

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO VARELA SCHUINGEL

ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO DURANTE A ESTIAGEM DE 2019 – 2021
NO RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA-PR

CURITIBA

2024

TIAGO VARELA SCHUINGEL

ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO DURANTE A ESTIAGEM DE 2019 – 2021
NO RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA-PR

Dissertação de Mestrado apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, no Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Tobias Bernward Bleninger
Coorientadora: Jucimara Andreza Rigotti

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Schuingel, Tiago Varela

Análise do balanço hídrico durante a estiagem de 2019 – 2021 no reservatório do Passaúna-PR / Tiago Varela Schuingel. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Tobias Bernward Bleninger
Coorientador: Jucimara Andreza Rigotti

1. Passaúna, Reservatório de (PR). 2. Estiagem. 3. Estratificação térmica.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Bleninger, Tobias Bernward. IV Rigotti, Jucimara Andreza. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **TIAGO VARELA SCHUINGEL** intitulada: **Análise do balanço hídrico durante a estiagem de 2019-2021 no reservatório Passaúna-PR**, sob orientação do Prof. Dr. TOBIAS BERNWARD BLENINGER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 16 de Outubro de 2024.

Assinatura Eletrônica

18/10/2024 13:14:24.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/10/2024 16:52:46.0

MAURICIO BERGAMINI SCHEER
Avaliador Externo (COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANA.)

Assinatura Eletrônica

17/10/2024 16:44:37.0

MICHAEL MANNICH

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/10/2024 18:48:32.0

REGINA TIEMY KISHI

Avaliador Externo (DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA)

RESUMO

Este trabalho investiga a modelagem hidrológica do Reservatório Passaúna em Curitiba, Brasil, utilizando o General Lake Model (GLM). O estudo aborda o impacto dos períodos de estiagem entre 2019 e 2021, focando no balanço hídrico, na estratificação térmica e nos parâmetros físicos sob condições extremas. A metodologia inclui a aplicação do GLM e sua ferramenta de auto calibração (glmgui) para simular variações no nível da água e na temperatura da coluna de água. Os resultados indicam uma redução significativa no nível do reservatório durante os períodos de estiagem, associada principalmente à diminuição da entrada de água (consequência dos baixos índices pluviométricos). A estratificação térmica mostrou-se acentuada, com camadas térmicas bem definidas que dificultaram a mistura das águas. No entanto, foram observados períodos de homogeneização durante baixas temperaturas no inverno e também no verão. Ainda neste cenário, a ocorrência de estratificação térmica durante o inverno, devido a temperaturas elevadas, sugere uma alteração no comportamento térmico do reservatório. Cenários alternativos, como a redução da captação de água, a transposição da Pedreira Orleans e o efeito da sementeira de nuvens, mostraram impactos positivos na manutenção do nível do reservatório. A auto calibração do modelo foi eficaz na redução dos erros de simulação, garantindo maior precisão nos resultados. Esses resultados fornecem insights valiosos para a gestão sustentável de reservatórios subtropicais em cenário de mudanças climáticas.

Palavras-chave: Estiagem. Modelagem de Reservatórios. General Lake Model. Estratificação térmica. Cenários Alternativos.

ABSTRACT

This study investigates the hydrological modeling of the Passaúna Reservoir in Curitiba, Brazil, using the General Lake Model (GLM). The research addresses the impact of drought periods between 2019 and 2021, focusing on water balance, thermal stratification, and physical parameters under extreme conditions. The methodology includes the application of the GLM and its auto-calibration tool (glmgui) to simulate variations in water level and temperature in the water column. The results indicate a significant reduction in reservoir level during drought periods, mainly due to the decrease in water inflow (a consequence of low rainfall rates). Thermal stratification was pronounced, with well-defined thermal layers that hindered water mixing. However, periods of homogenization were observed during low winter temperatures as well as in the summer. In this context, the occurrence of thermal stratification during the winter, due to elevated temperatures, suggests an alteration in the reservoir's thermal behavior. Alternative scenarios, such as reduced water withdrawal, the Pedreira Orleans water transfer, and the effect of cloud seeding, showed positive impacts on maintaining the reservoir level. The model's auto-calibration effectively reduced simulation errors, ensuring greater accuracy in the results. These findings provide valuable insights for the sustainable management of subtropical reservoirs in the context of climate change

Keywords: Drought. Reservoir Modeling. General Lake Model. Thermal Stratification. Alternative Scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - ANOMALIAS HÍDRICAS AVALIADAS EM % DO NORMAL NOS DIFERENTES ESTADOS DO BRASIL EM MAIO DE 2021	22
Figura 2 - ESQUEMA DO DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO DO GLM, INFORMAÇÕES DE ENTRADA (TEXTO EM AZUL) E OS PROCESSOS SIMULADOS (TEXTO EM PRETO).....	44
Figura 3 - LAYOUT DO TOOLBOX DA FERRAMENTA DE AUTO CALIBRAÇÃO DO GLMTOOLS.....	47
Figura 4 - LAYOUT DA ABA DE SELEÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM CALIBRADOS E O INTERVALO DE DENSIDADE DOS MESMOS.....	48
Figura 5 - DADOS DE ENTRADA DO MODELO E DADOS DE EVAPORAÇÃO E VAZÃO VERTIDA UTILIZADOS NO CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO	54
Figura 6 - SENSIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA NA AUTO CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA O NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO.....	55
Figura 7 - SENSIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA NA AUTO CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA COLUNA DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO	56
Figura 8 - COMPARAÇÃO DO NÍVEL MEDIDO X NÍVEL SIMULADO E OS ERROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO	57
Figura 9 - COMPARAÇÃO DO NÍVEL MEDIDO X NÍVEL SIMULADO E OS ERROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO	58
Figura 10 - COMPARAÇÃO DO NÍVEL MEDIDO X NÍVEL SIMULADO E OS ERROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO	60
Figura 11 - COMPARAÇÃO ENTRE O NÍVEL COM TRANSPOSIÇÃO DE 6 MESES INCIADO EM ABRIL DE 2020 E DE 1 ANO INCIADO EM JANEIRO DE 2020 EM COMPARAÇÃO COM O NÍVEL DE CALIBRAÇÃO	62
Figura 12 - DIFERENÇA ENTRE O NÍVEL COM TRANSPOSIÇÃO DE 6 MESES INCIADO EM ABRIL DE 2020 E DE 1 ANO INCIADO EM JANEIRO DE 2020 EM COMPARAÇÃO COM O NÍVEL DE CALIBRAÇÃO	63
Figura 13 - TEMPERATURA SIMULADA DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO PARA OS CENÁRIOS ALTERNATIVOS EM DIFERENTES COTAS	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - VALORES UTILIZADOS NA AUTO CALIBRAÇÃO E CALIBRAÇÃO MANUAL DO GENERAL LAKE MODEL	49
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivos Específicos.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Reservatório do Passaúna.....	14
3.2 Balanço Hídrico.....	16
3.3 General Lake Model.....	19
3.4 Estiagem.....	20
3.5 Estratificação Térmica.....	24
4 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	27
4.1 Effects of Hydrological Drought Periods on Thermal Stability of Brazilian Reservoirs.....	27
4.2 Water Quality Modeling in a Subtropical Water Supply Reservoir.....	30
4.3 Soluções Inovadoras para o Enfrentamento aos Efeitos da Crise Hídrica na Região Metropolitana de Curitiba: Da Lagoa de Minas à Hidrossemeadura de Nuvens.....	35
5. METODOLOGIA.....	38
5.1 Área de Estudo.....	39
5.2 Dados meteorológicos.....	39
5.3 Condições de contorno.....	40
5.3.1 Dados hidrológicos.....	40
5.3.2 Vazão do descarregador de fundo.....	41
5.3.3 Temperatura da água dos afluentes.....	42
5.4 Balanço Hídrico.....	42
5.5 Configuração do modelo.....	43
5.5.1 Aplicação da ferramenta de Auto Calibração.....	46
5.6 Cenários Alternativos.....	51
5.6.1 Redução da Captação para preservação do nível do reservatório.....	51
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
6.1 Compilação de dados e Balanço Hídrico.....	54
6.2 Calibração.....	55
6.3 Cenários Alternativos.....	59

7. CONCLUSÃO	67
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental na existência humana. Cada vez mais são alteradas suas condições naturais devido aos efeitos antrópicos. Além disso, o crescimento populacional em escala global aumenta a demanda por este recurso, principalmente nos centros urbanos. Desta forma, são construídos reservatórios de água com a finalidade de armazená-la, possibilitando atender a esta demanda ou parte dela.

Contudo, é importante destacar a qualidade de água destes ambientes, visto que diversos fatores influenciam sobre este aspecto. O principal fator a ser considerado é o volume de água do reservatório, uma vez que está diretamente associado com o potencial de diluição de poluentes, (Barroso; Pinheiro; Pereira, 2018).

Nesse sentido, ferramentas matemáticas de modelagem hidrodinâmica de lagos, rios e lagoas tornaram-se determinantes na gestão da qualidade dos recursos hídricos e na estimativa da capacidade de dissolução de poluentes destes meios. Atualmente, com o avanço de tecnologias – em especial na área de programação – muitos avanços foram realizados na área de modelagem. Isso desencadeou uma maior complexidade na modelagem de parâmetros físicos, de qualidade de água, dispersão de óleo e sedimentos, (Santos et al., 2015).

