) temperatura a 1 metro do fundo.....	59
Figura 5.7 - Perfil de temperatura da verificação para o ano de 2013.....	66
Figura 5.8 - Comparação entre as temperaturas simuladas pelo modelo e observadas por profundidade no ano de 2013: (A) profundidade superficial, (B) temperatura a 1 metro, (C) temperatura a 5 metros, (D) temperatura a 10 metros, (E) temperatura a 15 metros e (F) temperatura a 1 metro do fundo.....	66

Figura 5.9 - Perfil de temperatura dos cenários (2007-2012): (A) Perfil de temperatura simulada, (B) Cenário 1: aumento de 1°C na temperatura atmosférica, (C) Cenário 2: redução de 15% da precipitação, (D) Cenário 3: aumento de 1°C na temperatura atmosférica e redução de 15% da precipitação, (E) Cenário 4: aumento de 5% da temperatura e (F) Cenário 5: redução de 30% da precipitação.....68

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 .....	26
Equação 3.2 .....	26
Equação 3.3 .....	27
Equação 3.4 .....	27
Equação 3.5 .....	28
Equação 3.6 .....	28
Equação 3.7 .....	29
Equação 3.8 .....	29
Equação 3.9 .....	29
Equação 3.10 .....	29
Equação 3.11.....	30
Equação 3.12 .....	30
Equação 3.13.....	31
Equação 3.14.....	33
Equação 4.1 .....	46
Equação 4.2.....	50
Equação A1.....	78
Equação A2.....	78
Equação A3.....	78
Equação A4.....	78
Equação A5.....	78
Equação A6.....	79
Equação A7.....	79
Equação A8.....	79
Equação A9.....	79
Equação A10.....	79
Equação A11.....	80
Equação A12.....	80
Equação A13.....	80
Equação A14.....	80
Equação A15.....	80

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AED - *Aquatic EcoDynamic*

AEMON - *Aquatic Ecosystem Modelling Network*

CTPA/CRH -DF - Câmara Técnica Permanente de Assessoramento - Conselho e Recursos Hídricos do Distrito Federal

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

GLEON - *Global lake Ecological Observatory Network*

GLM - *General Lake Model*

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

PSO - *Particle Swarm Optimization*

RMSE - *Root Mean Square Error*

SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

$\widetilde{h}_K$  - Altura média entre as camadas sequenciais

$\widetilde{h}_{SML}$  - Altura média do epilimnio

$\hat{\phi}_{AS}$  - Irradiância dispersada pela atmosfera;

$\hat{\phi}_{DB}$  - Irradiância direta

$\hat{\phi}_{SW}$  - Irradiância total

$w_*^3$  – Escala de velocidade turbulenta associada à convecção;

$\alpha_{SKY}$  - Albedo

$\varepsilon_a^*$  - Emissividade da atmosfera;

$\Delta t$  - Intervalo de tempo t em segundos;

AOD<sub>380</sub> - Profundidade ótica aerosol 380 nm;

AOD<sub>500</sub> - Profundidade ótica aerosol 500 nm

$A_S$  - Área superficial

$C_E$  - Coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente

$C_{HYP}$  - Eficiência de mistura da turbulência hipolimnética

$C_K$  - Coeficiente de eficiência de mistura convectiva;

$C_{KH}$  - Eficiência de mistura - ondas de turbulência de Kelvin -Helmholtz

$c_p$  - Capacidade específica do ar

$C_S$  - Coeficiente de eficiência de mistura - aceleração;

$C_T$  - Coeficiente de eficiência de mistura

$C_W$  - Coeficiente de eficiência de mistura - produção de cisalhamento;  
 $E$  - Fluxo de massa de evaporação  
 $e_a$  - Pressão de vapor do ar  
 $e_s$  - Pressão de vapor saturado na temperatura da camada superficial  
 $f_{PAR}$  - Fração fotossinteticamente ativa  
 $f_R$  - Fator de correção da precipitação que pode ser ajustado pelo usuário  
 $f_{SW}$  - Fator escalar  
 $f_W$  - Coeficiente de correção do vento  
 $g$  - Gravidade  
 $h_{max}$  - Espessura máxima para as camadas  
 $h_{min}$  - Espessura mínima para as camadas  
 $h_S$  - Altura da camada superficial no passo de tempo  $t$   
 $k_{TKE}$  - Número de onda de turbulência  
 $K_W$  - Coeficiente de extinção de luz  
 $N$  - Frequência de Brunt - Väisälä  
 $N_{LEV}$  - número de camadas  
 $p$  - Pressão do ar  
 $Q_R$  - Coeficiente de vazão  
 $r$  - Taxa de mistura;  
 $R$  - Precipitação  
 $S$  - Queda de neve  
 $T_a$  - Temperatura do ar  
 $T_S$  - Temperatura superficial da camada de mistura da superfície  
 $u_*$  - Escala de velocidade associada à tensão do vento  
 $u_b$  - Velocidade de cisalhamento na interface da camada de mistura  
 $U_x$  - Velocidade do vento  
 $z$  - Profundidade da camada superficial  
 $z_{sml}$  - Profundidade da camada de mistura superficial  
 $\alpha_{LW}$  - Albedo de ondas longas  
 $\alpha_{SW}$  - Albedo de ondas curtas  
 $\alpha_{TKE}$  - Eficiência de mistura no hipólímnio  
 $\Delta z_k$  - Diferença entre as alturas das camadas sequenciais  
 $\Delta z_{k-1}$  - Variação da camada de mistura  
 $\varepsilon_{TKE}$  - Taxa de dissipação turbulenta

$\varepsilon_w$  - Emissividade da superfície da água  
 $\kappa$  - Razão entre o peso molecular da água e o peso molecular do ar  
 $\lambda$  - Calor latente de evaporação  
 $\nu$  - Viscosidade cinemática do ar  
 $\xi$  - Coeficiente de correção de rugosidade da superfície do lago  
 $\rho_0$  - Densidade do ar saturado à temperatura da superfície da água  
 $\rho_a$  - Densidade do ar  
 $\rho_k$  - Densidade da k-ésima camada  
 $\rho_s$  - Densidade da superfície da água  
 $\rho_{SML}$  - Densidade média da camada de mistura  
 $\sigma$  - Constante de Stefan -Boltzmann  
 $\phi_E$  - Fluxo de calor latente  
 $\phi_H$  - Fluxo de calor sensível  
 $\phi_{LWin}$  - Fluxo de entrada de ondas longas  
 $\phi_{SW}$  - Penetração da radiação de ondas curtas  
 $\Phi_{zen}$  - Ângulo zenital solar em radianos da local de estudo.

## 1. INTRODUÇÃO

O reservatório do Descoberto, localizado na bacia hidrográfica do Paraná na divisa entre o estado de Goiás e o Distrito Federal, é um manancial de abastecimento urbano de grande importância para a região. O reservatório apresentou baixos índices pluviométricos no período de setembro a dezembro dos anos de 2015 e 2016 que foram, respectivamente, de 368,80mm e 412,40 mm. Estes volumes de chuvas estão, portanto, 42,5% (2015) e 35,7% (2016), abaixo da média histórica de 641,40 mm para o período (DISTRITO FEDERAL, 2017). Com volume de chuva abaixo do esperado, o nível de água do reservatório atingiu volume morto, o que é preocupante, considerando que cerca de 60% da população do Distrito Federal é atendida por esse manancial de abastecimento (DISTRITO FEDERAL, 2017).

Estudos relacionados a mudanças climáticas têm demonstrado que alterações no clima, tais como variações de precipitação e de temperatura do ar, podem afetar a dinâmica natural de lagos e reservatórios. Alguns desses trabalhos têm mostrado um padrão de aumento da temperatura da água (O'Reilly *et al.*, 2003; Livingstone, 2003, Carvalho e Kirika, 2003; Austin Colman, 2007; Hampton *et al.*, 2008 e Tanentzap e Keller, 2008).

Esse aumento da temperatura em ambientes lacustres pode ser um indicador de mudanças na estrutura térmica nesses ambientes. A alteração no padrão de temperatura de lagos e reservatórios pode afetar a dinâmica natural de alguns compostos químicos, como por exemplo, o oxigênio dissolvido e macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e, como consequência disso, afetar os organismos que dependem desses compostos.

Lagos e reservatórios estratificados possuem gradientes verticais de organismos, nutrientes e oxigênio, que têm importantes implicações para a estrutura e o funcionamento do ecossistema. O processo de mistura da coluna d'água pode interromper esses gradientes e, muitas vezes carrear os compostos químicos presentes nas regiões mais profundas e, conseqüentemente, modificar o nível trófico do ambiente aquático comprometendo a qualidade da água.

Uma forma de representar o funcionamento de um ambiente lacustre, e assim compreender os fatores que regem os seus principais processos de funcionamento, é por meio da modelagem numérica. Esse método consiste, basicamente, em aplicar equações matemáticas que descrevem processos naturais, ajustando os parâmetros dessas equações de acordo com dados coletados em campo.

A modelagem numérica de lagos e reservatórios oferece oportunidade para abordar assuntos que vão além daqueles obtidos apenas observando dados monitorados no campo. Essas questões podem ser: aplicar o modelo a fim de gerar cenários capazes de fornecer informações para analisar alternativas de gerenciamento de um determinado ambiente, ou prever o comportamento desse ambiente no futuro.

Um exemplo de modelo de lagos e reservatórios é o *General Lake Model- GLM*. O GLM é um modelo hidrodinâmico unidimensional vertical para simulação em período contínuo desenvolvido para simular os principais processos hidrodinâmicos de ambientes lênticos (Hipsey *et al.*, 2013; Hipsey *et al.*, 2014; Obrador *et al.* 2016). O GLM foi selecionado para aplicação neste trabalho, pois é um modelo de uso livre e de código aberto. Por se tratar de um modelo de código aberto é um modelo mais flexível permitindo, se necessário, ajustar as equações empregadas nas simulações.

Ademais, por se tratar de um modelo unidimensional vertical o GLM é um modelo simplificado e requer menos dados de entrada o que proporciona menor esforço computacional. Esse tipo de modelo, unidimensional, pode representar de forma satisfatória ambientes profundos, nos quais os processos verticais tendem ser mais relevantes dos que os horizontais (Rinke *et al.*, 2010). O estudo foi assim realizado utilizando dados a região de captação do reservatório do Descoberto para calibração e verificação, caracterizada por ser uma região profunda.

Considerando-se os problemas relatados, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento do reservatório do Descoberto-DF quando submetido a diferentes condições de temperatura atmosférica e precipitação por meio de simulação hidrodinâmica do modelo unidimensional GLM. Este trabalho está dividido nos seguintes capítulos: (2) objetivos geral e específicos; (3) fundamentação teórica e revisão bibliográfica, no qual são desenvolvidos os principais temas acerca de modelagem hidrodinâmica em lagos e

reservatórios, dando ênfase no modelo estudado GLM; (4) metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho; (5) discussão dos resultados obtidos com aplicação da metodologia; e (6) conclusões da discussão dos dados.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar como algumas variáveis climáticas afetam a estrutura térmica reservatório do Descoberto-DF por meio da simulação do modelo unidimensional hidrodinâmico *General Lake Model-GLM*.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aplicar o modelo GLM por meio da organização de banco de dados e ajustes de parâmetros.
- Compreender a dinâmica da estrutura térmica do reservatório do Descoberto-DF por meio da simulação com GLM.
- Analisar o comportamento do reservatório do Descoberto-DF quando submetido a diferentes condições de precipitação e temperatura atmosférica por meio da simulação com modelo GLM.

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

Neste capítulo foram apresentados principais fatores que influenciam os processos hidrodinâmicos. Além disso, também é apresentada uma discussão acerca das características do modelo hidrodinâmico GLM, abordando sua estrutura, vantagens, limitações e as principais aplicações.

#### **3.1 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS FORÇANTES NA MODELAGEM DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE AMBIENTES LACUSTRES**

Uma forma de se compreender o funcionamento de um ecossistema é por meio de modelagem numérica. Cada vez mais tem se percebido a importância dessa ferramenta e de sua colaboração na compreensão dos processos que acontecem na natureza servindo de apoio a gestão ambiental e nas práticas de manejo de ecossistemas (Schmolke *et al.*, 2010).

A modelagem numérica de lagos e reservatórios oferece oportunidades para abordar questões de pesquisas além daquelas possíveis apenas com dados de monitoramento. Essas questões podem ser: estudar opções de gerenciamento de um determinado ambiente, prever o comportamento desse ambiente, e, assim, prever o comportamento desse ambiente no futuro, ou até mesmo espacializar um determinado dado de monitoramento.

Os modelos de lagos são ferramentas capazes de fornecer, por exemplo, a previsão da mudança do comportamento térmico de um reservatório em resposta a análises de cenários de mudanças climáticas e avaliar os resultados de diferentes estratégias de manejo de um determinado problema. As equações empregadas na modelagem hidrodinâmica de lagos e reservatórios buscam representar numericamente os processos que ocorrem nos reservatórios, tais como estratificação e mistura térmica. A estratificação e mistura térmica de um ambiente lacustre dependem, entre outros fatores, das condições climáticas (Imbodem e Wüstedt, 1995; Gal *et al.*, 2003; Moreno-Ostos *et al.*, 2008; Markfort *et al.*, 2010; Winslow *et al.*, 2015).

Dentre as variáveis climáticas que influenciam os processos térmicos existe a radiação solar. A energia solar, que chega à superfície da água é rapidamente transformada em calor nas camadas superiores da coluna de água. A radiação, então, passa por alterações tanto na sua intensidade quanto na qualidade espectral. Assim que a radiação atravessa a água ocorre uma alteração de sua trajetória devido à refração. Esse fenômeno é devido à mudança de velocidade da radiação ao penetrar na água. A radiação é absorvida e transformada em outras formas de energia, tais como energia química por meio da fotossíntese, podendo ser também dispersada por partículas e organismos (Esteves, 2011).

Em estudo do lago Kinneret, em Israel, Gal *et al.* (2003) observaram que a radiação de ondas longas impacta na temperatura da água simulada. A redução na radiação de ondas longas provocou a diminuição no calor de entrada para o lago, as temperaturas superficiais ficaram mais baixas e a mistura da camada superficial ficou mais profunda. Logo, o aumento da radiação de ondas longas resultou em um efeito oposto, provocou aumento na temperatura da água superficial e um fortalecimento da estratificação.

Ademais, os Gal *et al.* (2003) afirmam que os períodos em que os ajustes não foram bons coincidem com os períodos em que os dados das variáveis forçantes não eram confiáveis. Esse comportamento já era esperado, pois a consistência dos dados de entrada afeta a qualidade das variáveis de saída simuladas.

A ocorrência da estratificação térmica em lagos e reservatórios pode ocorrer devido a três principais fatores. Primeiro, os lagos e reservatórios têm baixa velocidade de fluxos, geralmente laminar. Como resultado, a mistura é controlada por difusão molecular, o que permite a persistência da estratificação o que por sua vez, permite que os gradientes de temperatura se mantenham mais estáveis. Em segundo lugar o tempo de residência de lagos e reservatórios são maiores (quando comparados a ambientes lóticos), essa característica é importante, pois os processos de aquecimento e resfriamento acabam sendo mais lentos. E terceiro, os lagos e reservatórios são formados em depressões e essa característica faz com que a interação da água superficial, que recebe maior influência da radiação solar, com a água do hipolímnio seja menor (Imbodem e Wüdest, 1995).

Assim, a estratificação vertical em lagos e reservatórios torna-se cada vez persistente à medida que o lago se torna predominantemente laminar; com tempos de residência longos

e águas profundas. Em contra partida, processos que aumentam a turbulência diminuem o tempo de residência e aumentam a interação com a água do fundo e reduzem a persistência estratificação favorece a mistura (Imbodem e Wüdest, 1995).

Ao mesmo tempo em que ocorre o aquecimento da superfície do lago, a energia cinética turbulenta do vento espalha o calor absorvido em todas as três dimensões do corpo de água. O gradiente de densidade vertical resultante (principalmente consequência da mudança de temperatura) atua como um fator de resistência contra a mistura de coluna de água (Moreno-Ostos *et al.*, 2008; Esteves, 2011).

O vento é uma das mais importantes variáveis forçantes que interferem na dinâmica da temperatura de águas de reservatórios. Essa variável influencia fornecendo energia cinética por meio de cisalhamento da superfície da água. O vento é principal responsável pelos processos de mistura nas camadas superficiais, o aumento da velocidade do vento pode resultar em temperaturas superficiais mais altas. Esse fenômeno pode ocorrer pois o vento pode espalhar a radiação que atinge as camadas mais superficiais (Gal *et al.* 2003; Markfort *et al.*, 2010; Winslow *et al.* 2015). Entretanto o mais comum de acontecer é perda de calor por meio da turbulência gerada pela velocidade do vento nas camadas superficiais. Além disso, a força dos ventos é capaz de quebrar estratificações, o que dependendo da profundidade, pode trazer nutrientes de águas mais profundas para o epilânio e transporte de nutrientes e material particulado verticalmente e horizontalmente no ambiente lacustre.

Outra variável climática capaz de influenciar as condições térmicas de lagos e reservatórios é a temperatura do ar, o aquecimento é impulsionado também pelo aumento da temperatura do ar (Schmid *et al.* 2014). Características do próprio ambiente podem influenciar na temperatura da água, como particularidades morfométricas do reservatório e das características dos seus afluentes. Os afluentes do reservatório podem apresentar características físico-químicas (salinidade, densidade e temperatura) diferentes das do reservatório e essas diferenças podem provocar aumento ou redução da temperatura e até mesmo modificar o regime de estratificação/mistura.

O grau de influência desses afluentes ao reservatório dependerá da forma como ocorre a interação de corpos d'água, como por exemplo, o quão menor será a vazão de entrada em relação ao volume do reservatório, a profundidade em que ocorre a interação e

principalmente a densidade das massas de água. Ao entrar no reservatório a tendência é que a vazão afluente se misture (quando há estratificação) à camada em densidade tenha valor mais próximo a sua.

Fenocchi *et al.* (2017) estudaram as intrusões dos principais afluentes do Lago Maggiore, os rios Ticino e Toce e puderam perceber a influência desses afluentes na temperatura do lago. Resumidamente, os autores tentaram realizar uma modelagem hidrodinâmica desprezando os dados dos afluentes, na ausência de dados de entrada que representasse o aquecimento do hipolímnio e do metalímnio profundo, a forma que os autores encontraram de representar o aquecimento das regiões onde ocorre a mistura do lago com os afluentes foi adotando um coeficiente de extinção de luz irreal. Esse estudo demonstrou a importância dos dados de vazões de entrada para obtenção de um modelo ajustado de maneira coerente.

Neste tópico foram discutidos fatores que influenciam a dinâmica térmica de lagos e reservatórios. Compreender as variáveis que atuam nos processos de lagos e reservatórios é fundamental para conseguir modelar matematicamente ambientes lacustres. Existem vários modelos capazes de representar bem esse tipo de ambiente (Mooij *et al.*, 2010), para este trabalho o modelo selecionado é o *General Lake Model* (GLM).

Por se tratar de um modelo unidimensional, o modelo GLM, tem a vantagem de requerer menos dados de entrada quando comparados a modelos bidimensionais e tridimensionais. Outra vantagem da característica unidimensional é o processamento, por ser um modelo mais simples, requer menos recursos de processamento.

### **3.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM GLM**

Dentre os modelos capazes de simular os processos hidrodinâmicos tem-se o GLM. O *General Lake Model* (GLM) é um modelo hidrodinâmico que pode ser acoplado ao *Aquatic EcoDynamic* (AED) para simular a dinâmica hidrológica e bioquímica de lagos e reservatórios (Hipsey *et al.*, 2013; Hipsey *et al.* 2014; Obrador *et al.* 2016; Hipsey *et al.* 2017). Os modelos GLM e AED foram desenvolvidos inicialmente como um projeto na *Global Lake Ecological Observatory Network* (GLEON), em parceria com *Aquatic*

*Ecosystem Modelling Network (AEMON)* (Hipsey *et al.*, 2013; Hipsey *et al.*, 2014; Obrador *et al.*, 2016).

Os principais processos simulados pelo GLM são: formação de gelo, esfriamento evaporativo, vento cisalhante, aquecimento superficial, mistura superficial, penetração de luz, mistura profunda, fluxos submerso e de infiltração, estratificação térmica e escoamento superficial.

O modelo GLM, é escrito em linguagem C e seus executáveis podem ser compilados para MS Windows, Mac OS ou Linux e o download é gratuito. O modelo pode ser executado a partir da janela de comando, mas há alternativas mais amigáveis, como a interface do programa R, por meio do pacote GLMr, e também pela interface do Matlab. Em todos os casos é necessário o conhecimento básico em programação (Obrador *et al.* 2016).

Além disso, o GLM é um modelo unidimensional distribuído verticalmente de característica dinâmica (não permanente) e determinística. O GLM foi criado para modelar lagos e reservatórios, sendo recomendado para estudos nos quais a variabilidade horizontal não é o foco. A ferramenta é capaz de calcular perfis verticais de temperatura, salinidade e densidade por meio de balanços hídricos, aquecimento e resfriamento da água, além de misturas verticais.

