

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

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO GLM  
EM DUAS REGIÕES LIMNOLOGICAMENTE DISTINTAS DO LAGO  
PARANOÁ - DF**

**TAYNARA DE SOUZA FERNANDES**

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

**CO-ORIENTADORA: LENORA NUNES LUDOLF GOMES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF, JUNHO DE 2018**

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

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO GLM  
EM DUAS REGIÕES LIMNOLOGICAMENTE DISTINTAS DO LAGO  
PARANOÁ - DF**

**TAYNARA DE SOUZA FERNANDES**

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

APROVADA POR:

---

RICARDO TEZINI MINOTI, Doutor (UnB)  
(ORIENTADOR)

---

LENORA NUNES LUDOLF, Doutor (UnB)  
(COORIENTADOR)

---

SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

GILLIARD NUNES, Mestre (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

## FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDES, TAYNARA DE SOUZA.

Avaliação da aplicação do modelo hidrodinâmico GLM em duas regiões limnologicamente distintas do lago Paranoá – DF

xiii, 75 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. *General Lake Model*

2. Lago Paranoá-DF

3. Modelo hidrodinâmico

4. Ambientes aquáticos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDES, T. S. (2018), Avaliação da aplicação do modelo hidrodinâmico GLM em duas regiões limnologicamente distintas do lago Paranoá – DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Taynara de Souza Fernandes

TÍTULO: Avaliação da aplicação do modelo hidrodinâmico GLM em duas regiões limnologicamente distintas do lago Paranoá – DF.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

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

---

Taynara de Souza Fernandes  
Quadra 17 Conjunto C casa 23  
CEP: 73045173 – Sobradinho/DF – Brasil  
Taynara.tsf@hotmail.com

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, Doleny e José, aos meus irmãos, Samara e Tiago, por todo o amor e suporte ao longo de minha vida e por sempre incentivarem os meus estudos. Em especial, minha mãe, por acordar muito cedo todos os dias só para me deixar na parada de ônibus.

À minha orientadora, Lenora, pelos conhecimentos transmitidos durante minha graduação, por ter me acompanhado desde os primeiros semestres e orientado meus projetos de pesquisa de iniciação científica, além do meu projeto final. Professora, sua dedicação e atenção foram essenciais para minha formação pessoal e profissional.

Ao professor Ricardo por me coorientar no projeto final 1 e me orientar no projeto final 2. Sua paciência e atenção foram determinantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a banca, Professor Koide e Gilliard Nunes, pela dedicação e enriquecimento deste trabalho.

À Ana Alícia por me auxiliar neste projeto, com o modelo e por me ajudar sempre que precisei.

Meu agradecimento especial ao Rafael por ser meu companheiro durante grande parte da minha graduação, e me ajudar até hoje a enfrentar os desafios da vida, o universo e tudo mais.

Sou muito grata a todos os meus amigos do curso de engenharia ambiental, especialmente aos amigos do AOA por me acompanharem lado a lado nessa extensa jornada, facilitando momentos difíceis.

Agradeço a todas as pessoas especiais da minha vida que de alguma forma contribuíram positivamente para a minha graduação com conversas, conselhos e apoio emocional, Sarah, Guilherme, Romário, Nicole, Marianna, Miriã, Bruna, Vinícius e Kátia.

À Universidade de Brasília pela oportunidade de estudar em uma instituição pública com ensino de qualidade. Espero poder retribuir de alguma forma durante o exercício de minha profissão.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”

Albert Einstein

## Resumo

Dentre os principais fatores que influenciam os sistemas aquáticos, destacam-se as alterações químicas produzidas pela entrada de substâncias tóxicas, os nutrientes e as modificações microbiológicas resultantes da carga orgânica que atinge esses ambientes. O entendimento da dinâmica dos ambientes aquáticos por meio da avaliação do comportamento das variáveis limnológicas é fator crucial para fornecer informações relativas ao grau de comprometimento da qualidade da água frente aos impactos sofridos. Diante dessas situações, os modelos de lagos e reservatórios vêm se mostrando como ferramenta facilitadora para o entendimento da dinâmica dos ambientes aquáticos. A utilização dos modelos, tem como finalidade melhor entender e representar o comportamento de lagos e reservatórios, além de prever condições diferentes das observadas, ou seja, realizar prognósticos. Este trabalho teve como objetivo analisar a resposta do modelo de simulação hidrodinâmica unidimensional, General Lake Model – GLM ao modelar dois compartimentos do lago Paranoá, com diferentes profundidades, um raso e outro profundo. No intuito de atingir o objetivo principal, foi necessário analisar os dados disponíveis e, assim, selecionar os períodos adequados para calibração e verificação, de 2011 a 2014, no braço do Torto, para a calibração e, de 2007 até 2009, na região mais profunda do lago, próximo a barragem. Para a região com profundidade reduzida, os parâmetros mais sensíveis foram: o coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente (CE), seguido do coeficiente aerodinâmico de calor sensível (CH) e em terceiro a espessura máxima das camadas ( $h_{max}$ ). Para a região mais profunda do lago, os parâmetros mais sensíveis foram: o coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente (CE), seguido do coeficiente aerodinâmico de calor sensível (CH) e o coeficiente de extinção de luz (Kw). Foi realizada a calibração do modelo, para as duas regiões do lago, 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. Inicialmente, a simulação para a região com profundidade reduzida empregou os parâmetros default que apresentou RMSE de 5,1°C, após a calibração, o RMSE foi de 3,411°C. Já para a região mais profunda a simulação com parâmetros default resultou em um RMSE de 1,83°C, e após a calibração o RMSE foi de 1,57°C.

**Palavras-chaves:** Lago Paranoá-DF, General Lake Model, modelagem hidrodinâmica, ambientes aquáticos.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral .....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 CONCEITOS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTES LÊNTICOS .....	4
3.1.1 Águas Continentais e Características de Reservatórios .....	4
3.1.3 Eutrofização .....	7
3.1.4 Variáveis forçantes da temperatura da água em ambientes lacustres .....	9
3.2 MODELAGEM DE LAGOS E RESERVATÓRIOS.....	10
3.3 GLM .....	12
3.3.2 GLMr.....	18
3.3.2 Aplicações do GLM.....	19
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	21
3.4.3.1 Braço do Torto - Unidade Hidrográfica do Ribeirão do Torto .....	24
4 METODOLOGIA .....	27
4.2 Base de dados .....	29
4.3 Condições de contorno .....	31
4.4 Cálculo da vazão de escoamento superficial direto .....	32
4.5 Tratamento de dados e análise dos dados .....	32
4.6 Simulação hidrodinâmica com GLM.....	33
4.6.1 Automatização da calibração com o HydroPSO .....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
5.1 Avaliação temporal da qualidade da água das estações de amostragem D e C.....	34
5.2 Estruturação da base de dados .....	39
5.3 Batimetria .....	44
5.4 Simulação hidrodinâmica por meio do GLM .....	44
5.5 Análise de sensibilidade e automatização da calibração do GLM.....	45
5.5.2 Análise de sensibilidade para o Braço do Torto (estação de monitoramento D) e para a região mais profunda do lago (estação de monitoramento C).....	55

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	58
6.1 Conclusões.....	58
6.2 Recomendações .....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
APÊNDICES.....	64
APÊNDICE A.....	65
APÊNDICE B.....	66
APÊNDICE C.....	67
APÊNDICE D.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Principais compartimentos e comunidades de ecossistemas lacustres.....	4
Figura 3-2 - Esquema de simulação do domínio do GLM.....	12
Figura 3-3 – Estrutura e rotinas do programa GLM.....	14
Figura 3-4 - Relação entre o GLM e o R.....	18
Figura 3-5 – Estações de monitoramento do lago Paranoá/DF.....	19
Figura 3-6 - Perfil batimétrico do lago Paranoá com curvas de nível de 1 em 1 metro a partir da borda com cota 1000m.....	21
Figura 3-7 - Bacia do Santa Maria-Torto.....	22
Figura 3-8 - Área do Braço do Torto (estação de amostragem D) escolhida para a primeira aplicação do modelo GLM.....	23
Figura 3-9 - Área referente a região mais profunda do lago Paranoá (estação de monitoramento C) escolhida para a segunda a aplicação do modelo GLM.....	24
Figura 4-1 - Etapas da modelagem hidrodinâmica.....	25
Figura 4-2 Estações climáticas de monitoramento do (H) SONDA/INPE e do (I) INMET.....	27
Figura 5-1 - Perfil de distribuição para a da estação de amostragem D do lago Paranoá.....	32
Figura 5-2 - Perfil da distribuição de parâmetros físicos e químicos para a estação de amostragem C.....	33
Figura 5-3 - Dados meteorológicos de (a) Temperatura (°C), (b) Umidade Relativa (%), (c) Precipitação (mm), (d) Velocidade do vento (m/s), (e) Onda curta (W/m <sup>2</sup> ), (f) Onda Longa (W/m <sup>2</sup> ) utilizados na modelagem de 2007 até 2014.....	37
Figura 5-4 - Vazão dos tributários do braço do Torto de 2006 até 2018.....	38
Figura 5-5 – Vazões de entrada e de saída para a simulação da estação de amostragem C.....	39
Figura 5-6 - Batimetria do lago Paranoá.....	40
Figura 5-7 Perfil vertical de temperatura para o braço do Torto (estação de amostragem D) para os anos de 2012 até 2014.....	43

Figura 5-8 - Perfil vertical de temperatura para o braço do Torto (estação de amostragem D) (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014.....	43
Figura 5-9 – Comparação da temperatura simulada com a observada a 0.1 metros da superfície de 2011 até 2014.....	44
Figura 5-10 - Comparação da temperatura simulada com a observada a 3 metros da superfície de 2011 até 2014.....	45
Figura 5-11 - Comparação da temperatura simulada com a observada a 10 metros da superfície de 2011 até 2014.....	45
Figura 5-12 - Perfil vertical de temperatura para a região mais profunda do lago (estação de amostragem C) para os anos de 2007 até março de 2009.....	47
Figura 5-13 - Perfis verticais de temperatura separados por cada ano simulado no GLM para a região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C).....	49
Figura 5-14 comparação entre o perfil vertical de temperatura da estação de amostragem C (a) observado e (b) modelado pelo GLM.....	50
Figura 5-15 - Comparação da temperatura observada e simulada pelo GLM nas profundidades de (a) 1 metro, (b) 10 metros, (c) 15 metros e (d) 20 metros da superfície da água.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Dados utilizados na organização do banco de dados para a modelagem.....	27
Tabela 4-2 - Coeficientes de escoamento superficial utilizados no cálculo da contribuição direta ao Lago.....	29
Tabela 5-1 - Variação de temperatura modelada nas profundidades de 0.1, 3 e 10 metros para o braço do Torto.....	42
Tabela 5-2 Valores de RMSE para as simulações no braço do Torto (estação de amostragem D).....	42
Tabela 5-3 - Variação de temperatura modelada nas profundidades de 1, 10, 15 e 20 metros para a região mais profunda do lago (estação de amostragem C).....	46
Tabela 5-4 - Valores de RMSE para as simulações na região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C).....	46
Tabela 5-5 – Comparativo dos valores de RMSE obtidos por Barbosa (2015) e os obtidos neste trabalho.....	48
Tabela 5-5 - Classificação de sensibilidade dos parâmetros do GLM calibrados para o braço do Torto.....	52
Tabela 5-6 - Classificação de sensibilidade dos parâmetros do GLM calibrados para a estação de o ponto mais profundo do lago Paranoá (amostragem C).....	52
Tabela A1 - Descrição dos arquivos necessários para executar o GLM.....	61
Tabela A2 - Cabeçalho dos arquivos de entrada .csv do GLM.....	62
Tabela A3 Script em linguagem R criado para a simulação por meio do GLM.....	63
Tabela A4 - Sumário de parâmetros físicos do GLM com valores padrão.....	64

## LISTA DE NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

Adasa.....	Agência reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
AED.....	<i>Aquatic EcoDynamic</i>
AEMON.....	<i>Aquatic Ecosystem Modelling Network</i>
CAESB .....	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CEB.....	Companhia Energética de Brasília
EFDC .....	<i>Environmental Fluid Dynamics Code</i>
ETE .....	Estação de Tratamento de Esgoto
GLEON.....	<i>Global Lake Ecological Observatory Network</i>
GLM .....	<i>General Lake Model</i>
INMET.....	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE.....	Instituto Nacional de Meteorologia
UNB.....	Universidade de Brasília
WASP .....	<i>Water Quality Simulation Analysis Program</i>

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para o desenvolvimento de todas as formas de vida que habitam o planeta Terra. A deterioração e o uso excessivo da água têm relação direta com o homem, em especial com o aumento da urbanização e alterações no que tange ao uso e ocupação do solo como o crescimento das atividades agrícolas e industriais. A intensificação das ações humanas nas bacias hidrográficas impacta diretamente na qualidade e na quantidade de água disponível nos corpos hídricos.

Dentre os principais fatores que influenciam esses sistemas aquáticos, destacam-se as alterações químicas produzidas pela entrada de substâncias tóxicas, os nutrientes e as modificações microbiológicas resultantes da carga orgânica que atinge esses ambientes. O entendimento da dinâmica dos ambientes aquáticos por meio da avaliação do comportamento das variáveis limnológicas é fator crucial para fornecer informações relativas ao grau de comprometimento da qualidade da água frente aos impactos sofridos. A pressão sobre os recursos naturais precisa ser gerida com atenção, de modo que, hoje, ao lado dos cenários suscitados pelas mudanças climáticas, a combinação da poluição dos mananciais com o desperdício de água é uma das razões de a escassez ser um problema real para a boa parte da população, em especial para aquela que vive nas grandes cidades.

Diante dessas situações, os modelos de lagos e reservatórios vêm se mostrando como ferramenta imprescindível para o processo de gestão e gerenciamento dos recursos hídricos. A utilização dos modelos, tem como finalidade melhor entender e representar o comportamento de lagos e reservatórios além de prever condições diferentes das observadas, ou seja, realizar prognósticos. Como a natureza é regida por leis da física, química e biologia, fenômenos naturais podem ser representados por expressões matemáticas, possibilitando a modelagem de base física de sistemas ambientais, que são relevantes ferramentas para avaliar principalmente os padrões de circulação e estratificação da coluna d'água e os cenários futuros de impactos decorrentes da eutrofização.

A modelagem hidrodinâmica em lagos tem sido extensamente utilizada para dar uma primeira estimativa do comportamento físico desses ambientes que influencia a qualidade da água e a dinâmica dos organismos vivos presentes. Esse tipo de modelagem fornece informações do comportamento das massas de água sob diferentes condições externas e permite entender

melhor a dinâmica desses ambientes. Além disso, a modelagem hidrodinâmica pode ser acoplada a modelos ecológicos para a avaliação da qualidade da água de ambientes lacustres.

O *General Lake Model* (GLM) é um modelo hidrodinâmico unidimensional que calcula perfis verticais de temperatura, salinidade e densidade pela representação dos efeitos dos fluxos de entrada e saída, mistura, aquecimento e resfriamento da superfície.

Apesar da população do Distrito Federal ter aumentado bastante na última década, a disponibilidade hídrica permaneceu igual. O crescimento populacional implica em um maior consumo de água e na necessidade de monitorar e acompanhar os reservatórios que abastecem a população local, dentre esses reservatórios está incluído o lago Paranoá. O lago Paranoá localiza-se dentro da bacia de drenagem do rio Paranoá e tem como principais afluentes os ribeirões do Torto, do Gama, do Riacho Fundo e Bananal. O Lago foi criado na década de sessenta com o objetivo de melhorar o microclima da região, a composição paisagística, as opções de lazer, e geração de energia elétrica.

Dentre os múltiplos usos, consuntivos e não consuntivos o Lago é usado pela população como fonte de lazer, na prática de esportes de contato primário, como corpo hídrico receptor dos efluentes de duas estações de tratamento de águas residuárias (ETEB Sul e ETEB Norte), recebimento de águas pluviais e, recentemente, como manancial de abastecimento de água para o consumo humano. Já no final da primeira década, após a formação do Lago, era evidente a floração de algas nas proximidades das Estações de Tratamento de Esgoto Norte e Sul, que lançavam efluentes tratados em nível secundário, sem a remoção dos nutrientes fósforo e nitrogênio (Burnett *et al.*, 2001). Atualmente as duas estações de tratamento de águas residuárias realizam tratamento terciário para a remoção de nitrogênio e fósforo, mas, ainda assim, estão sendo observadas, novamente, florações no Lago.

O primeiro foco deste trabalho está direcionado a um dos braços do reservatório, o braço do Torto que é o tributário do Lago Paranoá que possui captação para abastecimento humano. O segundo foco é a região mais profunda do Lago, próximo ao barramento e ao futuro ponto de captação de água para abastecimento para consumo humano. Pretende-se analisar como o modelo irá se comportar de acordo com as características limnológicas e morfométricas, das regiões estudadas. Esta monografia tem como objetivo avaliar a aplicação do modelo hidrodinâmico GLM em duas regiões no Lago Paranoá com características limnológicas distintas e identificadas como fontes de água para consumo humano.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicação do modelo hidrodinâmico GLM em duas regiões no lago Paranoá com características limnológicas distintas e identificadas como fontes de água para consumo humano.

### **2.2 Objetivos específicos**

No intuito de atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os dados de entrada e avaliar o perfil de variação dos parâmetros físicos e químicos monitorados nas duas regiões do lago Paranoá escolhidas para aplicação do GLM, braço do Torto e região mais profunda;
- Aplicar e compreender as etapas do processo de modelagem do GLM com a realização de análise de sensibilidade e calibração das variáveis hidrodinâmicas para as duas regiões do Lago;
- Analisar a resposta do modelo GLM referente a temperatura nas duas regiões do Lago com características limnológicas distintas, braço do Torto e região mais profunda, próxima à barragem.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica e revisão bibliográfica acerca dos aspectos gerais de reservatórios; eutrofização; modelagem de lagos e reservatórios; caracterização da área de estudo e uma breve descrição dos softwares utilizados na modelagem hidrodinâmica.

#### 3.1 CONCEITOS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTES LÊNTICOS

##### 3.1.1 Águas Continentais e Características de Reservatórios

Reservatórios e/ou lagos artificiais são corpos de água formados principalmente pelo represamento de rios com o objetivo de atender a inúmeros usos, tais como geração de energia elétrica, irrigação, abastecimento público, dentre outros.

A Figura 3-1 apresenta as regiões e os organismos que compõem lagos e reservatórios. Lagos são divididos de acordo com os seguintes compartimentos: região litorânea ou ripária, região limnética ou pelágica, região bentônica e interface água-ar.

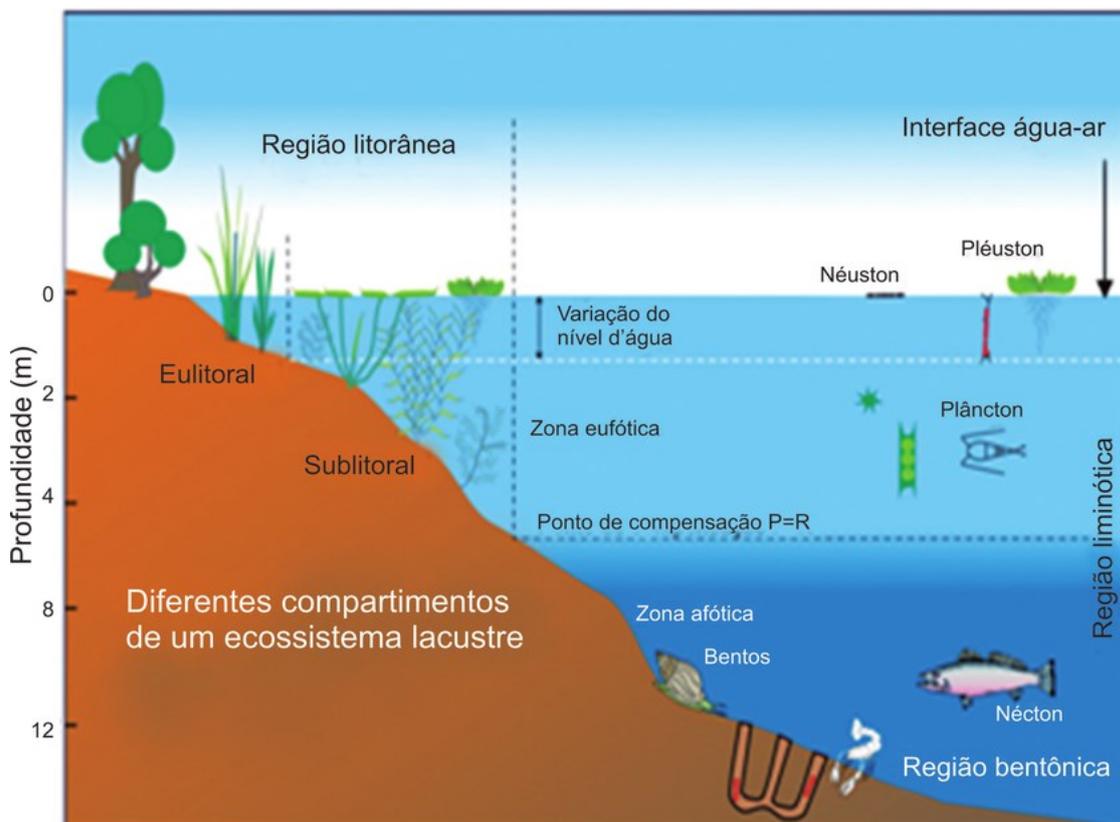


Figura 3-1 Principais compartimentos e comunidades de ecossistemas lacustres. Fonte: Esteves, (2011).

A interface ar-água é uma região habitada por duas comunidades bem características: nêuston, composta por organismos microscópicos tais como algas, fungos e bactérias que vivem no limite inferior, e plêuston que é composta por plantas superiores e animais que vivem no limite superior e obtém oxigênio diretamente da atmosfera (Esteves, 2011).

A região litorânea está em contato direto com o ecossistema terrestre adjacente, sendo, portanto, influenciada diretamente por ele. Esta região pode ser considerada um compartimento autônomo e de grande complexidade trófica por possuir todos os níveis tróficos de um ecossistema: produtores primários, consumidores e decompositores. A ocorrência e a extensão de regiões litorâneas são extremamente dependentes de características morfométricas do ambiente lacustre, como tamanho, profundidade, e razão perímetro/volume (Esteves, 2011).

Na região limnética ou pelágica, as principais comunidades características são o plâncton e o nécton. Em geral, a região limnética pode ser dividida em estratos verticais, o epilímnio, metalímnio e hipolímnio devido à diferença de densidade das massas d'água que pode ser causada por diferenças na temperatura, bem como também na salinidade da água. E diferenças na intensidade de radiação solar fotossinteticamente ativa, em zona eufótica e afótica (Esteves, 2011).

A região bentônica é em geral muito heterogênea tanto em sua dimensão horizontal quanto vertical. Os táxons dominantes na região bentônica são algas perifíticas, e macrófitas aquáticas (apenas na zona eufótica), bactérias, protozoários e uma grande diversidade de insetos aquáticos e outros invertebrados, além de peixes. As principais fontes de energia para a produção secundária bentônica incluem a biomassa de algas bentônicas (perifiton e metafiton), macrófitas aquáticas, sedimentação do fitoplâncton e aporte de subsídios alóctones provenientes de vegetação terrestre. A região bentônica de lagos também é um importante sítio de atividade biogeoquímica e, além disso, por se tratar, em geral, do ponto mais profundo de toda a bacia de drenagem, integra informações sobre a história evolutiva do ambiente aquático, bem como do ambiente terrestre circundante (Esteves, 2011).

Dois características dos lagos e reservatórios que têm grande influência na qualidade da água são a profundidade e o tempo de detenção ou tempo de residência da água. O tempo de residência da água pode ser entendido como a razão entre a vazão que sai do reservatório e o seu volume. O tempo de detenção pode ser compreendido também como o tempo de esvaziamento do reservatório caso todas as entradas de água fossem cessadas, ou ainda o tempo

médio que certo volume de água demora do ponto de entrada até a saída (Thomann e Mueller, 1987; Chapra, 1997). Tucci e Mendes (2006), caracterizam o tempo de residência como um índice que indica o tempo médio em que o reservatório renova seu volume de água ou tempo de esvaziamento do reservatório, caso todas as entradas de água fossem cessadas.

Lagos e reservatórios com tempo de residência bastante prolongados podem ser analisados como comunidades essencialmente fechadas nos quais os nutrientes são mantidos ou acumulados por sua ciclagem nos vários níveis tróficos (Nogueira, 1991). Chapra (1997) divide os reservatórios com baixo tempo de detenção ( $td < 1$  ano) e elevado ( $td > 1$  ano).