Dentro deste cenário, modelos unidimensionais (1D) tornaram-se ferramentas práticas e eficientes de simulação, necessitando de menos recursos para realizar a calibração do mesmo – isso fez com que esses modelos se destacassem dentro da comunidade científica, tornando-se tendência na mesma. Contudo, apesar de ser um modelo que solicita requisitos mínimos de calibração, Sales (2020) destaca que “o uso da estrutura 1D é justificada em muitos casos, dado o papel dominante das mudanças sazonais na estratificação vertical da dinâmica do lago, incluindo oxigênio, nutrientes e ciclagem de metal e plâncton, além de que para determinados corpos d’água os gradientes horizontais são menores do que os verticais. Outra vantagem é a fácil ligação

com bibliotecas biogeoquímicas e ecológicas de modelagem para simulações de ecossistemas complexos”.

Outro fator fundamental no aprimoramento destes modelos foi o desenvolvimento de redes internacionais de dados, a partir da colaboração entre cientistas permitindo a síntese de dados coletados. Isso permitiu a disseminação de dados hidrológicos e técnicas de modelagem que auxiliam no entendimento de corpos hídricos e também a suscetibilidade desses sistemas em cenários futuros.

Os lagos, em particular, são ecossistemas altamente valorizados, pois fornecem importantes recursos hídricos e alimentares, e vários outros serviços ecossistêmicos. As atividades humanas, como o desvio de água doce e o aumento da carga de nutrientes, além das pressões indiretas das mudanças climáticas, levaram a um aumento da vulnerabilidade dos lagos em escala global, (Frassl et al., 2018).

O projeto MuDak-WRM (em português: Aquisição de dados multidisciplinares como a chave para uma gestão de recursos hídricos aplicáveis globalmente) – foi uma parceria entre universidades alemãs e brasileiras, empresas de saneamento, companhias de gestão de reservatórios e parceiros da indústria – que tinha como principais objetivos: a identificação de todos os parâmetros relevantes que influenciam o comportamento de longo prazo de reservatórios, o desenvolvimento de um conceito de monitoramento mínimo, a redução da complexidade e demanda de dados de abordagens de determinado modelo e o desenvolvimento de uma ferramenta globalmente aplicável para recursos hídricos superficiais, (MuDaK-WRM, 2019).

Do lado brasileiro, o projeto monitorou parâmetros físicos e de qualidade da água do Reservatório do Passaúna, localizado na região metropolitana de Curitiba-PR. A calibração de um modelo unidimensional, a partir da comparação com os dados fornecidos pelo projeto, é um fator fundamental para cumprir os objetivos do mesmo.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a análise de medidas de mitigação para aumentar o volume de água no reservatório Passaúna no período de estiagem, com aplicação do General Lake Model e utilização do modelo para gerar diferentes cenários.

2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Compilação de dados de entrada para o modelo GLM
- Analisar e modelar o balanço hídrico do reservatório Passaúna;
- Ajuste do General Lake Model para representar as estruturas e o balanço hídrico e parâmetros de estratificação térmica;
- A partir da ferramenta de auto calibração, testar efeitos da profundidade do local modelado em comparação do local de observação;
- Análise de medidas de mitigação a respeito de variações de volume e efeitos de estratificação térmica.
- Proposta de cenários alternativos

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reservatório do Passaúna

O reservatório do Passaúna é um importante manancial de abastecimento de água para a cidade de Curitiba e região metropolitana, localizado no estado do Paraná, Brasil. O reservatório abrange principalmente as cidades de Curitiba e Araucária, e, ainda, algumas partes também se estendem para os municípios de Campo Largo e Balsa Nova. Segundo Medeiros et al. (2020), o reservatório está localizado na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu, ocupando uma área de cerca de 8 km².

A batimetria do reservatório do Passaúna foi investigada por Soares et al. (2021), utilizando tecnologia de sonar de varredura lateral. Os resultados mostraram que o reservatório tem uma profundidade média de cerca de 12 metros, com algumas áreas chegando a mais de 20 metros de profundidade. Além disso, os autores identificaram algumas áreas com sedimentos acumulados, o que pode afetar a qualidade da água e o ecossistema do reservatório.

O abastecimento de água a partir do reservatório do Passaúna foi avaliado por Amaral et al. (2020). Os autores verificaram que a qualidade da água é influenciada pela sazonalidade das chuvas e pelo uso do solo na bacia hidrográfica, e que são necessárias medidas de gestão integrada para garantir a qualidade da água. Segundo os autores, a qualidade da água do reservatório do Passaúna é considerada boa, mas ainda assim é importante monitorar a qualidade da água regularmente.

A influência do clima na qualidade da água do reservatório do Passaúna também foi investigada por Silva et al. (2020). Os autores verificaram que o aumento da temperatura e da precipitação afeta a qualidade da água, principalmente em relação à turbidez e à concentração de sólidos em suspensão. Segundo os autores, o monitoramento da qualidade da água do reservatório do Passaúna deve considerar as mudanças climáticas em curso.

A ocorrência de cianobactérias no reservatório do Passaúna foi analisada por Almeida et al. (2021). Os autores verificaram que a presença de cianobactérias está relacionada principalmente com a temperatura da água e com a concentração de nutrientes, como o fósforo. Segundo os autores, o controle da eutrofização é fundamental para prevenir a ocorrência de cianobactérias e manter a qualidade da água do reservatório do Passaúna.

A gestão integrada da bacia hidrográfica do reservatório do Passaúna é fundamental para garantir a qualidade da água do reservatório, considerando as múltiplas demandas e usos da água na bacia hidrográfica, como foi destacado por Castro et al. (2020). Segundo os autores, a gestão integrada deve envolver a participação de diferentes setores da sociedade e a adoção de medidas de conservação e recuperação ambiental.

Ainda, Müller et al. (2021) destacaram a importância da educação ambiental na gestão do reservatório do Passaúna. Segundo os autores, a educação ambiental pode contribuir para a conscientização da população em relação à importância da água e do meio ambiente, e para o engajamento da comunidade na gestão do reservatório. Os autores verificaram que a educação ambiental pode ser realizada em diferentes níveis, desde ações educativas nas escolas até programas de sensibilização para os usuários da água, passando pela capacitação dos gestores e dos profissionais envolvidos na gestão do reservatório.

O reservatório do Passaúna é um manancial fundamental de abastecimento de água para Curitiba e região metropolitana, no Paraná. A SANEPAR, empresa de saneamento básico do estado, é a responsável por gerenciá-lo e garantir o abastecimento de água potável para a população. Os estudos citados mostram que a qualidade da água do reservatório é influenciada pela sazonalidade das chuvas, uso do solo, mudanças climáticas e presença de cianobactérias. Assim, é importante adotar medidas de gestão integrada da bacia hidrográfica, incluindo ações de prevenção da eutrofização, monitoramento da qualidade da água e programas de educação ambiental, a fim de garantir a qualidade da água do reservatório. A participação da sociedade é

fundamental para a gestão sustentável do reservatório e conservação do meio ambiente que o constitui.

3.2 Balanço Hídrico

O balanço hídrico é uma ferramenta essencial para entender a dinâmica da água em reservatórios, permitindo avaliar as mudanças na quantidade e qualidade da água. O balanço hídrico em reservatórios envolve o registro das entradas de água, incluindo precipitação e escoamento superficial, bem como as saídas, como evaporação, transpiração e descarga (Zhang et al., 2019). O uso de modelos hidrológicos é uma abordagem comum para estimar o balanço hídrico em reservatórios, permitindo uma melhor compreensão das complexas interações entre os diferentes componentes do sistema hídrico.

A aplicação de modelos hidrológicos em reservatórios é importante para uma gestão eficaz dos recursos hídricos. O balanço hídrico é uma das principais informações utilizadas na tomada de decisões relacionadas ao gerenciamento de reservatórios, incluindo planejamento de abastecimento de água, produção de energia hidrelétrica e controle de enchentes (Kumar et al., 2021). Além disso, a modelagem hidrológica pode ser usada para avaliar o impacto de diferentes cenários de mudanças climáticas na disponibilidade de água em reservatórios (Kumar et al., 2021).

A precisão do balanço hídrico em reservatórios depende da qualidade dos dados de entrada e da capacidade do modelo hidrológico em simular com precisão as interações entre os diferentes componentes do sistema hídrico (Zhang et al., 2019). Portanto, a escolha do modelo hidrológico apropriado é crucial para obter resultados precisos na modelagem do balanço hídrico em reservatórios.

Diversos modelos hidrológicos têm sido utilizados para simular o balanço hídrico em reservatórios, incluindo o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (HBV) e o Modelo Hidrológico da Área de Drenagem (DHSVM) (Pande et al., 2019). O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) tem sido amplamente

utilizado na modelagem hidrológica de reservatórios para avaliar a disponibilidade de água para a produção de energia hidrelétrica (Garrido et al., 2019).

A modelagem hidrológica do balanço hídrico em reservatórios é uma área em constante evolução, com novas técnicas e métodos sendo desenvolvidos para melhorar a precisão da simulação. Por exemplo, o uso de técnicas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e LIDAR, pode fornecer dados mais precisos sobre a quantidade e distribuição espacial de água em reservatórios (Pande et al., 2019). Além disso, a integração de modelos hidrológicos com modelos de sistemas de informações geográficas (SIG) pode melhorar a precisão da modelagem do balanço hídrico em reservatórios (Zhang et al., 2019).

O desenvolvimento de modelos integrados que combinam vários processos hidrológicos, como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo, e transporte de sedimentos, também é uma área promissora de pesquisa em modelagem de balanço hídrico em reservatórios (Wang et al., 2019). Esses modelos integrados podem fornecer uma compreensão mais abrangente dos processos hidrológicos em reservatórios, permitindo a simulação de diferentes cenários e a avaliação do impacto das mudanças climáticas e do uso da terra no balanço hídrico. Em resumo, a modelagem hidrológica em reservatórios é uma ferramenta importante para a gestão e planejamento de recursos hídricos, e continua sendo uma área em evolução com avanços constantes e novas aplicações sendo desenvolvidas.