O modelo se baseia em equações empíricas e ainda incorpora uma estrutura de camadas Lagrangeanas, permitindo que as camadas mudem de espessura de acordo com fluxo de calor, misturas verticais e fluxos de entrada e saída de água. O modelo, basicamente, utiliza dados de monitoramento como entrada e, também, para calibrar e verificar a qualidade da simulação (Hipsey *et al.* 2014; Yao *et al.*, 2014, Obrador *et al.* 2016).

O balanço de massa ocorre através das camadas, mas a evaporação e a precipitação ocorrem apenas na camada superficial e a infiltração ocorre apenas na camada inferior. A densidade das camadas é calculada por meio da temperatura e salinidade de acordo com UNESCO (1981).

O modelo calcula a dinâmica das entradas e saídas em passo de tempo horário, no entanto, os fluxos de massa da superfície podem ocorrer em passo de tempo horário ou diário, dependendo da resolução dos dados meteorológicos (Hipsey *et al.* 2014).

A mudança na espessura da camada superficial devido aos fluxos de massa da superfície é calculada por meio da Equação 3.1.

$$\frac{dh_S}{dt} = E + S + f_R R + \frac{Q_R}{A_S} \quad (\text{Equação 3.1})$$

$h_S$ : altura da camada superficial no passo de tempo  $t$  (m/dia);

$E$ : fluxo de massa de evaporação (m/dia);

$S$ : queda de neve (m/dia);

$f_R$ : fator de correção da precipitação que pode ser ajustado pelo usuário (adimensional);

$R$ : precipitação (m/dia);

$Q_R$ : esse termo só é considerado quando o reservatório do estudo formar ilhas quando o nível está baixo;

$A_S$ : área superficial (m<sup>2</sup>)

A equação geral do modelo para calcular balanço de energia superficial entre as ondas longas, ondas curtas e fluxos de calor sensível e calor latente é dado pela Equação 3.2.

$$\left[ \frac{cp}{A_S z_{sml}} \right] \frac{dT_S}{dt} = \phi_{SW_S} - \phi_E + \phi_H + \phi_{LWin} - \phi_{LWout} \quad (\text{Equação 3.2})$$

$A_S$ : área superficial (m<sup>2</sup>)

$z_{sml}$ : profundidade da camada de mistura superficial (m);

$cp$ : capacidade específica do ar (1005J/Kg/°C);

$T_S$ : temperatura superficial da camada de mistura da superfície (°C);

$\phi_{SW}$ : a penetração da radiação de ondas curtas (W/m<sup>2</sup>);

$\phi_E$ : fluxo de calor latente (W/m<sup>2</sup>);

$\phi_H$ : fluxo de calor sensível (W/m<sup>2</sup>);

$\phi_{LWin}$ : fluxo de entrada de ondas longas (W/m<sup>2</sup>);

$\phi_{LWout}$ : fluxo de saída de ondas longas (W/m<sup>2</sup>)

A penetração de ondas curtas ( $\phi_{SW}$ ) é dada pela Equação 3.3.

$$\phi_{SW}(z) = (1 - \alpha_{SW})f_{SW} f_{par}\hat{\phi}_{SW}exp[-K_Wz] \quad (\text{Equação 3.3})$$

$\alpha_{SW}$ : albedo de ondas curtas (adimensional);

$f_{SW}$ : fator escalar (adimensional);

$f_{PAR}$ : fração fotossinteticamente ativa (45% da luz incidente);

$\hat{\phi}_{SW}$ : irradiância total ( $W/m^2$ );

$K_W$ : coeficiente de extinção de luz ( $m^{-1}$ );

$z$ : profundidade da camada superficial (m)

As equações do modelo para o cálculo da irradiância total ( $\hat{\phi}_{SW}$ ) e o albedo de ondas curtas ( $\alpha_{SW}$ ) podem ser encontradas no Anexo A.

O fluxo de calor latente ( $\phi_E$ ) é dado pela Equação 3.4

$$\phi_E = -\rho_a C_E \lambda U_x \frac{\kappa}{p} (e_s[T_s] - e_a[T_a]) \quad (\text{Equação 3.4})$$

$\rho_a$ : densidade do ar ( $Kg.m^{-3}$ );

$C_E$ : Coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente (*default*~ $1,3 \times 10^{-3}$ );

$\lambda$ : Calor latente de evaporação ( $2,453 \times 10^6 JKg^{-1}$ );

$U_x$ : velocidade do vento (m/s);

$\kappa$ : razão entre o peso molecular da água e o peso molecular do ar (= 0,622);

$p$ : pressão do ar (hPa);

$e_s$ : Pressão de vapor saturado na temperatura da camada superficial (hPa);

$e_a$ : Pressão de vapor do ar (hPa);

$T_s$ : Temperatura da camada superficial ( $^{\circ}C$ );

$T_a$ : Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ )

A equação do modelo que é empregada para calcular a densidade do ar ( $\rho_a$ ) pode ser encontrada no Anexo A.

O fluxo de calor sensível ( $\phi_H$ ) é dado pela Equação 3.5.

$$\phi_H = -\rho_a C_p C_H U_x (T_S - T_a) \quad (\text{Equação 3.5})$$

$\rho_a$ : densidade do ar ( $\text{Kg.m}^{-3}$ );

$c_p$ : capacidade específica do ar ( $1005\text{J/Kg}^\circ\text{C}$ );

$C_H$ : coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente (*default*~ $1,3 \times 10^{-3}$ );

$U_x$ : velocidade do vento (m/s);

$T_S$ : Temperatura da camada superficial ( $^\circ\text{C}$ );

$T_a$ : Temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ )

As equações 3.4 e 3.5 funcionam bem para valores de vento ( $U_x$ ) suficiente para criar uma camada limite definida sobre a superfície da água. Em lagos e reservatórios onde a velocidade do vento tende a zero, as equações 3.4 e 3.5 devem ser complementadas para que os baixos valores de velocidade de vento sejam melhor capturados. Portanto, quando velocidade do vento tende a zero o cálculo para o calor latente (Equação 3.6) e calor sensível (Equação 3.8) são apresentados. Fluxo de calor latente:

$$\phi_{E_0} = \rho_S \lambda \alpha_e (C_0 - C_a) \quad (\text{Equação 3.6})$$

$\rho_S$ : densidade da superfície da água ( $\text{Kg.m}^{-3}$ );

$\lambda$ : calor latente de evaporação ( $2,453 \times 10^6 \text{JKg}^{-1}$ );

$\alpha_e$ : é dado pela Equação 3.7

$C_0$  e  $C_a$  são variáveis que representam a razão entre o peso molecular da água e pressão de vapor com a pressão, da superfície ( $C_0$ ) e do ar ( $C_a$ ). Essas equações são apresentadas do Anexo A.

$$\alpha_e = 2,283 \times 10^{-3} \xi \frac{v}{c_p \rho_s} \left[ g \frac{|\rho_a - \rho_0|}{\rho_a v a} \right]^{1/3} \quad (\text{Equação 3.7})$$

$\xi$ : coeficiente de correção de rugosidade da superfície do lago (0,5);

$v$ : viscosidade cinemática do ar ( $0,0548 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ );

$c_p$ : condutividade térmica molecular do ar ( $0,1 \text{ KJ m}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );

$\rho_s$ : capacidade específica do ar ( $1005 \text{ J/Kg/}^\circ\text{C}$ );

$\rho_s$ : densidade da superfície da água ( $\text{Kg.m}^{-3}$ );

$g$ : gravidade ( $\text{ms}^{-2}$ );

$\rho_a$ : densidade do ar ( $\text{Kg.m}^{-3}$ );

$\rho_0$ : densidade do ar saturado à temperatura da superfície da água ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )

Fluxo de calor sensível:

$$\phi_{H_0} = \alpha_h (T_s - T_a) \quad (\text{Equação 3.8})$$

$\alpha_h$ : é dado pela Equação 3.9

$T_s$ : Temperatura da camada superficial ( $^\circ\text{C}$ );

$T_a$ : Temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ )

$$\alpha_h = 2,283 \times 10^{-3} \xi v \left[ g \frac{|\rho_a - \rho_0|}{\rho_a v a} \right]^{1/3} \quad (\text{Equação 3.9})$$

$\xi$ : coeficiente de correção de rugosidade da superfície do lago (0,5);

$v$ : viscosidade cinemática do ar ( $0,0548 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ );

$c_p$ : condutividade térmica molecular do ar ( $0,1 \text{ KJ m}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );

$g$ : gravidade ( $\text{ms}^{-2}$ );

$\rho_a$ : densidade do ar ( $\text{Kg.m}^{-3}$ );

$\rho_0$ : densidade do ar saturado à temperatura da superfície da água ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )

O fluxo de entrada de ondas longas ( $\phi_{LW_{in}}$ ) é dado pela Equação 3.10.

$$\phi_{LW_{in}} = (1 - \alpha_{LW}) \varepsilon_a^* \sigma [T_a + 273,15]^4 \quad (\text{Equação 3.10})$$

$\alpha_{LW}$ : albedo de ondas longas (0,03);

$\varepsilon_a^*$ : emissividade da atmosfera;

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ );

$T_a$ : Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

A emissividade da atmosfera ( $\varepsilon_a$ ) pode ser calculada por uma função que depende da temperatura do ar ( $T_a$ ) e da fração de cobertura de nuvens ( $C$ ), as equações para o cálculo da emissividade da atmosfera são apresentadas no Anexo A.

A título de esclarecimento: o GLM trabalha com dois tipos de entradas para a radiação de ondas longas, que pode ser selecionada e configurada pelo usuário. É possível trabalhar inserindo diretamente ao banco de dados os valores de ondas longas, mas se o usuário preferir, ou não possuir os dados de ondas longas, é possível entrar com dados de fração de cobertura de nuvens e esse dado poderá ser usado pelo modelo para estimar o valor de ondas longas (Equação 3.10). No presente trabalho foi selecionada a opção que modela a partir de dados de ondas longas medidos.

O fluxo de saída de ondas longas ( $\phi_{LWout}$ ) é dado pela Equação 3.11.

$$\phi_{LWout} = \varepsilon_w \sigma [T_s + 273,15]^4 \quad (\text{Equação 3.11})$$

$\varepsilon_w$ : emissividade da superfície da água (o modelo assume como 0,985);

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ );

$T_s$ : Temperatura da camada superficial ( $^{\circ}\text{C}$ )

Para representar os processos de mistura e estratificação modelo GLM assume que a energia disponível ( $E_{TKE}$ ) está em equilíbrio com a necessária para que ocorra a mistura ( $E_{PE}$ ). O GLM tem como base o trabalho de Imberger e Patterson (1981).

A energia disponível no sistema ( $E_{TKE}$ ) é dada pela (Equação 3.12)

$$E_{TKE} = \underbrace{0,5C_K(w_*^3)\Delta t}_{\text{mistura convectiva}} + \underbrace{0,5C_K(C_W u_*^3)\Delta t}_{\text{agitação do vento}} + \underbrace{0,5C_S \left[ u_b^2 + \frac{u_b^2}{6} \frac{d\xi}{dz_{sml}} + \frac{u_b \xi}{3} \frac{du_b}{dz_{sml}} \right]}_{\substack{\text{Produção de cisalhament} \\ \text{produção de K-H}}} \Delta z_{k-1}$$

(Equação 3.12)

$C_K$ : coeficiente de eficiência de mistura convectiva;  
 $w_*^3$ : escala de velocidade turbulenta associada à convecção;  
 $\Delta t$ : intervalo de tempo t em segundos;  
 $C_W$ : coeficiente de eficiência de mistura: produção de cisalhamento;  
 $u_*$ : escala de velocidade associada à tensão do vento  $u_* = \sqrt{1,612 \times 10^{-6} U_x^2}$  ;  
 $u_b$ : velocidade de cisalhamento na interface da camada de mistura (m/s);  
 $C_S$ : coeficiente de eficiência de mistura: aceleração;  
 $z_{sml}$ : profundidade da camada de mistura superficial (m);  
 $\xi$ : escala de comprimento de onda de Kelvin-Helmholtz;  
 $\Delta z_{k-1}$ : variação da camada de mistura (m).

O primeiro termo da Equação 3.12 representa a mistura convectiva, o segundo termo a agitação da camada superficial pelo vento e o terceiro e último termo representa a produção de cisalhamento, isto é, produção de ondulação Kelvin-Helmholtz

A energia necessária para que ocorra a mistura ( $E_{PE}$ ). é dada pela Equação 3.13 (Equação 3.13):

$$E_{PE} = \left[ \underbrace{0,5 C_T (w_*^3 + C_W u_*^3)^{2/3}}_{\text{aceleração}} + \underbrace{\frac{\Delta \rho}{\rho_0} g z_{sml}}_{\text{elevação}} + \underbrace{\frac{g \xi^2}{24 \rho_0} \frac{d(\Delta \rho)}{dz_{sml}} + \frac{g \xi \Delta \rho}{12 \rho_0} \frac{d\xi}{dz_{sml}}}_{\text{Consumo de K-H}} \right] \Delta z_{k-1}$$

(Equação 3.13)

$C_T$ : coeficiente de eficiência de mistura  
 $w_*^3$ : escala de velocidade turbulenta associada à convecção;  
 $C_W$ : coeficiente de eficiência de mistura: produção de cisalhamento;  
 $u_*$ : escala de velocidade associada à tensão do vento  $u_* = \sqrt{1,612 \times 10^{-6} U_x^2}$  ;  
 $C_S$ : coeficiente de eficiência de mistura: aceleração;  
 $z_{sml}$ : profundidade da camada de mistura superficial (m);  
 $g$ : gravidade (m/s<sup>2</sup>)  
 $\rho_0$ : densidade do ar saturado à temperatura da superfície da água (Kg.m<sup>-3</sup>);  
 $\xi$ : escala de comprimento de onda de Kelvin-Helmholtz;

$\Delta z_{k-1}$ : variação da camada de mistura (m);

$z_{sm1}$ : profundidade da camada de mistura superficial (m).

Os coeficientes  $C_K$ ,  $C_W$ ,  $C_S$  e  $C_T$  podem ser ajustados de acordo com o ambiente simulado pelo modelo.

É possível identificar o que cada termo da Equação 3.13 estão representando. O primeiro termo representa a aceleração, o segundo termo representa a elevação da camada de mistura de fundo para a superfície e o terceiro termo representa o consumo da ondulação de Kelvin-Helmholtz

A variável  $w_*$  está associada à mistura devido ao resfriamento convectivo, o GLM usa um algoritmo adotado por Imberger e Petterson (1981). Esse algoritmo considera que a energia potencial que é liberada pelo aprofundamento da camada mista é computada observando os momentos das diferentes camadas na camada de superfície mista.

Já a variável  $u_*$  está associada à tensão do vento e pode ser calculada em função da força do vento. A velocidade de cisalhamento na interface da camada de mistura ( $u_b$ ), escala de velocidade turbulenta associada à convecção ( $w_*$ ) e escala de velocidade associada à tensão do vento ( $u_*$ ) são apresentados no Anexo A.

Em linhas gerais, o modelo compara a energia disponível ( $E_{TKE}$ ) com a energia necessária para que ocorra a mistura ( $E_{PE}$ ). Se a energia disponível for maior, ocorre a mistura, caso contrário a estratificação será mantida. Mais detalhes sobre esses processos podem ser encontrados no manual do modelo escrito por Hipsey *et al.* (2014)

A mistura que ocorre abaixo da camada superficial em lagos e regiões profundas é modelada usando difusividade vertical ( $K_z$ ). O GLM se baseia na derivação de Weinstock (1981), que descreve a estratificação fraca ou forte com o aumento e a redução da difusividade.

$$K_z = \frac{\alpha_{TKE} \varepsilon_{TKE}}{N^2 + 0,6k_{TKE}^2 u_*^2} \quad (\text{Equação 3.14})$$

Onde

$\alpha_{TKE}$ : eficiência de mistura no hipolímnio

$\epsilon_{TKE}$ : taxa de dissipação turbulenta

N: frequência de Brunt-Väisälä (flutuabilidade)

$k_{TKE}$ : número de onda de turbulência

$u_*$ : escala de velocidade associada à tensão do vento  $u_* = \sqrt{1,612 \times 10^{-6} U_x^2}$

Embora o modelo calcule a dinâmica de congelamento e descongelamento de lagos e reservatórios as equações que modelam esse comportamento foram omitidas, pois o reservatório do Descoberto, objeto de estudo deste trabalho, não passa por esses processos. Entretanto, a descrição completa das equações de congelamento e descongelamento podem ser encontradas no manual do modelo escrito por Hipsey *et al.* (2014).

O GLM é um modelo relativamente simplificado o qual não requer muitos dados de entrada. Os dados de entrada requeridos são os dados meteorológicos, características das vazões de entrada, vazões de saída e dados morfométricos da área de estudo.

Entre os dados meteorológicos estão, ondas curtas, ondas longas (que pode ser substituído pela cobertura de nuvens), temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e queda de neve.

Caso não esteja disponível, o modelo é capaz de estimar os dados de ondas longas por meio do dado de cobertura de nuvens por meio da equação 3.10, basta alterar a configuração do modelo. Embora o GLM seja uma ferramenta autônoma e possa ser usado apenas para a simulação hidrodinâmica de lagos e reservatórios, o principal uso do GLM é fornecer dados físicos que são acoplados a um modelo ecológico como, por exemplo, o modelo *Aquatic EcoDynamic* - AED como o objetivo principal de simular a algumas variáveis de qualidade da água (Obrador *et al.*, 2016).

Nota-se (Figura Figura 3.1) que os alguns dos dados de entrada compõem o balanço hídrico, considerando vazão de entrada, precipitação (nevasca e chuva), extravasamento e retiradas. Dados de entradas como temperatura atmosférica, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação de ondas longas e radiação de ondas curtas podem ser considerados como forças motrizes para os processos físicos e químicos que ocorrem no reservatório.

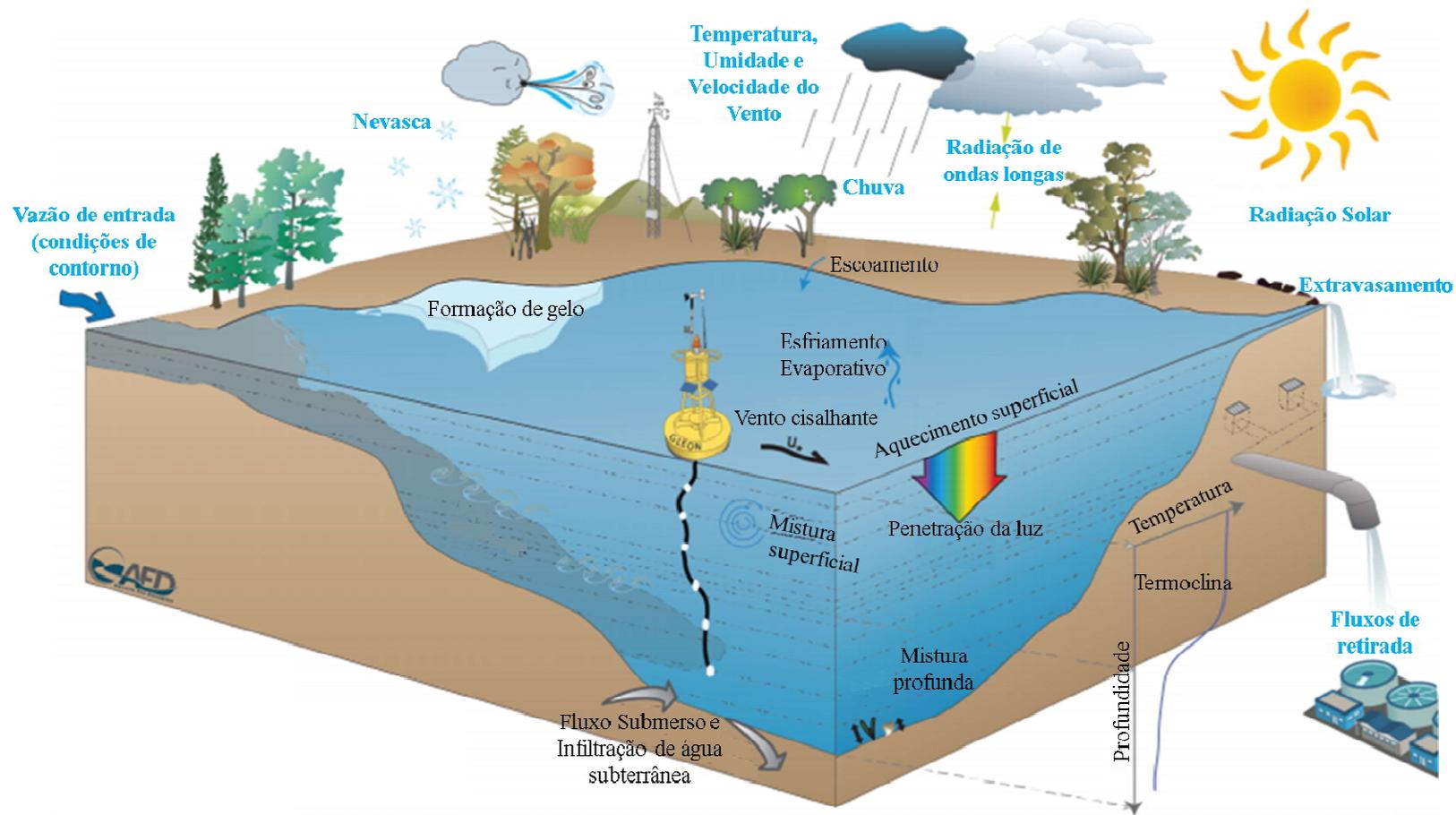


Figura 3.1 Esquema de simulação do domínio do GLM. Informações de entrada são apresentadas em texto na cor azul e processos simulados na cor preta. Fonte: Hypsey et al.(2014).