A profundidade é uma característica importante, pois está diretamente relacionada com a estratificação térmica da coluna d'água que é um dos processos que determinam o funcionamento dos lagos. Durante a estratificação ocorre a diferenciação de camadas - epilímnio, metalímnio e hipolímnio – no lago de acordo com a temperatura, onde a camada superficial, o epilímnio apresenta a temperatura mais elevada e a mesma diminui com a profundidade (Esteves, 2011).

A estratificação térmica é uma importante característica para os ecossistemas aquáticos, pois por meio desta também pode ocorrer a estratificação de outros elementos. A estratificação térmica e química divide o ambiente em compartimentos verticais (Chapra, 1997).

A estratificação térmica afeta diretamente a mobilidade do fitoplâncton e a disponibilidade dos nutrientes na coluna d'água. Segundo Esteves (2011) em lagos tropicais profundos, que permanecem estratificados grande parte do ano, observa-se profundos déficits de nutrientes na zona eufótica durante este período. Nestes lagos, os nutrientes, especialmente o fósforo e o nitrogênio, são os principais fatores controladores da flutuação temporal do fitoplâncton.

Segundo Esteves (2011), as maiores densidades de biomassa fitoplanctônicas são observadas em períodos de maior estabilidade hidrodinâmica nos sistemas aquáticos, coincidindo, geralmente, com o período de estratificação térmica da coluna d'água.

A produção primária pode ser medida pelo aumento de biomassa em um dado intervalo de tempo acrescido de todas as perdas ocorridas nesse período. Desta maneira, a produção primária é a quantidade de matéria orgânica acrescida pela fotossíntese ou quimiossíntese em um dado intervalo de tempo, considerando-se as perdas principais são devidas à: respiração, excreção, secreção, morte, herbivoria e parasitismo. A produtividade primária pode ser expressa em

termos de matéria orgânica, oxigênio, carbono, energia, dentre outros. A produtividade primária fitoplanctônica é um processo complexo, no qual estão envolvidos diferentes fatores bióticos e abióticos, que podem inibi-la ou estimulá-la. Dentre os inúmeros fatores abióticos, considera-se como os mais importantes a radiação solar, a temperatura e os nutrientes, uma vez que exercem influência direta sobre o processo fotossintético. A radiação solar influencia a produtividade fitoplanctônica agindo diretamente sobre a taxa de fotossíntese e na determinação da profundidade da zona eufótica. A temperatura do meio pode atuar diretamente sobre a produtividade e fisiologia dos organismos fitoplanctônicos e indiretamente, alterando, por exemplo, a distribuição de nutrientes na zona eufótica, principalmente por meio do perfil térmico (estratificação e/ou circulação). A concentração dos nutrientes limitantes como fosfato, nitrato, amônio e silicato tem papel fundamental sobre a produtividade primária do fitoplâncton (Esteves, 2011).

### **3.1.3 Eutrofização**

Em situação de alta disponibilidade de nutrientes, luz e temperatura ótimas, os organismos do fitoplâncton podem se multiplicar rapidamente formando o processo conhecido como floração ou *bloom*. Esse fenômeno ocorre principalmente em lagos eutróficos (ricos em nutrientes) (Fragoso, 2009).

O processo de eutrofização pode ocorrer de forma natural ou artificial. Quando natural, é um processo lento e contínuo que resulta do aporte de nutrientes trazidos pelas chuvas e pelas águas superficiais que erodem e lavam a superfície terrestre. A eutrofização natural está relacionada com o envelhecimento natural do ambiente aquático. Quando ocorre em função das atividades humanas, a eutrofização é denominada de artificial, cultural ou antrópica. Neste caso, os nutrientes podem ter diferentes origens, como: esgotos domésticos, efluentes industriais e/ou atividades agrícolas, entre outros. A eutrofização artificial é responsável pelo “envelhecimento precoce” de ecossistemas lacustres. A eutrofização artificial de águas continentais está relacionada com o aumento da população humana, da industrialização e do uso de fertilizantes químicos na agricultura. Todos esses fatores resultam na liberação de nutrientes, como fosfatos e nitrogênio, que são compostos estimuladores da produção primária. A importância destes elementos como desencadeadores do processo de eutrofização, resulta da sua atuação como fatores limitantes na produção primária de ecossistemas, por estarem relacionados com o processo fotossintético (Esteves, 2011).

A eutrofização artificial pode ser considerada como uma reação em cadeia de causas e efeitos bem evidentes, cuja característica principal é a quebra relativa da estabilidade do ecossistema. Com a quebra do estado de equilíbrio, o ecossistema passa a produzir mais matéria orgânica do que é capaz de consumir e decompor, o que vem acompanhado de profundas mudanças no metabolismo de todo o ecossistema. O processo de eutrofização é causado por um aumento da concentração de quase todos os elementos químicos essenciais à produtividade primária, sendo o fosfato o nutriente mais importante no processo de eutrofização artificial (Esteves, 2011).

Dentre as principais consequências do aumento do grau de trofia em reservatórios de usos múltiplos está a redução da diversidade biológica, uma vez que o desenvolvimento intensivo do fitoplâncton espalha-se por toda a superfície da água e impede a penetração da luz nas camadas inferiores com redução de oxigênio dissolvido no hipolímnio (condições anaeróbias), da biodiversidade aquática, a perda das qualidades cênicas, a morte extensiva de peixes e o aumento da incidência de florações de microalgas e cianobactérias. O aumento do grau de trofia também pode causar a proliferação algumas espécies de fitoplâncton do grupo das cianobactérias e uma consequente liberação de toxinas para o meio aquático em caso de lise celular. Essas florações podem provocar o aumento no custo do tratamento da água de abastecimento e consequências relacionadas à saúde pública (Fragoso, 2009).

O lago Paranoá passou por um período de forte eutrofização, com episódios de florações de cianobactérias, o que levou à tomada de diferentes medidas para recuperação do ambiente como a implantação do tratamento terciário, com maior remoção de nutrientes, nas estações de tratamento de esgoto - ETEs Brasília Sul e Norte, nos anos de 1993 e 1994. E ainda, no ano de 1998, a alteração da operação anual da Usina Hidrelétrica - UHE do Paranoá com vistas à renovação e circulação das águas do Lago. Essas ações de modificação do tratamento dos efluentes e operação do reservatório levaram à melhoria da qualidade da água do lago Paranoá desde então.

Cordeiro Netto e Dutra filho (1981), identificaram as principais fontes de fosfato no lago Paranoá, realizando a quantificação do aporte deste elemento em bases anuais para cada uma das fontes e concluíram que os efluentes das duas estações de tratamento de esgotos lançados no lago Paranoá contribuíam com cerca de 70% do aporte total de fosfato no ano de 1980, o que correspondia a 82 toneladas, logo eram as principais fontes de fosfato antrópico para este ecossistema, e, conseqüentemente, as maiores responsáveis pela eutrofização artificial. No citado estudo, foi relatado para o lago Paranoá um aporte de fosfato e nitrogênio, por meio da

precipitação direta, de  $0,8 \text{ t.ano}^{-1}$ , valor que corresponde a 0,7% do aporte total do Lago, e que o escoamento superficial, com 6,7% do aporte total, representa a terceira maior fonte de fosfato.

A contaminação humana por toxinas geradas por cianobactérias pode ocorrer tanto pela ingestão de água como por contato em atividades de recreação no ambiente, ou ainda pelo consumo de pescado contaminado. Entretanto, a principal via de intoxicação é pelo consumo oral da água sem um tratamento adequado para remoção dessas toxinas. As cianotoxinas formam um grupo de substâncias químicas bastante diverso, com mecanismos tóxicos específicos em vertebrados. Algumas cianotoxinas são neurotoxinas fortes (anatoxina-a, anatoxina-a(s), saxitoxinas), outras são principalmente tóxicas ao fígado (microcistinas, nodularina e cilindrospermopsina) e outras ainda podem ser irritantes ao contato, consideradas como endotoxinas pirogênicas, como as de bactérias Gram negativas (Funasa, 2003).

### **3.1.4 Variáveis forçantes da temperatura da água em ambientes lacustres**

Dentre as principais variáveis climáticas que influenciam os processos térmicos de ambientes lacustres é possível citar a radiação solar. A energia solar, que chega à superfície da água, é rapidamente transformada em calor nas camadas superiores da coluna de água (Imbodem e Wüdest, 1995). 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 ocorre devido à mudança de velocidade da radiação ao penetrar na água. Em seguida, 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).

A estratificação térmica em lagos e reservatórios pode ocorrer devido a três diferentes fatores, primeiro, a baixa velocidade de fluxos, geralmente laminar, como resultado, a mistura é controlada por difusão molecular, o que permite a persistência da estratificação que por sua vez, permite que os gradientes de temperatura se mantenham mais estáveis (Imbodem e Wüdest, 1995). Em segundo lugar, os maiores tempos de residência (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, a qual recebe maior influência da radiação solar, com a água do hipolímnio seja menor (Imbodem e Wüdest, 1995).

Os processos que aumentam a turbulência, diminuem o tempo de residência e aumentam a interação com a água do fundo reduzem a persistência da estratificação e favorecem 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 (latitudinal longitudinal e vertical) 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 (Esteves, 2011).

O vento é uma das mais importantes variáveis 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 (Winslow et al., 2015), mas podem ocasionar, também, perda de calor por meio da turbulência gerada pela velocidade do vento nas camadas superficiais. Além disso, a força dos ventos é capaz de gerar quebra das estratificações, o que dependendo da profundidade, pode trazer nutrientes de águas mais profundas para o epilimnio, fertilizando a coluna d'água e o 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 pois, em lagos, o aquecimento é impulsionado também pelo aumento desta variável (Schmid et al. 2014).

### **3.2 MODELAGEM DE LAGOS E RESERVATÓRIOS**

Modelos de qualidade da água tentam representar um sistema, o qual Jorgensen, (2011) define como um conjunto de processos químicos, físicos e biológicos interligados. Moss (2012) afirma que a importância de considerar os lagos e reservatórios em simulações está na rápida resposta a mudanças no ciclo hidrológico por meio de alterações nos níveis da água e em sua composição química, e também por manterem em seus sedimentos um registro de tais mudanças.

Fragoso (2009) divide a evolução da modelagem em quatro fases distintas: Em meados da década de 1920 os modelos focavam na avaliação dos níveis de oxigênio dissolvido em rios e estuários, ainda sem computadores, essas aplicações limitavam-se a soluções lineares, com geometria simples e considerando um estado permanente de tempo. Já na década de 1960, o oxigênio ainda era o foco principal das modelagens, mas os computadores apareceram como uma ferramenta disponível. Os computadores permitiram um maior detalhamento das reações cinéticas e simulações não permanentes no tempo (dinâmicas), fato esse que levou a um maior

avanço dos modelos e de seu potencial de aplicação. Na década de 1970, foram desenvolvidos os primeiros modelos que representariam a dinâmica da cadeia alimentar aquática, o avanço computacional permitiu o emprego de soluções não lineares, retroativas, em sistemas com geometrias complicadas. Ao longo dos anos, o progresso computacional propiciou soluções mais próximas da realidade, o mais recente estágio do desenvolvimento de modelos voltou-se a problemas envolvendo contaminantes emergentes, a biota do sistema, micro-organismos patogênicos e metais pesados, que representam uma ameaça tanto para a saúde humana quanto para a saúde dos ecossistemas aquáticos.

Com relação ao número de dimensões espaciais consideradas nos modelos, Wrobel *et al.* (1989) e Martin e McCutcheon, (1999); classificam os modelos de simulação de escoamentos e qualidade da água em reservatórios da seguinte maneira:

- i. Modelos Concentrados (Dimensão zero) – são modelos matemáticos que consideram o reservatório completamente misturado em todas as direções, ou seja, não simulam variações espaciais e não tem compromisso de representar os gradientes espaciais das variáveis hidrodinâmicas, químicas e biológicas. Aplica-se esse caso em estudos de balanço de massa simplificados que servem para dar uma avaliação preliminar das condições de armazenamento e concentração de poluentes no reservatório;
- ii. Modelos unidimensionais – são modelos que consideram os gradientes espaciais em uma direção, geralmente na direção vertical ou longitudinal. Modelos longitudinais são aplicáveis para estudar variações do escoamento e concentrações ao longo do eixo do reservatório, desprezando a estratificação vertical que é marcante em reservatórios com grandes profundidades. Já os modelos verticais são apropriados para simular, justamente, temperatura e qualidade da água em reservatórios profundos;
- iii. Modelos bidimensionais – simulam os fluxos e mudanças na qualidade da água nas direções verticais e longitudinais do reservatório, desprezando as variações na transversal. São geralmente aplicados para reservatórios maiores, profundos e estratificados, onde as variações laterais são negligenciáveis;
- iv. Modelos tridimensionais – são os modelos que representam todas as direções do espaço. Em geral, são utilizados conjuntamente para simulações de hidrodinâmica e qualidade da água. São mais complexos e eficientes, porém apresentam dificuldades práticas relacionadas ao número de parâmetros para controlar.

A simulação é o processo de utilização do modelo e, geralmente, é dividida em quatro fases Tucci, (2005): Como etapa preliminar, tem-se a aquisição de dados e estruturação da base de dados (pré-modelagem).

i. Análise de sensibilidade: consiste na variação individual de cada parâmetro, valor que caracteriza o sistema, e verificação dos resultados de forma que é possível averiguar qual(is) parâmetro(s) tem(têm) maior influência na simulação do sistema em estudo;

ii. Calibração: quando os parâmetros devem ser determinados, seja por calibração manual, alterando-os manualmente e observando o ajuste ou calibração automática, ou quando o próprio *software* possui em seu código a calibração otimizada, que é realizada automaticamente.

iii. Verificação: onde é realizada a simulação do modelo com os parâmetros estimados e verifica-se a validade do ajuste realizado para outros dados.

iv. Previsão ou simulação de cenários: é feita a simulação do modelo com os parâmetros estimados para analisar a quantificação de suas respostas a entradas distintas, normalmente associadas à elaboração de cenários futuros.

### **3.3 GLM**

Dentre os modelos capazes de simular os processos hidrodinâmicos acoplados a modelos ecológicos tem-se o GLM. O General Lake Model (GLM) é um modelo hidrodinâmico que pode ser unido 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). O modelo GLM foi desenvolvido inicialmente como um projeto na Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) (Hipsey *et al.*, 2013; Hipsey *et al.*, 2014; Obrador *et al.*,2016).

Segundo Hipsey *et al.* (2012), *The General Lake Model - GLM* é um modelo hidrodinâmico, unidimensional, de estratificação vertical capaz de simular perfis verticais de temperatura, salinidade e densidade, balanço hídrico, aquecimento e resfriamento, gelo, neve e misturas verticais de um sistema de lagos e reservatórios.

O GLM é um software colaborativo de código aberto, desenvolvido na linguagem de programação C e pode ser utilizado para aprofundar o conhecimento de como mudanças no uso do solo, clima e ações de tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos podem afetar corpos lênticos, enquanto ecossistemas aquáticos. O modelo incorpora uma estrutura de camadas

Lagrangianas, permitindo que as camadas mudem de espessura de acordo com fluxo de calor, misturas verticais e fluxos de entrada e saída de água (Hipsey *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2014 Obrador *et al.* 2016). Depois de ser introduzido em 2012, o GLM tem sido melhorado e diversas publicações atuais apresentaram simulações usando esse modelo (Read *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2014). Os principais processos simulados pelo GLM são: formação de gelo, balanço de energia, vento cisalhante, aquecimento superficial, mistura superficial, penetração de luz, mistura profunda, fluxos submerso e de infiltração, estratificação térmica e escoamento superficial.

Na Figura 3-2, é apresentado um esquema que demonstra os dados de entrada que compõem o balanço hídrico, considerando vazão de entrada, precipitação (nevasca e chuva), extravasamento e retiradas. Dados de entrada como temperatura atmosférica, umidade, velocidade do vento, radiação de ondas longas e radiação solar podem ser considerados como forças motrizes para os processos físicos e químicos que ocorrem no reservatório. Na Figura 3-2, as informações de entrada são apresentadas em texto, na cor azul, e processos simulados, na cor preta.

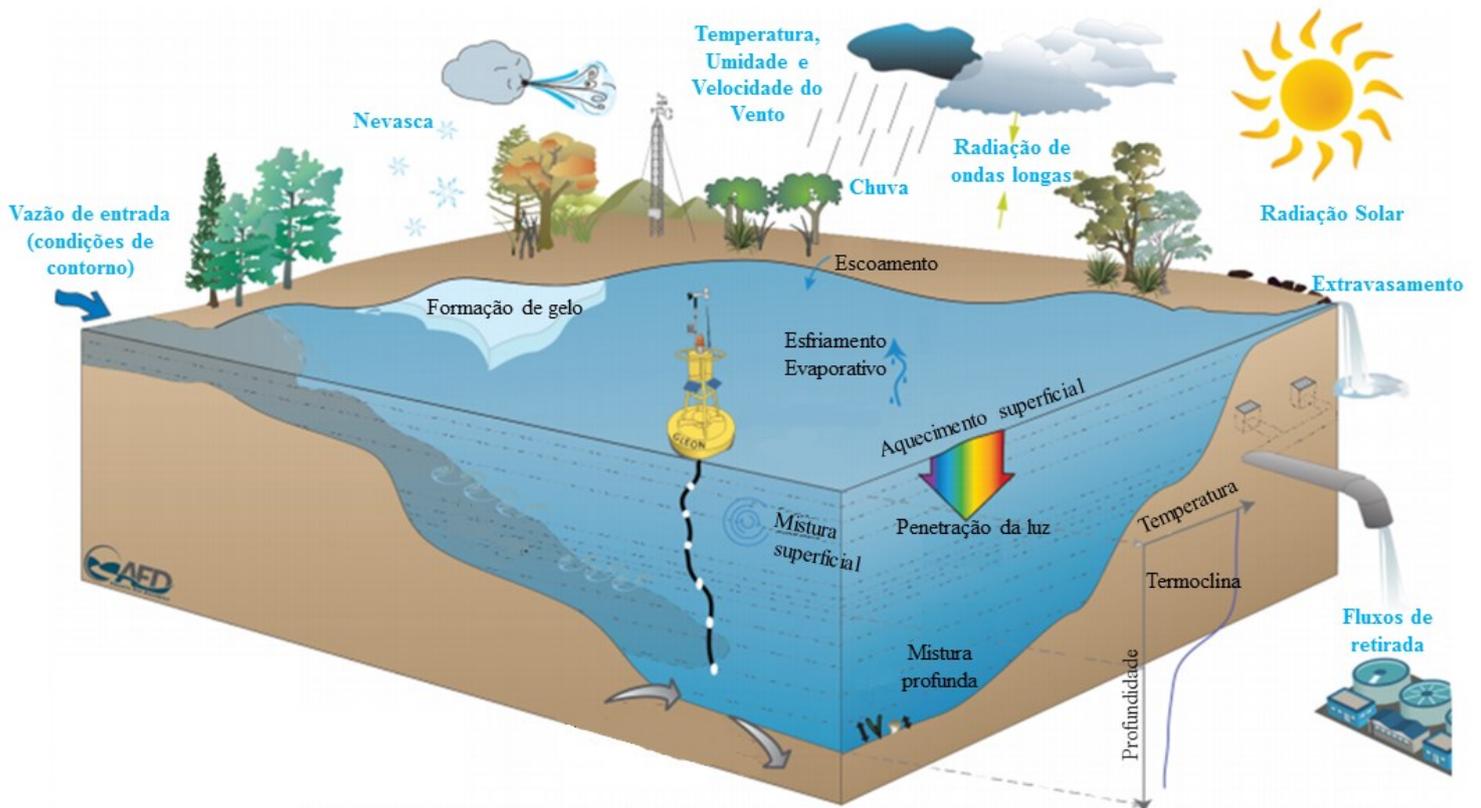


Figura 3-1 - Esquema de simulação do domínio do GLM. Fonte: Hypsey *et al.* (2014); modificada por Pinto (2017).

O <sup>1</sup>GLM incorpora uma estrutura de camadas com a possibilidade de dividir ou combinar as camadas que tenham as mesmas características físico-químicas, o que evita a necessidade de calcular velocidades verticais, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento computacional. Cada camada é assumida como homogênea, as diferenças de propriedade entre as camadas representam a distribuição vertical e as espessuras das camadas são ajustadas dentro do modelo, de acordo com a resolução necessária para representar o gradiente de densidade vertical.

Com relação aos fluxos superficiais, o modelo representa o vento e o balanço de energia. A radiação de ondas curtas pode ser especificada como fluxo líquido ou fluxo de entrada. O fluxo de entrada pode ser especificado diretamente ou calculado pelo modelo com base na fração de cobertura de nuvens e temperatura do ar. Além do fluxo superficial de energia, o modelo explicita os fluxos de massa de evaporação, chuva e queda de neve (novamente enfatiza-se que os algoritmos para gelo e neve não serão especificados nesse estudo visto que não são necessários em regiões tropicais).

Em relação à mistura vertical, tem-se a premissa de que o equilíbrio entre a energia disponível,  $E_{TKE}$ , e a energia necessária para submeter-se a mistura,  $E_{PE}$ , fornece uma equação para a taxa de aprofundamento da camada de mistura superficial:  $d_{mix}/dt$ . O modelo calcula, assim, o primeiro desses argumentos de energia e, em seguida, percorre as camadas da parte superior para a parte inferior até que haja energia suficiente disponível até a  $i$ -ésima camada. Quanto aos fluxos de entrada e saída, esses são variáveis sub-diárias, ou seja, considerados mais de uma vez por dia. O Apêndice D apresenta o sumário de parâmetros físicos do GLM com valores padrão.

O modelo calcula a dinâmica das entradas e saída 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 (Hipse 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.

---

<sup>1</sup> O GLM foi desenvolvido por Jordan Read and Luke Winslow e é acessível no link: <https://github.com/GLEON>.<sup>1</sup>

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

Onde:

$h_S$ : 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.

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

Onde:

$A_S$ : 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);

$\phi_{SW_S}$ : a penetração da radiação de ondas longas (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>)

O fluxo de calor sensível ( $\phi_H$ ) é dado pela Equação 3.3.

$$\phi_H = -\rho_a C_p C_H U_x (T_S - T_a) \quad (\text{Equação 3.3})$$

$\rho_a$  : densidade do ar (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  $\sim 1,3 \times 10^{-3}$ );

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

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

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

Na Figura 3, apresentam-se as estruturas e rotinas que compõem os arquivos do programa GLM. Os arquivos estão representados em azul (extensão .c) e as rotinas estão representadas em branco. A partir do fluxograma exibido na Figura 3-3 é possível compreender as etapas que o programa realiza para o processamento dos dados e geração de resultados.