Diversos estudos têm destacado a importância de realizar o balanço hídrico em reservatórios como forma de garantir a segurança hídrica para as populações que dependem desse recurso. De acordo com Moreira et al. (2020), o balanço hídrico é fundamental para a gestão adequada de recursos hídricos em reservatórios, permitindo a avaliação da disponibilidade de água para diferentes usos, como abastecimento humano, agricultura e geração de energia elétrica. Além disso, o balanço hídrico também é essencial para a identificação de problemas relacionados à qualidade da água, como a proliferação de algas tóxicas e a redução da oxigenação.

Para a realização do balanço hídrico em reservatórios, é comum o uso de modelos hidrológicos, que permitem a simulação da dinâmica da água no sistema. Segundo Silva et al. (2020), a aplicação de modelos hidrológicos é fundamental para a análise da variação temporal e espacial das variáveis hidrológicas, como a vazão, a evapotranspiração e a infiltração, além de permitir a simulação de diferentes cenários de gestão dos recursos hídricos.

Dentre os modelos hidrológicos utilizados para o balanço hídrico em reservatórios, destacam-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e o General Lake Model (GLM). De acordo com Almeida et al. (2021), o SWAT tem sido amplamente utilizado para a simulação da qualidade da água em reservatórios, permitindo a análise da contribuição das diferentes fontes de poluição para a degradação da qualidade da água. Já o GLM é um modelo específico para a simulação de processos hidrológicos e biogeoquímicos em lagos e reservatórios, permitindo a simulação da dinâmica do fluxo de água, da temperatura da água, da concentração de oxigênio dissolvido, entre outros processos.

É importante destacar que o balanço hídrico em reservatórios não deve ser realizado apenas de forma pontual, mas sim de forma contínua e integrada com as ações de gestão dos recursos hídricos. Segundo Ribeiro et al. (2020), a realização do balanço hídrico contínuo permite a avaliação da eficácia das medidas de gestão adotadas e a identificação de problemas emergentes, como a ocorrência de secas prolongadas e eventos extremos de chuva.

A aplicação do balanço hídrico em reservatórios também é fundamental para a avaliação da vulnerabilidade desses sistemas às mudanças climáticas. Segundo Souza et al. (2019), a simulação da dinâmica da água em reservatórios utilizando modelos hidrológicos permite a identificação dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água, na qualidade da água e na ocorrência de eventos extremos, como enchentes e secas.

Portanto, pode-se concluir que o balanço hídrico em reservatórios é uma ferramenta essencial para a gestão adequada de recursos hídricos, permitindo a avaliação da disponibilidade de água para diferentes usos e a identificação de problemas relacionados à qualidade da água. A aplicação de modelos

hidrológicos, como o SWAT e o GLM, permite a simulação da dinâmica da água e a análise da variação temporal e espacial das variáveis hidrológicas, além de permitir a simulação de diferentes cenários de gestão dos recursos hídricos. É fundamental que o balanço hídrico em reservatórios seja realizado de forma contínua e integrada com as ações de gestão dos recursos hídricos, para permitir a avaliação da eficácia das medidas de gestão adotadas e a identificação de problemas emergentes. Além disso, a aplicação do balanço hídrico em reservatórios também é fundamental para a avaliação da vulnerabilidade desses sistemas às mudanças climáticas.

3.3 General Lake Model

O General Lake Model (GLM) é um modelo hidrodinâmico unidimensional projetado para simular os processos físicos em lagos e reservatórios. O modelo foi desenvolvido para fornecer uma ferramenta robusta para a análise de diferentes cenários de gestão de recursos hídricos, incluindo variações na temperatura da água, circulação, estratificação térmica, e dinâmica de nutrientes (Hipsey et al., 2019). O GLM utiliza equações diferenciais para descrever as interações entre os diferentes componentes do sistema lacustre, como a água e os sedimentos, e é capaz de simular diversos processos hidrológicos e biogeoquímicos.

O manual do modelo descreve as principais funcionalidades do GLM, incluindo a simulação da dinâmica da temperatura da água, concentração de oxigênio dissolvido, e fluxos de gases do efeito estufa, além de outros processos importantes para a gestão de lagos e reservatórios (Hipsey et al., 2019). O GLM também permite a simulação de diferentes cenários de gestão, como mudanças climáticas e estratégias de controle de nutrientes, sendo amplamente utilizado em estudos de impacto ambiental.

Markkula et al. (2019) aplicaram o GLM para avaliar os impactos das mudanças climáticas na qualidade da água de lagos na Finlândia, demonstrando a eficácia do modelo em simular a dinâmica da qualidade da água sob diferentes cenários climáticos.

Além disso, o GLM tem sido comparado a outros modelos hidrológicos em diferentes contextos. Um estudo comparou o GLM com outros modelos semelhantes e concluiu que ele oferece alta precisão na simulação de processos hidrológicos em lagos e reservatórios, sendo uma ferramenta eficaz para a gestão de recursos hídricos (Hipsey et al., 2020).

Em resumo, o GLM é uma ferramenta valiosa para a simulação de processos hidrológicos e biogeoquímicos em lagos e reservatórios. O modelo possui diversas ferramentas e funcionalidades para a análise de diferentes cenários de gestão de recursos hídricos. O GLM tem sido amplamente utilizado em diferentes contextos, fornecendo informações valiosas para a gestão dos recursos hídricos e a tomada de decisões.

Para melhorar a usabilidade dos modelos hidrológicos, foram desenvolvidas ferramentas de autocalibração, como o glmgui. Essa ferramenta, criada por Bueche et al (2020), permite a calibração automática do General Lake Model (GLM), ajustando os parâmetros do modelo para minimizar as diferenças entre as simulações e os dados observados, assegurando assim resultados mais precisos e confiáveis (Bueche et al. 2020).

3.4 Estiagem

A Secretaria de Defesa Civil classifica os termos “estiagem” e “seca” de maneiras distintas, INEA (2021). O primeiro termo seria referente aos períodos em que a reposição de água no solo é inferior à sua perda, devido à ausência de chuvas ou baixos índices pluviométricos. Enquanto isso, seca seria referente ao período prolongado de ausência de chuvas ou baixa pluviosidade, desencadeando em um acentuado desequilíbrio hidrológico, INEA (2021).

Ainda segundo o INEA (2021), no ponto de vista meteorológico, os termos estão relacionados, sendo a seca um período prolongado de estiagem. Contudo, diferentemente da Secretaria de Defesa Civil, entende-se que não está exclusivamente relacionado com os baixos índices pluviométricos, mas sim com uma significativa redução das reservas hídricas existentes. A causa disso pode

estar relacionada com o uso antrópico inadequado de corpos hídricos e bacias hidrográficas.

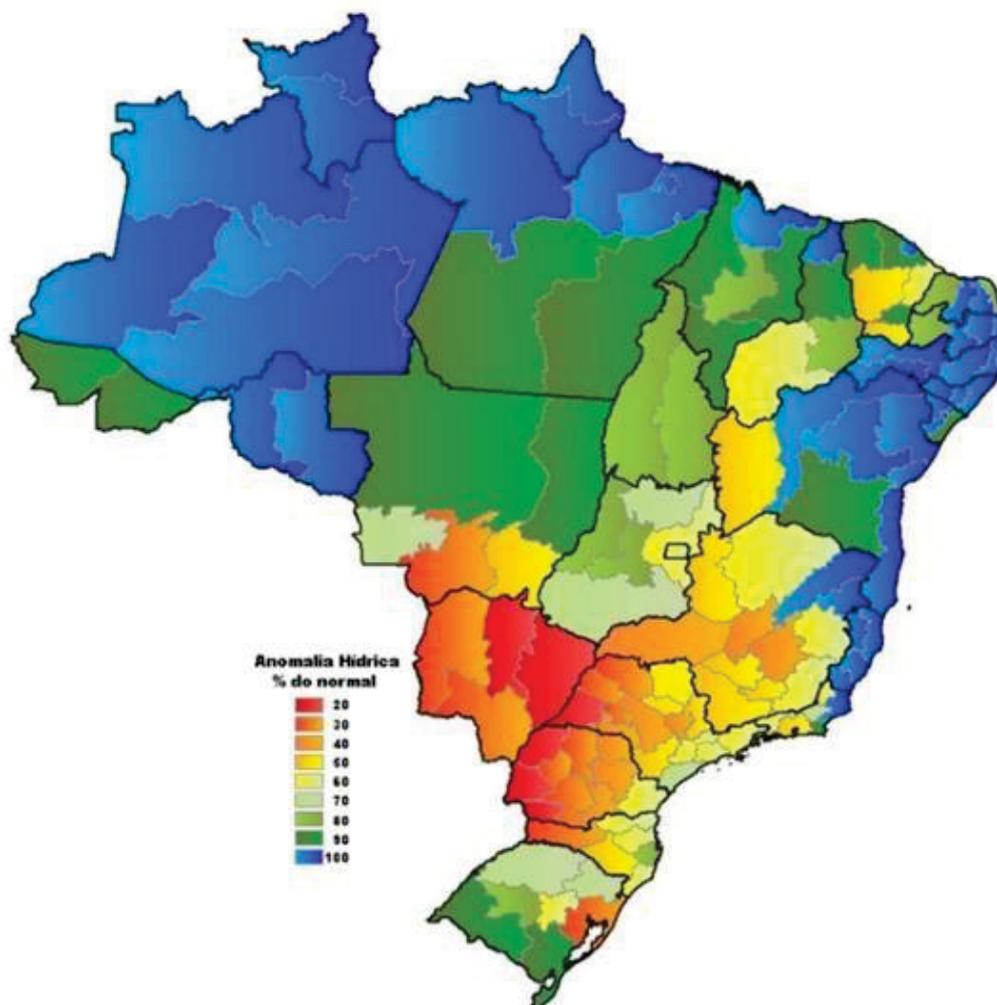
De acordo com Guimarães (2021), é necessário realizar o monitoramento constante de anomalias desencadeadas pela combinação da distribuição espacial dos recursos hídricos e as variabilidades temporais no Brasil. O autor destaca que o excesso ou falta de chuvas causam impactos, porém em magnitudes diferentes. Enquanto o excesso de chuvas causa efeitos localizados (como danos materiais e humanos), a falta das mesmas apresenta um problema crônico, em macro escala, tendo efeitos diretos no meio ambiente, abastecimento para consumo humano e comercial, na produção de alimentos e na geração de energia.