O GLM é um modelo relativamente novo (2013), e, com poucas publicações, mas é possível citar pesquisadores que tenham utilizado a ferramenta para diferentes finalidades descritas a seguir: Read *et al.*(2014) Yao *et al.* (2014), Silva *et al.* (2015), Pujoni (2015), Barbosa (2015), Rose *et al.*(2016); Bueche, Hamilton e Vetter (2017) e Fenocchi *et al.* (2017).

Read *et al.* (2014) modelaram 2368 lagos utilizando o GLM. O grupo de pesquisadores estava em posse de um banco de dados armazenados por 33 anos (1979-2011) e tinham como objetivo estudar as respostas dos lagos ao clima. Foi observado que o GLM apresentou boas previsões para as temperaturas observadas, assim como a presença/ausência de estratificação, entretanto no hipolímnio as simulações foram menos precisas. Os autores justificaram que o modelo ainda está sendo testado e por isso podem ser necessários alguns ajustes.

Yao *et al.* (2014) utilizaram o GLM como uma das ferramentas para simular formação de gelo e temperatura do lago canadense Harp. A escolha do modelo unidimensional foi feita pela característica desse tipo de modelo em focar nos processos principais de lagos. Os resultados de saída da modelagem demonstraram bom desempenho na simulação da temperatura, mas fraca capacidade de simular a dinâmica do gelo.

Silva *et al.* (2015) utilizaram o GLM para modelar a temperatura da água na Lagoa da Pampulha localizada na cidade de Belo Horizonte – MG. Os autores tiveram sucesso na calibração. Para a calibração os autores utilizaram o algoritmo Cadeia de Monte Carlo (Markov chain Monte Carlo - MCMC) e a métrica utilizada como função objetivo foi a *Root Mean Square Error*- RMSE (raiz do erro quadrado médio) das temperaturas medidas em três profundidades 0,5m, 3,0m e 6,0m. Ao final da calibração Silva *et al.* (2015) observaram RMSE de 0,7 °C entre os dados simulados e observados, o que consideraram como um bom ajuste.

Pujoni (2015) aplicou o modelo GLM com o objetivo de modelar o efeito do coeficiente de atenuação da luz (Kw) na dinâmica térmica de um lago tropical para as lagoas Gambazinho e Carioca (Minas Gerais). O autor afirma ter conseguido um bom ajuste nas temperaturas calibradas, no qual os valores observados e estimados apresentaram diferença com

variação de no máximo 10%. Ademais, após a calibração, o autor concluiu que o valor de  $K_w$  exerce influência na profundidade da termoclina.

O modelo GLM também foi usado por Barbosa (2015) que simulou a temperatura da água de um compartimento (região próxima à barragem) do lago Paranoá-DF. Em seu trabalho a autora realizou análise de sensibilidade dos parâmetros e calibrou manualmente a temperatura. Para a calibração Barbosa (2015) utilizou as métricas: RMSE, NSE (eficiência de Nash-Sutcliffe) e CC (coeficiente de correlação).

No trabalho de Barbosa (2015) foram identificados três parâmetros sensíveis: coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente, coeficiente aerodinâmico de transferência de momento e coeficiente de atenuação vertical da luz. O RMSE calculado foi de 1,47°C nas temperaturas medidas em cinco profundidades 0m, 1m, 10m, 15m e 20m.

Rose *et al.* (2016), por meio do GLM, investigaram a sensibilidade da temperatura da água de 1894 lagos em relação a claridade da água e o efeito das mudanças climáticas sobre a dinâmica térmica dos lagos. Os autores implementaram uma calibração genérica para que essa atendesse todos os lagos simulados.

Rose *et al.* (2016) concluíram que lagos profundos são sensíveis a parametrização da claridade da água, notou-se também que as variações de temperatura do ar e de eventos chuvosos provocaram alteração na claridade da água e conseqüentemente a distribuição de calor nos lagos.

Bueche, Hamilton e Vetter (2017) fizeram o uso do modelo GLM para modelar processos hidrodinâmicos do lago alemão Ammersee. Os objetivos do trabalho foram: calibrar e validar o GLM incluindo os eventos de cobertura de gelo no inverno, analisar se o modelo pode simular situações extremas com ou sem cobertura de gelo e ondas de calor, observar os erros de entre os dados observados e modelados nos compartimentos epilimnio, metalimnio e hipolimnio. A simulação realizada por Bueche, Hamilton e Vetter (2017) apresentou bons ajustes considerando as métricas aplicadas, entretanto os piores ajustes foram nas temperaturas simuladas no metalimnio. Outros problemas relatados pelos autores são a limitação no GLM ao utilizar  $K_w$  constante ao longo do tempo e limitações também foram observadas na previsão de formação de gelo.

Além dos trabalhos anteriormente citados Fenocchi *et al.* (2017) modelaram a dinâmica térmica do Lago Maggiore buscando entender a influência das vazões de entrada na temperatura do lago, que está localizado ao norte da Itália e sul da Suíça. O período de simulação foi entre os anos de 1998-2014 e uma das métricas utilizadas para a calibração e verificação do modelo foi RMSE que apresentou valores  $< 1^{\circ}\text{C}$ .

Os autores trazem a discussão da importância das vazões de entrada para na calibração do modelo GLM ao afirmarem que só foi possível observar um bom ajuste no modelo quando foi utilizado um coeficiente de extinção de luz ( $K_w$ ) não realista, pois dessa forma estariam representando o aquecimento do hipolimnio e metalimnio profundo (onde a radiação solar não chega), o que na prática são aquecidos devido a mistura desses compartimentos com o as vazões de entrada. Na Tabela 3.1 é apresentado um breve resumo dos trabalhos que fizeram o uso do GLM destacando os pontos principais e características de cada estudo.

Tabela 3.1 Características principais dos trabalhos que utilizaram o General Lake Model.

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Lago</b>	<b>Métrica de calibração</b>	<b>Período</b>
<b>Read <i>et al.</i> (2014)</b>	Estudar as respostas dos lagos submetidos a mudanças do clima.	2368 lagos - EUA	RMSE = $2,78^{\circ}\text{C}$	1979-2011
<b>Yao <i>et al.</i> (2014)</b>	Simular dinâmica da temperatura e formação de gelo.	Harp- Canadá	CE = 0,87	1978-1993
<b>Silva <i>et al.</i> (2015)</b>	Modelar a temperatura da água.	Pampulha- Minas Gerais	RMSE = $0,7^{\circ}\text{C}$	Mar-Jun/ 2013
<b>Pujoni (2015)</b>	Modelar o efeito do coeficiente de extinção de luz.	Gambazinho e Carioca	-	Mai/2011- Dez/2012
<b>Barbosa (2015)</b>	Modelar a temperatura de um compartimento do lago	Paranoá - Distrito Federal	RMSE = $1,47^{\circ}\text{C}$	2007-2013
<b>Rose <i>et al.</i> (2016)</b>	Analisar a sensibilidade da temperatura em relação à claridade da coluna d'água	1894 lagos	-	
<b>Bueche, Hamilton e Vetter (2017)</b>	Modelar os processos hidrodinâmicos	Ammersee - Alemanha	RMSE = $0,65^{\circ}\text{C}$	Jan/2002- Dez/2004 e Nov/2004- Out/2008
<b>Fenocchi <i>et al.</i> (2017)</b>	Modelar a dinâmica térmica	Maggiore- Itália e Suíça	RMSE $< 1^{\circ}\text{C}$	1998-2014

Entre os trabalhos citados que fizeram o uso do modelo GLM, foi possível identificar apenas dois trabalhos que apresentaram os parâmetros do GLM após a fase de calibração, sendo eles Barbosa (2015) e Bueche, Hamilton e Vetter (2017).

Os trabalhos citados, que fizeram o uso do modelo GLM, demonstram a versatilidade do modelo em simular os processos hidrodinâmicos de lagos e reservatórios para diferentes finalidades e, embora tenha apresentado limitações em alguns trabalhos, o modelo tem se mostrado eficiente ao simular processos térmicos em diferentes ambientes lacustres.

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo detalhar os métodos empregados para o desenvolvimento do trabalho. Tendo em vista a proposta de realizar a modelagem hidrodinâmica do reservatório do Descoberto utilizando o GLM, a metodologia do trabalho foi apresentada em quatro etapas: caracterização da área de estudo, elaboração do banco de dados, modelagem e verificação e análises de cenários com modelo GLM. Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma com resumo das etapas deste trabalho.

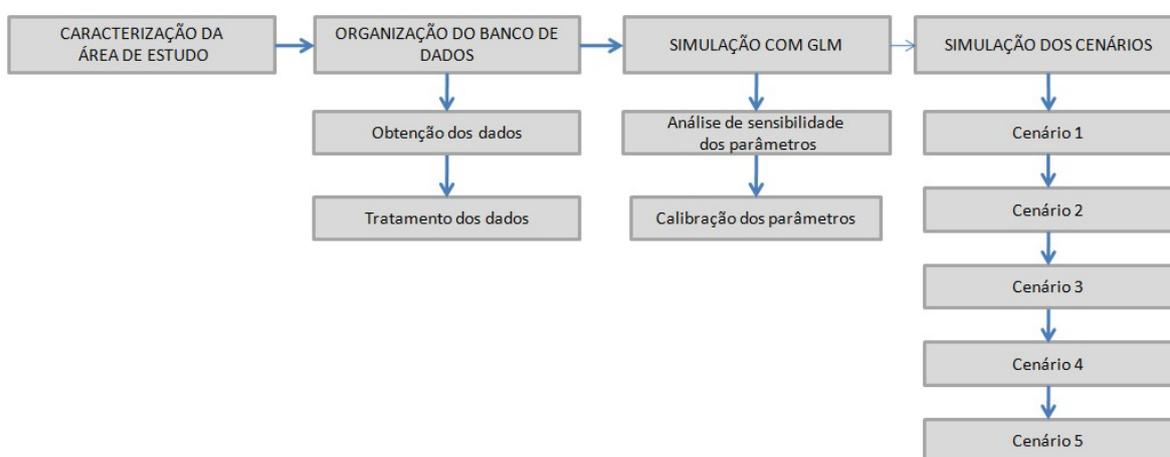


Figura 4.1 Fluxograma das etapas do trabalho.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O reservatório do Descoberto está localizado na porção oeste do Distrito Federal, na bacia hidrográfica do rio Descoberto. O território da bacia do rio Descoberto, ocupa 30% no estado de Goiás e os outros 70% no Distrito Federal com uma área de aproximadamente 452 km<sup>2</sup>. O clima é classificado, segundo a classificação climática Köppen, como região tropical de altitude do tipo Cwa. A precipitação da bacia hidrográfica do rio Descoberto varia entre os valores de 1200 a 1800 mm, sendo que, entre maio e setembro ocorre a estação de seca, e a chuvosa abrange o período de dezembro a março, no qual ocorrem cerca de 80% das chuvas do ano. Na Figura 4.2 são apresentados os valores médios histórico da precipitação, umidade relativa e temperaturas máximas e mínimas.

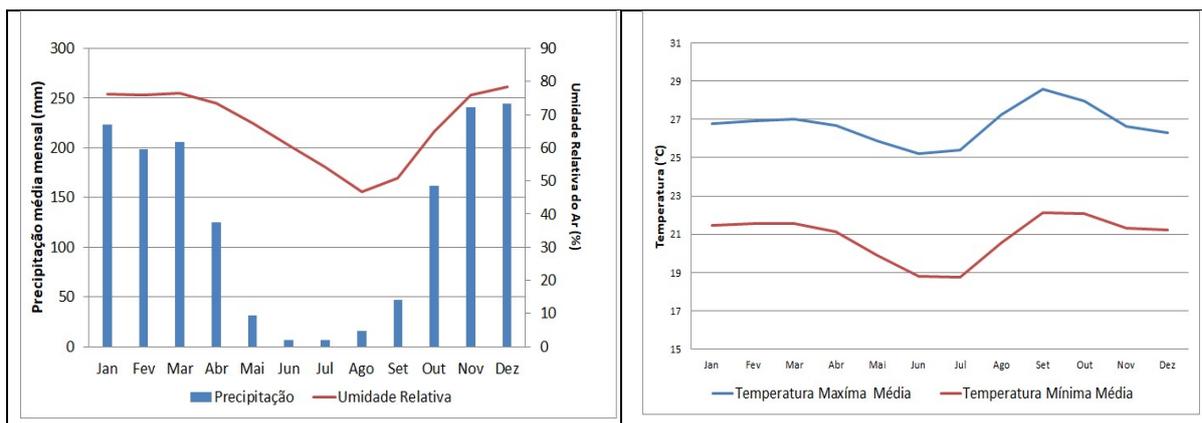


Figura 4.2 Dados meteorológicos históricos (1963-2015) de Brasília (A) Precipitação e Umidade relativa do ar (B) Temperatura máxima e mínima. Fonte: INMET, 2018.

O reservatório tem aproximadamente 12 Km<sup>2</sup> de extensão e capacidade para armazenar 102,3 hm<sup>3</sup> de água (Silva, 2009), sendo esse o manancial responsável por abastecer o principal sistema de distribuição de água do Distrito Federal, cerca de 60% da água tratada e distribuída no Distrito Federal (CAESB 2017, DISTRITO FEDERAL, 2017). Na Figura 4.3 é apresentada a imagem mostrando a localização do reservatório do Descoberto.

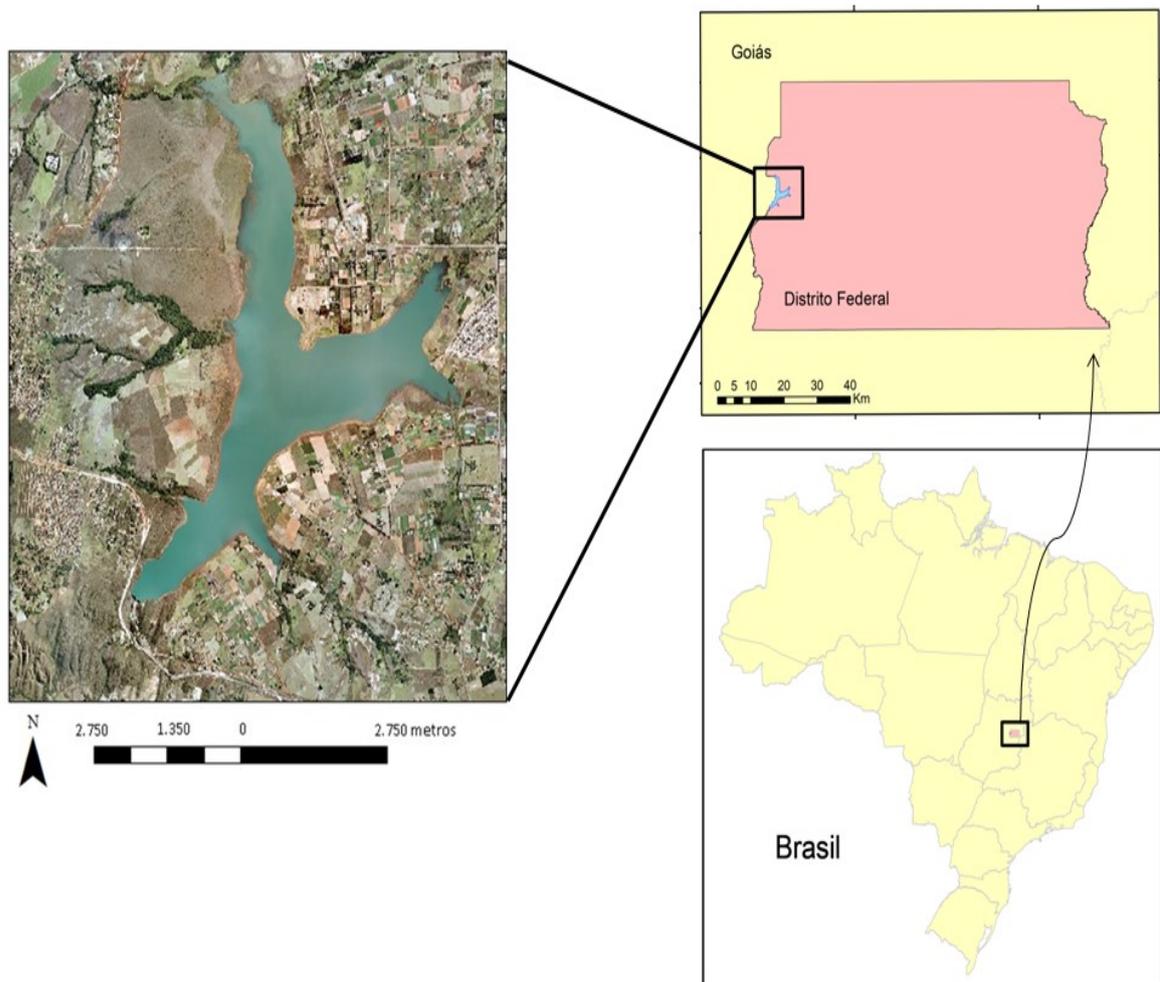


Figura 4.3 Localização da Área de Estudo: reservatório do Descoberto (DF/GO).

O reservatório do Descoberto foi inaugurado em 1974 com a construção de sua barragem localizada às margens da BR-070 (que liga o Plano Piloto a Águas Lindas), o que já indicava que haveria ocupação do solo na região e assim, demandaria mecanismos de controle do processo de degradação (CAESB, 2017; DISTRITO FEDERAL, 2017).

Essa ocupação foi concretizada e já na época de sua construção foi observada a ocupação intensa do solo. Em resposta a isso, o Governo Federal e a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB criaram o Decreto nº 88.940/83 para criação das Áreas de Preservação Ambiental da Bacia do rio Descoberto. Este decreto abrange as regiões administrativas de Taguatinga, Brazlândia, Ceilândia e o município de Águas Lindas - Goiás, que tinha como objetivo garantir maior proteção à Bacia do Rio Descoberto e à sua represa (CAESB, 2017; DISTRITO FEDERAL, 2017).

Apesar da existência desse Decreto, as atividades do uso e ocupação do solo da bacia do reservatório do Descoberto têm aumentado, provocando sua degradação. Estes usos e ocupações foram caracterizados por Ferrigo (2014), que identificou áreas onde havia alta, média e baixa densidade de urbanização, vias pavimentadas e não pavimentadas, cerrado preservado, reflorestamento de Pinus e Eucalipto, culturas anuais (olericultura) e perenes (fruticultura), mata de galeria, campo limpo, áreas vegetadas, solo exposto, pastagem, áreas degradadas (cascalheiras), lagos/açudes e áreas alagáveis.

Ademais, órgãos responsáveis pela gestão da Bacia do reservatório detectaram problemas ambientais e processos erosivos generalizados, impermeabilização do solo nas áreas urbanas, desmatamento nas áreas do entorno, invasões das margens dos recursos hídricos por atividades agrícolas, além da expansão desenfreada da cidade de Águas Lindas. O entorno do reservatório sofre grande pressão socioambiental, como por exemplo, especulação imobiliária, invasões, presença de animais, despejo de lixo, erosões, desmatamento, e destruição das cercas de proteção (DISTRITO FEDERAL, 2017).

Foi recomendado, por meio da nota técnica emitida pela CTPA/CRH-DF- Câmara Técnica Permanente de Assessoramento/ Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal (2014), o enquadramento do reservatório do Descoberto como classe 2, o mesmo documento informa que antes disso era considerado classe 1.

Para essa decisão da mudança do enquadramento foi levado em conta o adensamento populacional na região, observando a necessidade de gerir corretamente essas ocupações, a intensa poluição difusa no reservatório do Descoberto, usos desejados atuais e futuros, uso para abastecimento e irrigação e ausência de dados atuais consistentes em relação à qualidade da água.

## **4.2 ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS**

Realizada a caracterização da área de estudo, a etapa seguinte do trabalho foi construção do banco de dados. Optou-se por trabalhar com dados em intervalo de tempo horário para os dados meteorológicos e em intervalo de tempo diário para os dados fluviométricos devido a disponibilização e frequência de monitoramento de cada um deles. A partir dessa decisão, os dados fornecidos pelas Instituições CAESB, INPE e INMET passaram por um

processo de análise de consistência. Essa análise foi necessária para que os dados estivessem compatíveis com o modelo. Além disso, a maior parte dos dados apresentou, em algum momento, falhas na continuidade da série, e por isso foi necessário preencher essas lacunas.