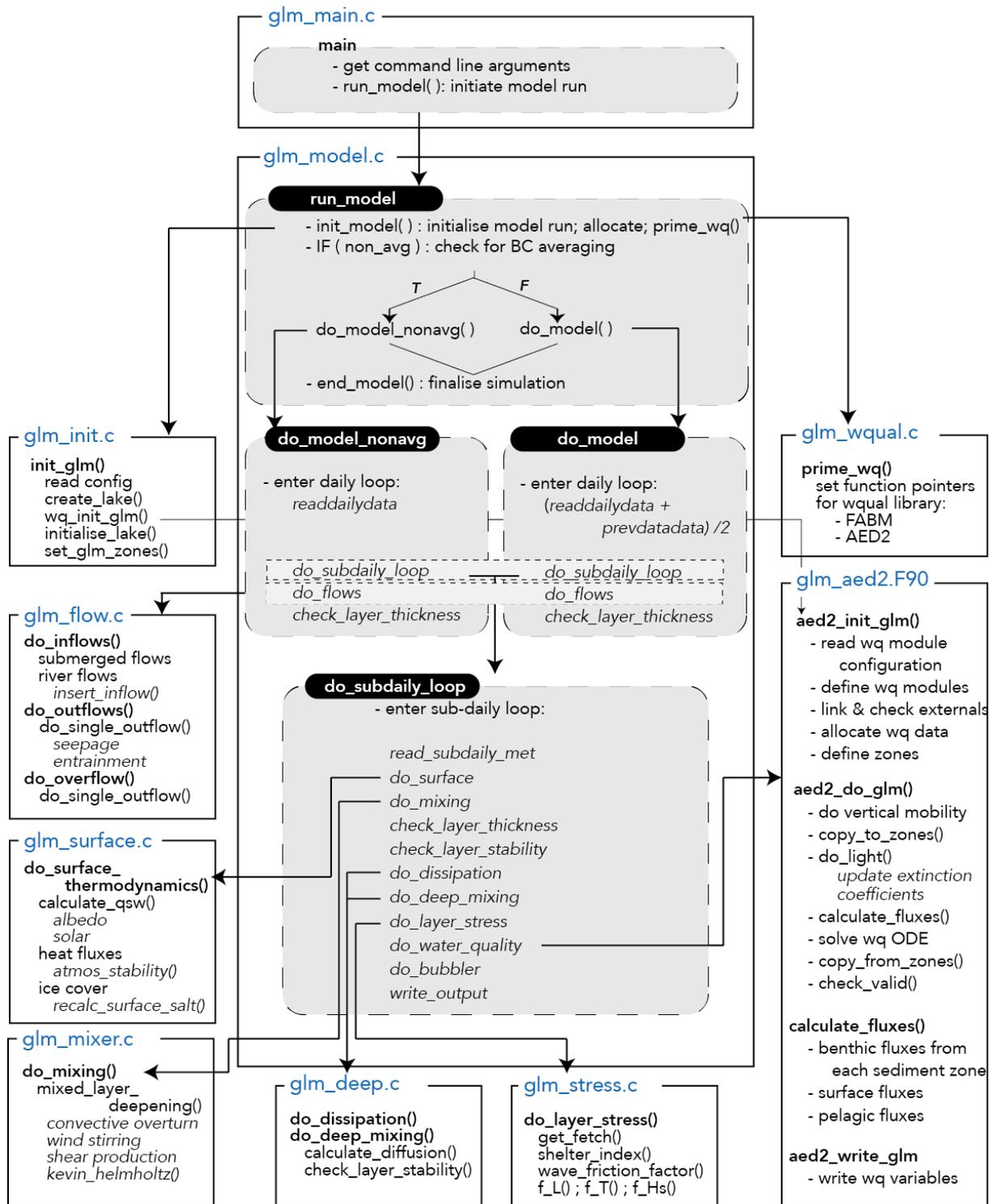


Figura 3-2 – Estrutura e rotinas do programa GLM. Fonte: Disponível em <http://aed.see.uwa.edu.au/research/models/GLM/>

Cada rotina apresentada na Figura 3-3 possui um papel essencial na modelagem. Por exemplo, o arquivo `glm_model.c` inicializa o modelo e aloca os dados, o `glm_init.c`, lê a configuração do programa e possui rotinas para configurar a morfologia e definir as zonas do lago que será

modelado. O `glm_inflow.c` calcula as vazões de entrada, de saída e de extravasamento, o `glm_surface.c` realiza as transferências térmicas na superfície, calcula as entradas diárias de calor da radiação de ondas curtas (albedo, fluxos de radiação solar) e faz os diversos fluxos atmosféricos como evaporação, calor sensível e radiação de onda longa, com uma rotina de correção para a estabilidade atmosférica.

O `glm_mixer.c` calcula a circulação da superfície devido à ação cisalhante dos ventos e a circulação da coluna d'água pela energia potencial liberada pelo fluxo de densidade (*buoyancy flux*). O `glm_deep.c` calcula a dissipação da energia disponível em resposta à taxa de trabalho e energia por ventos e por influxos e calcula a circulação abaixo da camada superficial (camadas mais profundas e estratificadas da coluna d'água) usando uma difusividade vertical e checa a estabilidade das camadas. O `glm_aed2.F90` lê a configuração do módulo de qualidade da água, define os módulos que serão utilizados, aloca os dados de qualidade da água, define as zonas e calcula fluxos bentônicos.

O Apêndice A, deste trabalho apresenta a descrição e a extensão dos arquivos que devem existir em uma mesma pasta para execução adequada do modelo GLM e o Apêndice B apresenta o cabeçalho dos de tais arquivos de entrada.

### 3.3.2 GLMr

A *Global Lake Ecological Observatory Network* (GLEON) desenvolveu funções, chamadas 'ferramentas' ou *tools*, que interagem com o GLM em interface com o *software* R que é um sistema livre de computação estatística e geração de gráficos. Para a modelagem deste projeto utilizou-se o RStudio Team (2015), que é um ambiente de desenvolvimento integrado para a linguagem de programação estatística R. Esse software permite a instalação de pacotes com os algoritmos de modelagem hidrodinâmica, dentre esses se encontram o *glmtools* e o GLMr.

Essas ferramentas disponíveis no '*glmtools*' fazem a interação do GLM com o R e o 'pacote' (*package*) de base do modelo se chama GLMr. Os pacotes são coleções de funções específicas para uma determinada área do conhecimento. As '*glmtools*' são funções básicas que retornam algumas informações do modelo, fazem as simulações, calculam derivadas físicas e propriedades térmicas, plotam o arquivo de saída e, ainda, possuem métricas que comparam os dados simulados com os observados. O GLMr possui o código fonte do modelo, e é programado para conter a versão mais atualizada do GLM.

Neste estudo será utilizada a versão GLMr para rodar o modelo GLM, gerar os resultados e analisá-los. Neste estudo utilizou-se o GLMr versão 3.1.16 disponibilizado por Winslow e Read (2014), o qual ainda está em fase experimental. O Apêndice C deste trabalho apresenta o script em linguagem R criado para a simulação por meio do GLM, utilizando os pacotes GLMr e *glmtools*.

A Figura 3-4 apresenta a relação entre o GLM e o software R. O usuário insere os dados de entrada (dados no formato .csv e variáveis no arquivo.nml) no software R que irá configurar os arquivos e executar o programa GLM. O R processa os arquivos de saída obtendo as variáveis e plotando os resultados.

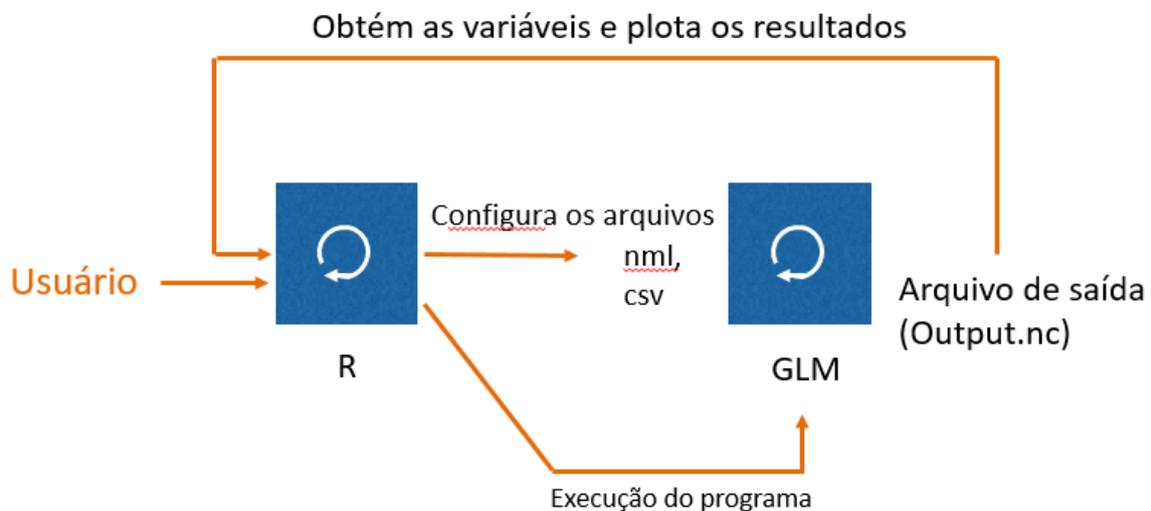


Figura 3-3 - Relação entre o GLM e o R. Fonte: EDDIE (2016).

### 3.3.2 Aplicações do GLM

Read *et al.* (2014) modelaram 2368 lagos temperados utilizando o GLM. O grupo de pesquisadores utilizou um banco de dados de 33 anos (1979-2011) e tinham como objetivo examinar a sensibilidade da temperatura modelada no GLM à transparência da água, tempo de residência e altura da cobertura do vento. Observou-se que o GLM apresentou boas previsões para as temperaturas observadas, assim como a presença/ausência de estratificação, entretanto, no hipolimnio as simulações foram menos precisas. Os autores examinaram a sensibilidade da temperatura modelada no GLM à transparência da água, tempo de residência e altura da cobertura do vento, e colocam que a transparência da água controla a taxa de radiação solar no comprimento de ondas do visível que é atenuada ao longo da coluna d'água, e dessa maneira, o parâmetro  $K_w$  (coeficiente de atenuação vertical da luz) torna-se muito importante. Outro

parâmetro que os autores colocam como influente é o coeficiente aerodinâmico de transferência de momento ( $Cd$ ), por controlar o fluxo de energia de mistura impulsionada pelo vento e, por fim, os coeficientes de cobertura do vento. Os autores encontraram valores de RMSE de 2.78°C para as temperaturas ao longo da coluna d'água, 1.74° C para as temperaturas do epilimnio e 3.33°C para as temperaturas do hipolimnio. Os pesquisadores concluíram pela análise de sensibilidade preliminar que melhorando as estimativas da transparência da água podem-se produzir ganhos significativos na qualidade das temperaturas simuladas nas profundidades maiores.

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 em razão de sua característica de focar nos processos principais de lagos como estratificação e circulação vertical. Os resultados de saída da modelagem demonstraram bom desempenho na simulação da temperatura, mas fraca capacidade de simular a dinâmica do gelo.

Bueche *et al.* (2017) utilizaram o GLM para simular temperaturas da água e formação de gelo do lago Ammersee, na Alemanha. O lago Ammersee é de origem glacial, possui uma profundidade média de 38,6 metros, profundidade máxima de 83,7 metros e uma área superficial de 46,6 km<sup>2</sup>. A simulação da água para o período de calibração apresentou um erro quadrático médio total de 0.65°C e um erro médio de 0.08°C. O padrão de estratificação sazonal e a estrutura térmica anual foram bem reproduzidas pelo modelo. A análise estatística dos resultados da calibração do modelo para o lago Ammersee indica um ajuste comparável ou melhor do que a maioria dos outros modelos hidrodinâmicos que já são bem estabelecidos, além de oferecer oportunidade para simulações contínuas. Os resultados indicam uma grande melhora da nova versão do GLM em comparação com as versões anteriores do modelo e demonstram a aplicabilidade desse modelo para estudos limnofísicos que permeiam também mudanças climáticas.

Silva *et al.* (2015) usaram o GLM para modelar a lagoa da Pampulha, situada em Belo Horizonte, Minas Gerais, com o objetivo de avaliar os impactos do escoamento superficial de água da chuva na estrutura térmica e na dinâmica das cianobactérias em um lago tropical urbano. Os autores simularam a temperatura e a circulação da coluna d'água do lago. A temperatura da água simulada foi compatível com a observada e apresentou um  $rmse = 0.70^{\circ}C$ , demonstrando que os resultados obtidos foram muito satisfatórios quando comparados a outros estudos que usaram modelos similares ao GLM, por exemplo, Burger *et al.* (2008) e Trolle *et*

*al.* (2008) obtiveram o rmse de 0.97°C e 1.4°C, respectivamente, usando o modelo DYRESM (Centre for Water Research, University of Western Australia). Os dados monitorados e os resultados do modelo demonstraram que os eventos de precipitação, os quais ocorrem principalmente durante o verão, são responsáveis parcialmente ou até mesmo totalmente pela circulação da coluna d'água e, também por iniciar crescimento de algas durante o verão.

Barbosa *et al.* (2015) aplicaram o modelo hidrodinâmico GLM no lago Paranoá localizado em Brasília-DF. Nesse estudo a temperatura da água foi a variável de controle selecionada para calibração do GLM. Dois parâmetros relacionados à termodinâmica e um relacionado às propriedades do Lago se mostraram mais sensíveis: coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente ( $C_e$ ), coeficiente aerodinâmico de transferência de momento ( $C_d$ ) e coeficiente de atenuação vertical da luz ( $K_w$ ). Os resultados da simulação do modelo foram satisfatórios e evidenciaram o comportamento do perfil de temperatura ao longo da coluna d'água e em quatro profundidades monitoradas pela Companhia de Saneamento do Distrito Federal (CAESB). O perfil ao longo da coluna d'água possibilitou a compreensão da variação física do Lago durante os dois anos considerados para a calibração (2007-2009). Foi encontrado um RMSE de 1.47°C para as temperaturas na coluna d'água e um coeficiente de correlação em torno de 50%. Para as quatro profundidades avaliadas, os erros não passaram de 2°C e diminuíram com o aumento da profundidade, foram notados melhores ajustes em maiores profundidades. Apesar do GLM ser um modelo ainda em desenvolvimento e com poucas aplicações em estudos, mostrou-se uma ferramenta com potencial satisfatório para análise do perfil térmico de lagos e reservatórios, além de apresentar o benefício de oferecer modelagens contínuas. Acredita-se que esse modelo será útil para representar a hidrodinâmica da área de estudo desta monografia.

### **3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.4.1 Lago Paranoá**

O objeto de estudo do presente trabalho é o lago Paranoá, um reservatório situado na bacia do rio Paranoá localizada na região central do Distrito Federal, abrangendo uma área de aproximadamente 1.054 km<sup>2</sup>, o que corresponde a cerca de 18% de seu território. A unidade hidrográfica do Lago recebe águas da drenagem pluvial urbana e dos efluentes das duas estações de tratamento de esgotos situadas nas suas margens (ETE's Sul e Norte). A bacia do lago Paranoá é formada pelas unidades hidrográficas: córrego Bananal, Riacho Fundo, ribeirão do Gama, ribeirão do Torto e lago Paranoá (PGIRHDF, 2011).

O Lago possui área superficial de 37,50 km<sup>2</sup> e volume total de 498x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> à cota 1000 metros (Ferrante *et al.*, 2001). O lago Paranoá, foi construído em 1959 e teve como objetivo melhorar o clima da cidade e também promover o paisagismo e a recreação, além de permitir a geração de energia elétrica, (CAESB, 2005). O Lago é de elevada importância para a região, abrangendo as Regiões Administrativas (RA's) de Brasília, Lago Sul, Lago Norte, Cruzeiro, Núcleo Bandeirante, Candangolândia, Riacho Fundo, Guará, parte de Taguatinga e a área urbana do Paranoá. Na Figura 3-5 apresenta-se as estações de monitoramento do Lago Paranoá; A – braço do Riacho Fundo; B – braço do Gama; C – região mais profunda do Lago; D – braço do Torto; E – braço do Bananal; G e H – porções centrais.

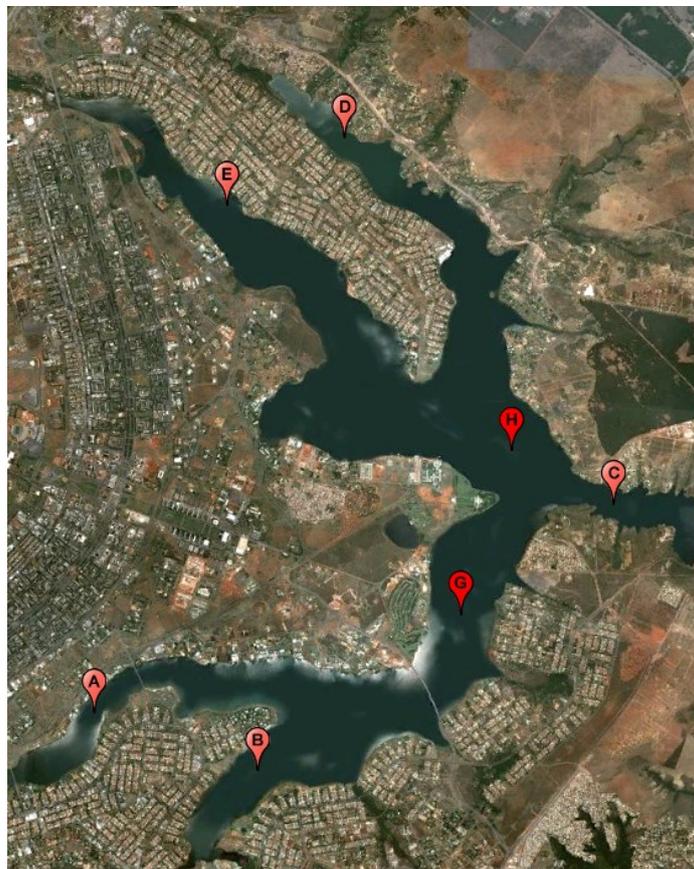


Figura 3-5 – Estações de monitoramento do lago Paranoá/DF.

O lago Paranoá foi um dos muitos exemplos de reservatórios urbanos tropicais que teve a qualidade das suas águas severamente deteriorada por um acelerado processo de eutrofização, especialmente durante as décadas de 1970 a 1990, o lago recebeu aportes crescentes de nutrientes, oriundos de esgotos brutos e não convenientemente tratados, responsáveis pelo aparecimento dos sintomas indesejáveis da eutrofização, i.e., florações de Cianobactérias (especialmente *Microcystis aeruginosa* e *Cylindrospermopsis raciborskii*) e causando

mortandades de peixes, principalmente as espécies exóticas carpa comum (*Cyprinus carpio*) e as tilápias (*Oreochromis niloticus* e *Tilapia rendalli*), por déficit de oxigênio dissolvido. O Programa de Despoluição do Lago Paranoá, implantado a partir de meados da década de 1990, concentrou esforços em atuar tanto no controle do aporte externo de fósforo (fator limitante ao crescimento do fitoplâncton) como também no seu aporte interno (Starling *et al.*, 2002).

Quanto à morfologia, o Lago apresenta formato dendrítico, bem compartimentado, recebendo seus afluentes em diferentes pontos. Nos braços, a profundidade pode variar de 5 a 20 metros e na região central apresenta profundidades maiores que 20 metros (Souza, 2013). O tempo de residência nos braços é maior que no centro do Lago e os tributários que chegam a cada braço apresentam características distintas em relação à qualidade da água, pelos diferentes graus de conservação das microbacias, da densidade populacional e usos do solo e dos recursos hídricos (Machado, 2004; Souza, 2013).

O clima predominante da região é caracterizado pela ocorrência bem definida de verões chuvosos e invernos secos. A estação chuvosa se inicia em outubro e termina em abril, representando cerca de 90% do total precipitado no ano. O trimestre mais chuvoso é o de novembro a janeiro. A estação seca vai de maio a setembro, sendo o trimestre de junho a agosto o mais seco, responsável por somente cerca de 2% do total anual precipitado. A umidade relativa do ar acompanha o padrão sazonal das precipitações, apresenta pequena variação de janeiro a abril, com média de 77%, seguindo-se queda acentuada dos valores até setembro, com mínima em agosto, com média de 49%, para voltar a recuperar a umidade a partir de outubro, com a chegada das chuvas. A insolação tem comportamento inverso ao da umidade, sendo máxima nos meses de julho e agosto. Com relação à temperatura média do ar, os meses de setembro e outubro são os mais quentes, sendo o mês de julho o mais frio. A evaporação é maior no trimestre julho/setembro, atingindo seu máximo em agosto (PGIRHDF, 2011).

Um aspecto extremamente importante em relação ao modelo do Lago Paranoá elaborado no presente trabalho, refere-se aos dados batimétricos. Os dados obtidos junto ao Instituto de Geociências da UnB, apresentavam profundidade máxima de 29m, em ponto próximo a barragem. Contudo, nas campanhas de monitoramento do Lago no âmbito do projeto “Avaliação do impacto do uso da terra sobre os sistemas aquáticos das Bacias Hidrográficas do Descoberto e do Paranoá para determinação de indicadores de integridade ambiental” (Koide, 2010), realizadas a partir do ano de 2011, foi verificado que a profundidade máxima no ponto C de monitoramento era de 42 metros (LIPRORONI, 2012).

Além dos usos múltiplos do Lago, a bacia do Paranoá possui relevante importância por abrigar o sistema integrado de abastecimento Santa Maria/Torto, cujas nascentes se localizam no Parque Nacional de Brasília. Esse manancial é responsável por cerca de 26% do abastecimento público de água do DF, abastecendo as regiões administrativas de Brasília, Cruzeiro, Lago Norte, Lago Sul, Paranoá, Guará, Santa Maria e Sobradinho (GDF, 2012a). A Figura 3-6 apresenta o perfil batimétrico do lago Paranoá. Os braços do lago possuem profundidade reduzida, ficando em torno de 10 a 15 metros e a região mais profunda do lago, próxima a barragem, referente a estação de amostragem C indicada na Figura 3-6, possui 29 metros de profundidade.

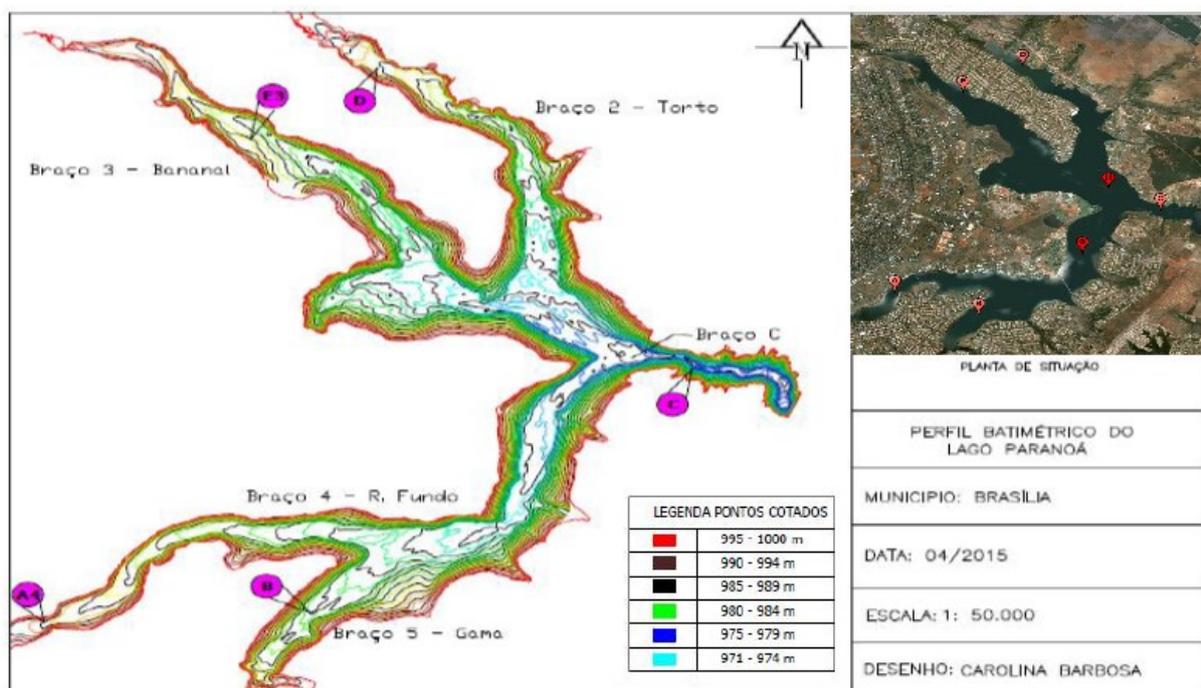


Figura 3-6 - Perfil batimétrico do lago Paranoá com curvas de nível de 1 em 1 metro a partir da borda com cota 1000m. Adaptado de Barbosa (2015).

### 3.4.3 Delimitação da área para a modelagem

#### 3.4.3.1 Braço do Torto - Unidade Hidrográfica do Ribeirão do Torto

O Ribeirão do Torto possui uma área de drenagem de aproximadamente 250 km<sup>2</sup> e seu curso principal mede cerca de 20 km. A presença das barragens de Santa Maria/Torto, utilizadas para captação pela CAESB (1.200 e 500 l/s) alterou o regime natural dessa bacia, que deságua no Lago com vazão média de 2,89m<sup>3</sup>/s. Seus principais afluentes são os córregos Tortinho e Três Barras, juntamente com o Ribeirão de Santa Maria. Na região mais a jusante dessa Unidade, a área que percorre o Ribeirão do Torto atravessa a zona rural constituída pelo Lago Oeste e a

Granja do Torto, observando-se também áreas urbanas como o Varjão e Setor de Mansões Lago Norte. No restante da área encontra-se o Parque Nacional de Brasília (Ferrante et al., 2002; CAESB, 2003; GDF, 2012(a), LIPORONI, 2012).

O sistema Santa Maria/Torto é o segundo em porte do DF, sendo responsável pelo abastecimento de aproximadamente 21% da população urbana em áreas regularizadas (2001). Faz parte deste sistema o ribeirão Santa Maria, localizado na bacia hidrográfica do lago Paranoá nos limites do Parque Nacional de Brasília. Suas águas têm apresentado qualidade satisfatória, excetuando-se a presença eventual de algas. O ribeirão Santa Maria possui barragem de acumulação e o Torto, de elevação de nível. A Figura 3-7 apresenta a Bacia do Santa Maria-Torto e Relevô.