O período atual marca a ocorrência de um terceiro período de estiagem dentro dos últimos 20 anos. Esse período retrata os efeitos da falta de chuva registrada nos últimos meses, desencadeando uma crise hídrica no cenário nacional e, ainda, combinado com um aumento nas temperaturas e o crescimento do risco de incêndios – como foi o incêndio ocorrido no Pantanal, em 2020. Anteriormente, foi notório os períodos de estiagem de 2014 e 2015 com a escassez de água em São Paulo e com o “apagão” de 2001, com a crise no setor elétrico. Contudo, a crise atual é agravada com a pandemia da Covid-19, tendo seus impactos socioeconômicos potencializados, (Guimarães, 2021).

Guimarães (2021) ainda destaca medidas mitigadoras, como o Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos no ramo alimentício, e avanços tecnológicos nas áreas de energias limpas (com fonte solar e eólica). Ainda sobre os avanços tecnológicos, a atual capacidade de monitoramento meteorológico através de imagens de satélite e o compartilhamento de dados entre iniciativas públicas e privadas são ferramentas que ajudam na prevenção ou no auxílio para tomada de decisão frente ao risco de um período de seca.

A figura 1 demonstra a anomalia hídrica vivida nos diferentes estados brasileiros, destacando, ainda, que os maiores impactos da estiagem em maio de 2021 foram observados na bacia hidrográfica do Rio Paraná – sendo está a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil e que contempla a Usina de Itaipu.

Figura 1 - ANOMALIAS HÍDRICAS AVALIADAS EM % DO NORMAL NOS DIFERENTES ESTADOS DO BRASIL EM MAIO DE 2021



FONTE: GUIMARÃES (2021)

Além do lago de Itaipu, a notícia trazida pela AEN-PR (2021) informa que a estiagem também foi notória na Bacia do Iguaçu. A vazão das Cataratas do Iguaçu durante os dias 9 e 10 de junho foi de aproximadamente 20% da vazão normal, com valores registrados de 308.000 L/s, enquanto a vazão normal (para estas datas, considerando as vazões registradas nos últimos 5 anos) era de 1.500.000 L/s. Ainda, o nível de água do Rio Paraná na divisa entre Brasil e Paraguai estava 8,5 metros abaixo da média comparativa dos últimos 5 anos.

Apesar do Rio Iguaçu não fazer parte do sistema de abastecimento da Sanepar, a falta de chuvas na região de Curitiba – área da nascente do rio – e os consequentes efeitos diretos na vazão das Cataratas reafirmam os impactos da crise hídrica, AEN-PR (2021).

Ainda de acordo com a agência, o nível dos reservatórios do Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana estava em 51,82% no dia 14 de julho de 2021.

De acordo com a ANA (2020), o mês de agosto de 2020 registrou índices pluviométricos acima da média no Paraná. Apesar disso, o estado registrou a pior situação de seca do país, sendo 100% do seu território afetado pelo fenômeno. Ainda, ANA (2020) destaca que em 2020 61,14% do estado do Paraná encontrava-se em situação de seca grave e 8,61% em seca extrema. As regiões norte, sul e sudeste do estado apresentam um estado de seca moderada, enquanto para a área leste, o fenômeno é considerado extremo – confirmando os efeitos de crise extrema na Região Metropolitana de Curitiba. Os índices pluviométricos do mês de agosto de 2020 e a situação das diferentes regiões do estado do Paraná reiteram a visão meteorológico trazida pelo INEA (2020), demonstrando que os efeitos da estiagem e da seca não estão exclusivamente atrelados aos baixos índices pluviométricos.

A redução aguda nos níveis dos reservatórios marca um período de estiagem na região metropolitana de Curitiba-PR que já dura mais de 10 meses. Os efeitos disso são a busca de medidas mitigação emergenciais como a transposição de rios da região em curto prazo e a implementação de um sistema de rodízio no abastecimento, que visa evitar um colapso, CLIMAINFO (2020).

Ainda de acordo com CLIMAINFO (2020), a falta de chuva na região estão retrata um cenário de alterações climáticas, intensificados com o desmatamento na região norte – uma vez que as correntes de ar deveriam carregar a umidade da Amazônia para as demais regiões do Brasil. O efeito disso foi notado no final de 2020 e início de 2021, com um verão marcado pelos baixos índices pluviométricos, agravando a situação da crise hídrica.

Fisicamente, Stull (2017) explica que a água líquida na atmosfera aumenta a temperatura virtual desta camada, de forma que quanto maior o volume e tamanho de gotas de chuva, maior é a temperatura. Como o ar quente tende a subir, isso proporciona a formação de correntes de nuvens ascendentes de chuva. Em microescala, isso faz com que os ventos na troposfera carreguem as nuvens para outro local.

Contudo, em um nível mais intenso podem evitar que as gotas atinjam o solo, fazendo com que sejam acumuladas no topo das tempestades. Com isso, seria possível a formação de camadas de água líquida na estratosfera, que serviria como uma camada de bloqueio da radiação solar, onde menos chuvas atingiriam o solo e, assim, se intensificariam as secas. Em macro escala isso poderia resultar na extinção da vida humana, segundo Stull (2017).

Entretanto, as ações antrópicas na linha dos avanços tecnológicos também possuem seus pontos positivos, como a possibilidade do monitoramento hidrológico. Isso permite ao operador a tomada de decisões analisando dados de níveis da água em tempo real, visando minimizar os impactos da estiagem, INEA (2021).

Além disso, esses avanços permitiram o desenvolvimento de modelos computacionais que podem simular diversos cenários para previsão de condições futuras sob diversas condições proporcionadas pelas variáveis hídricas, meteorológicas, químicas, físicas e biológicas – isso permite a previsão e mitigação de um problema antes mesmo que ele aconteça.

3.5 Estratificação Térmica

A dinâmica do regime térmico em corpos hídricos é fundamental na compreensão do funcionamento de fluxos ecológicos contidos nestes ambientes. Processos como a produção primária, a nitrificação e a respiração nos ambientes aquáticos são sensíveis às variações de temperatura do mesmo, sendo estas variações determinadas pelo regime climático natural da região onde o ambiente se encontra, (Fragoso Jr. et al., 2009; apud Souza et al., 2016).

Os processos hidrodinâmicos e de transporte de massa são vulneráveis a densidade da água, sendo que esta, por sua vez, depende da variação de temperatura da água. Desta forma, conhecer as características térmicas de um corpo hídrico, bem como as variações de temperatura que nele ocorrem, são aspectos de extrema importância. Além disso, a descarga de efluentes com temperaturas diferentes – normalmente superiores – à temperatura do corpo

hídrico podem causar efeitos negativos neste ambiente, especialmente por conta de a temperatura influenciar nas reações químicas e biológicas dos ecossistemas, (COPPE/UFRJ, 2007; apud Souza et al., 2016).

Nesse aspecto, reservatórios de água são sistemas sensíveis a variações de temperaturas, sendo importante conhecer a estratificação térmica da coluna de água para entender o funcionamento deste ecossistema. A ecologia destes ambientes, assim como a qualidade de suas águas, é influenciada pela dinâmica de calor da água, determinando assim aspectos como a toxicidade de poluentes, solubilidade de oxigênio dissolvido, metabolismo e respiração de plantas e animais, entre outros. A superfície da água é determinante nesta dinâmica de calor, uma vez que estabelece interações dos fluxos de energia entre a água e a atmosfera, sendo responsável, assim, a temperatura da água da superfície - que “é um parâmetro chave na física dos processos do sistema aquático”, (Alcântara et al. 2011; Lerman et al, 1995; Kimmel et al., 1990; apud Alcântara et al., 2012).

A transferência de calor que ocorre na superfície do lago em virtude da radiação solar é um processo lento, o que promove a formação de diferentes camadas de temperatura na coluna de água. Quando o vento não proporciona uma mistura das camadas, por não possuir energia suficiente para causar turbulências no ambiente – ou estes distúrbios serem ínfimos - o sistema tende a formar de camadas heterogêneas. Neste processo então, formam-se três camadas: epilímnio, hipolímnio e metalímnio.

No metalímnio, encontra-se a termoclina, que corresponde ao plano que passa no ponto de inflexão do perfil térmico e cuja formação ocorre por interações entre a turbulência gerada pelo vento e o empuxo devido ao gradiente de densidade; esse processo de formação é instável mesmo quando as condições ambientais são estáveis, (Andreoli *et al.*, 2011; apud Ferreira e Cunha; 2013).

Decorrente deste gradiente de temperatura, o gradiente de densidade proporciona o desenvolvimento de uma barreira física no sistema e que acaba por impedir a mistura de compartimentos no sentido vertical. Os efeitos deste processo se agravam ainda mais, pois a formação de uma barreira física

desencadeia na formação de zonas de circulação na coluna de água, o que intensifica os efeitos da estratificação térmica. Esse processo impede a mistura homogênea entre superfície e fundo do reservatório, (Souza et al., 2016).