Os dados de radiação de ondas longas e radiação de ondas curtas foram obtidos da base de dados Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – SONDA que surgiu de um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE. A estação utilizada foi a BRB localizada na região nordeste do Distrito Federal. Esses dados estavam no intervalo de tempo por minuto e foram convertidos para o intervalo horário por meio de médias aritméticas simples.

O processo de análise de consistência dos dados foi realizado por meio de gráficos para observação do comportamento da série e os dados duvidosos foram eliminados. Lacunas de dados no mesmo dia eram preenchidas com interpolação linear. Lacunas de dados de 1 dia foram preenchidas com média dos valores do dia anterior e posterior. Lacunas maiores de dados foram preenchidas com média dos valores do ano anterior e do ano posterior.

Os dados de temperatura do ar, precipitação, velocidade do vento e umidade relativa do ar foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Esses dados já estavam no intervalo de tempo horário. Dados inconsistentes foram eliminados. Lacunas de dados no mesmo dia foram preenchidas com interpolação linear (variáveis intensivas). Lacunas de dados de 1 dia foram preenchidas com média do dia anterior com o posterior.

Os dados morfométricos e fluviométricos foram fornecidos pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal- CAESB. Os dados morfométricos requeridos pelo modelo são relação cota e área do reservatório. A relação cota área foi obtida por meio de medição batimétrica realizada por Magna (2002). Os dados obtidos por Magna (2002) foram fornecidos pela CAESB para a execução deste trabalho. Na Tabela 4.1 são apresentadas as fontes, localizações, coordenadas, frequência de medição dos dados e a identificação por letras da localização geográfica. Figura 4..

Tabela 4.1 Descrição das fontes dos dados requeridos pelo modelo.

Dados	Fonte	Localização	Coordenadas	Frequência	Ponto
Meteorológicos	SONDA/INPE	Estação BRB	15°36'S 47° 42' W	Minuto	H
	INMET		15°47'S 47°55' W	Diária	I
Fluviométricos	CAESB	Estação 60435000	15° 45' S 48° 9' W		D
		Estação 60435100	15° 41' S 48° 12' W		B
		Estação 60435150	15° 42' S 48° 11' W	Diária	C
		Estação 60435200	15° 43' S 48° 10' W		E
		Estação 60435300	15° 44' S 48° 9' W		G
		Estação 60435400	15° 45' S 48° 9' W		F
Morfométrico	CAESB/ Magma	-	-	Ano 2002	
Temperatura	CAESB	50 m da barragem	15°46 'S 48° 13' W	Mensal	A

A localização das estações de monitoramento é apresentada na Figura 4.. No ponto (A) está localizado Barragem, onde são monitorados dados limnológicos. Nos pontos(B) Chapadinha, (C) Olaria, (D) Ribeirão das Pedras,(E) Rodeador,(F) Descoberto e (G) Capão Compridosão feitos monitoramento fluviométricos. Já nos pontos (H) e (I) estão localizadas as estações de monitoramento climatológico SONDA/ INPE e INMET, respectivamente.



Figura 4.4 Localização das Estações de Monitoramento: (A) limnológica: Barragem, (B) Chapadinha, (C) Olaria, (D) Ribeirão das Pedras, (E) Rodeador, (F) Descoberto, (G) Capão Comprido, (H) climática SONDA/INPE e (I) climática: INMET. Fonte: *Google Earth Pro*, 2018.

No ponto A (Figura 4.4) está localizado o ponto de monitoramento do perfil de temperatura da água na região mais profunda do reservatório. Os dados de perfil de temperatura do

ponto A foram utilizados para calibração do modelo. Nesse ponto é medida a temperatura em seis profundidades diferentes: na superfície, a um metro da superfície, a cinco metros da superfície, a dez metros da superfície, a quinze metros da superfície e a um metro do fundo.

Dados de temperatura do sedimento foram considerados como dados medidos de temperatura do solo a 60 cm de profundidade. Os dados estavam no passo de tem de 30 min entre os anos de 2013 e 2018, esses dados foram fornecidos pelo INMET. Os dados gerados para a simulação foram: temperatura média, dia do ano em que ocorre o pico de temperatura e amplitude térmica. A temperatura média foi calculada como a temperatura média da série, o dia do ano em que ocorre o pico de temperatura foi selecionado identificando o dia em do ano em que a temperatura foi mais alta e a amplitude térmica foi calculada subtraindo a menor da maior temperatura do solo da série de dados.

### **4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA POR MEIO DO GLM**

O processo de modelagem do GLM foi subdivido em duas fases. Na primeira fase foi realizada a simulação do GLM com o banco de dados usando os valores *default* do modelo. Já na segunda fase foi realizada a automatização da calibração, verificação e análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo.

#### **4.3.1 Simulação com GLM**

A simulação hidrodinâmica com o GLM foi realizada utilizando a interface do programa R e RStudio. Os pacotes mais importantes foram *glmtools* (Read *et al.*, 2014) e *GLMr* (Hipsey *et al.*, 2014). O primeiro é um pacote criado para interagir com o GLM, inclui funções básicas para calcular derivadas físicas e propriedades térmicas. Além disso, possui algumas funcionalidades de plotagem.

Já o *GLMr* pode ser considerado o coração da modelagem hidrodinâmica do GLM, é nele que se encontra o código-fonte do modelo. Para as saídas do modelo foi utilizado o pacote *rLakeAnalyzer*, (Read *et al.*, 2011) criado para trabalhar com dados de lagos e reservatórios, que apresenta um código mais refinado para se trabalhar com gráficos de lagos quando comparado ao *glmtools*.

Assim que os arquivos necessários para a simulação estavam parametrizados de acordo com as exigências do modelo, foram feitas algumas considerações.

- Optou-se por realizar a simulação e calibração com início em 01/02/2007 e término 31/12/2012; esse período foi definido considerando os dados disponíveis;
- Foram desconsideradas as trocas de fluxos do fundo do reservatório com águas subterrâneas, pois ainda não se tem muito conhecimento sobre esse fenômeno na área de estudo;
- O volume de controle considerado para a simulação foi o do próprio reservatório como um todo;
- Os afluentes considerados foram os tributários: rio Descoberto, córrego Chapadinha, córrego Capão Comprido, ribeirão Rodeador, ribeirão das Pedras e ribeirão Olaria;
- A vazão de saída foi considerada como a soma entre a vazão da captação de água pela CAESB e a vazão a jusante da barragem do reservatório;
- O passo de tempo dos dados meteorológicos foi horário e o passo de tempo para os dados fluviométricos e dados de saída do modelo foram diários.

Para a realização da primeira simulação, e de todas as outras seguintes, foi necessário desenvolver um algoritmo em linguagem R para executar o modelo. Esse algoritmo criava uma conexão entre os arquivos de dados de entrada com o arquivo executável do modelo. Nesse algoritmo também continha comandos capazes de extrair os dados gerados pelo modelo e utilizar as métricas necessárias para a avaliação da confiabilidade da simulação. O *script* criado para simulação é apresentado no Apêndice A.

A primeira simulação foi realizada com os parâmetros *default* sugeridos pelo modelo. Essa etapa, sem calibração, foi verificada por comparação gráfica e computação da estatística *Root Mean Square Error*- RMSE (raiz do erro quadrado médio) entre os dados de temperatura simulados e observados (Equação 4.1).

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum [\theta_{sim}(t_i, d_j) - \theta(t_i, d_j)]\right)} \quad (\text{Equação 4.1})$$

$\theta_{sim}$  é a temperatura simulada (°C) na profundidade  $d$  e tempo  $t$ ;

$\theta$  é a temperatura observada ( $^{\circ}\text{C}$ ) na profundidade  $d$  e tempo  $t$ ;  
 $n$  é número de dados.

Esse processo tinha como objetivo avaliar visualmente e estatisticamente o comportamento da temperatura da coluna d'água simulada em comparação com a temperatura observada. Esse processo pode indicar se o modelo apresenta bons resultados dispensando a calibração, ou se a parametrização inicial é suficiente para fornecer respostas satisfatórias estatisticamente.

### 4.3.2 Automatização da calibração

Observada a necessidade de calibração, optou-se por empregar a calibração automática dos parâmetros sugeridos pelo modelo. Para a automatização da calibração do modelo GLM buscou-se implementar um algoritmo de otimização que fosse eficiente, e assim reduzir o esforço computacional, e por isso foi selecionado o *Particle Swarm Optimization*–PSO. Outro fator importante nessa decisão foi a facilidade de implementação utilizando a interface do programa R. O R possui um pacote chamado *hydroPSO* (Zambrano-Bigiarini e Rojas, 2014) e nesse pacote é encontrado o algoritmo PSO, entre outras funções a ele relacionadas.

O PSO é um método de otimização de funções não lineares contínuas. Esse método é baseado em teorias de vida artificial, tais como comportamento dos pássaros, peixes e enxames. Conceitualmente, o método PSO possui características de algoritmos genético, pois as partículas são ajustadas de acordo com a direção da melhor partícula. Ademais, o método possui similaridades com programação evolucionária, isso porque o método PSO é altamente dependente de eventos aleatórios (Kennedy e Eberhart, 1995).

De maneira simplificada, o método “lança” uma série de partículas (que são valores aleatórios) no espaço, e a cada iteração é verificada qual das partículas está mais próxima da função objetivo (“melhor”). Identificada a melhor partícula todas as outras partículas são deslocadas na direção dessa partícula. Na próxima iteração o PSO identifica novamente a partícula mais próxima da função objetivo, que pode ou não ser a mesma partícula da iteração anterior. Esse processo ocorre até a última iteração programada.

A função objetiva empregada foi a minimização da RMSE. A configuração da rotina de calibração foi 1500 partículas com 1000 iterações. O critério de parada foi o número de iterações estabelecidas. Os parâmetros selecionados para a calibração são apresentados na Tabela 4.2, assim como os valores padrões usados na primeira iteração da calibração e os limiares de cada um deles.

Tabela 4.2 Valores padrões dos parâmetros recomendados pelo pacote glmtools e seus limiares empregados na calibração automática.

Símbolo do Parâmetro	Descrição	Parâmetro default	Limiar de calibração	Referência
$h_{max}$	Espessura máxima para as camadas	1,5	-	Hipsey <i>et al.</i> (2014)
$h_{min}$	Espessura mínima para as camadas	0,5	-	Hipsey <i>et al.</i> (2014)
$K_w$	Coefficiente de extinção de luz	0,6	0,486 – 3,778	$K_w = 1,7/\text{secchi}$ Poole e Atkins (1929)
$C_K$	Eficiência da mistura- agitação	0,125	0,13 - 0,38	Fisher <i>et al.</i> (1979) e Sherman <i>et al.</i> (1978)
$C_w$	Eficiência de mistura - agitação do vento	0,23	0,23 – 2,50	Spigel <i>et al.</i> (1986)
$C_S$	Eficiência da mistura – cisalhamento	0,2	0,1 – 0,3	Sherman <i>et al.</i> (1978)
$C_T$	Eficiência da mistura - exigência cinética	0,51	0,50 – 0,51	Fisher <i>et al.</i> (1979) e Hipsey <i>et al.</i> (2014)
$C_{HYP}$	Eficiência de mistura da turbulência hipolimnética	0,5	0,50 – 0,80	Weinstock (1981)
$C_{KH}$	Eficiência de mistura – ondas turbulentas de Kelvin-Helmholtz	0,3	-	Sherman <i>et al.</i> (1978)
$C_E$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de calor latente	0,0013	0,0008-0,0016	Fisher <i>et al.</i> (1979)
$C_H$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de calor sensível	0,0013	0,0008-0,0016	Fisher <i>et al.</i> (1979)
$C_D$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de momento	0,0013	0,0010-0,0015	Fisher <i>et al.</i> (1979)
$f_w$	Fator de correção do vento	1	0,01-2,00	

O manual do modelo (Hipsey *et al.*, 2014) recomenda a calibração dos parâmetros  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$ ,  $K_W$ ,  $C_K$ ,  $C_W$ ,  $C_S$ ,  $C_T$ ,  $C_{HYP}$ ,  $C_{KH}$ ,  $C_E$ ,  $C_H$  e  $C_D$  (Tabela 4.2), além desses parâmetros, o coeficiente de correção do vento também foi calibrado ( $f_W$ ). Os limites utilizados para  $f_W$  foram os valores 0,01 a 2,00.

O valor de  $h_{\min}$  foi mantido fixo de 0,5 m, essa decisão foi tomada considerando os dados de temperaturas medidas empregados na calibração. Como o intervalo mínimo de medição de temperatura é de um metro, ao adotar um valor de 0,5, sugerido como *default* do manual (Hipsey *et al.*, 2014), não haverá perda de dados durante a simulação. A partir de um raciocínio similar adotou-se o  $h_{\max}$  com valor fixo de 1,5 m, também sugerido pelo manual (Hipsey *et al.*, 2014), na pior das hipóteses o que aconteceria seria apenas 2 ou mais camadas de 1,5 m com o mesmo valor de temperatura. Uma grande vantagem dessas decisões foi a redução do esforço computacional durante a calibração.

A eficiência de mistura – ondas turbulentas de Kelvin-Helmholtz ( $C_{KH}$ ) é definida por Sherman *et al.* (1978) como um valor fixo de 0,3. Os autores afirmam que este valor é “uma regra de ouro”, e, portanto foi mantido constante. Em simulação utilizando o GLM outros autores utilizaram esse mesmo valor: Rose *et al.*, (2016), Weber *et al.* (2017) e Buech, Hamilton e Vetter (2017).

Os limites do valor de  $K_W$  foram estabelecidos a partir do valor máximo e mínimo do calculados no período de 2007 a 2013. Os valores de  $K_W$  foram calculados usando os dados medidos da profundidade do *Secchi* por meio da Equação 4.2 :

$$K_W = \frac{1,7}{Secch} \quad (\text{Equação 4.2})$$

### 4.3.3 Análise de sensibilidade

O método empregado para analisar a sensibilidade dos parâmetros desenvolvido por Griensven *et al.* (2006), chamado LH-OaT (Latin Hipercube- One factor At a Time). É um método recomendado para análise de sensibilidade de modelos hidrológicos com muitos parâmetros. O LH-OaT utiliza as vantagens do método local de análise de sensibilidade One factor At a Time (OaT) combinadas com as vantagens do método global Latin Hipercube (LH). Isso porque métodos globais (LH), apesar de conseguirem fornecer bons resultados

considerando todos os parâmetros globalmente, exigem grande esforço computacional e isso pode tornar esse método não muito vantajoso. Em contrapartida, métodos locais (OaT) não necessitam de muito esforço computacional, mas não são capazes de fornecer uma análise de sensibilidade global para todos os parâmetros (Griensven *et al.*, 2006).

Inicialmente, o método obtém N pontos de amostras de LH para N intervalos, e em seguida varia para cada ponto LH vezes P mudando cada um dos parâmetros P um de cada vez. O método trabalha por meio de laços de iterações, cada laço começa com um ponto de LH, e um efeito parcial percentual para cada parâmetro é calculado. O efeito final é calculado como sendo a média dos efeitos parciais de cada laço de iteração para todos os N laços. No final, os parâmetros podem ser classificados quanto a sensibilidade (Griensven *et al.*, 2006).

A análise de sensibilidade teve como objetivo identificar os parâmetros mais sensíveis da modelagem do reservatório do Descoberto-DF, e assim analisar como isso influencia na dinâmica térmica do reservatório e na calibração do modelo.

#### **4.3.4 Verificação da Calibração e Análises de Cenários**

Concluída a etapa de calibração automatizada, deu-se início a etapa da verificação e análises de cenários utilizando os parâmetros do modelo calibrado. A verificação foi feita utilizando dados de 2013. Os dados de temperatura simulados foram confrontados com os dados observados para analisar a resposta do modelo a dados reais.

As projeções para o bioma do Cerrado, baseadas nos resultados científicos de modelagem climática global e regional indicam: aumento de 1°C na temperatura superficial com diminuição percentual entre 10% a 20% da chuva durante as próximas três décadas até 2040 (Menezes *et al.*, 2016). Diante disso, foram propostos 5 cenários com diferentes condições de precipitação e temperatura atmosférica para serem simulados pelo modelo GLM após a calibração dos parâmetros. Para a simulação dos cenários foi utilizado o mesmo banco de dados empregados para a calibração (2007-2012).

No primeiro cenário a temperatura do ar foi aumentada em 1°C (C1). No segundo cenário a precipitação foi reduzida em 15% (C2) e no terceiro cenário a temperatura do ar foi

aumentada em 1°C ao mesmo tempo em que a precipitação foi reduzida em 15% (C3). A fim de comparar a sensibilidade da influência da temperatura do ar e da precipitação na temperatura do reservatório foram propostos mais dois cenários, um cenário com o aumento de 5% na temperatura do ar (C4), o que resulta no aumento de 1°C na temperatura média atmosférica e outro cenário com a redução de 30% da precipitação (C5).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o trabalho considerando as etapas de elaboração do banco de dados, simulação GLM, calibração GLM, verificação e análise dos cenários gerados a partir do modelo calibrado.

### 5.1 ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS

A elaboração do banco de dados teve início com a análise da consistência e frequência dos dados fornecidos pelas instituições já citadas (item 4.2 da Metodologia). O percentual de falhas na série de dados de cada variável meteorológica é apresentado na Figura 5.1.

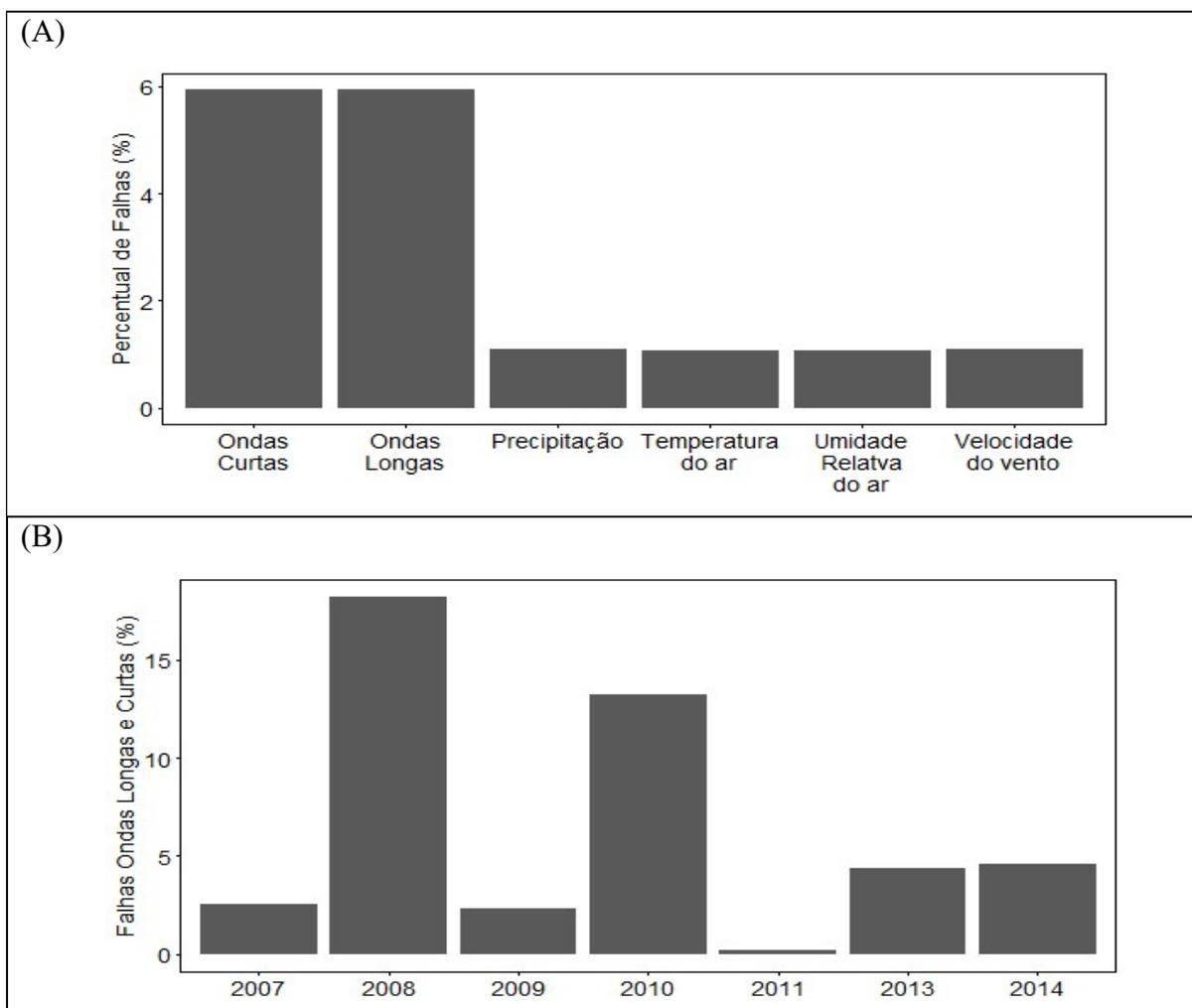


Figura 5.1 Percentual de falhas dos dados meteorológicos. (A) Falhas de ondas curtas e longas, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. (B) Percentual anual de falhas dos dados de ondas longas e ondas curtas.