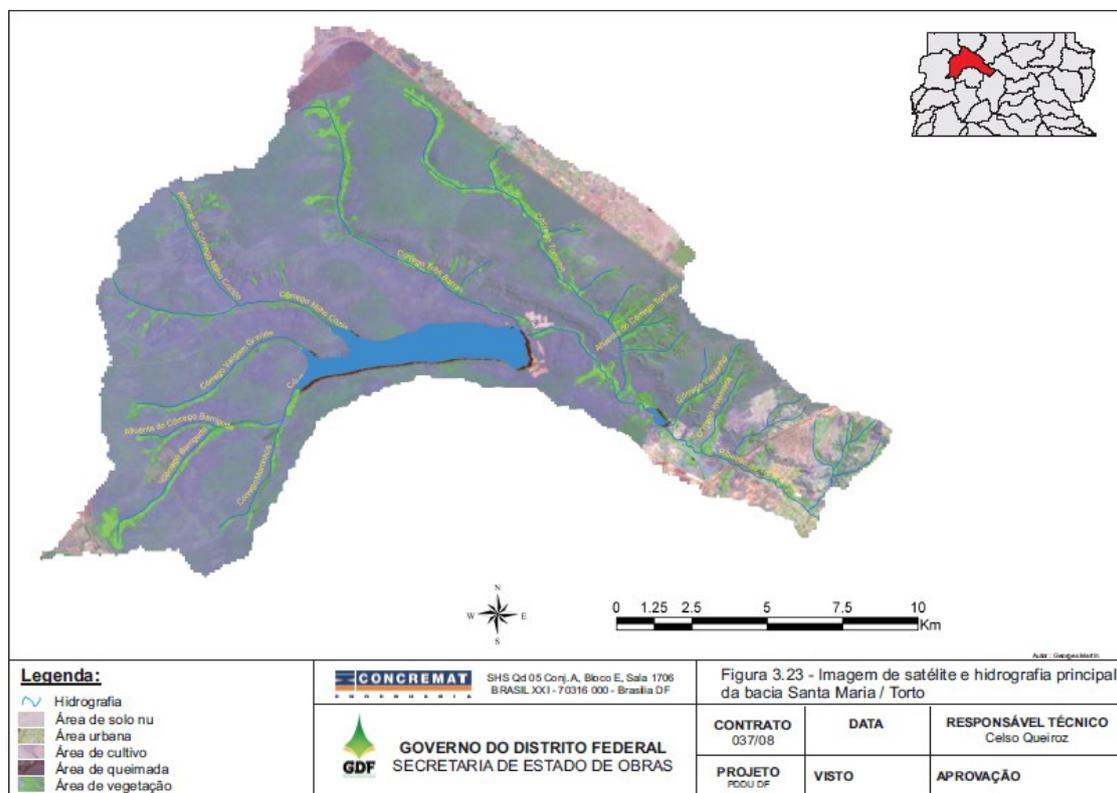


Figura 3-7 - Bacia do Santa Maria-Torto. Fonte: PDDU-DF.

A área, referente ao braço do Torto que foi delimitada para a aplicação do modelo GLM está destacada na cor azul escuro na Figura 3-8. Essa área engloba o local do Lago que é fonte de captação de água para abastecimento pela CAESB.

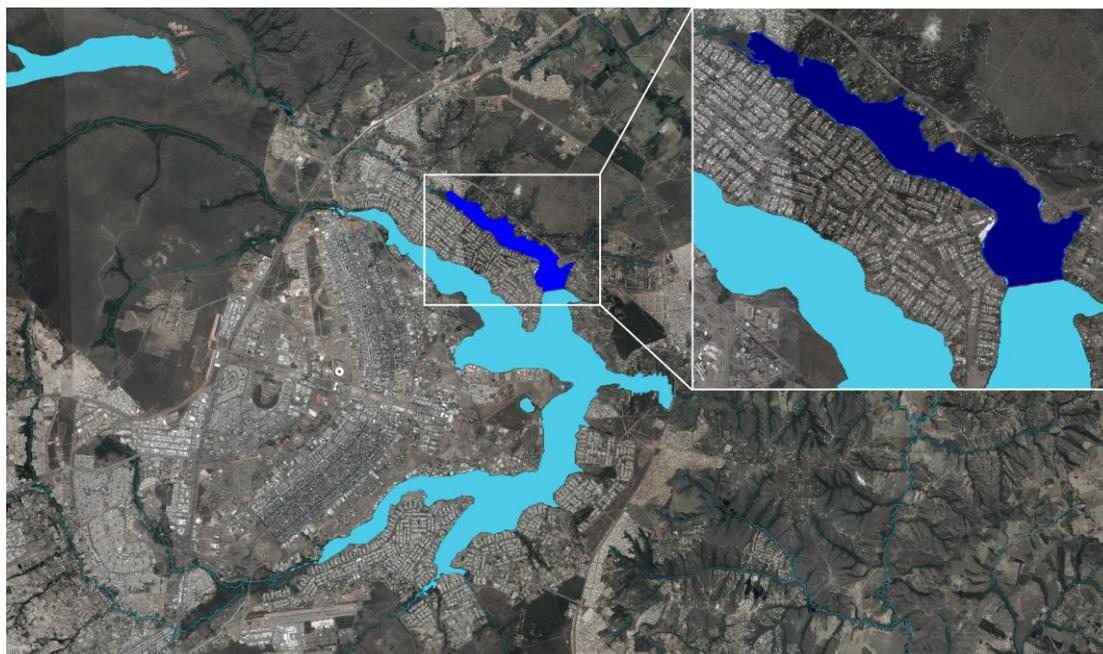


Figura 3-8 - Área do Braço do Torto (estação de amostragem D) escolhida para a primeira aplicação do modelo GLM.

#### 3.4.3.2 – Região mais profunda do Lago Paranoá

A segunda região do Lago Paranoá escolhida para a aplicação do modelo GLM foi a região central do lago, que engloba o local mais profundo do lago Paranoá/DF, próximo ao barramento e ao futuro ponto de captação de água para abastecimento para consumo humano. A Figura 3-9 apresenta a área referente a região mais profunda do lago Paranoá (estação de monitoramento C) escolhida para a segunda aplicação do modelo GLM. Nessa região também está prevista a utilização como fonte de captação de água para abastecimento pela CAESB.

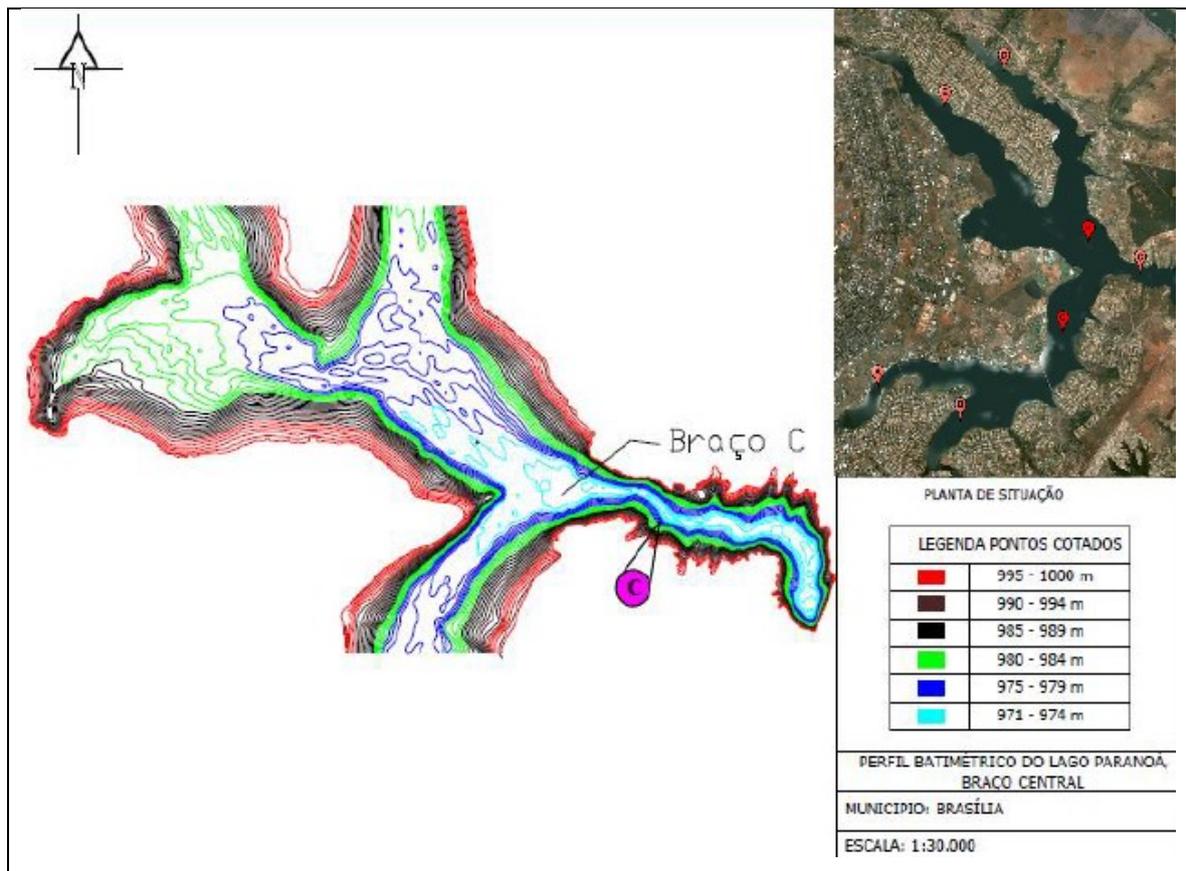


Figura 3-9 - Área referente a região mais profunda do lago Paranoá (estação de monitoramento C) escolhida para a segunda a aplicação do modelo GLM.

## 4 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido em duas regiões do lago Paranoá e como metodologia foi avaliado o uso do modelo hidrodinâmico unidimensional General Lake Model (GLM) para representação dos processos físicos que atuam nas duas regiões do ambiente. Segundo Yao *et al.* (2014), o modelo está sob contínuos testes, verificação e desenvolvimento. Por esta razão e, pelo seu recente desenvolvimento, existem poucos trabalhos publicados utilizando essa ferramenta.

A metodologia utilizada para aplicar a modelagem hidrodinâmica ao braço do Torto e na região mais profunda do lago Paranoá, próxima à barragem, é composta pelas seguintes etapas: a) análise exploratória de séries temporais; b) construção da base de dados para o desenvolvimento do estudo; c) definição das condições de contorno; d) análise de sensibilidade e calibração do GLM. Essas etapas estão ilustradas na Figura 4-1.

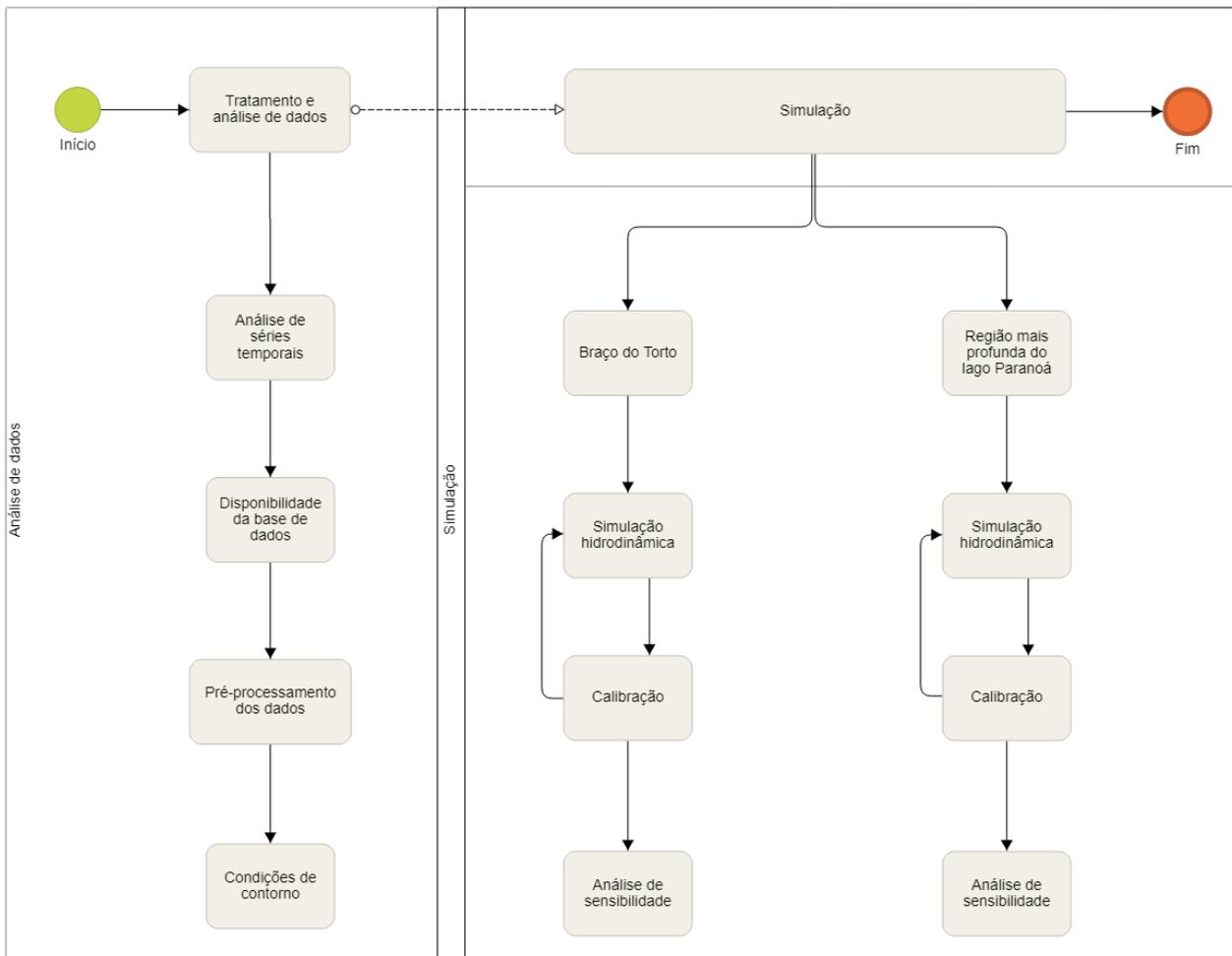


Figura 4-1 - Etapas da modelagem hidrodinâmica.

#### 4.1 – Análise exploratória de séries temporais

Realizou-se uma análise exploratória dos dados do monitoramento limnológico gerados no âmbito do projeto intitulado “Avaliação do impacto do uso da terra sobre os sistemas aquáticos das Bacias Hidrográficas do Descoberto e do Paranoá para determinação de indicadores de integridade ambiental”, aprovado no Edital MCT/CNPq/FNDCT/FAPs/MEC/CAPES/PRO-CENTRO-OESTE N° 031/2010. A análise dos dados foi realizada por meio de séries temporais utilizando-se o software Surfer para geração de gráficos de superfície e interpolação de dados. Como o período chuvoso é caracterizado por maiores temperaturas atmosféricas e conseqüentemente aumento da temperatura da água, sendo possível observar variações sazonais nos ambientes aquáticos, foram analisados separadamente os resultados de dois períodos distintos, a estação chuvosa, em geral de outubro a março, e a estação de seca, de abril a setembro. Os parâmetros foram determinados nas respectivas profundidades da coluna d’água, superfície, profundidade de extinção do disco de Secchi, final da zona eufótica, meio da zona afótica e a um metro do fundo.

Os dados dos parâmetros oxigênio dissolvido e temperatura dos meses de julho de 2012 e março de 2014 até novembro 2014 foram medidos a cada um metro de profundidade da coluna d'água, pois foram obtidos com o uso de uma sonda multiparâmetros. Nos meses onde a determinação dos parâmetros não abrangeu todas as profundidades, foi empregada a ferramenta de interpolação de dados (o método de interpolação usado foi o *Kriging*) do software Surfer. A ferramenta foi aplicada para representar os valores ausentes ao longo da coluna d'água, gerando assim um Contourn Map. O monitoramento apresentou frequência mensal, os pontos destacados nos gráficos, foram gerados a partir de um *Post Map*, eles representam os dados realmente obtidos durante os três ciclos hidrológicos monitorados.

#### **4.2 Base de dados**

Nesta etapa, foi realizada uma busca pelos dados de entrada do modelo hidrodinâmico, o GLM requer como entrada dados meteorológicos, morfométricos, hidrológicos e dados de temperatura da água do lago e dos tributários. Assim, a base de dados para este trabalho foi composta pelo banco de dados de Barbosa (2015) e Pinto (2018), que contemplam os anos entre 1976 até 2014. Os dados de precipitação e de vazão nos afluentes foram oriundos do programa de monitoramento da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB realizado desde 1976. Os demais dados foram fornecidos pelas instituições: Agência reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal - Adasa, Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e Companhia Energética de Brasília – CEB.

Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao INMET e INPE para a Estação Brasília que se localiza nas coordenadas 15°36'03"S e 47°42'47"O. A localização das estações está apresentada na Figura 4-2. Os dados do INMET correspondem as variáveis de precipitação e radiação de ondas curtas com medidas horárias de 2000 a 2017 e temperatura do ar e velocidade do vento com médias diárias de 1961 a 2017. Já o INPE, por meio da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), disponibiliza o acesso aos dados na rede. 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. Dessa forma, foram coletados os dados de ondas longas, ondas curtas, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação com medições minuto a minuto disponíveis de 2004 a 2017, esses dados foram

transformados para passo horário para serem usados na modelagem. Os dados de batimetria relativos à cota, área e volume do Lago foram provenientes do Relatório de Levantamentos Batimétricos e Sedimentométricos do lago Paranoá (CAESB, 2003) e arquivos em formato AutoCAD® disponibilizados pela CAESB.

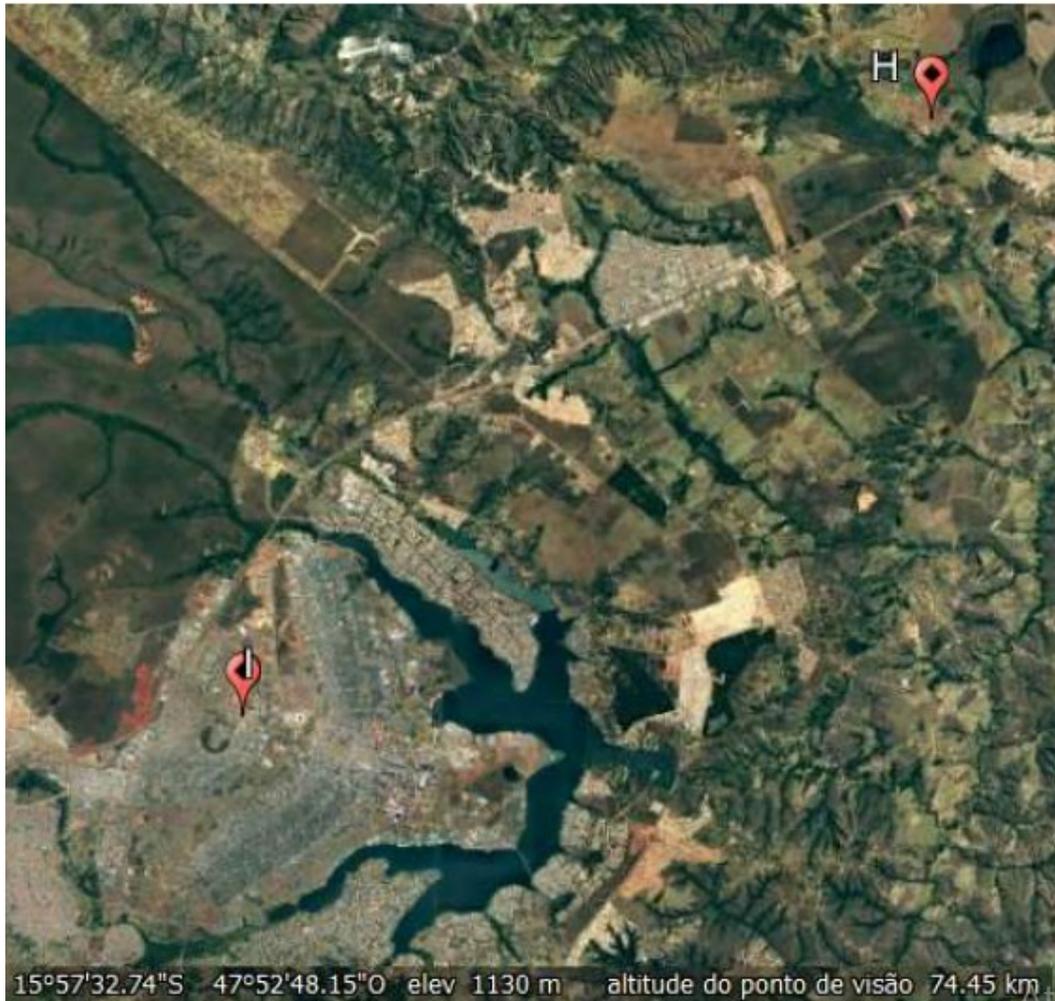


Figura 4-2 Estações climáticas de monitoramento do (H) SONDA/INPE e do (I) INMET.  
Fonte: Adaptado de Pinto, 2018.

A Tabela 4-1 apresenta os dados de entrada do GLM que compuseram os bancos de dados deste trabalho, a fonte, a frequência de monitoramento, a unidade de medida e o período a partir do qual esses dados foram disponibilizados.

Tabela 4-1 - Dados utilizados na organização do banco de dados para a modelagem.

<b>Tipo de dado de entrada</b>	<b>Dados</b>	<b>Fonte</b>	<b>Frequência</b>	<b>Unidade de medida</b>	<b>Ano inicial dos dados</b>
Metereológicos	Ondas longas	INPE	Minuto	W/m <sup>2</sup>	2004
	Ondas curtas	INMET	Horário	W/m <sup>2</sup>	2000
	Temperatura do ar	INMET	Diário	°C	1961
	Umidade relativa	INPE	Minuto	%	2004
	Velocidade do vento	INMET	Diário	m/s	1961
	Precipitação	INMET	Horário	m/dia	2000
Hidrológicos	Vazão	CAESB	Diário	m <sup>3</sup> /s	1976
Morfométricos	Batimetria	CAESB	-	-	2003

Com a base de dados elaborada, foi possível iniciar a etapa de análise da qualidade dos dados históricos disponíveis e, assim, selecionar os períodos adequados para a aplicação do modelo, além de estabelecer as condições de contorno consideradas na modelagem.

#### **4.3 Condições de contorno**

As condições de contorno adotadas para aplicar o modelo GLM, ao compartimento do Lago referente ao braço do Torto foram necessárias para definir quais vazões de entrada e saída (volume de controle) seriam consideradas na modelagem. As vazões de entrada existentes do braço do Torto são: Tributários; Precipitação e Escoamento superficial direto. A vazão de saída é a contribuição do braço do Torto para o lago Paranoá, como esse dado não é conhecido, essa vazão foi calculada, a partir de uma seção trapezoidal que delimitou o final do compartimento referente ao braço do Torto. Como o modelo GLM é um modelo unidimensional, vertical, uma outra condição de contorno é de que a variação de fluxo horizontal do Lago, nesta região, não é muito significativa. O volume de controle considerado para a simulação foi da entrada do braço do Torto até a região delimitada na Figura 3-9. Os afluentes considerados foram os tributários: Torto, Jerivá, Tamanduá e Urubu. A vazão de saída foi considerada como a vazão de entrada saindo por uma seção trapezoidal. Optou-se por realizar a simulação e calibração com início em 01/10/2011 e término 31/12/2014, esse período foi definido considerando os dados disponíveis.

Para a aplicação do GLM na região mais profunda do lago Paranoá, a principal condição de contorno foi considerar os braços como tributários, modelando apenas a parte central do lago. A vazão de entrada foi a vazão de escoamento superficial direto somada a vazão de cada

tributário e a vazão de saída foi a vazão turbinada pela CEB somada a vazão vertida na barragem do lago Paranoá. Optou-se por realizar a simulação e calibração com início em 01/03/2007 e término em 31/03/2009 devido a qualidade dos dados disponíveis. Essa mesma abordagem também foi adotada por Barbosa (2015) ao simular a região mais profunda do lago Paranoá.

Para ambos os casos (estação de monitoramento D e C) foram desconsideradas as trocas de fluxos do fundo do reservatório com águas subterrâneas e a salinidade foi considerada constante ao longo da coluna d'água. Não considerou-se a contribuição do escoamento de base.