Sob outra perspectiva, Alcântara et al. (2012) descreve os reservatórios como sistemas termodinâmicos, os quais poderiam ser abordados como motores térmicos e que realizam trocas de calor com seus arredores. Um exemplo disto seria a troca de energia que ocorre entre o reservatório e a atmosfera, sendo o estudo deste efeito “essencial para a compreensão do comportamento do sistema aquático e sua reação a possíveis mudanças nas condições ambientais e climáticas”, (Bonnet et al, 200; apud Alcântara et al., 2012).

Em paralelo, o calor absorvido pelo corpo hídrico pode ser distribuído ao longo de suas camadas, isso ocorre quando a energia cinética turbulenta impulsionada pelo vento é suficientemente grande, (Moreno-Ostos et al., 2008; apud Alcântara et al., 2012).

Desta forma, quando se possui conhecimento das variáveis climáticas é possível realizar a modelagem do regime térmico de um reservatório. Os parâmetros que definem tais variáveis são: a temperatura do ar, a radiação solar, a evaporação, a direção e intensidade do vento, precipitação e umidade, além dos dados hidrológicos, que constituem as condições de contorno para a entrada e a saída do reservatório, (Souza et al., 2016).

A modelagem destes sistemas permite identificar tendências e mudanças repentinas no sistema aquático, porém são dependes da disponibilidade de séries temporais de longo prazo de dados ambientais, da qualidade destes dados e de uma análise apropriada dos cenários de previsão que podem ser representados, (Stech et al., 2006; apud Alcântara et al., 2012).

4 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste item é trazido uma breve síntese de três artigos diretamente relacionados com o objeto de estudo deste trabalho. O primeiro com o título “*Effects of Hydrological Drought Periods on Thermal Stability of Brazilian Reservoirs*” traz a análise da ocorrência de períodos de seca em diversos reservatórios do Brasil, entre eles o reservatório do Passaúna. O segundo trabalho intitulado “*Water Quality Modeling in a Subtropical Water Supply Reservoir*” trata da calibração manual do General Lake Model no período de 2017 até 2019, que antecede o período de análise deste estudo, sendo influência direta na idealização para a realização desta pesquisa. Por fim, o trabalho “Soluções Inovadoras para o Enfrentamento aos Efeitos da Crise Hídrica na Região Metropolitana de Curitiba: Da Lagoa de Minas à Hidrossemeadura de Nuvens” traz as medidas mitigadoras realizadas durante o período de estudo deste trabalho com o intuito de amenizar os efeitos da estiagem sofridos no reservatório.

4.1 Effects of Hydrological Drought Periods on Thermal Stability of Brazilian Reservoirs

O artigo "Effects of Hydrological Drought Periods on Thermal Stability of Brazilian Reservoirs" conduz um estudo detalhado sobre os impactos dos períodos de seca hidrológica na estabilidade térmica de reservatórios brasileiros, focando em dez reservatórios situados em diferentes zonas climáticas do centro-sul do Brasil. São estes reservatórios: Ituparanga, Jurumirim, Chavantes, Capivara, Barra Bonita, Promissão, Três Irmãos, Serra Azul, Paranoá e Passaúna. Dentre eles, o reservatório Passaúna é tratado com destaque devido à sua importância para o abastecimento de água potável na região de Curitiba.

O estudo começa ressaltando a relevância dos reservatórios para a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, como abastecimento de água, irrigação agrícola, geração de energia hidrelétrica, recarga de aquíferos e manutenção de ecossistemas. Entretanto, períodos de seca, que estão se

tornando mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas, podem comprometer a estabilidade térmica desses reservatórios, o que, por sua vez, afeta diretamente a qualidade da água e os serviços ecossistêmicos.

A pesquisa utiliza o Índice de Precipitação Padronizado (SPI-12) para identificar períodos de seca hidrológica. Este índice é amplamente utilizado para caracterizar secas em diferentes escalas temporais e é particularmente útil para avaliar impactos hidrológicos, como o nível de água em reservatórios. O estudo se debruça sobre como esses períodos de seca influenciam a estratificação térmica nos reservatórios, utilizando o Índice de Estabilidade de Schmidt (St) como uma medida da resistência à mistura mecânica das águas, uma métrica crucial para entender a dinâmica térmica em sistemas aquáticos.

A seleção dos dez reservatórios estudados foi baseada em critérios específicos, incluindo a disponibilidade de dados batimétricos, hidrológicos e meteorológicos, a ocorrência recente de eventos de seca, o uso similar dos reservatórios (principalmente para abastecimento de água potável e geração hidrelétrica), e o tempo de residência das águas superior a três meses. Os reservatórios estão localizados em diferentes zonas climáticas do Brasil central e sul, o que permite uma análise comparativa abrangente.

O modelo hidrodinâmico unidimensional General Lake Model (GLM) foi empregado para simular o balanço hídrico e a estratificação térmica dos reservatórios ao longo do tempo. Este modelo é reconhecido por sua capacidade de simular com precisão mudanças na temperatura da água e em métricas de estratificação durante eventos climáticos extremos. A calibração do modelo foi feita utilizando dados medidos *in loco*, incluindo níveis de água e perfis de temperatura, fornecidos por empresas privadas de energia hidrelétrica, companhias de saneamento e agências governamentais.

Todos os dez reservatórios estudados experimentaram períodos de seca excepcional durante o período de estudo. O Passaúna, em particular, apresentou 6,0% de tempo sob condições de seca extrema, enquanto o Paranoá registrou 4,6% desse tempo. Esses resultados indicam que, apesar de relativamente curtos, os períodos de seca extrema podem ter impactos significativos, especialmente em reservatórios destinados ao abastecimento de água potável.

O GLM reproduziu com sucesso tanto o nível de água quanto o regime térmico dos reservatórios durante os períodos simulados. Em relação ao Passaúna, que é um reservatório polimítico (caracterizado por misturas de água frequentes, mas irregulares), o modelo mostrou que ele experimenta oscilações de nível de água menos pronunciadas em comparação com outros reservatórios estudados. Isso se deve, em parte, ao fato de que o Passaúna não é utilizado para geração de energia hidrelétrica, o que reduz as flutuações associadas à operação da barragem.

Os resultados indicaram que a seca pode coincidir tanto com níveis baixos quanto altos de água, o que influencia a estratificação térmica. Durante os períodos de seca, observou-se que a estratificação térmica pode ser tanto intensificada quanto reduzida, dependendo de fatores como a intensidade do vento e a precipitação. No Passaúna, por exemplo, a estratificação mostrou-se mais estável durante os períodos de seca, o que sugere uma resistência à mistura das camadas de água, mesmo sob condições adversas.

O Índice de Estabilidade de Schmidt (St) foi utilizado para avaliar a estabilidade térmica dos reservatórios ao longo do tempo. Altos valores de St indicam uma forte estratificação térmica, que requer inputs energéticos elevados para a mistura vertical da coluna d'água. O estudo revelou que, durante os períodos de seca, a estabilidade térmica variou significativamente entre os reservatórios, com diferenças marcantes entre os períodos de seca e os períodos normais ou úmidos, especialmente durante o verão.

No caso do Passaúna, o St manteve-se relativamente estável durante os períodos de seca, sugerindo que a morfometria do reservatório (com uma profundidade máxima de 16,5 metros e uma área superficial de 9,0 km²) contribui para a manutenção da estratificação térmica, mesmo em condições de baixa precipitação e níveis de água reduzidos. Esse comportamento é crucial para a gestão do reservatório, pois a estabilidade térmica pode influenciar a qualidade da água, particularmente em termos de oxigenação e presença de nutrientes.

O estudo aponta que os períodos de seca, mesmo que de baixa frequência, podem ter impactos severos na gestão dos reservatórios, especialmente aqueles utilizados para o abastecimento de água potável. No

Passaúna, por exemplo, a estabilidade térmica durante os períodos de seca sugere a necessidade de estratégias de gestão que considerem não apenas a quantidade de água disponível, mas também a qualidade da água em termos de oxigenação e risco de proliferação de cianobactérias.

Durante a seca severa de 2014 - 2015 no sudeste do Brasil, os níveis de água em reservatórios como o Serra Azul caíram drasticamente, resultando em custos elevados para medidas emergenciais de abastecimento. Essa situação destaca a importância de monitorar continuamente os efeitos da seca nas características físicas dos reservatórios, incluindo a estratificação térmica, para antecipar e mitigar impactos adversos na qualidade da água.

O estudo conclui que os períodos de seca hidrológica alteram o regime térmico dos reservatórios de maneira significativa, com impactos mais pronunciados durante o verão. Essas alterações dependem das características específicas de cada reservatório, como morfometria e uso, bem como das condições ambientais externas, como vento e precipitação. No caso do Passaúna, a estabilidade térmica durante os períodos de seca sugere que o reservatório possui uma resiliência natural à estratificação térmica, embora a gestão deva considerar potenciais impactos na qualidade da água.

Este estudo oferece uma base teórica robusta para a compreensão de como as mudanças climáticas e os eventos extremos, como as secas, podem influenciar a dinâmica térmica dos reservatórios brasileiros. As metodologias aplicadas e os resultados obtidos são valiosos para a formulação de estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos em contextos de escassez hídrica, sendo especialmente relevantes para reservatórios como o Passaúna, que desempenham um papel crucial no abastecimento de água potável.

4.2 Water Quality Modeling in a Subtropical Water Supply Reservoir

A dissertação de Gabriela Gomes Nogueira Sales, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná, é um estudo aprofundado sobre a modelagem da qualidade

da água em um reservatório de abastecimento de água subtropical, com foco no reservatório do Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), Paraná. O trabalho, intitulado "Water Quality Modeling in a Subtropical Water Supply Reservoir," aborda a utilização do modelo hidrodinâmico-ecológico acoplado GLM-AED (General Lake Model – Aquatic EcoDynamics) para simular e analisar os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nesse reservatório, em um contexto de crescente pressão por recursos hídricos e mudanças climáticas.