Os dados que apresentaram maior percentual de falhas foram os de ondas longas e ondas curtas, com aproximadamente 6% de falhas (Figura 5.1- A). Dentro da série de dados de ondas longas e ondas curtas os anos que apresentaram maiores falhas foram 2008 e 2010, com o percentual de aproximadamente 18 e 12 %, respectivamente. O ano em que houve o menor percentual de falha foi de 2011 com valor de aproximadamente 0,2% (Figura 5.1- B).

Os gráficos dos dados brutos de ondas longas e ondas curtas do ano de 2008 são apresentados na Figura 5.2. Nota-se que os dados de janeiro, fevereiro e parte de março não estavam disponíveis. Essa falha nos dados foi preenchida, mas por não se tratar de dados medidos, o preenchimento das lacunas pode influenciar na precisão do ajuste do modelo, principalmente os dados de ondas longas que junto com velocidade do vento podem exercer forte influência na simulação de temperatura em ambientes lacustres (Gal *et al.* 2003, Markfort *et al.*, 2010; Winslow *et al.*, 2015 ).

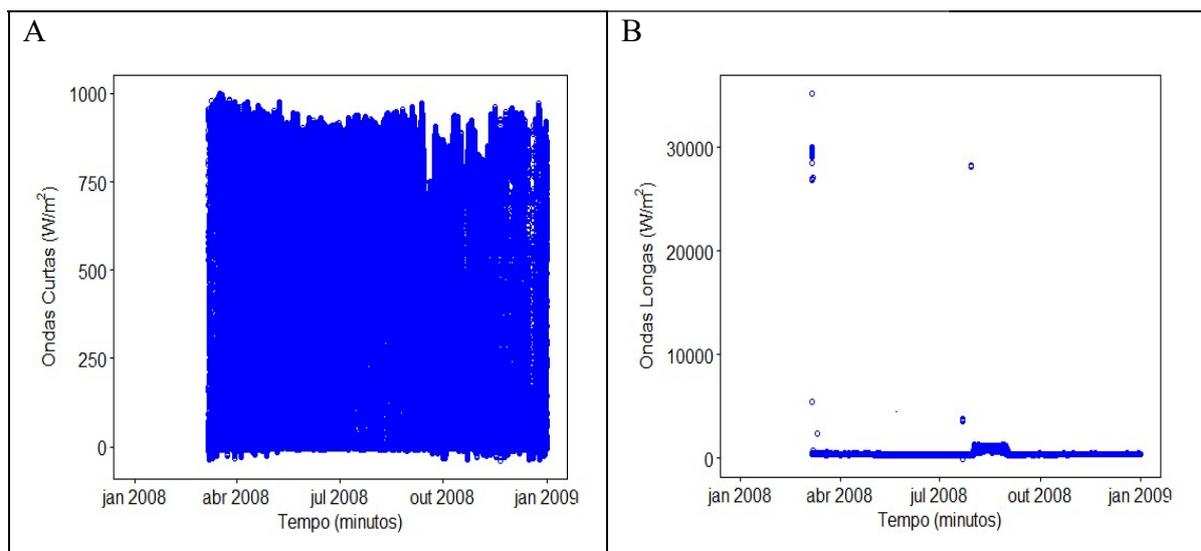


Figura 5.2 Gráficos dos dados brutos de ondas longas e ondas curtas do ano de 2008.

Na Figura 5.3 são apresentados os dados brutos de ondas longas do ano de 2008, no qual os valores de ondas longas variam de 0-1000 W/m<sup>2</sup>, nota-se que durante todo o mês de agosto os valores de radiação de ondas longas foram maiores do que o restante do período.

Os gráficos com todos os dados brutos das estações de monitoramento meteorológico (radiação de ondas longas, radiação de ondas curtas, precipitação, umidade relativa do ar,

velocidade do vento e temperatura do ar) utilizados neste trabalho são apresentados no Apêndice B.

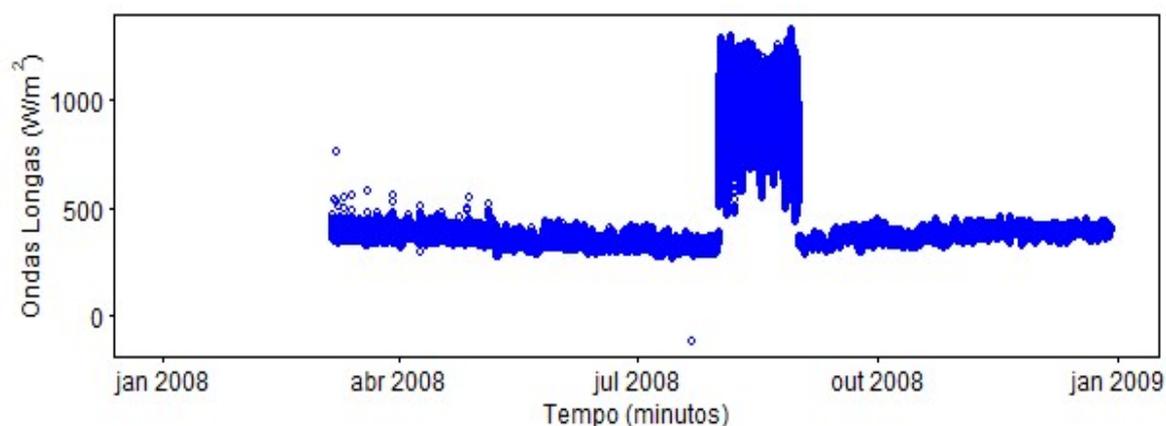


Figura 5.3 Dados brutos de ondas longas do ano de 2008.

As falhas na série de dados e os dados inconsistentes afetam a representatividade dos dados simulados, por isso a etapa de preenchimento e eliminação dos dados suspeitos deve ser feita com cautela. Dados considerados suspeitos foram: dados de velocidade do vento negativos, dados umidade relativa do ar negativos, temperatura do ar acima de  $100^{\circ}\text{C}$  e radiação de ondas longas acima de  $2000\text{ W/m}^2$ . Dados muito acima dos valores médios são suspeitos e também podem afetar o resultado final da simulação.

Nos gráficos da Figura 5.4 são apresentados os dados após a conversão de  $\text{W/m}^2\text{min}$  para  $\text{W/m}^2\text{h}$  e o preenchimento das lacunas, nessa figura é possível perceber a uniformidade dos dados após a eliminação dos dados suspeitos e preenchimento das lacunas. Essa etapa se faz necessária para buscar melhores resultados na etapa de simulação, pois as variáveis climáticas exercem influência nos processos hidrodinâmicos de lagos e reservatórios.

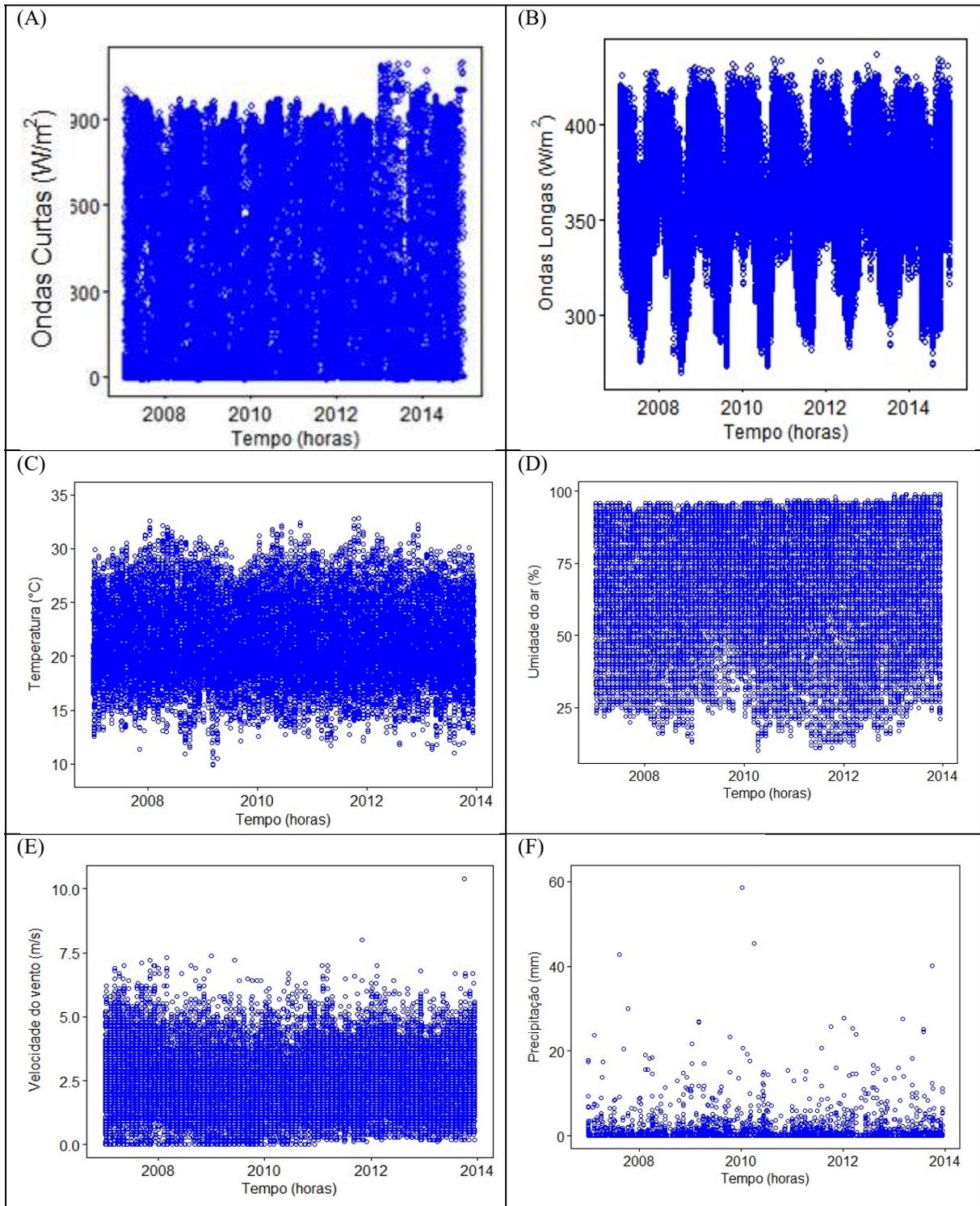


Figura 5.4 Dados meteorológicos após tratamento e preenchimento das lacunas: (A) Ondas curtas, (B) Ondas longas, (C) Temperatura do ar, (D) Umidade relativa do ar, (E) velocidade do vento e (F) Precipitação.

## 5.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA POR MEIO DO GLM

Com o banco de dados devidamente ajustado foi possível avançar para a etapa de modelagem hidrodinâmica do reservatório do Descoberto utilizando o modelo GLM. Essa etapa é subdividida em três fases: (1) automatização da calibração; (2) análise de sensibilidade e (3) verificação da calibração e análise de cenários.

Após o tratamento dos dados de entrada foi possível a simular do modelo GLM utilizando os parâmetros *default* fornecidos pelo pacote *GLMr*. Ao término da primeira simulação com os parâmetros *default* do modelo foi realizada a automatização da calibração.

### 5.2.1 Automatização da calibração

A fim de ajustar os parâmetros do GLM foi realizada a calibração do modelo, na qual a função objetivo foi a minimização do RMSE entre a temperatura observada e temperatura simulada empregando o algoritmo de otimização *Particle Swarm Optimization*–PSO. A rotina desse algoritmo está disponível no pacote R *HydroPSO*.

Na Figura 5.5 são apresentados os perfis de temperatura simulada separados anualmente. De acordo com a simulação, entre os anos de 2007 e 2012 é possível notar (Figura 5.5) que o nível do reservatório do Descoberto é maior, aproximadamente, a partir dos meses de setembro/outubro, se estendendo até maio do ano seguinte. Esse comportamento é esperado, pois é nesse período em que, geralmente, iniciam os eventos de chuva (Figura 4.1).

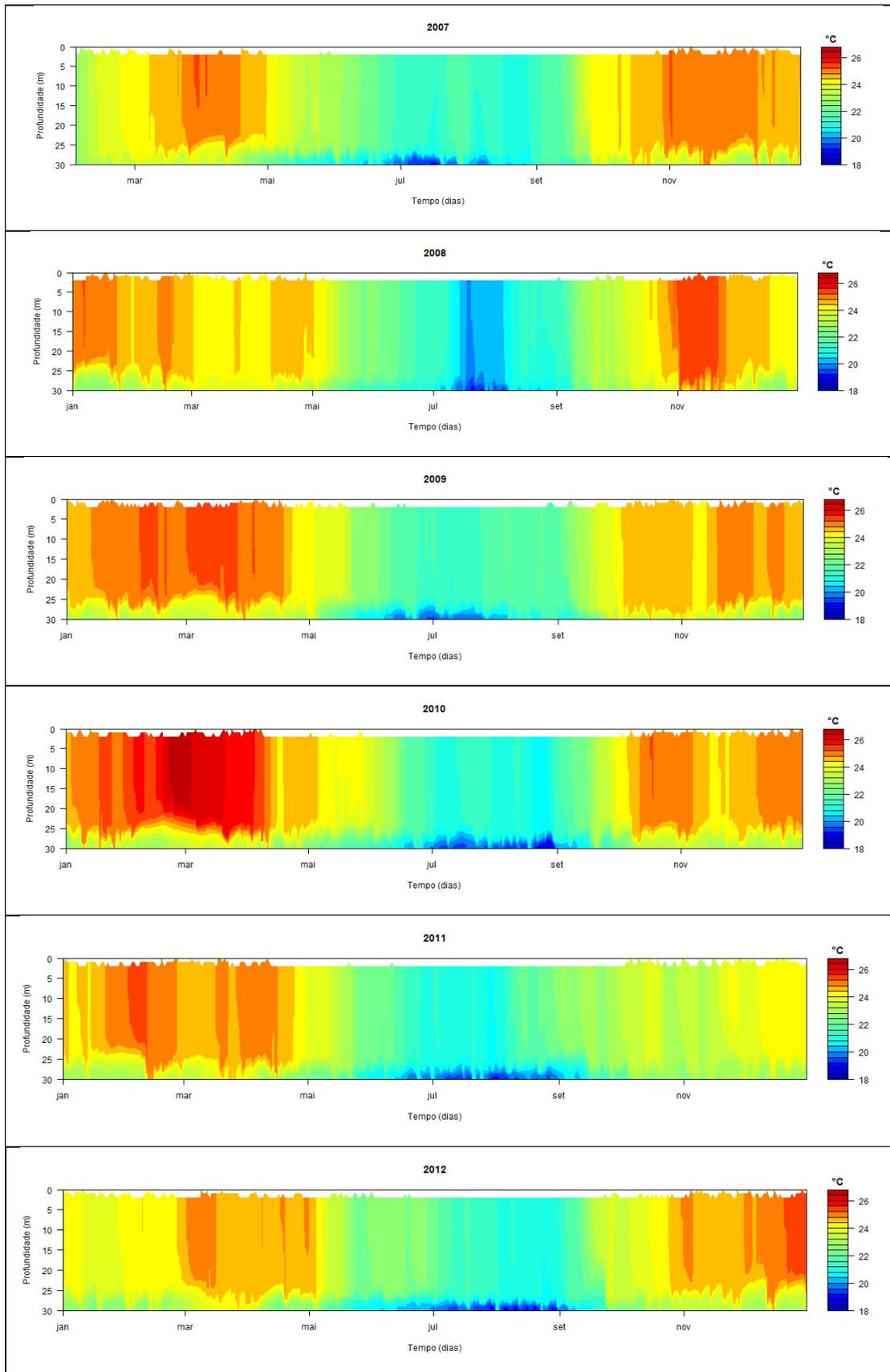


Figura 5.5 Perfil de temperatura simulada pelo GLM após a calibração do reservatório do Descoberto (2007-2012).

Na Tabela 5.1 são apresentadas as estatísticas utilizadas neste trabalho para apoiar a avaliação da qualidade da calibração da simulação.

Tabela 5.1 Valores das estatísticas empregadas para a análise da simulação.

Profundidade	Média (°C)		Máxima (°C)		Mínima (°C)		RMSE (°C)	R <sup>2</sup>
	S	O	S	O	S	O		
<b>Superficial</b>	23,6	24,2	26,7	27,7	20,0	19,8	1,20	0,66
<b>1 metro</b>	23,6	23,8	26,7	27,4	20,0	19,4	0,96	0,75
<b>5 metros</b>	23,6	23,6	26,7	26,8	20,0	19,0	0,85	0,74
<b>10 metros</b>	23,6	23,3	26,7	26,3	19,9	19,1	0,86	0,74
<b>15 metros</b>	23,6	22,8	26,7	25,4	19,9	18,2	1,01	0,73
<b>1 metro do fundo</b>	22,4	22,6	26,3	25,7	18,7	17,2	0,98	0,67

S: temperatura simulada e O: temperatura observada

Pela Tabela 5.1 nota-se que houve pouca variação entre os dados de temperatura superficial e a 1 metro da superfície, tanto na média quanto nos valores de máximas e mínimas temperaturas, entretanto o RMSE foi maior na superfície da água quando comparado com a temperatura a 1 metro. Os maiores R<sup>2</sup>, ocorreram nas camadas de profundidades intermediárias, assim como RMSE. Embora a diferença entre os dados simulados e observados tenha sido de até 1°C para temperaturas máximas e mínimas, os valores médios ficaram bem próximos.

Utilizando os parâmetros com valores *default* o RMSE da temperatura ao longo da coluna d'água gerado pelo modelo foi de 8,96°C e após a calibração o RMSE da série toda 1,01 °C. O valor de RMSE médio obtido por Read *et al.* (2014) foi de 2,78°C para toda a coluna d'água, sendo RMSE = 1,7°C na superfície.

Os valores finais dos parâmetros após a calibração do modelo podem ser vistos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Parâmetros empregados na simulação do GLM: valores iniciais, finais, limiares e comparação com outros autores.

Símbolo	Parâmetro Calibrado	Default	Barbosa (2015)	Rose <i>et al.</i> (2016)	Bueche, Hamilton e Vetter (2017)	Weber <i>et al.</i> (2010)	Snortheim <i>et al.</i> (2017)
<b>K<sub>w</sub></b>	<b>1,92</b>	0,600	0,110	-	-	0,600	1,00
<b>C<sub>K</sub></b>	<b>0,22</b>	0,125	0,100	0,125	0,175	0,125	0,272
<b>C<sub>w</sub></b>	<b>0,92</b>	0,230	0,200	0,23	0,230	0,230	0,278
<b>C<sub>s</sub></b>	<b>0,47</b>	0,200	0,100	0,20	0,250	0,200	0,286
<b>C<sub>T</sub></b>	<b>0,50</b>	0,510	0,450	-	0,200	0,510	0,526
<b>C<sub>HYP</sub></b>	<b>0,75</b>	0,500	0,575	0,50	0,200	0,500	0,453
<b>C<sub>E</sub></b>	<b>0,0008</b>	0,0013	0,00147	-	0,0026	0,0013	0,00132
<b>C<sub>H</sub></b>	<b>0,0016</b>	0,0013	0,00137	-	0,0013	0,0013	0,00132
<b>C<sub>D</sub></b>	<b>0,0013</b>	0,0013	0,0011	-	0,0025	0,0013	0,00121
<b>f<sub>w</sub></b>	<b>1,99</b>	1,00	1,00	-	-	0,78	-

Neste trabalho o Kw que forneceu melhor ajuste de temperatura foi 1,92 (Tabela 5.2). Já em comparação com o valor de Kw encontrado por Barbosa (2015) houve bastante diferença, a autora obteve melhor ajuste da temperatura usando um Kw = 0,11 (Tabela 5.2). Buscando estudar o comportamento da circulação em lagos Pujoni (2015) empregou o GLM em duas lagoas de localizadas no estado de Minas Gerais, as lagoas: Carioca e Gambazinho. O autor simulou a temperatura da água e após a calibração chegou a um valor de Kw sendo 0,8, enquanto que neste trabalho valor de Kw foi de 1,92 (Tabela 5.2).

Os efeitos térmicos de um menor valor de Kw (águas mais claras) é aumentar o aquecimento de águas profundas e diminuir o aquecimento de águas superficiais (Tenentzap e Keller, 2008; Rose *et al.*, 2013), isto é, águas mais claras permitem que a radiação atravesse a coluna d'água e alcance maiores profundidade, distribuindo melhor a energia ao longo da coluna. O alto valor de Kw (1,92) pode indicar que ocorre maior concentração do calor nas camadas mais superficiais e, por consequência, o fundo do reservatório é mais frio (ver Figura 5.5).