#### 4.4 Cálculo da vazão de escoamento superficial direto

Os coeficientes para o cálculo do escoamento superficial direto foram obtidos em estudo realizado por Pires (2004). Nesse trabalho a autora obteve melhores resultados utilizando valores constantes de coeficiente de escoamento superficial ao longo do tempo e específicos para a bacia de drenagem do Distrito Federal. As vazões de cada tributário foram somadas às águas de drenagem urbana, ou seja, foi calculado o escoamento superficial direto de cada braço do lago Paranoá (inclusive para o braço do Torto) utilizando-se o método Racional. Essa estimativa teve por base o coeficiente de *runoff* adotado por Pires (2004) para o lago Paranoá, apresentado na Tabela 4-2, e a área de drenagem do braço do Torto obtida por Liporoni (2012) com a utilização do software de geo-processamento Arc-Gis, versão 9.3.1, utilizando a base cartográfica do Sistema Cartográfica do DF (SICAD), em escala 1:10.000.

Tabela 4-2 - Coeficientes de escoamento superficial utilizados no cálculo da contribuição direta ao Lago. Fonte: (Pires, 2004).

Área de drenagem	Coefficiente de escoamento superficial
Torto	0.1
Bananal	0.16
Riacho Fundo	0.16
Gama	0.1
Central	0.14

#### 4.5 Tratamento de dados e análise dos dados

Nesta etapa foi realizada a construção do banco de dados secundários que foi composta por um período de dez anos escolhidos a partir da análise de consistência dos dados e para o período mais recente de dados monitorados, de 2007 até 2014. O tratamento de dados incluiu a verificação das unidades de medidas e tipo de discretização dos dados e, quando necessário,

foram feitas as devidas conversões de modo que os dados utilizados estivessem compatibilizados com os dados de entrada do modelo.

Para a análise de consistência dos dados foi realizada uma análise exploratória que consistiu na plotagem desses dados em gráficos para determinação e possível remoção de *outliers* além da análise da frequência dos dados, essas etapas foram realizadas no software R. Essa análise exploratória possibilitou a seleção de um intervalo de tempo de dados para a realização da simulação do GLM.

#### **4.6 Simulação hidrodinâmica com GLM**

Primeiramente, a simulação hidrodinâmica foi efetuada com os parâmetros das equações no modo padrão (*default*) do modelo. O software RStudio Team (2015) foi utilizado para realizar as simulações. Como parte da simulação hidrodinâmica realizou-se a análise de sensibilidade dos dados e a calibração. A temperatura foi a variável de controle selecionada para calibração do GLM. O período simulado para o braço do Torto foi de 2011 até 2014 e para a região mais profunda foi de 2007 até 2009. Não realizou-se a etapa de verificação para o modelo hidrodinâmico dado a limitação de dados disponíveis.

##### **4.6.1 Automatização da calibração com o HydroPSO**

A temperatura é a variável de controle selecionada para calibração do GLM. O *Root Mean Square Error* - RMSE é uma medida do nível médio de erro de predição. Ele indica o quão perto os dados observados estão para os valores previstos do modelo (Malek et al., 2011). A unidade de medida do RMSE é a mesma da variável a que se refere e é a métrica mais utilizada. O cálculo do RMSE é dado pela Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_n - S_n)^2} \quad (1)$$

Onde,  $O_n$  é o valor observado no n-ésimo dia,  $S_n$  é o valor simulado no n-ésimo dia e  $N$  é o número de dias de simulação.

Objetivando o ajuste dos 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*.

O HydroPSO é um pacote de otimização global do software R que implementa uma versão atual do algoritmo de *Particle Swarm Optimization – PSO*, com foco especial na calibração de modelos ambientais. O HydroPSO permite aliviar a carga computacional de modelos complexos, é independente do modelo, permitindo que o usuário relacione facilmente qualquer código de modelo com o mecanismo de calibração (PSO) além de incluir uma série de opções de controle e variantes de PSO para ajustar o desempenho do mecanismo de otimização. O HydroPSO possui uma função avançada de análise de sensibilidade, juntamente com resumos de plotagem fáceis de usar, facilitando a interpretação e a avaliação dos resultados da calibração (Bigiarini *et.al*, 2018).

#### **4.6.2 Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade foi efetuada a partir da função avançada de análise de sensibilidade, a GLM\_MOD (LH\_OAT) que está inclusa no pacote utilizado para fazer a calibração, o R *HydroPSO*. Essa função implementa o *Latin-Hypercube One-factor-At-a-Time – LH\_OAT*, que é um método de realizar a análise de sensibilidade.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no desenvolvimento deste estudo, considerando as etapas de avaliação temporal da qualidade da água do braço do Torto e da região mais profunda do lago Paranoá, a estruturação e análise do banco de dados, a simulação do GLM, a calibração do GLM e a discussão dos resultados.

### **5.1 Avaliação temporal da qualidade da água das estações de amostragem D e C.**

No intuito de caracterizar o ambiente estudado serão analisados os resultados das séries temporais referentes aos parâmetros temperatura, oxigênio dissolvido, série nitrogenada e fosforada, monitorados no período entre os meses de agosto de 2011 até novembro de 2014 (período com dados em mais de uma profundidade disponíveis), da estação de amostragem D (braço do Torto) e da estação amostragem C, localizada na região mais profunda do Lago. É importante salientar que os gráficos não possuem a mesma escala devido a diferença de magnitude dos valores observados (ex.: nitrato, fósforo total e ortofosfato).

Na Figura 5-1 apresenta-se o perfil de distribuição de temperatura, oxigênio dissolvido e nutrientes para a da estação amostral D, braço do Torto, do lago Paranoá.

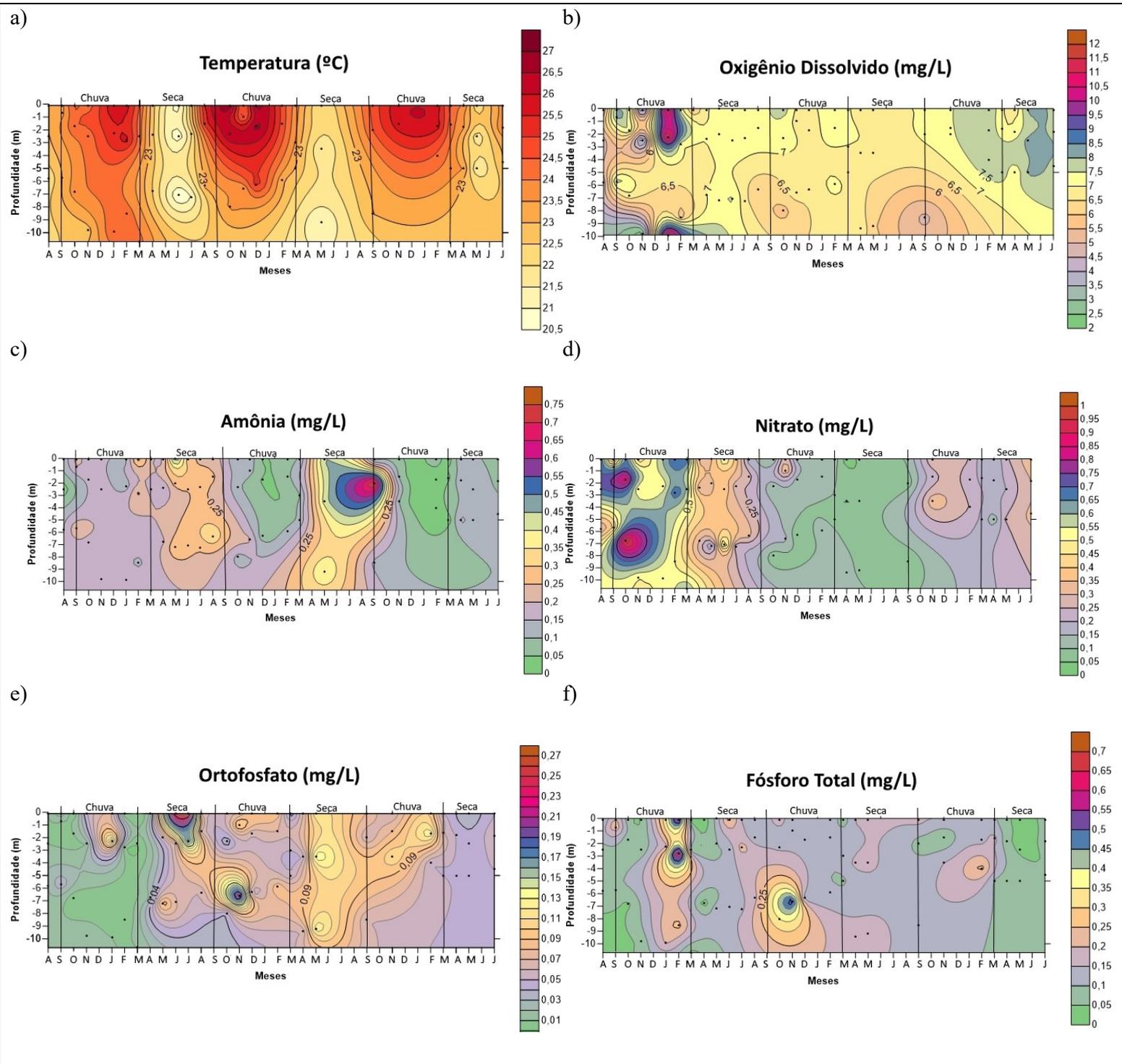


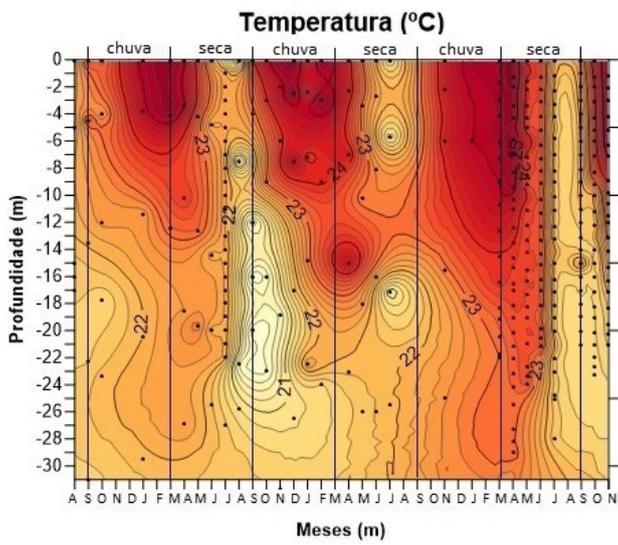
Figura 5-1 - Perfil de distribuição para a da estação de amostragem D do lago Paranoá. Temperatura (a) no período de agosto/2011 a julho/2014, Oxigênio dissolvido (b) de setembro/2011 a julho/2014, Amônia (c), Nitrato (d), Ortofosfato (e) de agosto/2011 a novembro/2014, e Fósforo total (f).

A estratificação térmica é determinada pela incidência de radiação solar e pelas mudanças de densidade das camadas de água, geradas pela variação da temperatura. Na Figura 5-1-a) pode-se observar estratificação térmica no período de chuva (verão) e circulação nos meses de seca (inverno). A variação de densidade da água em faixas de temperaturas mais elevadas é mais pronunciada, o que faz com que pequenas variações de temperatura evidenciem a mudança de densidade da água, levando a ocorrência da estratificação.

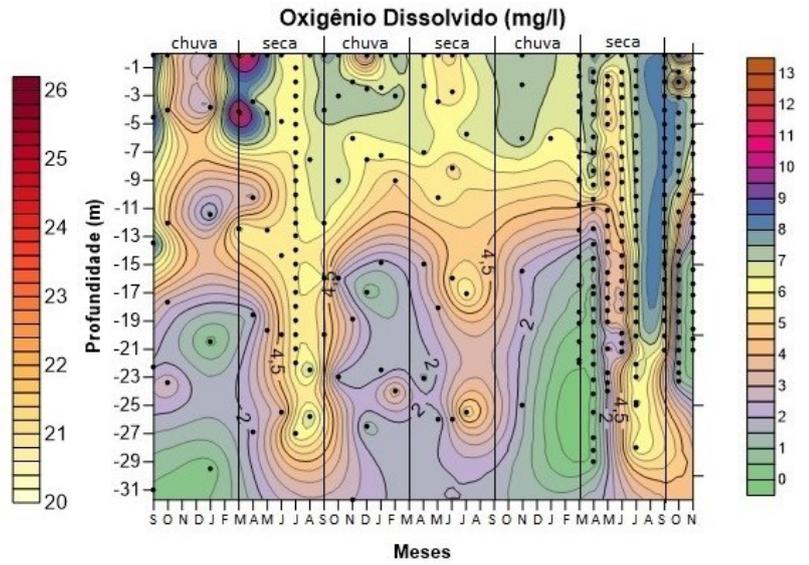
Analisando-se o perfil térmico da estação de amostragem D na Figura 5-1-a) nota-se que os períodos com maiores temperaturas na coluna d'água, foram observados ao final do período chuvoso (fevereiro e março) e início do período seco (abril e maio). O oxigênio dissolvido manteve-se na faixa de 5 a 9mg/L durante os três ciclos hidrológicos avaliados, com poucas alterações desses valores. No período chuvoso de 2011, nota-se valores mais elevados de oxigênio dissolvido na superfície e no fundo da coluna d'água, os valores elevados na superfície podem ser derivados da produção de oxigênio devido a proliferação de algas, já para a discrepância no fundo pode ser devido a problemas com a sonda. No período seco, caracterizado pelas estações de outono e inverno, observa-se a circulação da massa d'água, bem marcada nos meses de junho e julho, com quebra da estratificação térmica. Nas Figuras 5-1 (c) e (d) pode-se observar variação dos valores de nitrogênio amoniacal entre 0,05 e 0,5 (mg/l) e de nitrato entre 0,05 e 0,7 (mg/l) na maior parte do período monitorado. Em relação as concentrações de fósforo, nas Figuras 5-1 (e) e (f) apresenta-se as concentrações de ortofosfato variando entre 0,01 e 0,15 e de fósforo total variando entre 0,05 e 0,5 (mg/l) na maior parte do período monitorado. Nota-se a partir da Figura 5-1 (e) elevadas concentrações de ortofosfato no período de seca de 2012, fator incomum pois geralmente na seca existe uma indisponibilidade de ortofosfato na superfície, pois esse nutriente é utilizado como substrato por algas. Não foi possível determinar um padrão de variação da distribuição dos nutrientes em relação a variação sazonal (períodos seco e chuvoso), com exceção do primeiro período chuvoso que apresentou maiores concentrações de nitrato e fósforo total. Na maior parte do período monitorado a concentração dos nutrientes mostrou condições de trofia baixas.

Na figura 5-2 são apresentados os perfis de distribuição de temperatura, oxigênio dissolvido e nutrientes para a da estação amostral C, região mais profunda, do lago Paranoá.

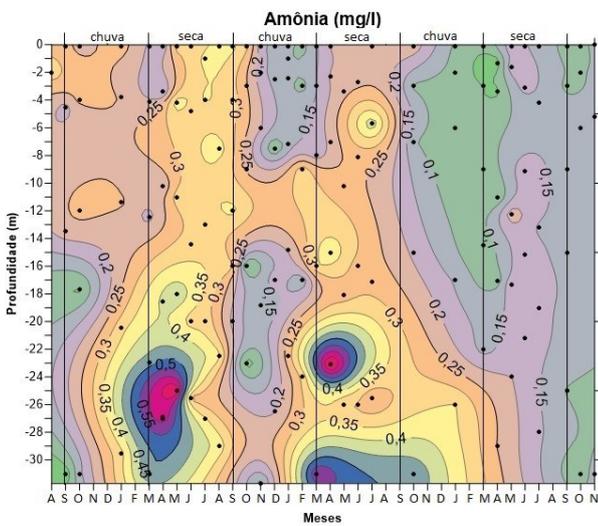
(a)



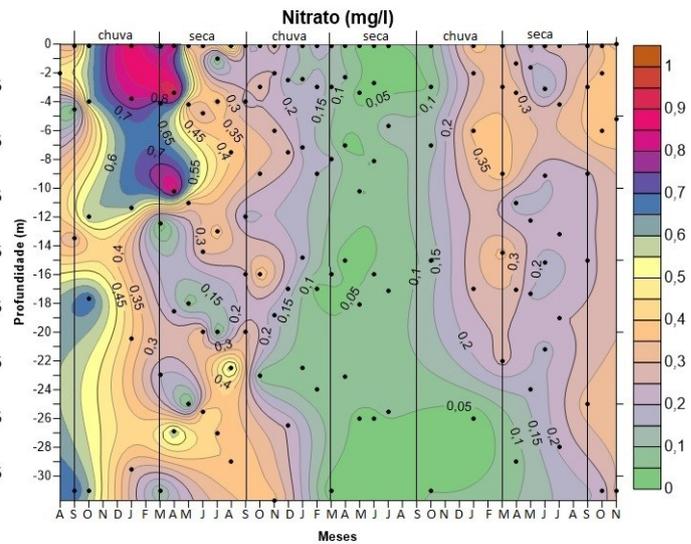
(b)



(c)



(d)



(e)

(f)

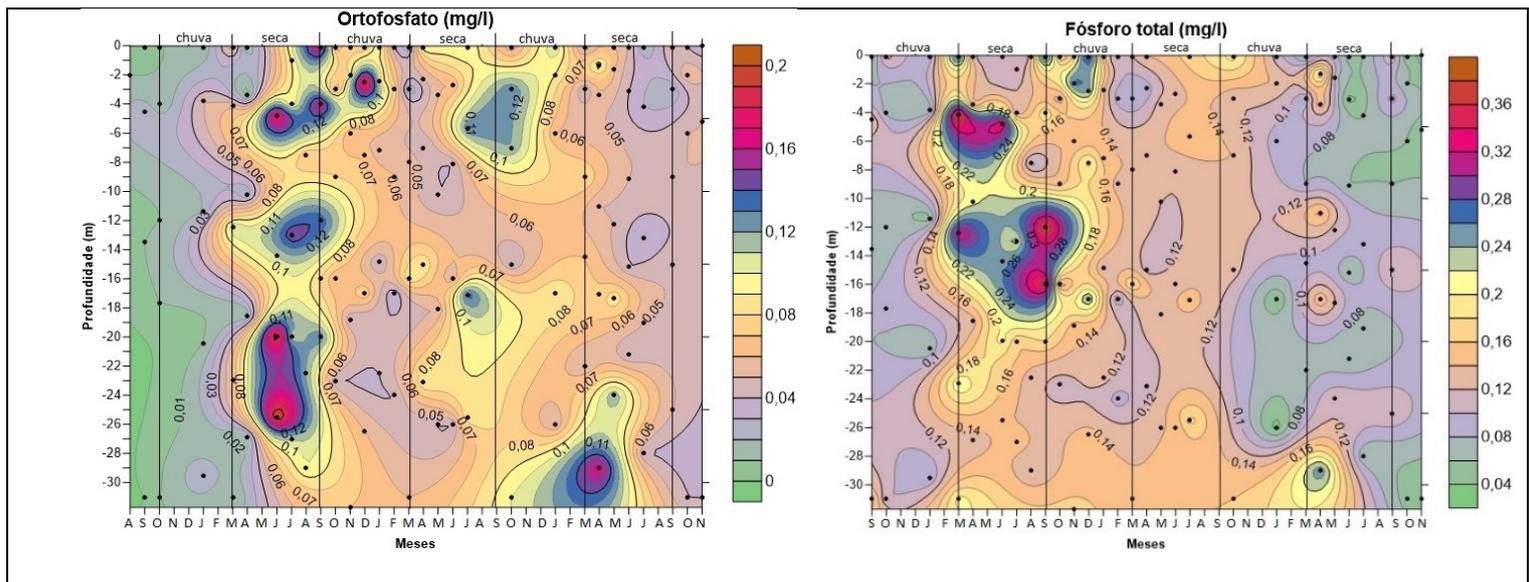


Figura 5-2 - Perfil da distribuição de parâmetros físicos e químicos para a estação de amostragem C. (a) Temperatura (°C), (b) Oxigênio dissolvido (mg/l), (c) amônia, nitrato (e), ortofosfato (f) e fósforo total (g) (mg/l), da estação de monitoramento C do lago Paranoá, no período de setembro de 2011 a novembro de 2014.

Verifica-se na figura 5-2 (a) e (b) a presença de estratificação térmica nos períodos de chuva (verão) e circulação nos períodos de seca (inverno), com isso observa-se também o aumento da concentração de oxigênio dissolvido no hipolímnio devido a circulação de massa d'água (Figura 5-1). Nos meses de julho foi notada a circulação completa da massa d'água e a distribuição do oxigênio dissolvido, ocorreu de forma mais homogênea.

A densidade da água em temperaturas mais elevadas é menor que a da água fria, ocorrendo assim estratificação térmica. A camada superior, geralmente contém níveis de OD mais elevados devido ao contato direto com a atmosfera, ocorrendo a troca gasosa e produção de OD, e pela fotossíntese realizada pelo fitoplâncton (microalgas e cianobactérias) e plantas aquáticas. Com a circulação, ocorre oxigenação das camadas do fundo e a coluna d'água apresenta-se homogênea. O perfil de oxigênio dissolvido (figura 5-2 b) apresenta concentrações de oxigênio dissolvido na faixa de 6 a 9 mg/l na maior parte do período monitorado, exceto no início de 2012 onde a concentração de oxigênio dissolvido chegou a 12 mg/l, podendo indicar um possível evento de floração.

De acordo com Esteves (1998), em lagos tropicais profundos, durante o período de estratificação, o hipolímnio, de onde se origina a maior parte dos nutrientes de origem autóctone para a zona eufótica, permanece isolado. Nestas condições, pode ocorrer um esgotamento dos principais nutrientes (fosfato, nitrato, amônia e silicato) na zona eufótica, com a consequente queda da produtividade primária do fitoplâncton. Na Figura 5-2 observa-se aumento da

concentração da amônia no fundo (5-2 c) nos meses de transição entre o período de estratificação (chuva) e circulação (seca). As concentrações de amônia (5-2 c) e ortofosfato (5-2 e) são maiores no fundo nesses períodos, fato que coincide com a estratificação e com a menor concentração de oxigênio dissolvido (ambiente redutor) e solubilização das formas reduzidas desses compostos do sedimento para essa camada. Na circulação ocorre a fertilização interna do ambiente, com a liberação dos nutrientes do sedimento para toda a coluna d'água. Contudo, os valores observados são característicos de um ambiente com baixo grau de trofia.

Analisando-se o perfil de distribuição das concentrações de nitrato na Figura 5-2 (d), e o perfil do OD (Figura 5-2 b), verifica-se que as maiores concentrações de nitrato são coincidentes com as maiores concentrações de oxigênio dissolvido durante a circulação, logo, as maiores concentrações de nitrato podem estar associadas ao ambiente mais oxidado, devido tanto à oxidação química, quanto biológica da amônia. As concentrações de ortofosfato ( $\text{PO}_4^3$ ) foram muito baixas. A estação de amostragem C encontra-se na região com pouca influência dos tributários afluentes ao lago Paranoá e também distante do lançamento dos efluentes das ETE B Sul e ETEB Norte, que contam com o tratamento terciário para remoção do fósforo e nitrogênio.

## **5.2 Estruturação da base de dados**

Nesta etapa, procedeu-se a construção do banco de dados de entrada necessários para a simulação utilizando o modelo GLM. Utilizou-se o banco de dados referente aos dados meteorológicos do ano de 2007 até 2014, da estação do INPE, disponibilizado por Pinto (2018). Dentre os dados disponibilizados por Barbosa (2015) foram utilizados neste trabalho dados de vazão e temperatura dos tributários do lago Paranoá.

Realizou-se uma análise da consistência e frequência do banco de dados disponibilizado por Pinto (2018) e Barbosa (2015) (Tabela 4-1). A escolha do período utilizado no estudo foi baseada na disponibilidade de todos os dados de entrada requeridos pelo modelo.

No que tange aos dados meteorológicos de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, como esses foram obtidos pelo INMET no passo horário, Pinto (2018) realizou uma análise de disponibilidade e frequência (Figura 5-3). Os dados de radiação de ondas longas e curtas foram provenientes do INPE. Estas variáveis radiométricas possuem discretização em minuto, assim, esses dados foram convertidos para dados horários. Os dados ausentes foram preenchidos por meio de interpolação linear. Assim, houve a

necessidade de analisar a consistência dos dados meteorológicos de entrada e verificar se havia valores destoantes ou fora da tendência para o período analisado.

A Figura 5-3 apresenta os dados meteorológicos de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, velocidade do vento, onda curta e onda longa plotados individualmente no software R. Todos esses dados são necessários para a simulação usando o GLM. Os dados de onda curta apresentaram discrepâncias da média a partir do ano de 2012, os valores de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, e velocidade do vento possuem uma variação dentro do esperado. É importante ressaltar que esses dados já se encontram nas unidades de medidas compatíveis com a entrada do modelo GLM, como apresentado na Tabela 0-1. Esses dados meteorológicos foram usados tanto na modelagem do braço do Torto (estação de amostragem D) quanto na modelagem para a região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C).