Reservatórios, também denominados lagos artificiais, são ecossistemas formados a partir do represamento de um ou mais cursos d'água, frequentemente inundando áreas extensas adjacentes. Estes corpos d'água desempenham um papel crucial na prestação de serviços ecossistêmicos, incluindo o abastecimento de água potável, controle de inundações, geração de energia hidrelétrica, além de oferecerem benefícios estéticos e culturais, e sustentarem a biodiversidade aquática e a pesca. No entanto, esses reservatórios estão sujeitos a impactos adversos decorrentes de atividades antropogênicas nas bacias hidrográficas, como a urbanização, a agricultura intensiva e a poluição industrial, que, aliadas às pressões indiretas das mudanças climáticas, têm aumentado a vulnerabilidade desses ecossistemas em escala global.

O fenômeno da eutrofização, que é a proliferação excessiva de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, tem sido identificado como um dos maiores desafios ambientais enfrentados por corpos d'água superficiais. Esse processo, embora natural em muitos sistemas aquáticos, tem sido acelerado pelas atividades humanas, levando a uma rápida degradação da qualidade da água. Em reservatórios como o do Passaúna, que possui baixa profundidade média, tempo de residência prolongado e extensa área superficial, a suscetibilidade à eutrofização é ainda mais pronunciada. Essas características, combinadas com a importância do reservatório como fonte de água para cerca de 20% da população da RMC, tornam urgente a necessidade de uma gestão eficaz e baseada em evidências científicas.

O estudo conduzido por Sales adotou o General Lake Model em conjunto com o módulo ecológico Aquatic EcoDynamics (AED). A escolha do GLM-AED foi motivada pela sua capacidade de simular o balanço hídrico e o comportamento térmico dos lagos, além de permitir a modelagem de componentes químicos e biológicos como oxigênio dissolvido, carbono, nitrogênio, fósforo, matéria orgânica e fitoplâncton.

A modelagem foi realizada para o período de agosto de 2017 a fevereiro de 2019, permitindo a análise das variações sazonais e o comportamento do reservatório ao longo de diferentes condições climáticas. A configuração do modelo incluiu duas profundidades distintas: uma correspondente à profundidade total do reservatório (17 metros) e outra à profundidade aproximada da região de captação (12 metros), onde as medições de campo foram realizadas. O período com dados de campo, de março de 2018 a fevereiro de 2019, foi utilizado para a calibração do modelo, assegurando que os resultados da simulação fossem comparáveis aos dados observados.

Um dos principais objetivos do estudo foi a análise do desempenho do modelo GLM-AED na simulação do nível do reservatório do Passaúna. O modelo foi calibrado para reproduzir o balanço hídrico do reservatório, que é crucial para entender como a água se comporta em termos de entrada e saída, além de seu armazenamento ao longo do tempo.

A simulação com a profundidade total do reservatório de 17 metros mostrou um desempenho superior. Os resultados indicaram que o modelo conseguiu capturar adequadamente as flutuações do nível da água ao longo do período simulado. A variação no nível do reservatório foi influenciada tanto pelas entradas (precipitação e afluentes) quanto pelas saídas (evaporação e retirada para abastecimento), e o modelo foi capaz de refletir essas variações de forma coerente com os dados observados.

Embora a simulação com a profundidade de 12 metros também tenha reproduzido o comportamento geral do nível do reservatório, o desempenho foi ligeiramente inferior ao da simulação de 17 metros. Isso sugere que a configuração que considera a profundidade total do reservatório é mais eficaz para representar os processos hidrológicos e o balanço hídrico.

Ainda, a simulação com a profundidade de 17 metros foi mais eficaz em capturar as oscilações sazonais e os eventos de precipitação, o que é fundamental para a gestão dos recursos hídricos do reservatório, especialmente em cenários de mudanças climáticas ou períodos de seca prolongada.

As métricas de erro utilizadas foram o Erro Médio Absoluto (MAE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), que são amplamente reconhecidas na literatura como indicadores robustos da acurácia de modelos numéricos.

O MAE é uma métrica que mede a média das diferenças absolutas entre os valores simulados e os observados. No caso da simulação do nível do reservatório, o MAE foi calculado para avaliar a precisão das previsões do modelo em relação aos dados medidos. O valor do MAE para a profundidade de 17 metros foi de 0,11 m para as simulações de nível e o RMSE foi de 0,16 m, sendo estes valores considerados bons, especialmente considerando a complexidade dos processos físicos envolvidos. Para a profundidade de 12 metros os erros foram 4.2 e 3.25 vezes maior, respectivamente.

Para as simulações de temperatura o MAE foi de 1.69°C e o RMSE foi de 2.28°C, o que também é um resultado satisfatório para a profundidade de 17 metros, enquanto os mesmos para a profundidade de 12 metros foram de 1.47°C e 2.08°C, respectivamente. Isso indica que o modelo foi capaz de manter a precisão ao longo de todo o período de simulação em ambos os casos, mesmo nos casos em que as condições ambientais variaram significativamente.

Essas métricas de erro foram comparadas com valores encontrados na literatura para modelos semelhantes, e os resultados obtidos pelo estudo de Sales ficaram dentro das expectativas, reforçando a confiabilidade do modelo GLM-AED para simulações hidrodinâmicas em reservatórios subtropicais.

A estratificação térmica, um fenômeno característico em reservatórios durante certas épocas do ano, foi representada adequadamente pelo modelo. Este fenômeno ocorre quando o aquecimento da superfície do reservatório cria camadas de água com diferentes densidades, resultando em uma separação vertical que pode dificultar a mistura de nutrientes e gases entre as camadas. O estudo de Sales mostrou que, durante os períodos mais frios, a instabilidade

térmica aumentou, levando a episódios de mistura entre as camadas, o que foi corroborado pelos índices físicos calculados.

Em relação ao oxigênio dissolvido, uma variável crítica para a vida aquática, o modelo demonstrou uma distribuição homogênea na coluna d'água, embora a dinâmica tenha sido melhor representada na camada inferior do reservatório, onde foi observado um maior coeficiente de correlação entre os valores simulados e os medidos. No entanto, os erros MAE e RMSE foram menores na região próxima à superfície, sugerindo uma maior concordância em termos de ordem de grandeza dos valores simulados.

A modelagem das substâncias químicas, como nitrogênio e fósforo, e da clorofila-a, substância que indica a presença de fitoplâncton, foi um desafio devido à limitação dos dados medidos. A calibração do modelo priorizou o ajuste da ordem de magnitude para essas substâncias, o que permitiu uma avaliação geral da qualidade da água no reservatório, mesmo com restrições de dados. Uma análise crucial realizada no estudo foi a classificação do estado trófico do reservatório, que é um indicador da quantidade de nutrientes e do potencial de produção primária (produção de biomassa por plantas e algas) no corpo d'água. Os resultados indicaram uma predominância de condições mesotróficas, o que significa que o reservatório tem um nível moderado de nutrientes, alinhando-se com estudos anteriores realizados no Passaúna.

As conclusões do estudo de Sales são claras: o modelo GLM-AED demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a análise de cenários de gestão em reservatórios subtropicais. A capacidade do modelo de reproduzir com precisão os processos físicos, químicos e biológicos no reservatório do Passaúna, aliado ao seu baixo custo computacional e à necessidade mínima de calibração, sugere que ele pode ser amplamente utilizado para informar decisões de gestão. Este é particularmente relevante em cenários futuros que envolvem períodos de seca ou mudanças climáticas, onde a compreensão detalhada da dinâmica do reservatório pode ajudar a mitigar os impactos adversos na qualidade da água.

Além disso, o estudo de Sales contribui significativamente para a literatura existente sobre modelagem de reservatórios subtropicais, oferecendo insights valiosos sobre como modelos unidimensionais podem ser aplicados em

diferentes contextos, especialmente em regiões onde a coleta de dados contínua é limitada. A aplicação do GLM-AED no Passaúna serve como um modelo para estudos futuros, sugerindo que abordagens semelhantes podem ser adotadas para outros corpos d'água com características e desafios comparáveis.

Este trabalho, portanto, não apenas avança o conhecimento científico sobre a modelagem da qualidade da água em reservatórios, mas também oferece uma base sólida para a implementação de estratégias de gestão mais informadas e eficazes, contribuindo para a sustentabilidade dos recursos hídricos em um mundo cada vez mais afetado por mudanças ambientais e pressões antropogênicas.

4.3 Soluções Inovadoras para o Enfrentamento aos Efeitos da Crise Hídrica na Região Metropolitana de Curitiba: Da Lagoa de Minas à Hidrossemeadura de Nuvens

O artigo "Soluções Inovadoras para o Enfrentamento aos Efeitos da Crise Hídrica na Região Metropolitana de Curitiba" discute as estratégias emergenciais e inovadoras adotadas para mitigar os impactos da seca severa que afetou o Paraná a partir de 2020. A crise hídrica foi resultado de anomalias pluviométricas que reduziram drasticamente os volumes de água disponíveis nos mananciais, especialmente aqueles que abastecem Curitiba e sua região metropolitana. Esse cenário levou a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) a implementar soluções inovadoras para assegurar o abastecimento de água durante o período de escassez, intensificado pela pandemia de Covid-19.

A crise de abastecimento de água foi particularmente desafiadora, pois o Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba (SAIC) é responsável por cerca de 40% do fornecimento de água no estado do Paraná, abastecendo aproximadamente 3,8 milhões de pessoas. Devido à severidade da seca, a Sanepar precisou adotar diversas ações emergenciais, como a antecipação de obras estruturantes, rodízios de distribuição de água, campanhas de conscientização sobre o uso racional e medidas de manejo em reservatórios. Entre as inovações mais notáveis estão a semeadura de nuvens, com o objetivo

de induzir chuvas localizadas, e a captação emergencial de água no lago de mina da Pedreira Orleans, ambos focos principais deste estudo.