Na Figura 5.6-A o maior RMSE é 1,20° C na superfície, esse comportamento pode ser atribuído à influência dos dados de ventos. A estação de monitoramento de velocidade de vento (INMET) localizada a cerca de 20 Km de distância do reservatório, os dados dessa estação podem não ter representado de maneira efetiva o comportamento dos ventos nas proximidades do reservatório do Descoberto, o que corrobora com ajuste apresentado.

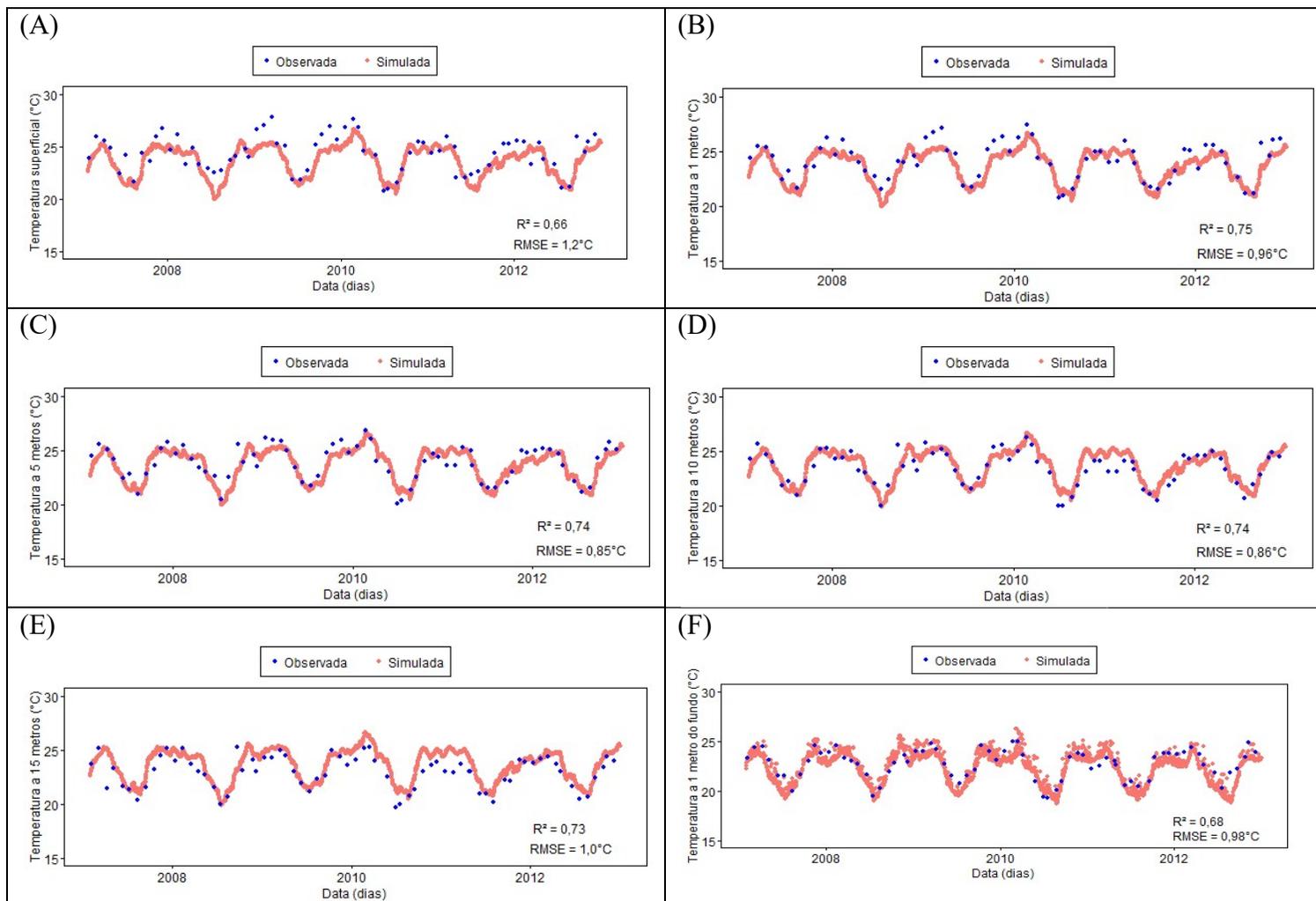


Figura 5.6 Comparação entre as temperaturas simuladas pelo modelo e observadas por profundidade(2007-2012). (A) temperatura superficial, (B) temperatura a 1 metro, (C) temperatura a 5 metros, (D) temperatura a 10 metros, (E) temperatura a 15 metros e (F) temperatura a 1 metro do fundo.

Liporoni (2012) e Barbosa (2015) também observaram ajustes de menor precisão nas camadas superficiais ao modelar a temperatura do lago Paranoá-DF. Liporoni (2012) utilizou o modelo CE-QUAL-W2 e Barbosa (2015) o GLM, os autores atribuem essa dificuldade de ajuste à influência dos ventos e também da radiação. Assim como no presente trabalho, Weber *et al.*(2010) também calibrou dos dados de velocidade do vento e mesmo assim obteve RMSE= 1,4 °C na superfície, esse valor é apenas 0,02 °C acima do valor de RMSE= 1,2 °C (Figura 5.6-A). Os trabalhos citados demonstram a dificuldade de se obter bons ajustes nas camadas mais próximas da superfície.

Gal *et al.* (2003) também notaram erros ao tentar ajustar o modelo DYRESM, entre os problemas relatados, observaram que a consistência dos dados de vento pode ter influenciado a qualidade das simulações geradas nas camadas superficiais, diante disso, os autores ressaltam que apenas uma única estação de monitoramento de vento pode não representar corretamente a heterogeneidade da distribuição de vento na superfície do lago. No presente trabalho foi utilizada apenas uma estação de monitoramento de velocidade de ventos (INMET), localizada aproximadamente 20 km do reservatório, o que pode ter sido um dos fatores que afetou a qualidade do ajuste da temperatura das camadas superficiais.

Além do vento, outro fator que pode ter influenciado o ajuste da calibração é a radiação, principalmente nas camadas superficiais, observa-se na Figura 5.6 que o pior ajuste ocorreu entre os anos de 2008 e 2010. Ademais, observando a Figura B2 (dados brutos de ondas longas) do Apêndice B nota-se irregularidade de ondas longas no mesmo período. Nesse período, de 2008 a 2010, os valores de ondas longas foram maiores quando comparados com período anterior e posterior, além disso, é possível perceber alguns picos de ondas longas acima de 2000 W/m<sup>2</sup>h.

Outro fator que pode ter dificultado o ajuste em regiões mais rasas é a evaporação. A evaporação, junto com a radiação, velocidade do vento e temperatura do ar são uns dos principais fatores que controlam a troca de calor das camadas superficiais de lagos e reservatórios. O aumento da taxa de evaporação reduz a temperatura da água e nas Figuras 5.6 A e B nota-se que a temperatura, de modo geral, está sendo subestimada, esse comportamento pode indicar que a evaporação está sendo superestimada pelo modelo.

Read *et al.* (2014) constaram, no estudo de 2368 lagos, que o maior erro ocorreu no epilímnio (RMSE= 3,33°C) e menor no hipolímnio (RMSE = 1,74°C), e o que pode ser observado neste trabalho (Figura 5.6) é um maior erro nas menores profundidade e, portanto, menor erro nas nas regiões mais profundas.

Nas primeiras tentativas de calibração foi observado que os maiores erros de ajuste, entre os dados simulados e observados, ocorriam a 1 metro do fundo, percebeu-se que os dados simulados formavam um viés de temperatura abaixo da temperatura observada. Para resolver esse problema, e ajustar o viés do erro, a função *&sed\_heat* do modelo foi ativada. A função *&sed\_heat* calcula a troca de calor entre a água do fundo do reservatório com o sedimento. Essa função requer 3 dados, os quais são apresentados a seguir:

- Temperatura média anual do sedimento: 27,79 °C
- Amplitude anual térmica do sedimento: 8,14 °C
- Dia do ano em que ocorre a maior temperatura: 52° dia

A descrição de como foram obtidos esses dados é apresentada no item 4.2, organização do banco de dados.

Após ativar a função *&sed\_heat* percebeu-se que o viés entre dos dados simulados e observados foi corrigido, e os dados modelados ficaram mais próximos dos dados observados (Figura 5.6-F). O gráfico de comparação entre os dados simulados e observados a 1 metro do fundo, antes que fosse ativada a função *&sed\_heat*, é apresentado na Figura B7 do Apêndice B.

Outros fatores que podem ter afetado o ajuste da simulação são as incertezas dos métodos e equipamentos utilizados para a obtenção dos dados de entrada, esses erros não são considerados durante a modelagem dos dados. Por se tratar de dados fornecidos por outras instituições torna-se difícil avaliar o seu grau de confiança desses, tanto dos dados de entrada, usados na simulação, quanto os dados usados para a calibração. Gal *et al.*(2003) afirmam que é possível identificar dois níveis de incertezas dos dados empregados na modelagem que são: (1) as incertezas dos dados que geram a previsão de temperatura da água e também (2) as incertezas dos dados utilizados na calibração/validação.

Erros e incertezas nos dados de campo terão, portanto, impacto tanto nas previsões do modelo quanto no processo de calibração/verificação, no qual se avalia a capacidade do modelo de reproduzir a dinâmica do ambiente. Entender as deficiências dos dados de entrada e verificação é parte integrante do teste do modelo.

### 5.2.2 Análise de sensibilidade

Neste tópico é apresentada a análise de sensibilidade dos parâmetros de calibração da simulação do reservatório do Descoberto utilizando o modelo GLM. Na Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros de calibração e sua respectiva sensibilidade.

Tabela 5.3 Classificação de sensibilidade dos parâmetros do GLM calibrados para o reservatório do Descoberto.

Parâmetro	Descrição	Ordem de sensibilidade	Importância Relativa Normalizada
$C_K$	Eficiência da mistura-agitação	1	0,137
$f_w$	Fator de correção do vento	2	0,131
$C_S$	Eficiência da mistura – cisalhamento	3	0,126
$K_W$	Coefficiente de extinção de luz	4	0,120
$C_W$	Eficiência de mistura - agitação do vento	5	0,110
$C_D$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de momento	6	0,108
$C_T$	Eficiência da mistura - exigência cinética	7	0,100
$C_{HYP}$	Eficiência de mistura da turbulência hipolimnética	8	0,073
$C_H$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de calor sensível	9	0,068
$C_E$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de calor latente	10	0,022

Observando a Tabela 5.3 percebe-se que não houve destaque para nenhum parâmetro isoladamente, os sete primeiros parâmetros mais sensíveis ( $C_K$ ,  $f_w$ ,  $C_S$ ,  $K_W$ ,  $C_W$ ,  $C_D$  e  $C_T$ ) não obtiveram grande diferença entre si, os quais apresentaram a mesma ordem de

grandeza de importância relativa normalizada variando de 0,100 a 0,137. O fato dos valores de importância relativa desses parâmetros estarem próximos indica que possuem sensibilidade parecida, e isto significa que todos são igualmente importantes para a calibração, do contrário seriam classificados com o mesmo valor de ordem de sensibilidade (Griensven *et al.*, 2006). Além disso, exceto o  $K_w$ , todos esses sete parâmetros estão relacionados a diferentes formas de ação da velocidade do vento em lagos e reservatórios.

O  $C_D$  (coeficiente aerodinâmico de massa para transferência de momento) controla o fluxo de energia adicionada pelo vento e pode variar entre os ambientes devido a topografia de cada região (Markfort *et al.*, 2010; Read *et al.*, 2014) e portanto, já era esperado que este parâmetro fosse sensível a calibração e esperava-se que a alteração desse valor fosse ajudar a melhorar o ajuste do modelo, principalmente nas camadas mais superficiais. Entretanto, o que de fato aconteceu foi que, após a calibração,  $C_D$  se manteve no valor *default* recomendado pelo manual de 0,0013 (Tabela 5.2).

O  $f_w$  que é, simplificada, um coeficiente de correção dos dados de vento foi identificado como sendo o segundo parâmetro mais sensível. Vale lembrar que a calibração desse parâmetro demonstrou que o valor ideal para  $f_w$  1,99 (Tabela 5.2), esse valor indica que os dados de velocidade de vento utilizados para essa simulação foram subestimados, e que a estação de monitoramento de velocidade de vento pode não estar oferecendo dados representativos para a região do reservatório do Descoberto.

Essas duas constatações, a sensibilidade do parâmetro relacionado ao vento e o aumento do valor de correção para melhor ajuste dos dados de temperatura, demonstram o quanto a velocidade do vento exerce influência na temperatura da água do reservatório. Ademais, Tenentzap e Keller (2008) afirmam que fatores que alteram a velocidade do vento e a atenuação da luz subaquática afetam também a dinâmica térmica de ambientes lacustres.

Entre os parâmetros mais sensíveis  $K_w$  foi o quarto mais sensível (Tabela 5.3). Read *et al.* (2014) avaliam o coeficiente de extinção de como sendo importante na sensibilidade da temperatura da água simulada quando avaliaram 2368 lagos temperados utilizando GLM. Os autores concluem que a transparência da água controla a taxa de radiação solar no que tange o comprimento de ondas visíveis que sofre um processo de atenuação à medida que

atravessa a coluna d'água, isso justifica a importância desse parâmetro para a variação de temperatura da água.

Neste trabalho, como já discutido, o valor de Kw foi de 1,92 (calibrado), entretanto os valores calculados a partir do *Secchi* variaram de 0,486 a 3,778 (Tabela 4.2), isso pode significar que, ao longo do tempo, a forma como a radiação atravessa a coluna d'água pode variar e assim afetar a temperatura da água. Portanto, se fosse possível entrar com dados diários de Kw no modelo, o ajuste da simulação poderia melhorar.

Bueche, Hamilton e Vetter (2017) também identificaram o coeficiente de extinção de luz com sendo um parâmetro sensível quando utilizaram o GLM para simular os processos térmicos do lago Ammersee, no sul da Alemanha. Os autores também observaram que o modelo GLM considera o coeficiente de extinção de luz constante em toda a simulação e que esse valor, na prática, pode ter uma variação significativa ao longo do tempo, diante disso e Bueche, Hamilton e Vetter (2017) recomendam que para as próximas versões do modelo essa variação deve ser considerada.

Quando a radiação solar atravessa a coluna d'água parte dessa radiação é transformada em calor, uma parte é assimilada pelos organismos fotossintetizantes, e outras são dispersadas ou absorvidas por partículas presentes na água. Como a radiação está diretamente relacionada à disponibilidade de luz, a passagem de luz interfere na transferência de energia em forma de calor. Esses fatores podem justificar a influência da Kw na sensibilidade da temperatura do reservatório do Descoberto.

### **5.2.3 Verificação da Calibração e Análises de Cenários**

Neste tópico é apresentada a verificação da calibração e a análise de diferentes cenários de variação de precipitação e temperatura atmosférica. Na Figura 5.7 é apresentado o perfil de temperatura simulada pelo modelo usando os parâmetros após calibrados. O RMSE desta verificação foi de 1,05 °C para todo o período.

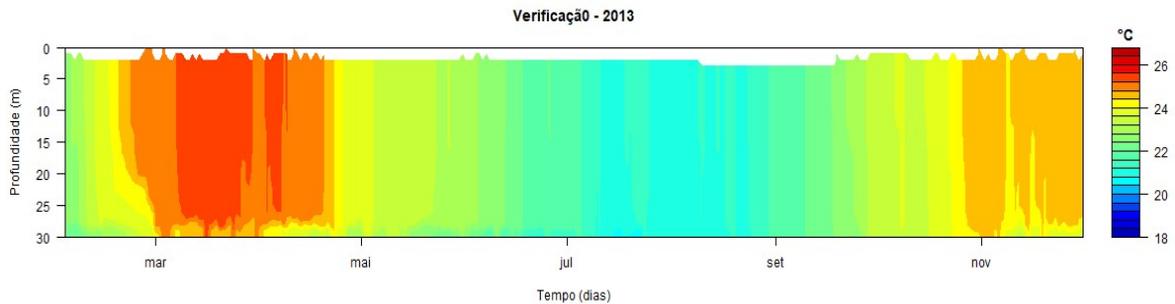


Figura 5.7 Perfil de temperatura da verificação para o ano de 2013.

O mesmo comportamento da simulação de calibração (Figura 5.5) pode ser visto na Figura 5.7 para os dados de verificação de temperatura de 2013, isso é, aumento do nível do reservatório e da temperatura a partir dos meses de setembro/outubro e terminando aproximadamente em maio, coincidindo com o período chuvoso.

Na Figura 5.8 são apresentados dados da etapa de calibração. Nessa figura são mostrados gráficos que comparam dados de temperatura observados com dados simulados, após a calibração dos parâmetros. Os melhores ajustes do modelo ocorreram nas profundidades intermediárias.

A verificação dos dados de 2013 (Figuras 5.7 e 5.8) demonstrou ser possível a obtenção uma boa representação do regime térmico do reservatório do Descoberto utilizando o modelo GLM parametrizado.

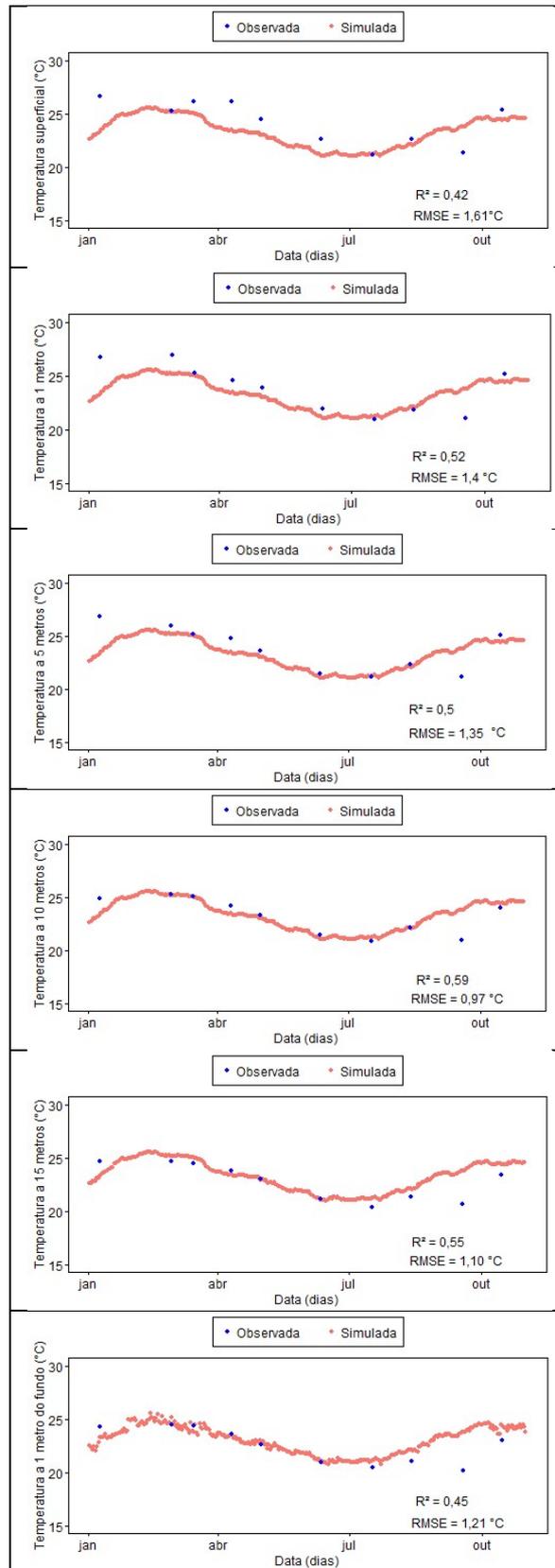


Figura 5.8 Comparação entre as temperaturas simuladas pelo modelo e observadas por profundidade no ano de 2013: (A) profundidade superficial, (B) temperatura a 1 metro, (C) temperatura a 5 metros, (D) temperatura a 10 metros, (E) temperatura a 15 metros e (F) temperatura a 1 metro do fundo.

Os cenários de variação da precipitação e temperatura atmosférica simulados neste trabalho são apresentados na Tabela 5.4.

Lembrando que no primeiro cenário a temperatura do ar foi aumentada em 1°C (C1). No segundo cenário a precipitação foi reduzida em 15% (C2), no terceiro cenário a temperatura do ar foi aumentada em 1°C ao mesmo tempo em que a precipitação foi reduzida em 15% (C3), no quarto cenário a temperatura foi aumentada em 5% (C4) e a precipitação foi reduzida em 30% (C5).

Tabela 5.4 Estatísticas empregadas para análise dos cenários de difentes condições de temperatura atmosférica e precipitação.