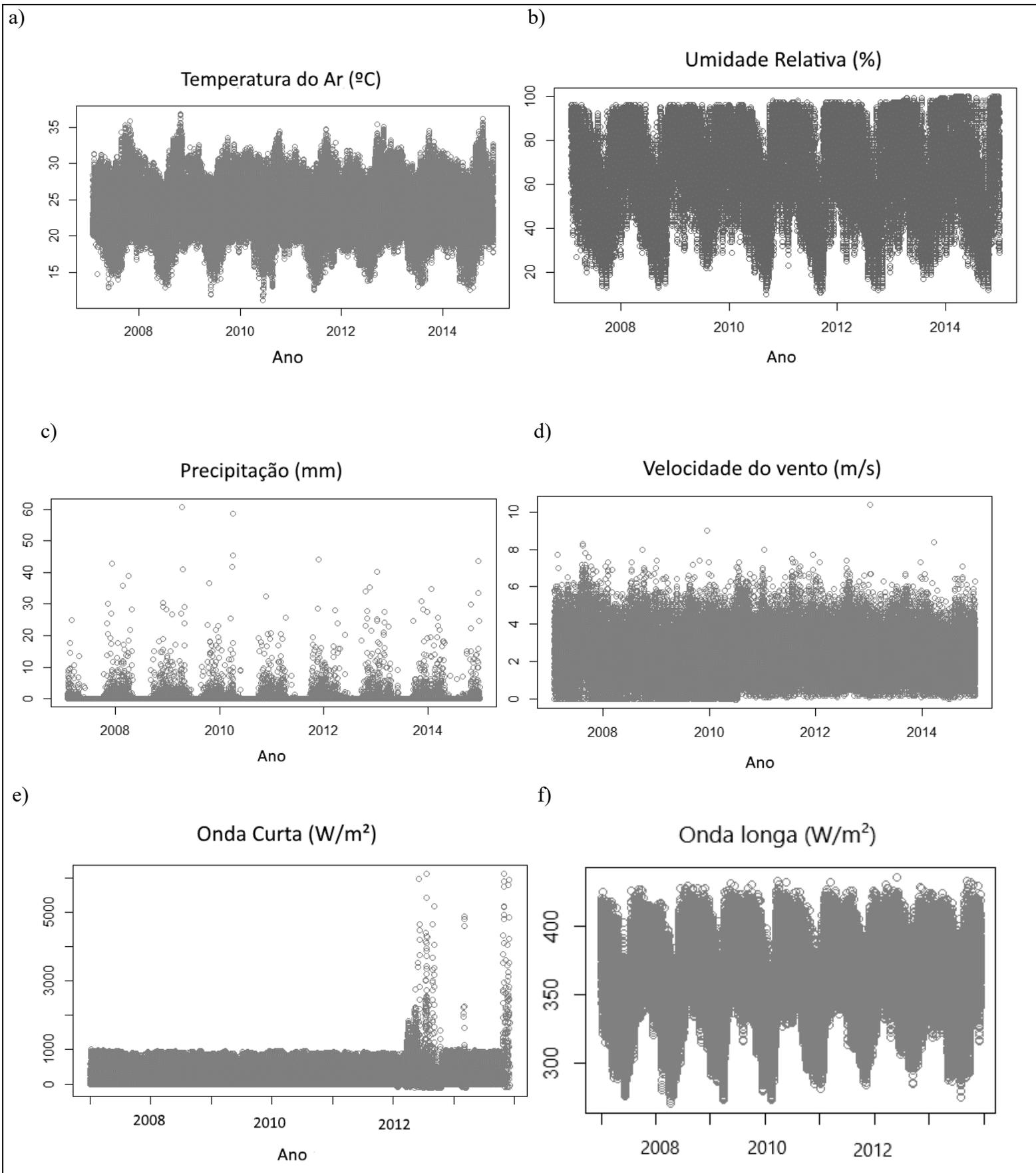


Figura 5-3 - Dados meteorológicos de (a) Temperatura (°C), (b) Umidade Relativa (%), (c) Precipitação (mm), (d) Velocidade do vento (m/s), (e) Onda curta (W/m<sup>2</sup>), (f) Onda Longa (W/m<sup>2</sup>) utilizados na modelagem de 2007 até 2014. Fonte dos dados: INPE e INMET.

A Figura 5-4 representa a análise de consistência dos dados de vazão de entrada de todos os tributários do braço do Torto (Córrego do Torto, Jerivá, Tamanduá e Urubu), que foram utilizados na modelagem. Esses dados foram cedidos e verificados pela CAESB.

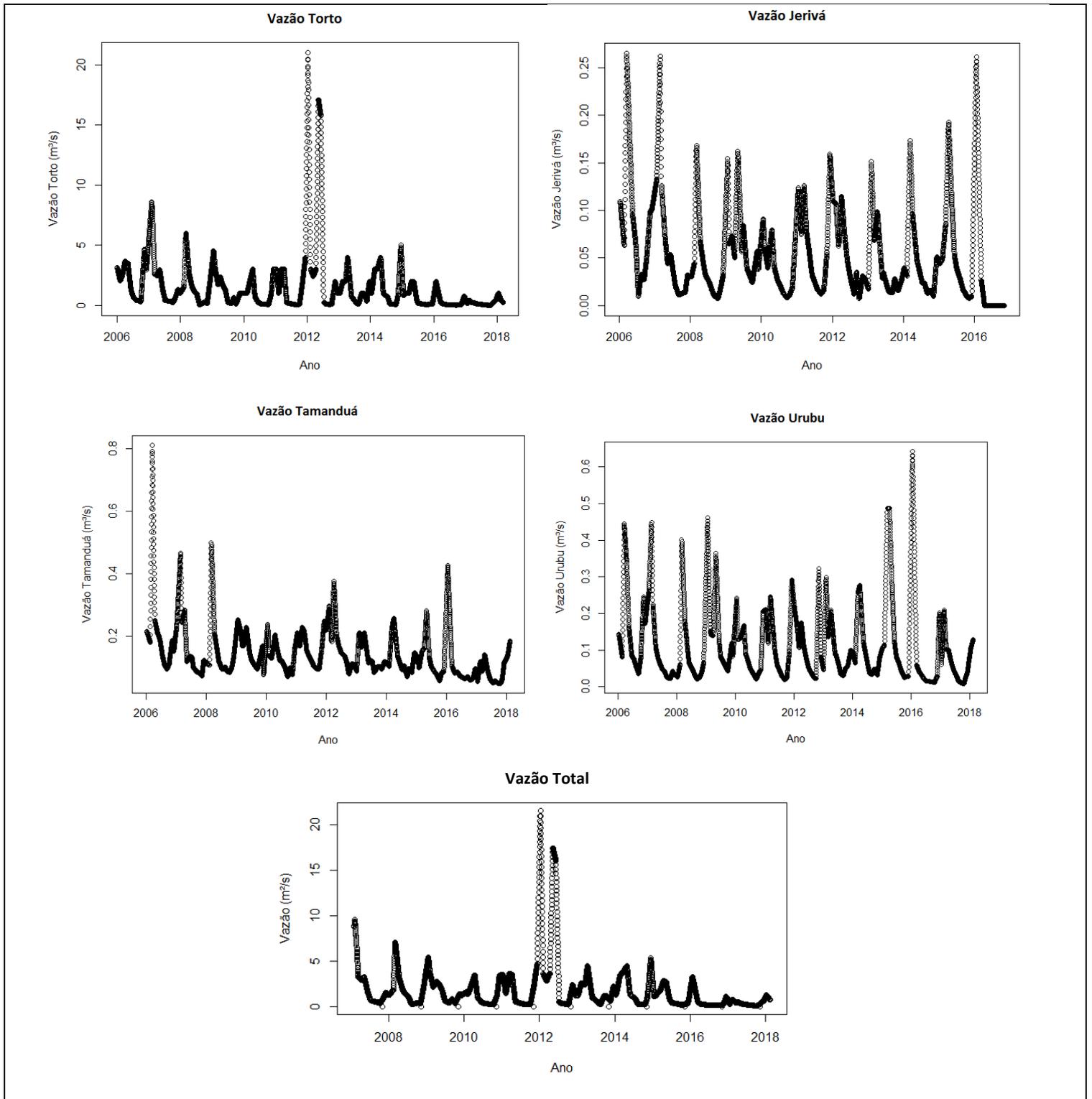


Figura 5-4 - Vazão dos tributários do braço do Torto de 2006 até 2018.

A Figura 5-5 apresenta as vazões de entrada (tributários do Torto, Riacho Fundo, Bananal e Gama) somadas com a vazão de drenagem urbana, consideradas na modelagem para a região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C). A vazão de saída correspondeu a vazão turbinada mais a vazão vertida na barragem do Lago.

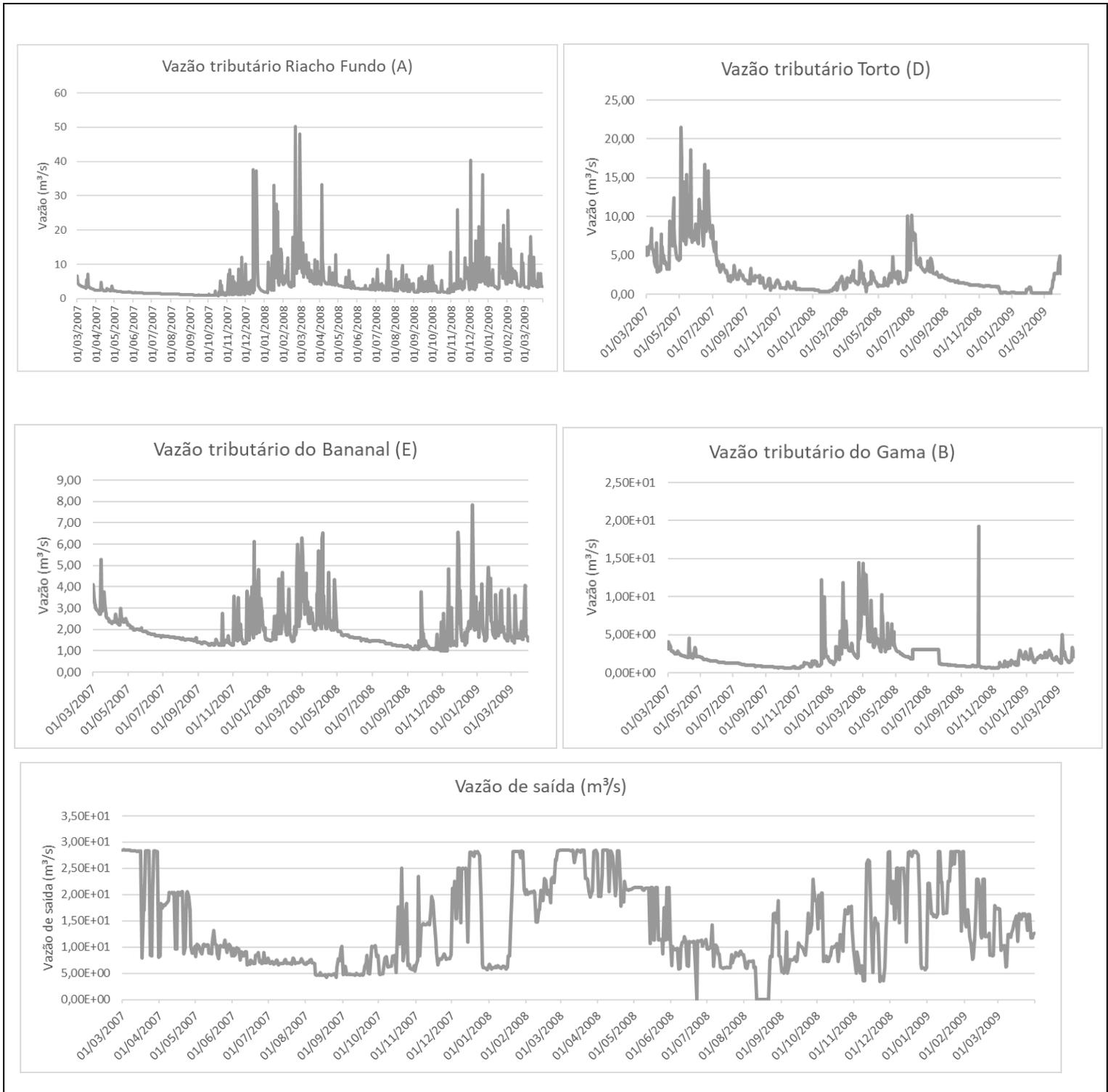


Figura 5-5 – Vazões diárias de entrada e de saída para a simulação da estação de amostragem C (região mais profunda).

### 5.3 Batimetria

A Figura 5-6 apresenta a batimetria do lago Paranoá e foi feita com a utilização do software de geo-processamento Arc-Gis, versão 10.2.2, utilizando os dados batimétricos da CAESB do ano de 2003. O braço do Torto, não é muito profundo, possuindo uma profundidade média de 12 a 15 metros. O ponto mais próximo da barragem é o mais profundo do lago Paranoá, atingindo até 29 metros de profundidade.

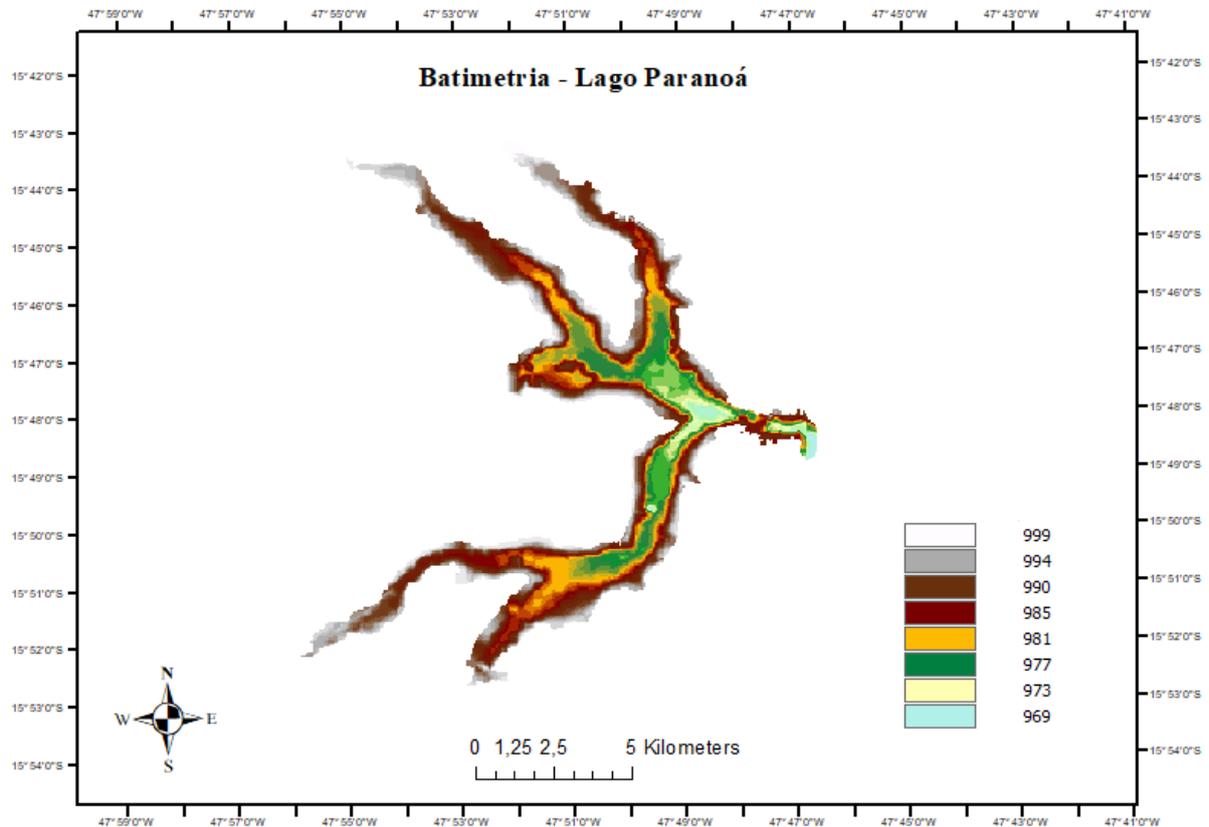


Figura 5-6 - Batimetria do lago Paranoá. Fonte dos dados para elaboração do mapa: (CAESB, 2003).

### 5.4 Simulação hidrodinâmica por meio do GLM

Com os dados organizados e tratados, foi possível realizar a etapa de modelagem hidrodinâmica das duas regiões do lago Paranoá por meio do modelo GLM. Essa etapa é subdividida na simulação com GLM além da análise de sensibilidade e automatização da calibração.

Inicialmente foi realizada uma tentativa de rodar o modelo com dados de temperatura monitorados pela CAESB no braço do Torto em apenas uma profundidade (à 1 metro da superfície). Não foi obtido sucesso nessa tentativa pois aparentemente o modelo GLM requer dados de mais de uma profundidade para efetuar as simulações. A partir disso, buscou-se dados

de monitoramento em mais de uma profundidade na região do braço do Torto. Tais dados foram encontrados no banco de dados do monitoramento realizado no projeto intitulado “Avaliação do impacto do uso da terra sobre os sistemas aquáticos das Bacias Hidrográficas do Descoberto e do Paranoá para determinação de indicadores de integridade ambiental”, aprovado no Edital MCT/CNPq/FNDCT/FAPs/MEC/CAPES/PRO-CENTRO-OESTE Nº 031/2010.

Assim que os arquivos necessários para a simulação estavam parametrizados de acordo com as exigências de entrada do modelo, a simulação inicial foi realizada com os parâmetros *default* fornecidos pelo pacote GLMr, no período de 2011 até 2014, para o braço do Torto (estação de amostragem D), pois esses foram os anos que continham dados de temperatura em mais de uma profundidade. Para a região mais profunda do Lago (estação de amostragem C), a simulação inicial foi realizada de 2007 até 2009, devido a disponibilidade de dados. Após a realização da simulação com parâmetros *default* e da calibração foi feita a análise de sensibilidade dos parâmetros a serem calibrados.

## **5.5 Análise de sensibilidade e automatização da calibração do GLM**

A temperatura foi a variável de controle selecionada para calibração do GLM. Após realizar a etapa de simulação utilizando os parâmetros *default* do modelo hidrodinâmico, procedeu-se então a etapa de otimização da calibração do módulo hidrodinâmico com foco nos parâmetros relacionados a fluxo superficial e mistura vertical, além de parâmetros relacionados às propriedades do Lago e a etapa da análise de sensibilidade.

### **5.5.1.1 Calibração para o braço do Torto (estação de amostragem D)**

Para a calibração do GLM no braço do Torto (estação de amostragem D) com o algoritmo PSO, optou-se por configurar com 50 partículas e 500 iterações, por questões de tempo de processamento. A calibração durou cerca de 72h e após a calibração, realizou-se uma nova simulação com os parâmetros calibrados que resultou na variação de temperaturas apresentada na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Variação de temperatura modelada nas profundidades de 0.1, 3 e 10 metros para o braço do Torto.

Profundidade (m)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	RMSE (°C)
0.1	15,27	23,42	45,42	4,083
3	15,27	23,17	40,40	3,333
10	15,27	22,745	33,61	2,668

A partir da Tabela 5-1 é possível perceber que os valores máximos de temperatura foram muito altos e os valores mínimos foram muito baixos, esses valores modelados são incompatíveis com a realidade. Nota-se que houve pouca variação entre os dados de temperatura a 0.1 metros da superfície e a 3 metros da superfície, para a média e para os valores de mínimo e máximo. O RMSE foi maior na superfície da água quando comparado aos valores do erro para as outras duas profundidades.

Na Tabela 5-2 apresentam-se os valores de RMSE anteriores e posteriores a calibração para a variável Temperatura da água. O valor de RMSE para o braço do Torto não foi satisfatório mesmo após a calibração.

Tabela 5-2 Valores de RMSE ao longo de toda a coluna d'água para as simulações no braço do Torto (estação de amostragem D)

Variável	RMSE antes da calibração (°C)	RMSE depois da calibração (°C)
Temperatura da água	5.109	3.411

Na Figura 5-7 é apresentado o perfil vertical de temperatura para o braço do Torto modelado pelo GLM após a calibração dos parâmetros no período de outubro de 2011 até dezembro de 2014.

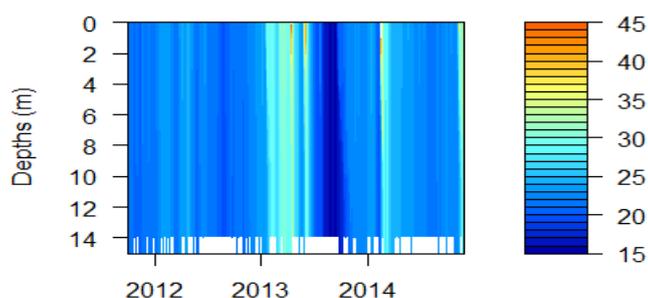


Figura 5-7 Perfil vertical de temperatura para o braço do Torto (estação de amostragem D) para os anos de 2012 até 2014.

Na Figura 5.8 apresenta-se o perfil vertical de temperatura modelada para o braço do Torto plotada individualmente para cada ano considerado na simulação (2011, 2012 e 2014).

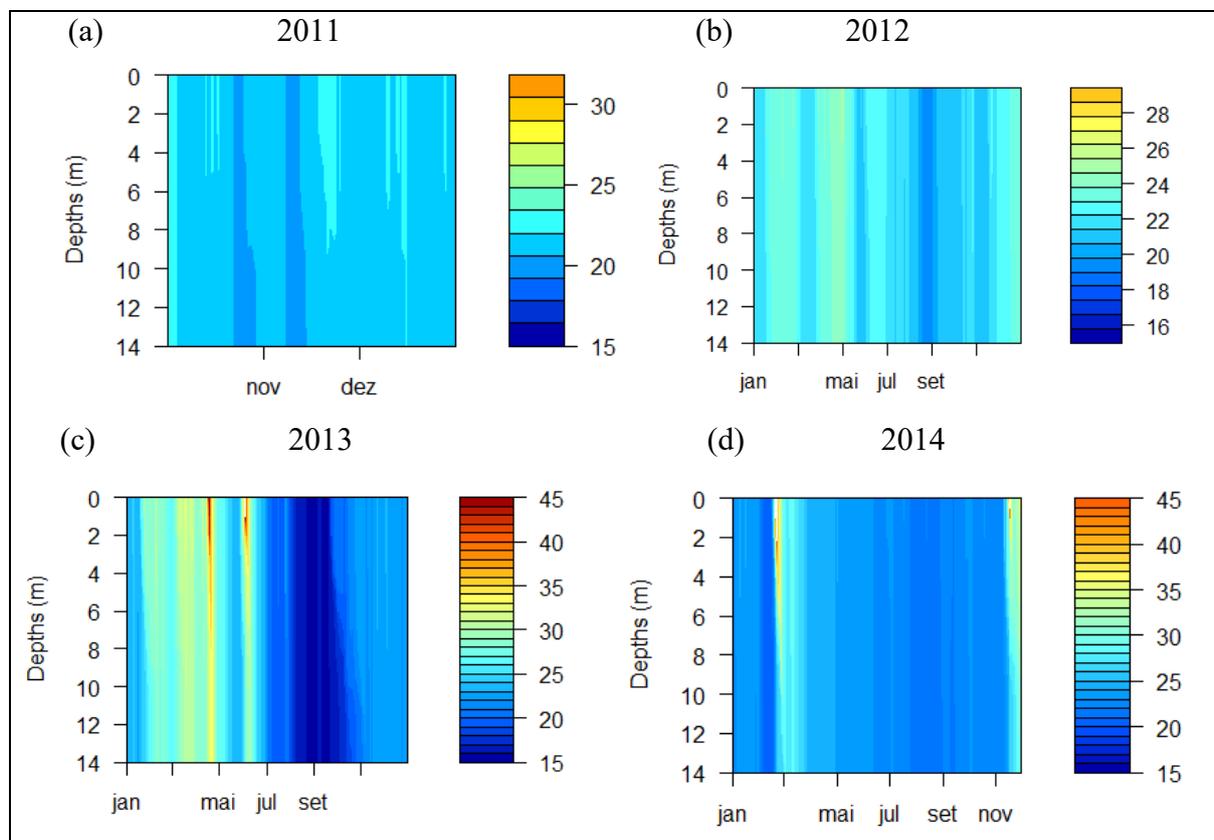


Figura 5-8 - Perfil vertical de temperatura para o braço do Torto (estação de amostragem D) (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014.