A sementeira de nuvens, também conhecida como hidrossementeira, foi uma das técnicas adotadas pela Sanepar. Esta prática consiste em induzir artificialmente precipitações em nuvens com potencial para chuvas, utilizando gotículas de água potável em vez de produtos químicos como iodeto de prata ou gelo seco, que podem causar impactos ambientais. A técnica, desenvolvida pela empresa ModClima, baseia-se em princípios de termodinâmica e envolve a pulverização de gotículas de tamanho controlado no interior de nuvens do tipo Cumulus, promovendo seu crescimento vertical e desencadeando chuvas após cerca de 15 a 40 minutos.

O processo incluiu monitoramento climático para identificar nuvens com potencial para sementeira, seguido de voos de sementeira realizados com uma aeronave equipada com os instrumentos necessários. Durante os voos, registrou-se uma série de dados meteorológicos, como temperatura, umidade e direção dos ventos, além das condições das nuvens e a quantidade de água pulverizada. A validação das chuvas induzidas foi feita com o auxílio de imagens de satélite e dados de radar meteorológico, que permitiram isolar as células de precipitação resultantes da sementeira.

Outra medida emergencial foi a captação de água do lago de mina da Pedreira Orleans. Os lagos de minas se formam quando operações de mineração a céu aberto são interrompidas e a água subterrânea aflora, formando reservatórios de água consideráveis. O lago da Pedreira Orleans, localizado a aproximadamente 5 km do reservatório Passaúna, foi escolhido por sua proximidade e pela qualidade de sua água, que superava a do próprio reservatório.

Para a captação, foram instaladas tubulações e bombas de alta capacidade que aduziram até 150 litros por segundo para o rio Passaúna, que deságua no reservatório de mesmo nome. Ao longo de seis meses, aproximadamente 1,9 bilhões de litros de água foram transferidos para o sistema de abastecimento, aumentando a disponibilidade de água durante o período mais crítico da seca.

Os resultados da hidrossemeadura de nuvens foram significativos. Entre dezembro de 2020 e abril de 2021, foram realizados 47 voos, dos quais 32 resultaram em precipitações induzidas, uma taxa de sucesso de 68%, alinhada com outros projetos semelhantes. O volume total estimado de precipitação gerada pelas operações foi de aproximadamente 17,6 milhões de metros cúbicos de água, sendo 6,4 milhões de metros cúbicos na área de influência das bacias de contribuição do SAIC (Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba), beneficiando diretamente os reservatórios responsáveis pelo abastecimento da região.

A captação no lago da Pedreira Orleans também trouxe resultados expressivos, contribuindo com cerca de 1,9 bilhões de litros de água para o reservatório Passaúna, representando quase 50% do volume captado emergencialmente no ano de 2020. A operação foi realizada de forma contínua durante seis meses e demonstrou que a utilização de lagos de minas pode ser uma solução viável e eficiente para aumentar a resiliência hídrica em momentos de crise.

As ações de hidrossemeadura de nuvens e a captação emergencial no lago da Pedreira Orleans mostraram-se estratégias eficazes para enfrentar a escassez hídrica na região metropolitana de Curitiba. Embora a sementeira de nuvens envolva desafios logísticos e custos elevados, ela se provou uma técnica promissora em termos de geração de chuvas localizadas, contribuindo significativamente para o aumento do volume de água nos reservatórios da região. A captação no lago da Pedreira Orleans, por sua vez, ofereceu uma solução de baixo custo e alto impacto, provando ser uma alternativa eficaz para períodos de estiagem severa.

Essas soluções inovadoras e sustentáveis são essenciais para aumentar a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas e garantir o abastecimento de água em cenários de crise.

5. METODOLOGIA

O monitoramento dos parâmetros físicos do Reservatório do Passaúna foi realizado no escopo do projeto MuDak-WRM de janeiro de 2018 a fevereiro de 2019 e disponibilizados através do software *FileZilla* – aplicativo de código aberto que contempla uma interface acessível, sendo prático realizar o *upload* de um arquivo para o servidor, bem como o *download* destes arquivos para o usuário final (FileZilla, 2021).

O modelo GLM foi aplicado neste trabalho para simulação do balanço hídrico do reservatório Passaúna. Sales (2020) explica que o modelo GLM requer uma curva hipsográfica; um perfil inicial de temperatura e salinidade na coluna d'água (no caso, considerado zero para todo o período, por conta do estudo ser feito para água doce); dados de séries temporais meteorológicas horárias para forçantes de superfície; séries temporais diárias de fluxo de entrada, valores de temperatura e escalares (variáveis de qualidade da água); e fluxo diário de saída.

Os resultados foram obtidos por meio da versão 2.2.0 para a simulação do balanço hídrico e segmentação térmica do reservatório de abastecimento. As simulações foram feitas para o período de 1 de janeiro de 2019 até 28 de abril de 2021. Os meses deste estudo foram definidos a partir da observação de um período de estiagem vivido na região e a necessidade do rodízio na distribuição de água promovido pela empresa de saneamento responsável. Como verificado anteriormente, o valor médio de profundidade do reservatório é de 12 metros, sendo este o valor assumido neste estudo.

Em seguida, é verificada a calibração do modelo. Para isto foi levado em consideração estes dois principais métodos: os dados medidos no reservatório e os dados simulados pelo GLM. Quando calculada a diferença entre o valor medido (real) e o valor simulado, é obtido o erro absoluto. Este erro permite mensurar a diferença das simulações para com os valores reais. Enquanto o erro não fosse considerado baixo, os valores de entrada foram ajustados e novos cenários seriam gerados.

5.1 Área de Estudo

O reservatório do Passaúna está localizado na região sudoeste da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), entre as coordenadas 25°25' e 25°32' de latitude sul e entre 49°21' e 49°23' de longitude oeste (Sales, 2020).

Ainda, a barragem do Passaúna, está contida na Bacia Hidrográfica do rio Passaúna, sub-bacia do Rio Iguaçu. A bacia abrange os municípios de Almirante Tamandaré, Araucária, Campo Magro, Campo Largo e Curitiba, possuindo uma área de drenagem de aproximadamente 214 km² (Fendrich, 1984).

A barragem foi criada a partir do represamento do rio Passaúna, em 1990, com o interesse de servir como manancial de abastecimento de água sob responsabilidade da SANEPAR, de acordo com o Plano Diretor de Águas da Região Metropolitana de Curitiba (Dias, 1997).

5.2 Dados meteorológicos

Os dados de alturas de precipitação foram obtidos no site do Instituto Águas Paraná através das medições realizadas pela estação meteorológica localizada próxima ao reservatório. Durante o período em que essa estação apresentou erros, os dados foram obtidos por outra estação localizada em Campina das Pedras, no município de Araucária, de acordo com as coordenadas 25° 34' 28" S e 49° 25' 47" O, e identificada pelo órgão com o código 2549081. A estação localiza-se à menos de 6 quilômetros da barragem.

Assim, os demais dados meteorológicos foram disponibilizados pela Sanepar (radiação de ondas curtas, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade e direção do vento).

5.3 Condições de contorno

Devido às complicações do cenário atual de pandemia da Covid-19, não foi possível realizar medições de campo para o levantamento de dados necessários no estudo – visto que este cenário contemplou o período em análise. Desta forma, este item descreverá os cálculos realizados para a obtenção dos parâmetros de entrada, levando em consideração as simplificações e estimativas assumidas.

5.3.1 Dados hidrológicos

A vazão dos rios que afluem ao reservatório foi estimada durante o projeto MuDak a partir de modelos chuva-vazão, sendo o início do ano de 2019 utilizado o modelo LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model), a partir de março de 2019 até abril de 2020 foi utilizado o MGB (Modelo de Grandes Bacias), de abril de 2020 ao final do período simulado foram utilizadas as vazões da estação fluviométrica da BR277, regionalizadas para o rio Passaúna, Ferrara e demais cursos d'água menores. Assim, foram criados três arquivos distintos: um para o rio Passaúna, outro para o rio Ferrara e um terceiro incluindo a soma do fluxo das demais afluentes.

Os dados de nível de água do reservatório e as vazões de captação de água para abastecimento urbano também foram fornecidos pela empresa – sendo apenas o segundo um dado de entrada do modelo, porém o primeiro dado foi primordial na obtenção dos demais parâmetros necessários. Da mesma forma, também foram criados outros dois arquivos, o “*catchment*” e o “*bottom-outlet*”. O primeiro inclui os valores de captação de água e o segundo arquivo é referente ao descarregador de fundo do reservatório, sendo estes dados ajustados a partir do trabalho de Sales (2020) e aplicados para o período de estudo, como justificado no item a seguir.

5.3.2 Vazão do descarregador de fundo

A partir dos valores do nível de água do reservatório foi possível estimar a vazão do descarregador de fundo. Inicialmente, foi calculado a velocidade de escoamento – desconsiderando os efeitos de atrito e considerando a conversão de toda energia potencial em energia cinética, de acordo com White (2011) – através da fórmula:

$$v \approx \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade (estimado em 9,81 m/s) e h é altura da coluna de água.

Com isso, foi possível calcular a largura do descarregador de fundo (L), tendo como base os valores de vazão do mesmo durante o período de estudo de Sales (2020) e os valores da altura de abertura da comporta (hc) – dados também fornecidos pela Sanepar - através dos seguintes cálculos:

$$Q = v \cdot A \quad (2)$$

$$A = L \cdot hc \quad (3)$$

onde A é a área do descarregador de fundo. Portanto:

$$L = \frac{Q}{v \cdot hc} \quad (4)$$

Assim, foi realizado a média para todos os valores de L obtidos entre 01/08/2017 até 28/02/2019 encontrando uma largura média de 0,1794 metros. Então, foi calculado o erro absoluto entre o valor médio e os valores de L calculados, sendo 0,0019 metros o maior valor observado e, portanto, a largura média foi considerada uma estimativa plausível, uma vez que simplificações foram assumidas como citado anteriormente.