Cenário	Temperatura média (°C)							Temperatura mínima (°C)							Temperatura máxima (°C)						
	C1	C2	C3	C4	C5	S	O	C1	C2	C3	C4	C5	S	O	C1	C2	C3	C4	C5	S	O
<b>0m</b>	24,5	23,6	24,3	27,4	23,6	23,6	24,2	20,7	19,95	20,7	22,6	19,9	20,0	19,8	27,4	26,6	27,4	30,6	26,7	26,7	27,8
<b>1m</b>	24,3	23,6	24,3	27,4	23,6	23,6	23,8	20,7	19,95	20,7	22,6	19,9	20,0	19,4	27,4	26,6	27,4	30,6	26,8	26,7	27,4
<b>5m</b>	24,3	23,6	24,3	27,4	26,6	23,6	23,6	20,7	19,95	20,7	22,6	19,9	20,0	19,0	27,4	26,6	27,4	30,6	26,6	26,7	26,8
<b>10m</b>	24,3	23,6	24,3	27,4	23,6	23,6	23,3	20,7	19,94	20,7	22,6	19,9	19,9	19,1	27,4	26,6	27,4	30,6	26,7	26,7	26,3
<b>15m</b>	24,3	23,5	24,3	27,3	23,5	23,6	23,8	20,6	19,88	20,6	22,6	19,8	19,9	18,2	27,4	26,6	27,4	30,20	26,6	26,7	25,4
<b>1 do fundo</b>	22,7	22,3	22,7	24,1	22,9	22,4	22,6	19,0	18,66	19,6	20,8	18,6	18,7	17,2	26,3	26,1	26,9	29,1	25,6	26,3	25,7

S: Temperatura simulada e O: Temperatura observada.

Em termos de temperaturas médias o único cenário que apresentou variação de temperatura foi o cenário 4, quando comparado aos valores da simulação, isso é, considerando que a simulação apresentou RMSE de 1,01°C. Na Figura 5.9 é apresentado o perfil de temperaturas dos 5 cenários propostos e o da simulação com GLM, na qual foram utilizados dados reais.

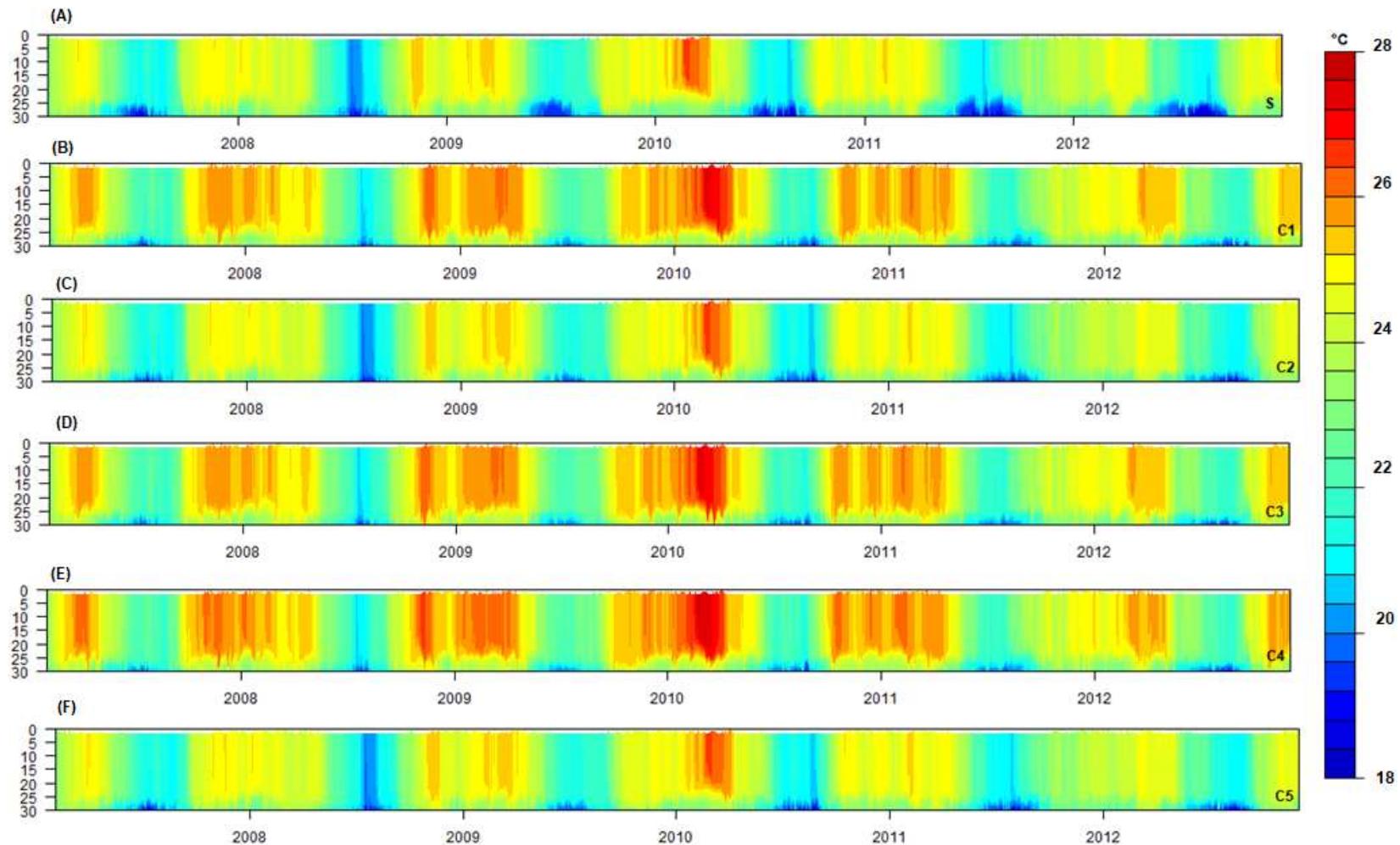


Figura 5.9 Perfil de temperatura dos cenários(2007-2012): (A) Perfil de temperatura simulada, (B) Cenário 1: aumento de 1°C na temperatura atmosférica, (C)Cenário 2: redução de 15% da precipitação, (D) Cenário 3: aumento de 1°C na temperatura atmosférica e redução de 15% da precipitação, (E) Cenário 4: aumento de 5% da temperatura e (F) Cenário 5: redução de 30% da precipitação.

Quando comparado o perfil de temperatura simulada (Figura 5.9-A) com o perfil de temperatura dos cenários 2 e 5 (Figuras 5.9-C e 5.9-F) nota-se que a redução da precipitação provocou o aumento da temperatura do fundo. Esse aumento pode ter ocorrido, pois a redução de precipitação reduz a turbulência da água e a agitação de sedimentos, que são responsáveis pelo aumento da taxa de extinção de luz. Assim, a radiação ultrapassa a colunda d'água e alcança regiões mais profundas e, assim, aumentando a temperatura.

No cenário 3 (Figura 5.9-D), no qual é combinada a redução da precipitação com o aumento da temperatura atmosférica, nota-se um aumento da temperatura. Esse comportamento pode ter sido causado apenas pelo aumento da temperatura atmosférica, já que ao comparar as Figuras 5.9-B e 5.9-D nota-se que são bem parecidos, senão iguais.

Na Figura de 5.9 não foi percebida a variação de nível, inclusive no cenário mais extremo de redução de precipitação, cenário 5 (Figura 5.13). O que pode justificar esse comportamento é o fato de não terem sido consideradas as reduções das vazões de entrada do reservatório, essas vazões podem ser mais significativas para manter o nível do reservatório do que a precipitação local.

Pequenas variações de temperaturas podem afetar comunidades de fitoplâncton mais sensíveis, ocasionando o desequilíbrio do ambiente. O aumento da temperatura pode alterar a densidade da água e, dessa forma, prejudicar organismos de baixa ou nenhuma mobilidade. Além disso, as cianobactérias, quando comparadas a outros organismos de fitoplâncton, possuem mais e melhores vantagens competitivas em ambientes quentes. Portanto, nesses cenários, o aumento da temperatura atmosférica e a redução da precipitação alteram a temperatura da água do reservatório do Descoberto e, assim, podem acarretar em eventos de florações de cianobactérias e até eutrofização.

## 6. CONCLUSÕES

Neste tópico são apresentadas as conclusões deste trabalho de acordo com os objetivos propostos.

Foi possível parametrizar e aplicar o modelo GLM para a representação térmica do reservatório do Descoberto-DF. As simulações e a verificação mostraram a variação da temperatura do reservatório do Descoberto como resposta da sazonalidade. A temperatura do reservatório aumentou próximo do verão e diminuiu no inverno, da mesma forma a redução do nível do reservatório no período de seca e o aumento após o início do período em que ocorrem os primeiros eventos de chuva.

Por meio de testes de simulações com o GLM foi possível perceber a influência que a temperatura do sedimento exerce na troca de calor com água de regiões profundas. Só foi possível obter bom ajuste de temperaturas mais profundas quando foram consideradas as trocas de calor do sedimento com a água. Com isso, percebeu-se que a temperatura do sedimento de fundo é responsável por parte do aquecimento da água em regiões mais profundas.

Analisando os cenários de diferentes condições de precipitação e temperatura atmosférica, por meio da simulação hidrodinâmica com GLM foi possível perceber que a redução de precipitação exerce maior influência no aumento da temperatura em regiões mais profundas.

Já o aumento de temperatura atmosférica influenciou o comportamento térmico do reservatório em camadas superficiais. Além disso, foi possível perceber que o aumento da temperatura do ar exerce menor influência em menores profundidades. Em nenhum dos cenários propostos foi possível perceber variação do nível do reservatório.

## 7. RECOMENDAÇÕES

O alto RMSE nas menores profundidades pode ser atribuído aos dados de velocidade de vento e de radiação em função da distância das estações de monitoramento e podem não ter representado esses fenômenos de maneira precisa. Outra hipótese levantada para justificar esse ajuste são os erros e incertezas dos métodos e equipamentos utilizados para a obtenção dos dados que não são considerados no processo de modelagem. Em função disso é recomendado instalação de novas estações de monitoramento meteorológico mais próximas da área de estudo.

Markfort *et al.*, (2010) propuseram uma equação para calcular o valor de  $C_D$  a partir de dados topográficos da região de estudo. Com isso, recomenda-se que em futuras pesquisas o valor de  $C_D$  seja calculado ao invés da utilização de um valor estimado, e assim, avaliar se ocorrerá melhor ajuste na calibração do modelo.

Recomenda-se aprofundar a complexidade das simulações de diferentes condições climáticas para que seja possível uma análise mais detalhada sobre como essas mudanças podem afetar os processos hidrodinâmicos do reservatório do Descoberto.

## REFERÊNCIAS

- Austin, J. A., and S. M. Colman (2007), Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback, *Geophysical Research Letters*, 34, L06604, doi:10.1029/2006GL029021.
- Barbosa, C. C. (2015). *Aplicação da modelagem ecológica com foco na dinâmica do fitoplâncton para avaliação da qualidade da água do lago Paranoá-DF*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília/DF, 146p.
- Bueche, T.; Hamilton, D. P.; Vetter, M. Using the General Lake Model (GLM) to simulate water temperatures and ice cover of a medium-sized lake: a case study of Lake Ammersee, Germany (2017). *Environmental Earth Sciences*, [s.l.], v. 76, n. 13, Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-017-6790-7>.
- Carvalho, L., and A. Kirika (2003). Changes in shallow lake functioning: Response to climate change and nutrient reduction, *Hydrobiologia*, 506-509(1-3), 789–796, doi:10.1023/B:HYDR.0000008600.84544.
- CTPA/CRH-DF- Câmara Técnica Permanente de Assessoramento/ Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal (2014). “Informações complementares à Nota Técnica nº 01/2014 – CTP/CRH-DF acerca da proposta de enquadramento apresentada pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba referente a trechos dos Rios Descoberto e São Bartolomeu no Distrito Federal.”. *Diário Oficial do Distrito*
- DISTRITO FEDERAL (2017) “Descoberto Coberto” Disponível em [http://www.recursoshidricos.df.gov.br/descoberto\\_coberto/historico.asp](http://www.recursoshidricos.df.gov.br/descoberto_coberto/historico.asp). Acesso: 10 de abril de 2018.
- DISTRITO FEDERAL (2017) “Plano Integrado de enfrentamento à crise Hídrica Disponível em [http://www.mpdf.mp.br/portal/pdf/eventos/crisehidrica/PLANO-INTEGRADO-DE-ENFRENTAMENTO-CRISE-HIDRICA\\_21-2-2017.pdf](http://www.mpdf.mp.br/portal/pdf/eventos/crisehidrica/PLANO-INTEGRADO-DE-ENFRENTAMENTO-CRISE-HIDRICA_21-2-2017.pdf). Acesso: 05 de Outubro de 2017
- Esteves, F. A. (coordenador). (2011). *"Fundamentos de limnologia"*. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 826p.
- Fenocchi A, Rogora M, Sibilla S, Dresti C (2017) Relevance of inflows on the thermodynamic structure and on the modeling of a deep subalpine lake (Lake Maggiore, Northern Italy/SouthernSwitzerland). *Limnol Ecol Manag Inland Waters* 63:42–56.doi:10.1016/j.limno.2017.01.006.

- Ferrigo, S. (2014). *Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática - estudo de caso da bacia do lago Descoberto-DF*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília/DF, 147p.
- Fisher, H.B.; List, E.G.; Koh, R.C.Y.; Imberger, J.; Brooks, N.H.. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, São Diego, 483p.
- Gal, G.; Imberger, J.; Zohary, T.; Antenucci, J.; Anis, A. e Rosenberg, T. (2003). "Simulating the thermal dynamics of Lake Kinneret" *Ecological Modelling*, 162, 69–86.
- Hampton, S. E., L. R. Izmet'eva, M. V. Moore, S. L. Katz, B. Dennis, and E. A. Silow (2008), Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake- Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology*, 14(8), 1947–1958, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x.
- Hipsey, M. R., Bruce, L. C., Boon, C., Busch, B., Carey, C. C., Hamilton, D. P., Hanson, P. C., Read, J. S., de Sousa, E., Weber, M., and Winslow, L. A (2017). A General Lake Model (GLM 2.4) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON), *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2017-257>.
- Hipsey, M. R.; Bruce, L. C.; Hamilton, D. P. (2013). "*Aquatic Ecodynamics (AED) Model Library. Science Manual Draft v4*". The University of Western Australia, Perth, Austrália, 33p.
- Hipsey, M. R.; Bruce, L. C.; Hamilton, D. P. (2014). "*GLM - General Lake Model: Model overview and user information. AED Report #26*". The University of Western Australia, Perth, Austrália, 42p.
- Imberger, J. and Patterson, J.C. (1981). A dynamic reservoir simulation model-DYRESM: 5. In: H.B. Fisher (ed.), *Transport Models for Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York: 310-361.
- Imboden, D. M. & Wüst, A. (1995), *Mixing mechanisms in lakes*, In A. Lerman, D. M. Imboden & J. R. Gat, eds, 'Physics and Chemistry of Lakes', Springer Verlag, pp. 83–138.4
- Kennedy, J., Eberhart, R.. (1995). Particle Swarm Optimization. *Neural Networks*, 4(1), 1942-1948.
- Liporoni, L. M. (2012). *Estudo preliminar da qualidade da água do Lago Paranoá, Brasília –DF, utilizando um modelo de qualidade de água bidimensional*.

- Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188p
- Livingstone, D. (2003), Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake, *Climatic. Change*, 57, 205–225.
- MAGNA - Magna Engenharia Ltda. (2002). Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para Elevação da Crista do Vertedouro. *Levantamentos Topobatimétricos. Volume II*, P.ECA.BRD.001.
- Markfort, C. D.; Perez, A. L. S.; Thill, J. W.; Jaster, D. A.; Porté-Agel, F. e Stefan, H. G. (2010). “Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography”. *Water Resources Research*, 46.DOI:10.1029/2009WR007759.
- Menezes, L. S. (2010). *Mudanças climáticas no DF e ride: detecção e projeções das mudanças climáticas para o distrito federal e região integrada de desenvolvimento do DF e entorno*. ACE Comunicação e Editora, 192p.
- Mooij, W. M.; Trolle, D.; Jeppesen, E.; Arhonditsis, G.; Belolipetsky, P. V.; Chitamwebwa, D. B. R.; Degermendzhy, A. G.; DeAngelis, D. L.; SenerpontDomis, L. N. D; Downing, A. S.; Elliott, J. A.; Gaedke, U.; Genova, S. N.; Gulati, R. D.; Håkanson, L., Hamilton, D. P., Hipsey, M. R., Hoen, J., Hulsmann, S., Los, F. H, Makler–Pick, V., Petzoldt, T., Prokopkin, I. G., Rinke, K., Schep, S. A., Tominaga, K., Dam, A. A., Nes, E. H., Wells, S. A., Janse, J. H., Fragoso, C. R. (2010). “Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches”. *Aquatic Ecology*, 44 (3), 633 – 667.
- Moreno-Ostos, E. Marcé, R., Ordóñez, Dolz, J., Armengol, J. Hydraulic Management Drives Heat Budgets and Temperature Trends in a Mediterranean Reservoir. *International Review Of Hydrobiology*, [s.l.], v. 93, n. 2, p.131-147, maio 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/iroh.200710965>.
- O’Reilly, C. M., S. R. Alin, P.-D. Plisnier, A. S. Cohen, and B. A. McKee (2003), Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of LakeTanganyika, Africa. *Nature*, 424(6950), 766–8, doi:10.1038/nature01833.
- Obrador, B.; Jones, I. D.; Jennings, E.. (2016). "*NETLAKE toolbox for the analysis of high-frequency data from lakes. Technical report*".NETLAKE COST Action, on line, disponível em <http://eprints.dkit.ie/id/eprint/530>, 60p. on Environmental Models. R package version 0.3-4.”

- Poole, H.H., Atkins, W.R.G., (1929). Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K. (New Series)* 16, 297–324.
- Pujoni, D.G.F. (2015). *Padrões Espaço-Temporais da comunidade planctônica do complexo lacustre do Médio Rio Doce*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas, Belo Horizonte, MG, 158p.
- Read, J.S. Hamilton, D.P, Jones, I.D. Muraoka, K L. Winslow, Kroiss, A. R. C.H. Wu, E. Gaiser (2011), Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data *Environ. Model. Software*, 26, 1325-1336.
- Read, J. S.; Winslow, L. A.; Hansen, G. J. A.; Den Hoek, J. V.; Hanson, P. C.; Bruce, L. C.; Markfort, C. D. (2014). "Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology". *Ecological Modelling*, **291**(1), 142-150.
- Rinke, K., Yeates, P., Rothhaupt, K.-O (2010). A simulation study on the feedback of phytoplankton on thermal structure via light extinction. *Freshwater Biology*, 55 (8) (2010), 1674-1693, 10.1111/j. 1365-2427.2010.02401.x.
- Rose K.C., Winslow L.A., Read J.S., Hansen GJA (2016) Climate induced warming of lakes can be either amplified or suppressed by trends in water clarity. *Limnology Oceanography Letters* 1(1):44–53.doi:10.1002/lol2.10027
- Schmid, M., S. Hunziker, and A. Wuest. (2014). Lake surface temperatures in a changing climate: A global sensitivity analysis. *Climatic Change* 124: 301–315
- Schmolke, A., P. Thorbek, D. L. DeAngelis & V. Grimm (2010). Ecological models supporting environmental decision-making: a strategy for the future. *Trends in Ecology & Evolution* 25: 479–486.
- Sherman, F. S., Imberger, J. Corcos, G. M.. (1978). *Turbulence and mixing in stably stratified water*. *Fluid Mech*, 10(1), 267-288.
- Silva, G. V.. (2009). *Simulação bidimensional da qualidade da água do lago do Descoberto (DF/GO)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília/DF, 117p.
- Snortheim, C.A.; Hanson, P. C.; McMahon, K. D.; Read, J.S.; Carey, C.C.; Dugan, H. A.. (2017). Meteorological drivers of hypolimnetic anoxia in a eutrophic, northtemperate lake. *Ecological Modelling*, 343, 39-53.
- Spigel, R. H. Imberger, J. Rayner, K. N.. (1986). 'Modeling the diurnal mixed layer '. *Limnology and Oceanography*, 31(1), 533-556.