Pode-se observar que o modelo conseguiu representar uma leve estratificação térmica (diferença de mais de 2°C) apenas nos anos 2011 e em 2013. Para os anos de 2012 e 2014 o modelo não foi capaz de representar de maneira adequada os padrões de estratificação e mistura vertical para o braço do Torto (estação de amostragem D) (Figura 5.1 (a)). As Figuras 5-8 e 5-9 foram geradas com o pacote do software R desenvolvido por Winslow *et. al* (2015), esse pacote é especializado em gerar gráficos de superfície para lagos o Rlakeanalyser.

A partir desses perfis é possível perceber que o modelo não foi capaz de simular os padrões de estratificação e mistura vertical, derivados das variações sazonais anuais, da coluna d'água do braço do Torto. Além disso a modelagem representou uma coluna d'água isotérmica na maioria dos meses do período simulado, o que não ocorre nos dados observados. Um dos motivos plausíveis para essa resposta do modelo, é o fato desse local ter uma profundidade reduzida e só possuir dados de temperatura nas profundidades de 0.1, 3 e 10 metros.

Na Figura 5.9, é apresentada a comparação das temperaturas observadas com as simuladas pelo modelo GLM para o braço do Torto a 0,1m da superfície do lago. Nota-se que nessa profundidade as temperaturas simuladas foram muito superiores aos dados observados, no verão de 2013 e 2014 as temperaturas modeladas superaram 50°C o que não é uma temperatura factível para o lago Paranoá. O resultado para o RMSE nessa profundidade foi de 4,083°C.

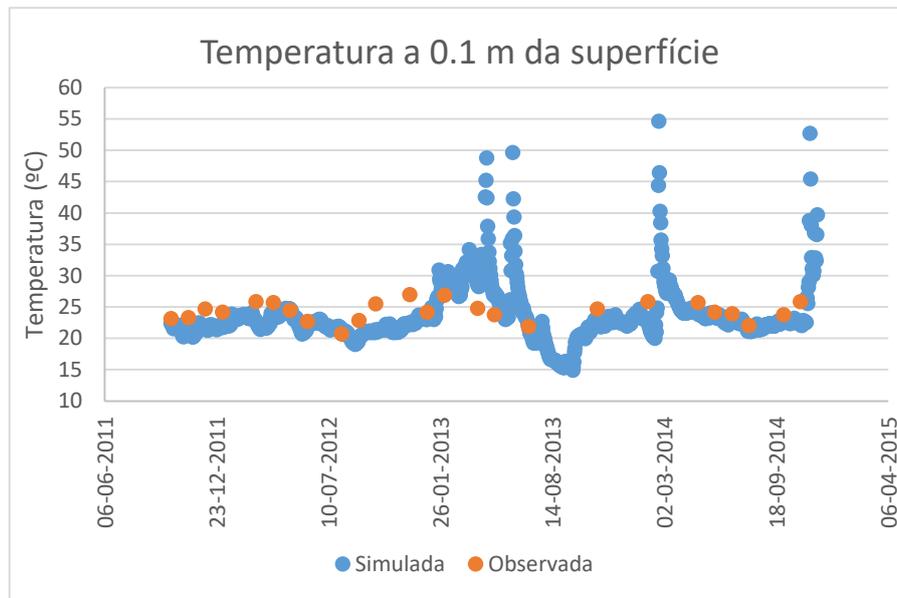


Figura 5-9 – Comparação da temperatura simulada com a observada a 0.1 metros da superfície de 2011 até 2014.

Na Figura 5.10 apresenta-se a comparação da temperatura simulada com a observada a 3 metros da superfície de 2011 até 2014. Nessa profundidade o modelo apresentou um erro menor do que a 0.1m de profundidade. O modelo acompanhou relativamente bem as temperaturas nessa profundidade de outubro de 2011 até dezembro de 2012, porém, também superestimou a temperatura no verão de 2013 e 2014. Esses valores superestimados podem estar relacionados com os dados meteorológicos de entrada como radiação de onda curta. Para essa profundidade obteve-se o RMSE = 3,333°C.

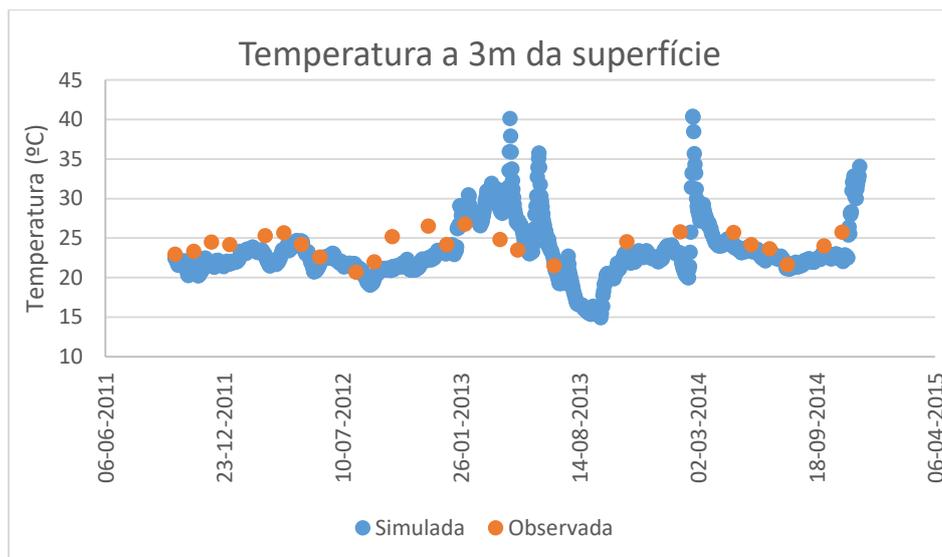


Figura 5-10 - Comparação da temperatura simulada com a observada a 3 metros da superfície de 2011 até 2014.

A Figura 5.13 apresenta a comparação da temperatura simulada com a observada a 10 metros da superfície de 2011 até 2014. Nessa profundidade o modelo superestimou a temperatura nos meses iniciais de 2013 e 2014 e subestimou a temperatura nos meses finais do ano de 2013. O RMSE foi menor nessa profundidade, alcançando o valor de 2,668°C.

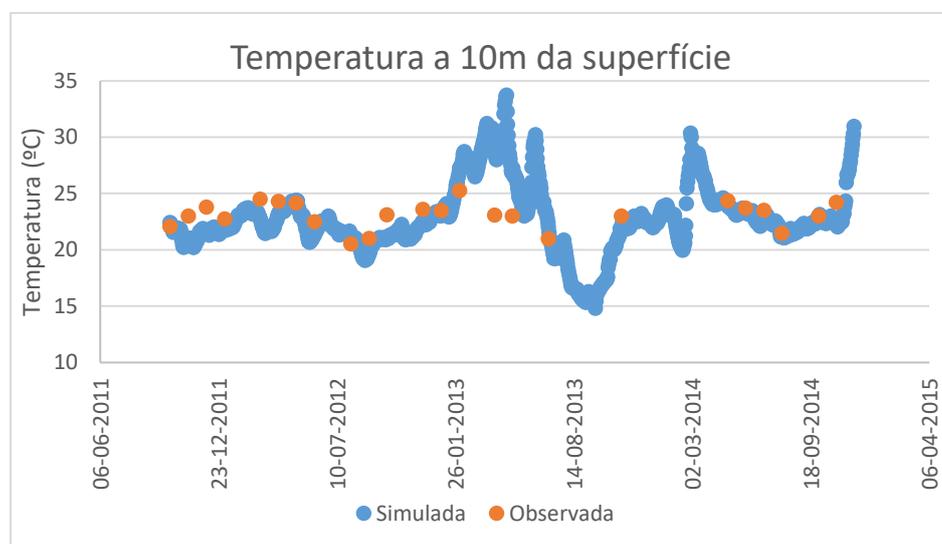


Figura 5-11 - Comparação da temperatura simulada com a observada a 10 metros da superfície de 2011 até 2014.

### 5.5.1.1 Calibração para a região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C)

Para a calibração do GLM na região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C) com o algoritmo PSO, optou-se por configurar a calibração com 50 partículas e 100 iterações, por questões de tempo de processamento. A calibração durou cerca de 24h e após a

calibração, realizou-se uma nova simulação com os parâmetros calibrados, que resultou na variação de temperaturas apresentada na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 - Variação de temperatura modelada nas profundidades de 1, 10, 15 e 20 metros para a região mais profunda do lago (estação de amostragem C).

Profundidade (m)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	RMSE (°C)
1	21,85	24,97	29,02	1,774
10	21,85	24,67	28,34	1,594
15	21,74	24,02	26,43	1,421
20	21,68	23,69	25,30	1,489

Pela Tabela 5-3 nota-se que houve pouca variação da temperatura mínima e média para as profundidades de 1, 10 e 15 metros. Entretanto o erro diminui conforme a profundidade aumenta. Os valores de temperatura máxima variaram mais do que os de temperatura mínima e a média, da superfície até o fundo do Lago.

Tabela 5-4 - Valores de RMSE ao longo de toda a coluna d'água para as simulações na região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C).

Variável	RMSE antes da calibração (°C)	RMSE depois da calibração (°C)
Temperatura da água	1.83	1.57

Nota-se (Tabela 5-4) que o RMSE dessa simulação foi pequeno mesmo antes da calibração, após a calibração o erro não teve uma queda importante, mas diminuiu 0.26°C, atendendo o objetivo da calibração de reduzir o erro. O RMSE da simulação com parâmetros default (sem calibrar) para a região mais profunda do Lago foi inferior ao RMSE da simulação referente ao braço do Torto mesmo após a sua calibração. Esse fato pode indicar que o modelo GLM se representa de forma melhor os ambientes com maiores profundidades.

Na Figura 5-12 apresenta-se o perfil vertical de temperatura para a região mais profunda do lago (estação de amostragem C) para os anos de 2007 até 2009 resultante da simulação com os parâmetros já calibrados. As Figuras 5-14 e 5-15 foram geradas com o pacote *Rlakeanalyser*.

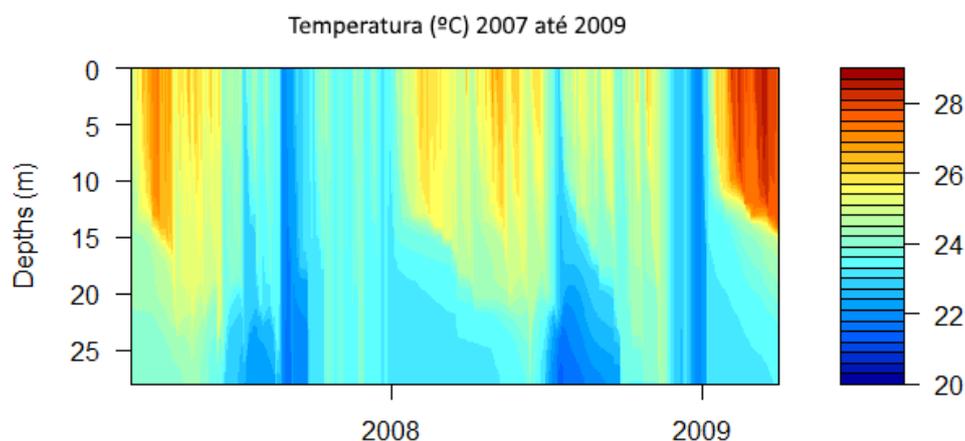


Figura 5-12 - Perfil vertical de temperatura para a região mais profunda do lago (estação de amostragem C) para os anos de 2007 até março de 2009.

Pode-se visualizar (Figura 5-14) que o modelo foi capaz de representar bem os padrões de circulação e estratificação na coluna d'água ao longo das variações sazonais, onde no verão (outubro a março) a coluna d'água se encontra estratificada e no inverno (abril a setembro) ocorre a circulação vertical.

Barbosa (2015) também aplicou o GLM na região mais profunda do lago Paranoá e obteve um RMSE médio de 1,47 °C para a temperatura ao longo da coluna d'água. Read et al. (2014b) encontraram valores de RMSE de 2,78 °C para as temperaturas ao longo da coluna d'água, 1,74° C para as temperaturas do eplímnio e 3,33 °C para as temperaturas do hipolímnio. Os autores atribuem, pela análise de sensibilidade preliminar, que, melhorando as estimativas da transparência da água, pode-se produzir ganhos significativos na qualidade das temperaturas simuladas nas profundidades maiores.

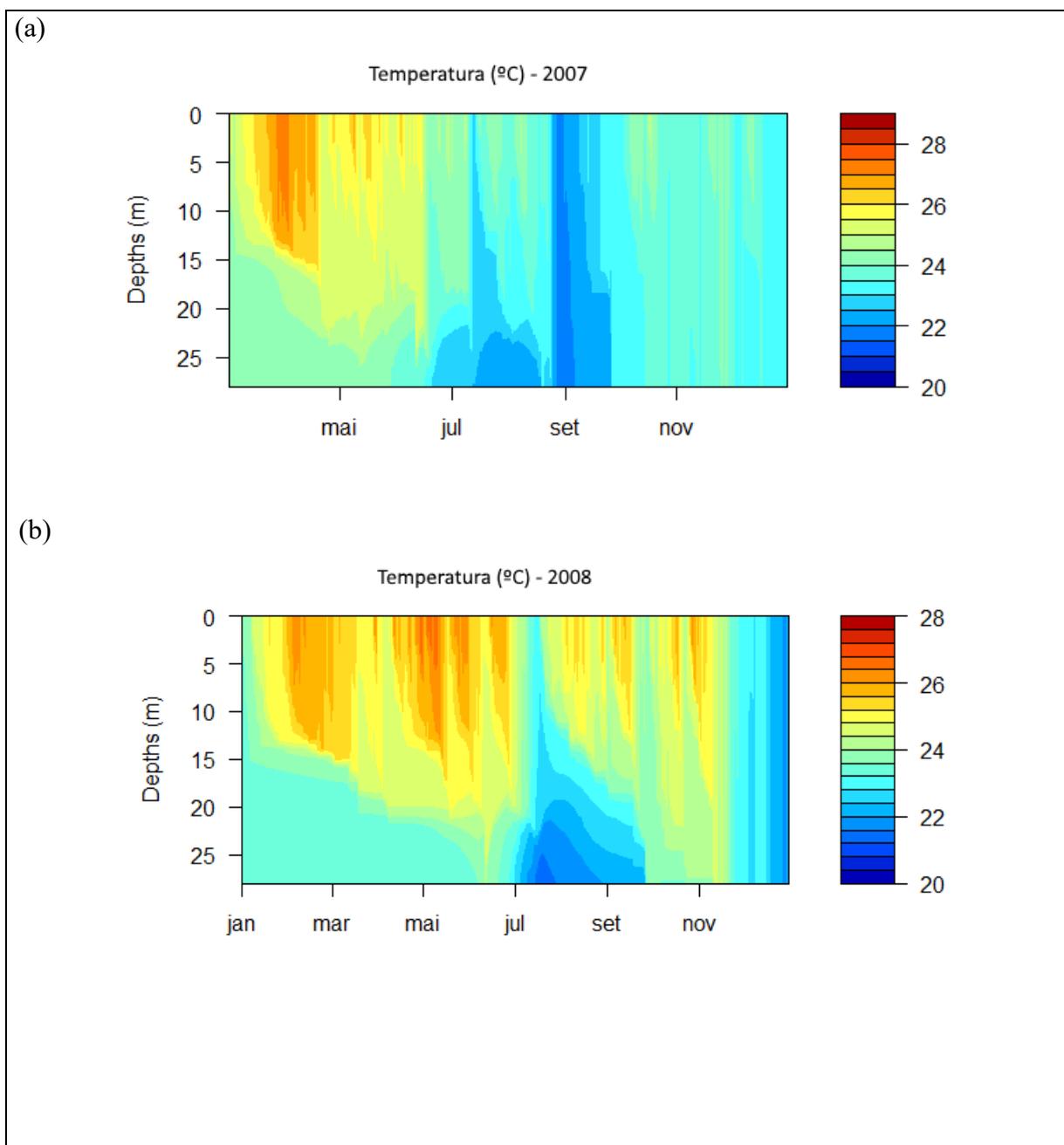
A Tabela 5-5 apresenta o comparativo dos resultados do RMSE obtidos por Barbosa (2015) por meio da otimização da calibração, com os valores de RMSE obtidos na calibração efetuada nesse trabalho por meio da automatização da calibração utilizando o algoritmo PSO.

Tabela 5-5 – Comparativo dos valores de RMSE obtidos por Barbosa (2015) e os obtidos neste trabalho.

<b>Profundidades</b>	<b>1 m</b>	<b>10 m</b>	<b>15 m</b>	<b>20 m</b>	<b>Ao longo da coluna d'água</b>
<b>RMSE (°C) Barbosa (2015)</b>	1.90	1.52	1.07	1.25	1,47
<b>RMSE (°C) Fernandes (2018)</b>	1.77	1.59	1.42	1.48	1,57

Nota-se pela Tabela 5-5 que o RMSE obtido neste trabalho foi inferior ao de Barbosa (2015) apenas a 1 metro de profundidade da superfície. Os valores de RMSE ao longo da coluna d'água e nas outras profundidades ficaram próximos, porém superiores, aos obtidos por Barbosa (2015). Um dos motivos para o RMSE da calibração PSO não ter sido menor pode ser devido ao número de partículas e de iterações reduzidas que foram utilizadas nesse trabalho devido ao alto tempo de processamento que seria necessário para efetuar-se a calibração com um número maior de partículas e de iterações.

Na Figura 5-13 são apresentados os perfis verticais de temperatura separados por cada ano simulado no GLM para a região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C).



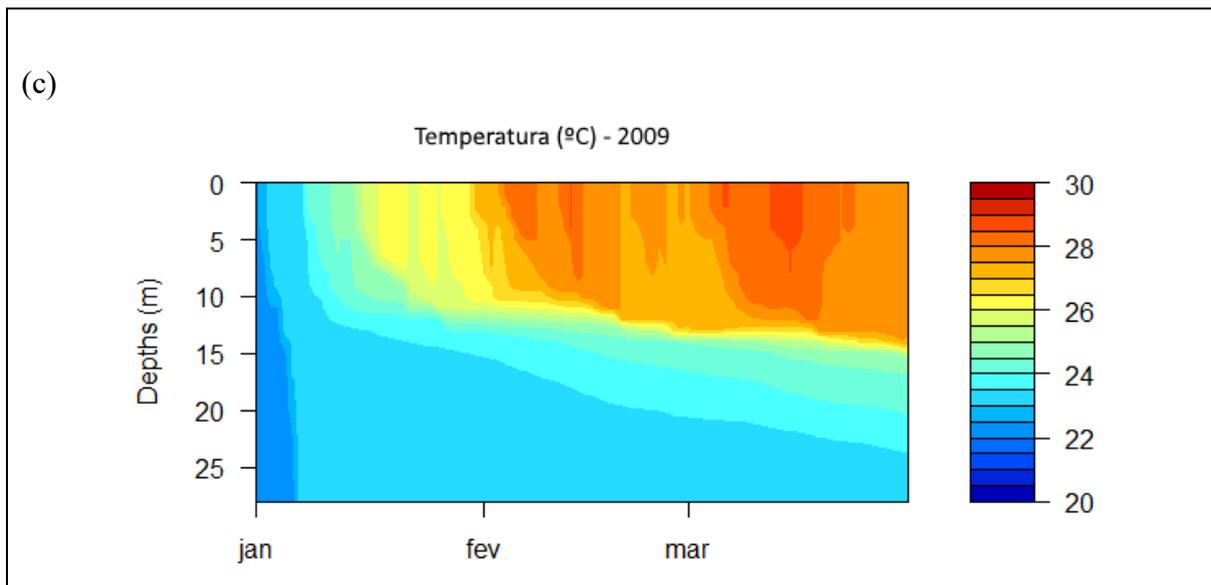


Figura 5-13 - Perfis verticais de temperatura separados por cada ano simulado no GLM para a região mais profunda do lago Paranoá (estação de amostragem C). (a) 2007, (b) 2008, (c) 2009.

A Figura 5-14 apresenta a comparação entre o perfil vertical de temperatura da estação de amostragem C observado e modelado pelo GLM. As quatro linhas pretas na Figura 5-14 (a) representam os dados observados que foram parte dos dados de entrada do modelo, nas respectivas profundidades, 1, 10, 15, 20 metros. A Figura 5-16 foi feita utilizando os pacotes desenvolvidos por Winslow et. al. 2015, para o software R, *GLM* e *glmtools*.

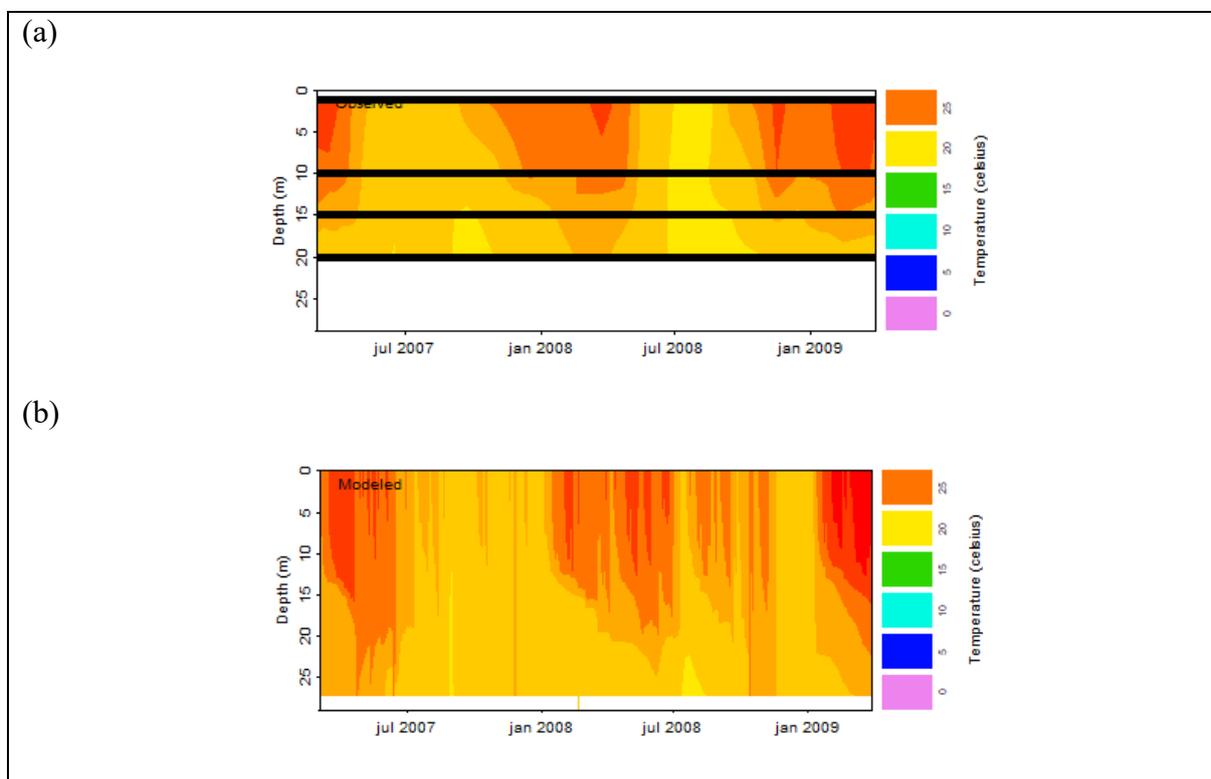


Figura 5-14 comparação entre o perfil vertical de temperatura da estação de amostragem C (a) observado e (b) modelado pelo GLM.

Barbosa (2015) aplicou o GLM para o lago Paranoá e obteve um erro padrão (RMSE) para a temperatura ao longo da coluna d'água de 1,47°C e nas profundidades a 1, 10, 15 e 20m da superfície abaixo de 2°C. Pinto (2018) aplicou o GLM no reservatório do Descoberto e obteve um RMSE de 1,71°C para a coluna d'água e um RMSE abaixo de 2°C na superfície e nas respectivas profundidades 1, 5, 10, 15 e a 1 metro do fundo. A Figura 5-15 apresenta-se a comparação da temperatura observada e simulada pelo GLM nas profundidades de 1, 10, 15 e 20 metros da superfície da água na estação C. A partir da Figura 5-15 pode-se notar que o modelo representou as temperaturas relativamente bem em todas as profundidades, mantendo-se nas faixas de temperaturas mínimas e máximas esperadas, apesar de subestimar ou superestimar a temperatura em todas as profundidades em algum momento do período simulado.