- Tanentzap, A., N. Yan, and B. Keller (2008), Cooling lakes while the world warms: Effects of forest regrowth and increased dissolved organic matter on the thermal regime of a temperate, urban lake, *Limnology and Oceanography*, 53(1), 404–410.
- UNESCO. 1981. *Technical papers in Marine Science*. No. 36.
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., Srinivasan, R.. (2006). 'A global sensitivity analysis tool for the parameters'. *Journal of Hydrology*, 10(23), 10-23.
- Weber, M.; Rinke, K.; Hipsey, M. R.;Boehrer,B. (2017). 'Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia'. *Journal of Environmental Management*, 197, 96-105.
- Weinstock, J., 1981.Vertical turbulence diffusivity for weak or strong stable stratification. *Journal of Geophysical Research* , 86(C10): 9925-9928.
- Winslow, L. A., J. S. Read, G. J. A. Hansen, and P. C. Hanson (2015), Small lakes show muted climate change signal in deep water temperatures, *Geophys. Res.Lett.*, 42, 355–361, doi:10.1002/2014GL062325.
- Yao, H.; Samal, N. R.; Joehnk, K. D.; Fang, X.; Bruce, L. C.; Pierson, D. C.; Rusak, J. A.; James, A.. (2014). "Comparing ice and temperature simulations by four dynamic lake models in Harp Lake: past performance and future predictions". *Hydrol. Process.*,**28**(1), 4587-4601.
- Zambrano-Bigiarini, M., and Rojas, R. (2014). “Particle Swarm Optimisation, with focus

## ANEXO A

Nesse apêndice são apresentadas algumas equações utilizadas pelo modelo GLM as quais não são complementares às que foram apresentadas no texto desta dissertação:

**Irradiância Total ( $\hat{\phi}_{SW}$ ):**

$$\hat{\phi}_{SW} = \frac{\hat{\phi}_{DB} + \hat{\phi}_{AS}}{1 - (\alpha_{SW} \alpha_{SKY})} f(c) \quad (A1)$$

Onde:

$\hat{\phi}_{DB}$ : irradiância direta;

$\hat{\phi}_{AS}$ : irradiância dispersada pela atmosfera;

$\alpha_{SKY}$ : albedo para o céu.

$$\alpha_{SKY} = 0,068 + (1 - 0,841(1 - \frac{T_{aerosol}}{T_{aa}})) \quad (A2)$$

$T_{aerosol}$  é dado pela equação:

$$T_{aerosol} = e^{(TauA)^{0,873}(1+TauA-TauA^{0,7088})AM^{0,9108}} \quad (A3)$$

$T_{auA}$  é dado pela equação:

$$TauA = 0,2758AOD_{380} + 0,35AOD_{500} \quad (A4)$$

Onde:

$AOD_{380}$ : Profundidade ótica aerosol 380 nm;

$AOD_{500}$  Profundidade ótica aerosol 500 nm.

AM é dado pela equação:

$$AM = \left[ \cos(\Phi_{zen}) + \frac{0,15}{(93,885 - \Phi_{zen}^{1,25})} \right]^{-1} \quad (A5)$$

Onde  $\Phi_{zen}$  é o ângulo zenital solar em radianos da local de estudo.

E  $T_{aa}$  é dado pela equação

$$T_{aa} = 1 - [0,1(1 - AM + AM^{1,06})(1 - T_{aerosol})] \quad (A6)$$

**Albedo de ondas curtas ( $\alpha_{SW}$ ) pode ser calculado de 3 formas:**

Opção 1

$$\alpha_{SW} = \begin{cases} 0,08 + 0,02 \sin \left[ \frac{2\pi}{365} d - \frac{\pi}{2} \right] & \text{hemisfério norte} \\ 0,08 & \text{equador} \\ 0,08 - 0,02 \sin \left[ \frac{2\pi}{365} d - \frac{\pi}{2} \right] & \text{hemisfério sul} \end{cases} \quad (A7)$$

Opção 2

$$\alpha_{SW} = \frac{1}{100} \left( \frac{2,6}{1,1 \cos(\Phi_{zen})^{1,7} + 0,065} + 15[\cos(\Phi_{zen}) - 0,1][\cos(\Phi_{zen}) - 0,5][\cos(\Phi_{zen}) - 1] \right) \quad (A8)$$

Opção 3

$$\alpha_{SW} = 0,001 RH [\cos(\Phi_{zen})]^{0,33} - 0,001 U_x [\cos \Phi_{zen}]^{-0,57} - 0,001 \zeta [\cos(\Phi_{zen})]^{0,829} \quad (A9)$$

A densidade do ar ( $\rho_a$ ) é dada pela equação:

$$\rho_a = \frac{0,348(1+r)}{(1+1,61r) \frac{P}{T_a}} \quad (A10)$$

Onde:

r: é a taxa de mistura;

P: pressão do ar (hPa);

$T_a$ : Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ).

A emissividade da atmosfera depende da temperatura do ar ( $T_a$ ) e da fração de cobertura por nuvens (C) e pode ser calculada por meio de quatro equações diferentes:

Opção 1

$$\varepsilon_a^* = (1 + 0,275C)(1 - 0,261 \exp[-0,0007777T_a^2]) \quad (A11)$$

Opção 2

$$\varepsilon_a^* = (1 + 0,17C^2)(9,365 \times 10^{-6}[T_a + 273,15]^2) \quad (A12)$$

Opção 3

$$\varepsilon_a^* = (1 + 0,275C) 0,642 \left(\frac{e_a}{T_a}\right)^{1/7} \quad (A13)$$

Opção 4

$$\varepsilon_a^* = (1 - C^{2,796}) 1,24 \left(\frac{e_a}{T_a}\right)^{1/7} + 0,955 C^{2,796} \quad (A14)$$

A escala de velocidade turbulenta associada à convecção ( $w_*^3$ ) é dada pela equação:

$$w_*^3 = \frac{g}{\rho_{SML}\Delta t} \left( \sum_{k=K}^{N_{LEV}} [\rho_k \Delta z_k \widetilde{h}_k] - \widetilde{h}_{SML} \sum_{k=K}^{N_{LEV}} [\rho_k \Delta z_k] \right) \quad (A15)$$

Onde:

$g$ : gravidade ( $m/s^2$ )

$\rho_{SML}$ : densidade média da camada de mistura ( $Kg/m^3$ )

$\rho_k$ : densidade da k-ésima camada ( $Kg/m^3$ )

$\Delta z_k$ : diferença entre as alturas das camadas sequenciais (m)

$\widetilde{h}_k$ : altura média entre as camadas sequenciais

$\widetilde{h}_{SML}$ : altura média do epilímnio (m)

$N_{LEV}$ : número de camadas

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

Neste apêndice é apresentado o *script* (Tabela A1) em linguagem R criado para a simulação e calibração da temperatura do reservatório do Descoberto por meio do *General Lake Model*. No *script* também são apresentados comandos para gerar gráficos e planilhas contendo os dados de saída gerados pelo modelo.

Tabela A1: Sequência de comando para executar o GLM

```
library(glmtools)
library(GLMr)

sim_folder <- "C:/Users/anaal/Documents/Simulacao"

nml_file <- paste0(sim_folder, "/glm2.nml")

nml <- read_nml(nml_file)

nc_file <- file.path(sim_folder, 'output.nc')

run_glm(sim_folder)

field_file <- file.path(sim_folder, "field_file2.csv")

temp_rmse <- compare_to_field(nc_file, field_file, metric = 'water.temperature')

plot_temp(file = nc_file, reference = "surface")

temp_surf <- get_temp(file = nc_file, reference = "surface", z_out =
  c(0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,27,28,29,30))

write.csv(temp_surf, "C:/Users/anaal/Documents/Simulacao/Simulacao.csv")
```

Nos próximos parágrafos é feita uma breve descrição dos comandos apresentados na Tabela 1

- *library (GLMr)*: Este comando habilita com pacote GLMr, neste pacote encontra-se o código fonte que executa o modelo GLM.
- *library(glmtools)*: Este comando habilita o pacote glmtools, no qual é contido comandos de apoio para manipular o GLM por meio da linguagem R.
- *sim\_folder <- "C:/Users/anaal/Documents/Simulacao"*: Este comando cria uma variável (*sim\_folder*) com o caminho do diretório onde todos os arquivos relacionados à simulação serão armazenados.
- *nml\_file<-paste0(sim\_folder,"/glm2.nml")*: Este comando cria uma variável com o caminho para leitura do arquivo de configuração do modelo *glm2.nml*.
- *nml<-read\_nml(nml\_file)*: Este comando faz a leitura do arquivo *glm2.nml* armazenando seus atributos na variável *nml*.
- *nc\_file <- file.path(sim\_folder, 'output.nc')*: Este comando cria um arquivo de saída para os dados gerados após a modelagem no caminho diretório armazenado na variável *sim\_folder*.
- *run\_glm(sim\_folder)*: Este comando executa o GLM.exe utilizando os arquivos armazenados no diretório com o caminho descrito na variável *sim\_folder*. Este executável (GLM.exe) contém as equações do GLM.
- *field\_file <- file.path (sim\_folder, "field\_file.csv")*: Este comando compara dados de campos (*field\_file.csv*) com os dados simulados após a simulação encontrados no caminho do diretório armazenado na variável (*sim\_folder*).

- `temp_rmse <- compare_to_field(nc_file, field_file, metric = 'water.temperature', as_value = FALSE)`: Este comando calcula e armazena (`temp_rmse`) o RMSE da temperatura entre os dados simulados e observados.
- `plot_temp(file = nc_file, reference = "surface")`: Este comando cria um gráfico do perfil de temperatura da simulação realizada pelo GLM.
- `temp_surf <- get_temp(file = nc_file, reference = "surface", z_out = c(0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,27,28,29,30))`: Este comando cria uma variável do tipo *dataframe* (`temp_surf`) com os valores de temperaturas geradas pelo modelo em cada uma das profundidades descrita no vetor *c*.
- `write.csv(temp_surf, "C:/Users/anaal/Documents/Simulacao/Simulacao.csv")`: Este comando cria um arquivo de extensão csv das temperaturas simuladas, armazenadas na variável `temp_surf`, no diretório da simulação.

## APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentados os gráficos dos dados meteorológicos brutos.

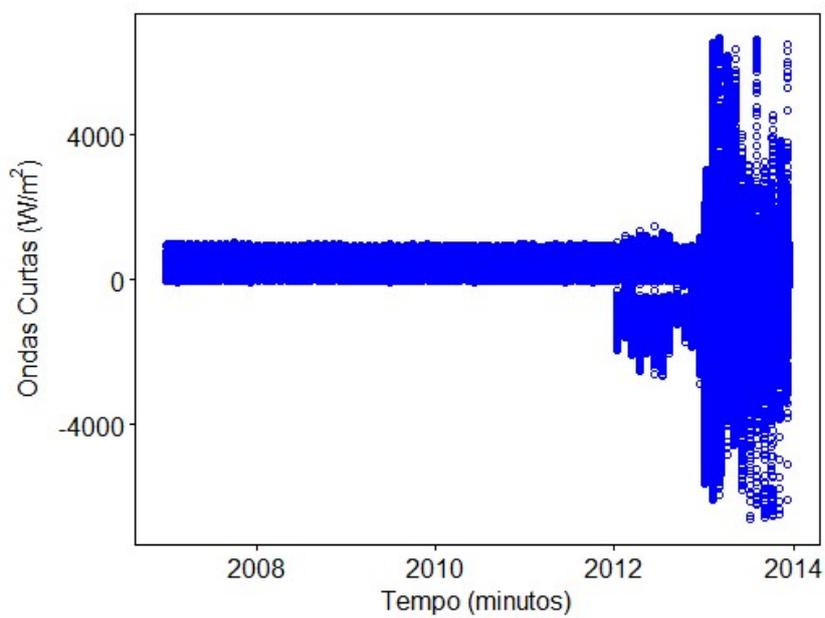


Figura B1 Dados brutos de ondas curtas

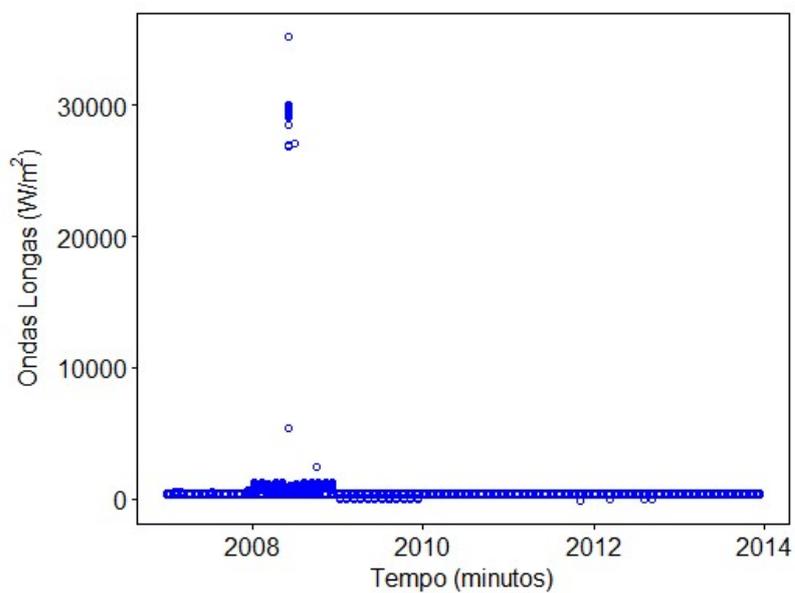


Figura B2 Dados brutos de ondas longas

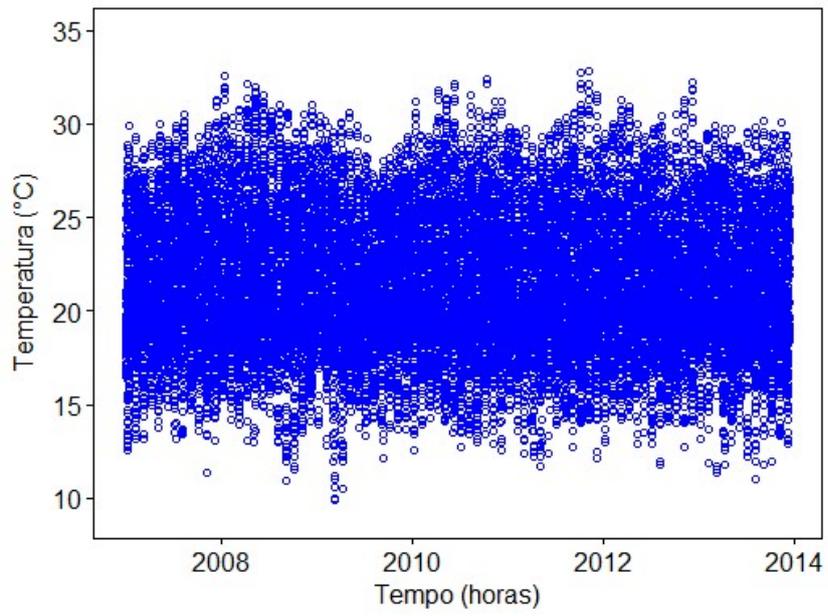


Figura B3 Dados brutos da temperatura do ar

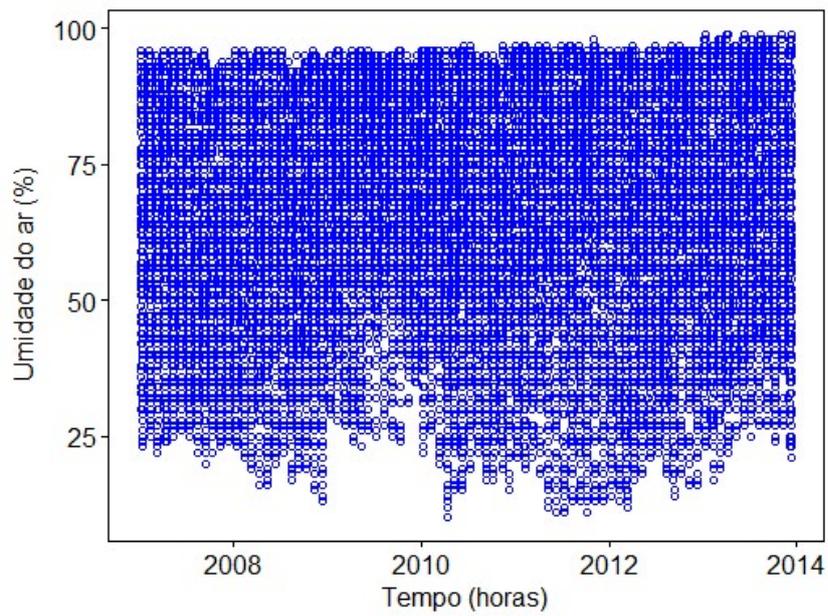


Figura B4 Dados brutos de umidade relativa do ar

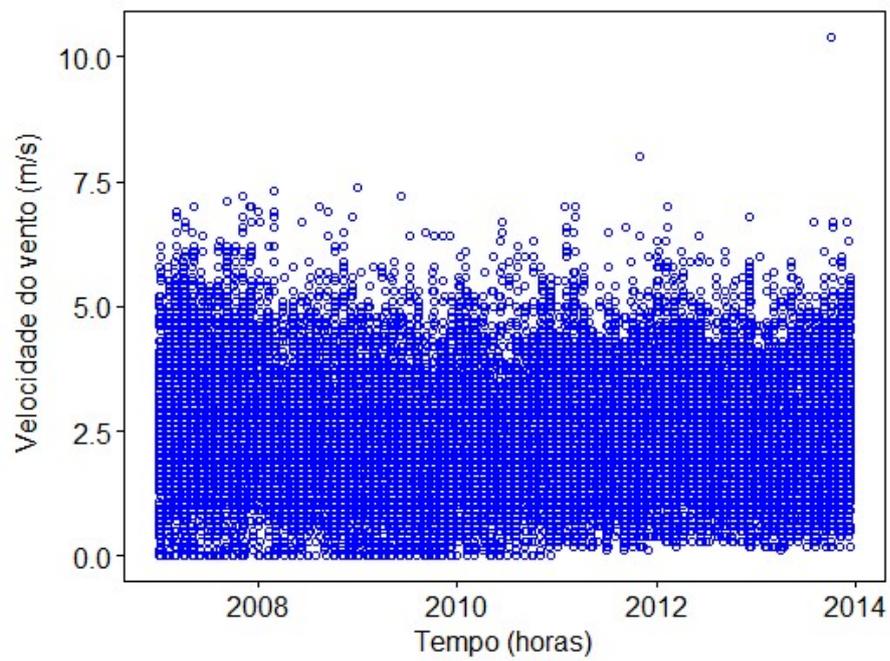


Figura B5 Dados brutos da velocidade do vento

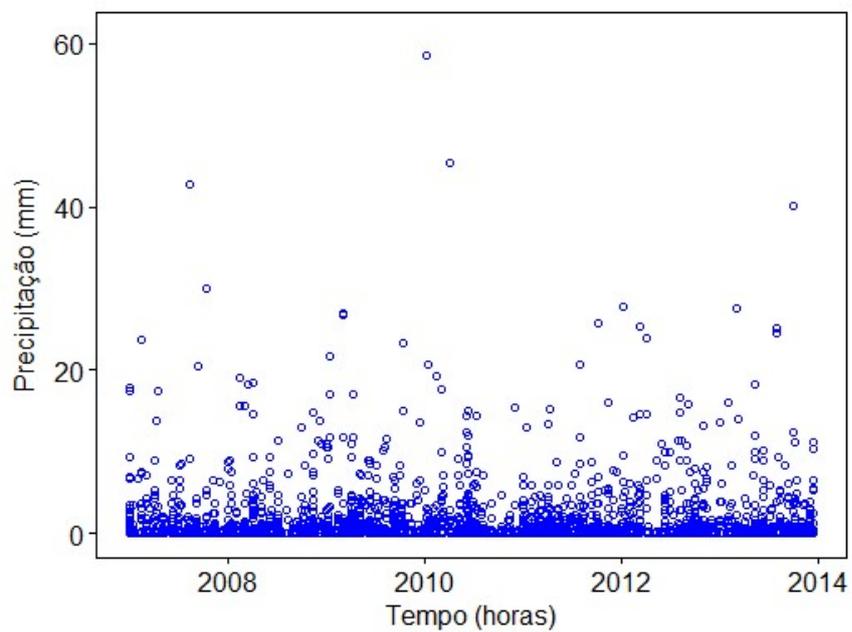


Figura B6 Dados brutos da precipitação

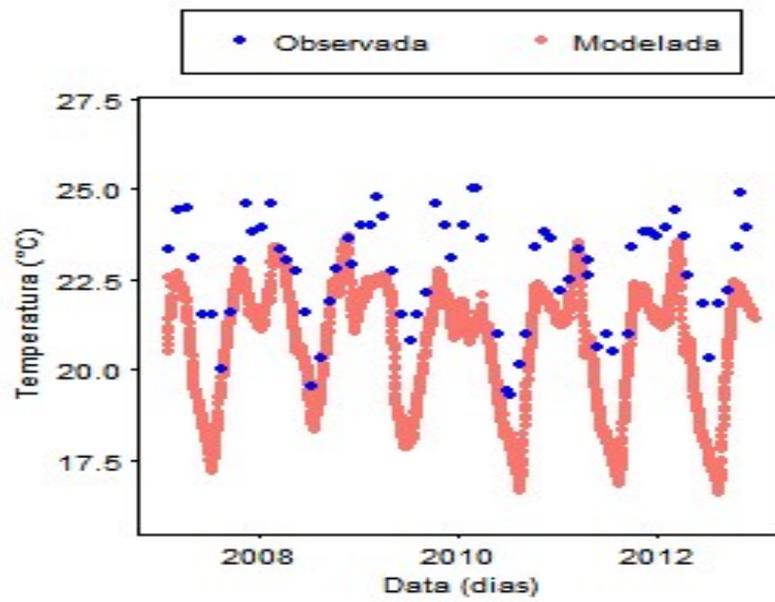


Figura B7: Calibração a 1 metro do fundo antes da ativação da função &sed\_heat