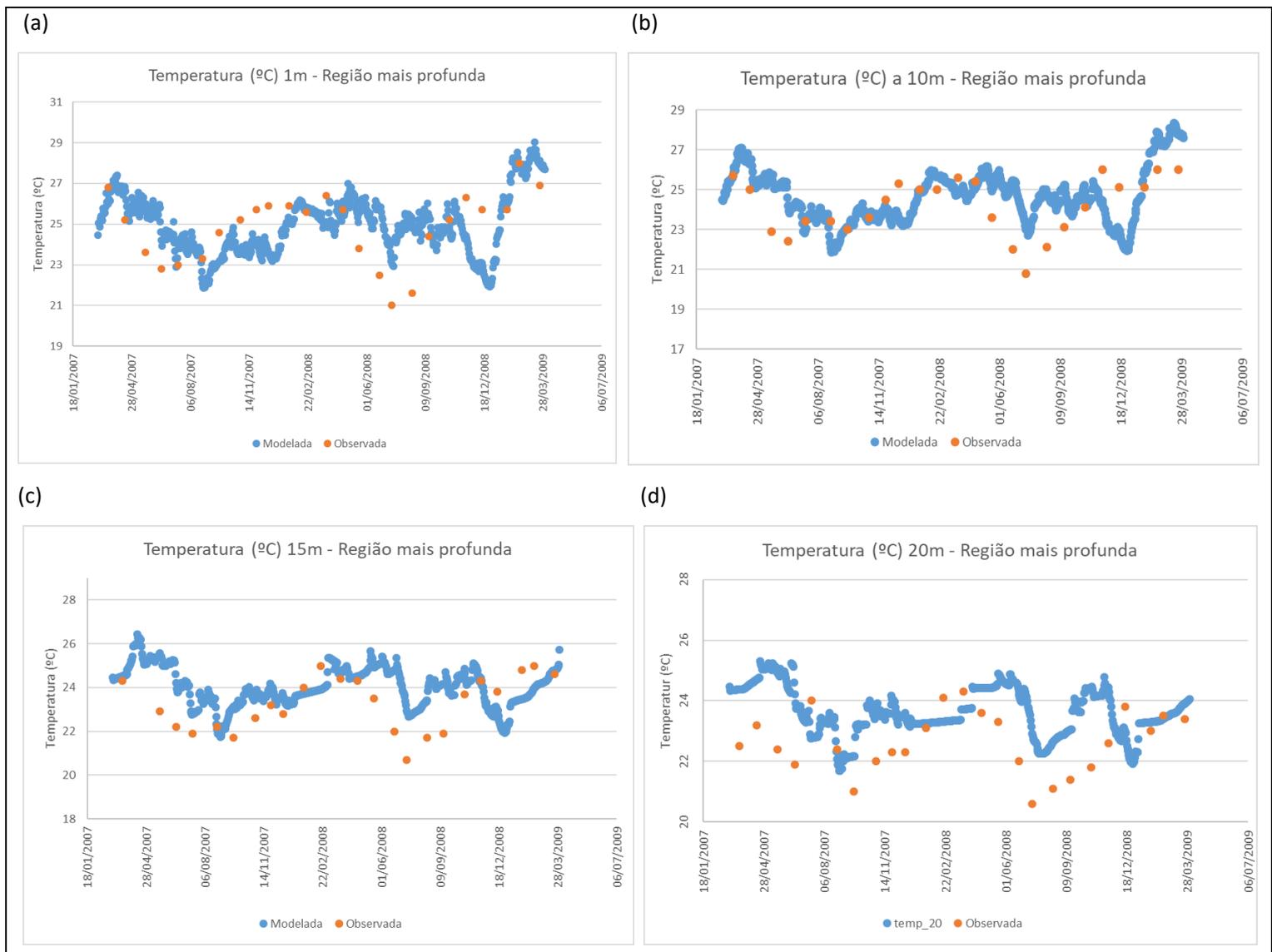


Figura 5-15 - Comparação da temperatura observada e simulada pelo GLM nas profundidades de (a) 1 metro, (b) 10 metros, (c) 15 metros e (d) 20 metros da superfície da água.

### 5.5.2 Análise de sensibilidade para o Braço do Torto (estação de monitoramento D) e para a região mais profunda do lago (estação de monitoramento C).

A análise de sensibilidade identificou que o parâmetro mais sensível na simulação dos processos hidrodinâmicos do reservatório no compartimento do Torto foi o coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente ( $C_E$ ), com uma importância relativa de aproximadamente 0,51. Em seguida, o coeficiente aerodinâmico de calor latente ( $C_H$ ) apresentou importância relativa de 0,2 e em terceiro lugar, com uma importância relativa de aproximadamente 0,06 a espessura máxima da camada ( $h_{max}$ ). Os demais parâmetros analisados tiveram importância relativa menor que 0,06. A classificação dos parâmetros analisados é apresentada na Tabela 5-5. A descrição, unidade de medida e valor padrão dos parâmetros da Tabela 5-5 e 5-6 estão listados no Apêndice D.

Tabela 5-5 - Classificação de sensibilidade dos parâmetros do GLM calibrados para o braço do Torto.

<b>Parâmetro</b>	<b>Ordem de sensibilidade</b>	<b>Importância relativa normalizada</b>
$C_E$ - Coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente	1º	0.516
$C_H$ - Coeficiente aerodinâmico de transferência de calor sensível	2º	0.207
$h_{max}$ - Espessura máxima da camada	3º	0.065
$C_{HYP}$ Eficiência de mistura da turbulência hipolimnética	4º	0.058
$C_d$ - Coeficiente aerodinâmico para transferência de momento	5º	0.033
$C_w$ - Eficiência de mistura - agitação do vento	6º	0.026
$C_K$ Eficiência da mistura - agitação	7º	0.024
$C_{KH}$ - Eficiência de mistura - ondas turbulentas de Kelvin-Helmholtz	8º	0.021
$C_T$ - Eficiência de mistura - exigência cinética	9º	0.014
$K_w$ - Coeficiente de extinção de radiação de ondas curtas	10º	0.011
$C_S$ - Eficiência da mistura - cisalhamento	11º	0.009
$h_{min}$ - Espessura máxima da camada	12º	0.008

A análise de sensibilidade para a região mais profunda do lago Paranoá identificou que o parâmetro mais sensível na simulação dos processos hidrodinâmicos foi o coeficiente

aerodinâmico de transferência de calor latente ( $C_E$ ) com uma importância relativa de aproximadamente 0,41, seguido do coeficiente aerodinâmico de calor latente ( $C_H$ ) com importância relativa de 0,122 e em terceiro lugar, com uma importância relativa de aproximadamente 0,13 coeficiente de extinção de luz ( $K_W$ ). Os demais parâmetros analisados tiveram importância relativa menor que 0,13. A classificação dos parâmetros analisados é apresentada na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 - Classificação de sensibilidade dos parâmetros do GLM calibrados para a estação de o ponto mais profundo do lago Paranoá (amostragem C).

<b>Parâmetro</b>	<b>Ordem de sensibilidade</b>	<b>Importância relativa normalizada</b>
Ce - Coeficiente aerodinâmico de transferência de calor latente	1°	0,415
Ch - Coeficiente aerodinâmico de transferência de calor sensível	2°	0,122
$K_W$ - Coeficiente de extinção de radiação de ondas curtas	3°	0,134
$C_{HYP}$ - Eficiência de mistura da turbulência hipolimnética	4°	0,091
Cd - Coeficiente aerodinâmico para transferência de momento	5°	0,101
$C_W$ - Eficiência de mistura – agitação do vento	6°	0,058
$C_K$ - Eficiência da mistura - agitação	7°	0,023
$C_{KH}$ - Eficiência de mistura – ondas turbulentas de Kelvin-Helmholtz	8°	0,025
$C_T$ - Eficiência de mistura – exigência cinética	9°	0,018
$h_{max}$ - Espessura máxima da camada	10°	0,011
$C_S$ - Eficiência da mistura – cisalhamento	11°	0,007
$h_{min}$ - Espessura mínima da camada	12°	0,004

Nota-se (Tabelas 5-5 e 5-6) que dos parâmetros identificados como mais sensíveis ( $C_E$ ,  $C_H$  e  $h_{max}$ ), dois estão relacionados ao balanço de energia ( $C_E$  e  $C_H$ ). O parâmetro  $C_E$  também foi

identificado como sensível por Barbosa (2015), a autora também simulou os processos hidrodinâmicos do lago Paranoá, utilizando o GLM.

Como o GLM é um modelo unidimensional vertical e considera que as variações de fluxo horizontal não são significativas, é desejável a aplicação do modelo em locais profundos e com uma distância considerável da entrada de vazão advindos dos tributários. Caso seja feita a escolha de um local raso para a aplicação do modelo, é necessário se certificar de que o local possua dados de temperatura em mais de uma profundidade por no mínimo um ciclo hidrológico. O modelo GLM alcançou resultados mais próximos da realidade na maior profundidade, a 10 metros da superfície no caso do braço do Torto e a 20 metros da superfície no caso da região mais profunda, podendo ser atribuído ao fato de o modelo hidrodinâmico simular melhor a temperatura da água nas altas profundidades, pela baixa ação dos ventos e da radiação solar incidente. Para a modelagem no local mais profundo do lago, o RMSE obtido após a calibração foi de 1,51°C, para essa região, o RMSE antes da calibração foi menor do que o RMSE obtido após a calibração para a região com profundidade reduzida. Esse resultado indica que o modelo GLM representa com maior precisão ambientes mais profundos.

## **6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **6.1 Conclusões**

A modelagem numérica de lagos e reservatórios oferece oportunidades para abordar questões de pesquisa além daquelas possíveis apenas com dados de monitoramento observacional. No presente trabalho foi proposto avaliar a aplicação do modelo hidrodinâmico GLM em duas regiões no lago Paranoá distintas e identificadas como fontes de água para consumo humano. Para atingir esse objetivo, foi necessário analisar os dados disponíveis e selecionar os períodos adequados para a calibração do modelo.

A partir do desenvolvimento deste trabalho foi possível observar as diferenças ao modelar uma região rasa e outra profunda do Lago Paranoá. O modelo hidrodinâmico GLM não se mostrou satisfatório ao simular o perfil de temperatura ao longo da coluna d'água do braço do Torto (local com profundidade reduzida), alcançando um erro padrão (RMSE) de 3,47°C. Porém, o modelo se mostrou satisfatório ao simular o perfil de temperatura ao longo da coluna d'água da região mais profunda do Lago Paranoá, resultando em um RMSE de 1,57°C, possibilitando adequação ao retratar as variações da região mais profunda do Lago.

No decorrer da aplicação da modelagem hidrodinâmica foi possível perceber que o modelo GLM não representa com alta precisão locais com variações verticais significativas de vazão, e que o modelo necessita de dados de temperatura em mais de uma profundidade, assim, locais com pouca quantidade de dados monitorados, em poucas profundidades, não são a escolha ideal para aplicação desse modelo.

### **6.2 Recomendações**

A distância das estações meteorológicas do lago simulado pode ser uma fonte de imprecisão na resposta do modelo. Recomenda-se a instalação de estações meteorológicas próximas aos Lago Paranoá para aprimorar os resultados.

A modelagem com o GLM pode ficar limitada devido aos poucos dados observados inseridos no modelo, assim, recomenda-se realizar a medição de temperatura em mais profundidades no braço do Torto. Sugere-se a utilização de calibração PSO com um número de partículas e iterações maiores do que as utilizadas neste trabalho. O manual do modelo GLM deveria possuir instruções referentes a usabilidade do modelo pois as informações de formatação dos dados de entrada e extensões dos arquivos foram muito difíceis de serem encontradas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Barbosa, C.C., Gomes, L.N.L., Koide, S. (2014). “Evolução da modelagem ecológica com foco em qualidade da água de lagos e reservatórios” Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal-RN, Brasil.
- Barbosa, C.C., Minoti, R.T., Gomes, L.N.L. (2015). “Análise de sensibilidade e otimização da calibração do modelo GLM aplicado ao lago Paranoá, Brasília-DF” Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília-DF, Brasil.
- Bueche, T., Hamilton, D. P., Vetter, M. (2017). “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” *Environ Earth Sci* (2017), Springer-Verlag GmbH, Germany.
- Burger D. F., Hamilton D. P.; Pilditch C. A. (2008). Modelling the relative importance of internal and external nutrient loads on water column nutrient concentrations and hytoplankton biomass in a shallow polymictic lake. *Ecological Modelling*, 211, (3-4), 411-423.
- Burnett, J.A.B.; Mattos, S.P. e Azzolin, N.M.P. (2001). “IX - Intervenções da companhia de saneamento.” In: Fonseca, F. O. (org.). Olhares sobre o Lago Paranoá. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília – DF.
- CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2005). Projeto Básico para Ampliação do Sistema de Abastecimento de Água do Distrito Federal Utilizando como Manancial o Lago Paranoá – Volume I: Memorial Descritivo Parte 2. Brasília – DF, 27p.
- Carey, C.C., S. Aditya, K. Subratie, and R. Figueiredo. 1 May 2016. Project EDDIE: Modeling Climate Change Effects on Lakes Using Distributed Computing. Project EDDIE Module 4, Version 1. <http://cemast.illinoisstate.edu/data-for-students/modules/lake-modeling.shtml>. Module development was supported by NSF DEB 1245707 and ACI 1234983.

- Chapra, S.C., (1997). *Surface Water–Quality Modeling*. McGraw–Hill, Nova Iorque, EUA, 844p.
- CORDEIRO-NETTO, O. M. & DUTRA-FILHO, D. 1981. O aporte de fósforo ao Lago Paranoá/Brasília. Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Fortaleza. P21.
- Esteves, F. A. (coordenador). (2011). "Fundamentos de limnologia". Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 826p.
- Ferrante, J. E. T., Roncan, L., Netto, B. P. (2001). "III – Meio Físico" in Fonseca, F. O. (org.). Olhares sobre o Lago Paranoá. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília – DF, 45–78
- Fragoso, Jr, C. R.; Ferreira, T. F.; Marques, D. M.. (2009). "Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos". Oficina de Textos, São Paulo, SP, 304p.
- Funasa (2003). Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em água para consumo humano. – Brasília: Ministério da Saúde: Fundação Nacional de Saúde, 56 pg.
- GDF - Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras, (2008). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Volume 5. Brasília, 2008.
- GDF/INSTITUTO DE PLANEJAMENTO URBANO E TERRITORIAL DO DISTRITO FEDERAL. Plano Diretor de Ordenamento Territorial Urbano do Distrito Federal – PDOT. Brasília: Codeplan, 2009.
- Governo do Distrito Federal – GDF (2012a). Revisão e Atualização do Plano de gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal –Volume I Diagnóstico. Brasília – DF, 830.
- Hipsey, M. R.; Bruce, L. C.; Hamilton, D. P. (2014). GLM – General Lake Model: Model Overview and User Information, v. 2.0 β. The University of Western Australia Technical Manual, Perth, Australia. 42pp
- 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.

- Imboden, D. M. & Wüest, 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
- Jorgensen, E. S.. (2011). "Handbook of Ecological Models Used in Ecosystem and Environmental Management". CRC Press, Boca Raton, EUA, 600p.
- Koide, S. – Coordenador (2010). Avaliação do impacto do uso da terra sobre os sistemas aquáticos das Bacias Hidrográficas do Descoberto e do Paranoá para determinação de indicadores de integridade ambiental. Projeto de rede de pesquisa, edital MCT/CNPq/FNDCT/FAPs/MEC/CAPES/PRO-CENTRO-OESTE Nº 031/2010.
- 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, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 188p.
- Machado, Marília T.S. (2004). Mapeamento do estado trófico do Lago Paranoá, DF por meio de sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água. Dissertação de Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental. Universidade Católica de Brasília. 145p.
- Malek, S.; Ahmad, S. M. S.; Singh, S. K. K.; Milow, P. e Salleh, A. (2011). "Assessment of predictive models for chlorophyll-a concentration of a tropical lake". *Bioinformatics*, 12, 104-109.
- Martin, J.L. e McCutcheon, S.C. (1999). Hidrodinamics and transport for water quality modeling. Lewis Publishers, EUA, 794p.
- Moss, B. (2012). "Cogs in the endless machine: Lakes, climate change and nutrient cycles: A review." *Science of the Total Environment*, 434, 130–142.
- Nogueira, V.P.Q. 1991. Qualidade da água em lagos e reservatórios. In: PORTO, R.L.L. (Org.). *Hidrologia ambiental*. São Paulo: ABRH. 165-210.
- 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.

- Pinto, A., A., S., (2018). Aplicação do modelo hidrodinâmico GLM no Reservatório do Descoberto-DF. Distrito Federal, 2018. xvii, p.75 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2018).
- Pires, A. C. B., Ianniruberto, M. – Coordenadores (2008). Caracterização morfológica e estratigráfica do Lago Paranoá. Projeto de pesquisa, convênio FAPDF nº 33/2008 – Tecnologias Ambientais, com colaboração da Delegacia Fluvial de Brasília (Ministério da Marinha).
- Pires, V. A. C. (2004). Metodologia para apoio à gestão estratégica de reservatórios de usos múltiplos: o caso do lago Paranoá, no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 203p.
- Read, J.S., Winslow, L.A., Hansen, G.J.A., Van Den Hoek, J., Hanson, P.C., Bruce, L.C., Markfort, C.D. (2014). “Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology.” *Ecological Modelling*, 291, 142–150.
- Read, J.S., Winslow, L.A., Hansen, G.J.A., Van Den Hoek, J., Hanson, P.C., Bruce, L.C., Markfort, C.D. (2014b). “Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology.” *Ecological Modelling*, 291, 142–150.
- Reynolds, C. S.. (2006). "The Ecology of Phytoplankton". Cambridge University Press, Nova Iorque, EUA, 535p.
- RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Schmid, M., S. Hunziker, and A. Wuest. (2014). Lake surface temperatures in a changing climate: A global sensitivity analysis. *Climatic Change* 124 : 301–315
- Silva, T., Leite, B., Lemaire, B., Poague, K., Nascimento, N. (2015) Urban stormwater runoff impacts on the ecosystem of a tropical lake. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress.
- Souza, A. P. (2013). Avaliação da utilização de índices de integridade biótica do fitoplâncton como ferramenta para estimativa de qualidade da água nos lagos Paranoá e Descoberto,

no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 174p.

- Starling, F.L.R.M.; Lazzaro, X.; Cavalcanti, C.; Moreira, R. (2002). “Contribution of omnivorous tilapia to eutrophication of a shallow tropical reservoir: evidence from a fish kill”. *Freshwater Biology*, 47, 2443-2452.
- Trolle, D.; Hamilton, D.P.; Hipsey, M.R.; Bolding, K.; Bruggeman, J.; Mooij, W.M.; Janse, J.H.; Nielsen, A. Jeppesen, E. Elliott, J.A. Makler-Pick, V. Petzoldt, T. Rinke, K. Flindt, M.R. Arhonditsis, G.B. Gal, G. Bjerring, R. Tominaga, K. Hoen, J. Downing, A.S. Marques, D.M. Fragoso Jr, C.R. Sondergaard, M. Hanson, P.C. (2012). “A community-based framework for aquatic ecosystem models.” *Hydrobiologia*, 683, 25–34.
- Trolle, D.; Skovgaard, H. e Jeppesen, E. (2008a). “The Water Framework Directive: Setting the phosphorus loading target for a deep lake in Denmark using the 1D lake ecosystem model DYRESM–CAEDYM”. *Ecological Modelling*, 219, 138–152.
- TUCCI C. & MENDES, A.C. 2006. Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica. MMA; PNUD, 311p.
- Tucci, C. M., (2005). Modelos hidrológicos. 2ª edição, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 678p.
- Winslow, L.A. e Read, J. S. (2014). GLM/glmtools. Disponível em: <[//github.com/USGS-R/glmtools](https://github.com/USGS-R/glmtools)>. Acesso em: 20 de maio de 2015.
- Wrobel, L.C.; Eiger. S.; Rosman, P.C.; Tucci, C.E.M., Cirilo, J.A. e Cabral, J.P. (1989). Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro.
- Yao, H.; Samal, N. R.; Joehnk, K. D.; Fang, X.; Bruce, L. C.; Pierson, D. C.; Rusak, J. A. e James, A. (2014). “Comparing ice and temperature simulations by four dynamic lake models in Harp Lake: past performance and future predictions”. *Hydrological Processes*, Publicado online em Wiley Online Library <[wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)> DOI: 10.1002/hyp.10180.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

A Tabela A1 apresenta os arquivos que devem existir em uma mesma pasta para executar o modelo GLM.

Tabela A1 - Descrição dos arquivos necessários para executar o GLM.

<b>Nome do arquivo</b>	<b>Extensão do arquivo</b>	<b>Descrição do arquivo</b>
glm2	.nml	Script do programa, pode ser copiado da pasta de exemplo do GLM.
output	.nc	Arquivo gerado pelo próprio modelo, onde os pacotes <i>GLMr</i> e o <i>glmtools</i> vão buscar informações para gerar os resultados do modelo (gráficos e métricas).
Inflow*	.csv	Arquivo contendo informações de data, vazão, temperatura e salinidade dos tributários.
outflow	.csv	Arquivo contendo os dados de vazão de saída do sistema modelado.
field_file	.csv	Arquivo com dados das diferentes profundidades modeladas e suas respectivas temperaturas.
met_hourly	.csv	Arquivo com todos os dados meteorológicos de entrada.

\*A quantidade de arquivos inflow.csv vai depender da quantidade de tributários que existe no sistema que será modelado.

## APÊNDICE B

Tabela A2 - Cabeçalho dos arquivos de entrada .csv do GLM.

<b>Dado</b>	<b>Nome do arquivo</b>	<b>Nome das colunas do arquivo .csv</b>
<b>Vazão de entrada</b>	inflow	Time, flow, temp, salt
<b>Vazão de saída</b>	outflow	time, flow
<b>Profundidade e temperatura</b>	field_file*	Datetime, Depth, temp
<b>Dados meteorológicos</b>	met_hourly*	time, ShortWave, LongWave, AirTemp, RelHum, WindSpeed, Rain

Os dados marcados com \* podem conter qualquer nome que o usuário quiser desde que o nome seja adequadamente declarado no arquivo glm2.nml.

## APÊNDICE C

Tabela A3 - Script em linguagem R criado para a simulação por meio do GLM.

```
install.packages('sp')
install.packages('glmtools', repos=c('http://cran.rstudio.com', 'http://owi.usgs.gov/R'))

library(glmtools)
library(GLMr)

sim_folder<-‘C:/Users/...’

setwd(sim_folder)

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

nml<-read_nml(nml_file)

print(nml)

Sys.setenv(Tz="UTC")

Sys.setenv(Tz="America/Sao_Paulo")

plot_meteo(nml_file)

run_glm(sim_folder, verbose=TRUE)

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

plot_temp(file=nc_file, fig_path=FALSE)

field_file <- file.path(sim_folder, 'field_file.csv')

plot_var_compare(nc_file, field_file, 'temp', resample=FALSE)

plot_temp_compare(nc_file, field_file)

sim_metrics(with_nml = FALSE)

compare_to_field(nc_file, field_file, metric="water.density", as_value=TRUE, na.rm=TRUE)
```

## APÊNDICE D

Tabela A4 - Sumário de parâmetros físicos do GLM com valores padrão. Fonte: Barbosa, 2015; Hipsey et al., 2014.

Símbolo	Descrição	Unidades	Valor padrão
<b>Estrutura do modelo</b>			
$h_{min}$	Espessura mínima da camada	M	0.5
$h_{max}$	Espessura máxima da camada	M	1.5
<b>Propriedades do lago</b>			
$K_W$	Coefficiente de extinção da radiação de ondas curtas	$m^{-1}$	0.2
$A_c$	Área crítica	$m^2$	$10^7$
<b>Parâmetros relacionados a termodinâmica superficial</b>			
$C_D$	Coefficiente aerodinâmico para transferência de momento	-	0.0013
$C_H$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de calor sensível	-	0.0013
$C_E$	Coefficiente aerodinâmico de massa para transferência de calor latente	-	0.0013
E	Emissividade da água superficial	-	0.985
$\Sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$W m^{-2} k^{-4}$	$5.6697e^{-8}$
<b>Parâmetros relacionados à mistura vertical</b>			
$C_K$	Eficiência da mistura- agitação	-	0.2
$C_S$	Eficiência da mistura – cisalhamento	-	0.3
$C_T$	Eficiência da mistura - exigência cinética	-	0.51
$C_w$	Eficiência de mistura - agitação do vento	-	0.23
$C_{HVP}$	Eficiência de mistura da turbulência hipolimnética	--	0.5
$C_{KH}$	Eficiência de mistura – ondas turbulentas de Kelvin-Helmholtz	-	0.3
<b>Parâmetros relacionados ao fluxo de entrada e saída</b>			
C	Nível de arrasto da afluência		0.016
G	Velocidade máxima de retirada	$md^{-1}$	0