A partir disso, conhecendo os valores de altura de abertura da comporta para o período do estudo (também fornecidos pela Sanepar) e com as velocidades de escoamento calculadas anteriormente, foi possível estimar as vazões diárias do descarregador de fundo para o período de 01/03/2019 até 28/04/2021, de forma que:

$$Q = v \cdot L_{m\u00e9dio} \cdot hc \quad (5)$$

esses valores foram ent\u00e3o inseridos no arquivo “*bottom_outlet.csv*”.

5.3.3 Temperatura da \u00e1gua dos afluentes

A temperatura da \u00e1gua dos afluentes foi estimada com base na disserta\u00e7\u00e3o de mestrado de Colombo (2019), onde o estudo analisou a rela\u00e7\u00e3o entre a temperatura do ar e da \u00e1gua no per\u00edodo de 2015 at\u00e9 2018 de diferentes rios, dentre eles o Rio Passa\u00fa\u00f1a.

A autora concluiu que a melhor rela\u00e7\u00e3o entre essas temperaturas para o rio Passa\u00fa\u00f1a \u00e9 descrita por:

$$T_{\u00e1gua} (\text{^\circ C}) = 11,380 + \frac{24,486 - 11,380}{1 + \exp(0,251 \cdot (17,499 - T_{ar} (\text{^\circ C})))} \quad (6)$$

essa rela\u00e7\u00e3o apresentou um coeficiente de correla\u00e7\u00e3o 0,967 e raiz do erro quadr\u00e1tico m\u00e9dio 0,427.

Desta forma, a temperatura da \u00e1gua dos afluentes foi considerada igual para todos os rios e foram estimadas atrav\u00e9s da temperatura do ar, a partir dos dados fornecidos pela Sanepar.

5.4 Balan\u00e7o H\u00eddrico

Com o objetivo de verificar a qualidade dos dados de vaz\u00e3o afluente e os dados de vaz\u00e3o do descarregador de fundo obtidos foi realizado o balan\u00e7o h\u00eddrico do reservat\u00f3rio.

Os integrantes do projeto MuDak desenvolveram uma rotina no *MatLab* que estima os valores de volume do reservat\u00f3rio a partir da cota do n\u00edvel de \u00e1gua. A rotina utiliza de uma curva cota-volume que \u00e9 ajustada a partir de valores conhecidos destes par\u00e2metros, desta forma, quando inseridas diferentes cotas

de entrada são calculados os volumes a partir da equação que rege o comportamento da curva ajustada.

Os efeitos da evaporação e do volume de água de chuva sobre o espelho d'água foram obtidos a partir de uma primeira simulação realizada no General Lake Model. As unidades foram ajustadas multiplicando pela área alagada do reservatório para cada dia, obtendo assim um valor final em m³/dia.

Assim, foi realizado o cálculo do balanço hídrico a partir da relação entre as vazões de afluência, a variação de volume do reservatório e os volumes de saída – sendo estes volumes extraídos pelo descarregador de fundo (calculado conforme descrito no item 5.2.1), pela captação e pelo vertedouro (sendo estes últimos dois dados fornecidos pela Sanepar) – da seguinte forma:

$$Q_{entra} = Q_{sai} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{(V_i - V_{i-1})}{\Delta t} \quad (9)$$

$$Q_A + P_{rep} = (E_{vap} + Q_{cap} + Q_{desc} + Q_{vert}) - \frac{(V_{i-1} - V_i)}{\Delta t} \quad (10)$$

Sendo Q_A a vazão de afluência, P_{rep} o volume diário de precipitação, E_{vap} o volume diário de evaporação, Q_{cap} a vazão captada, Q_{desc} a vazão extraída pelo descarregador de fundo, Q_{vert} a vazão vertida, V_{i-1} o volume do reservatório no dia anterior, V_i o volume do reservatório no dia e Δt o período de tempo em que está sendo analisada a variação de volume do reservatório – neste caso Δt é igual a 1 dia.

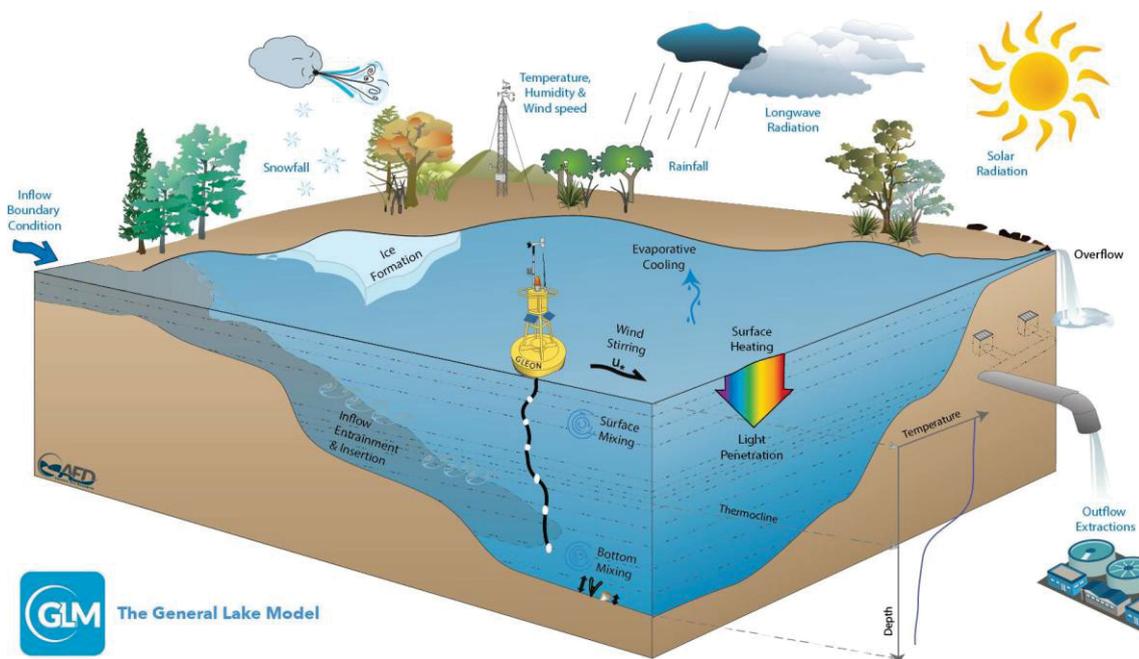
5.5 Configuração do modelo

O *General Lake Model* desenvolve a abordagem de estratificação vertical do GLM, que resolve, em uma dimensão, a variação das propriedades da coluna

de água. Assim, é permitido ao usuário determinar a quantidade de entradas e saídas, e simular cenários de equilíbrio hidrodinâmico e termodinâmico.

Para tanto, dados meteorológicos (diários ou horários) são necessários, bem como taxas diárias de entrada e saída de água (Hipsey et. al, 2019) – o programa ainda disponibiliza de diversas configurações pré-estabelecidas caso o usuário não disponha de todas as informações. A figura 2 demonstra a esquematização do sistema sob o qual o software foi desenvolvido.

Figura 2 - ESQUEMA DO DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO DO GLM, INFORMAÇÕES DE ENTRADA (TEXTO EM AZUL) E OS PROCESSOS SIMULADOS (TEXTO EM PRETO)



FONTE: HIPSEY ET AL. (2019).

Desta forma, os arquivos com os dados meteorológicos e de fluxo de séries temporais foram organizados e compilados separadamente no formato “csv” (valores separados por vírgulas) – como requer o programa. Os dados meteorológicos foram convertidos em dados horários médios, enquanto os dados hidrológicos e demais parâmetros de entrada foram inseridos com resolução diária, foi definida a condição inicial de salinidade nula em todos os corpos hídricos modelados, determinando ser insignificante os efeitos das

concentrações de sal em águas doces na densidade da água quando comparados com os efeitos da temperatura.

Os dados foram então divididos em 6 arquivos *.csv distintos, intitulados como: *ferraria_trc*, *passauna_trc*, *streams_trc*, *bottom_outlet*, *catchment* e *met_cloud*. Sendo:

- *Ferraria_trc*: arquivo referente ao Rio Ferraria (afluente do reservatório do Passaúna) que contém os dados de data, fluxo volumétrico, temperatura e salinidade.
- *Passauna_trc*: arquivo referente ao Rio Passaúna e que possui os dados de data, fluxo volumétrico, temperatura e salinidade.
- *Streams_trc*: arquivo referente à junção do fluxo das demais estações, contém informações de data, fluxo volumétrico, temperatura e salinidade.
- *Bottom_outlet*: arquivo referente à captação de água do reservatório realizada pela Sanepar, apresenta os dados de data e fluxo volumétrico.
- *Catchment*: arquivo referente ao descarregador de fundo do reservatório, possui informações de data e fluxo volumétrico.
- *Met_cloud*: arquivo que apresenta os dados meteorológicos, sendo estes: data, radiação de onda curta, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e volume de chuva.

Em seguida foi criado um arquivo no formato “*nm*”, no qual é inserido os parâmetros contidos nos 6 arquivos “*csv*” de entrada, e é incrementado com os detalhes das configurações sob as quais a modelagem foi realizada. Este arquivo é confeccionado utilizando de linguagem de programação determinada pelos desenvolvedores do modelo, e que pode ser encontrada na aba de “opções de configuração” no site do GLM.

Foi incrementado ao modelo o perfil de temperatura inicial da água do reservatório – definido como constante na coluna de água e com valor igual a 22°C. Visto que não havia dados disponíveis para os parâmetros de radiação de

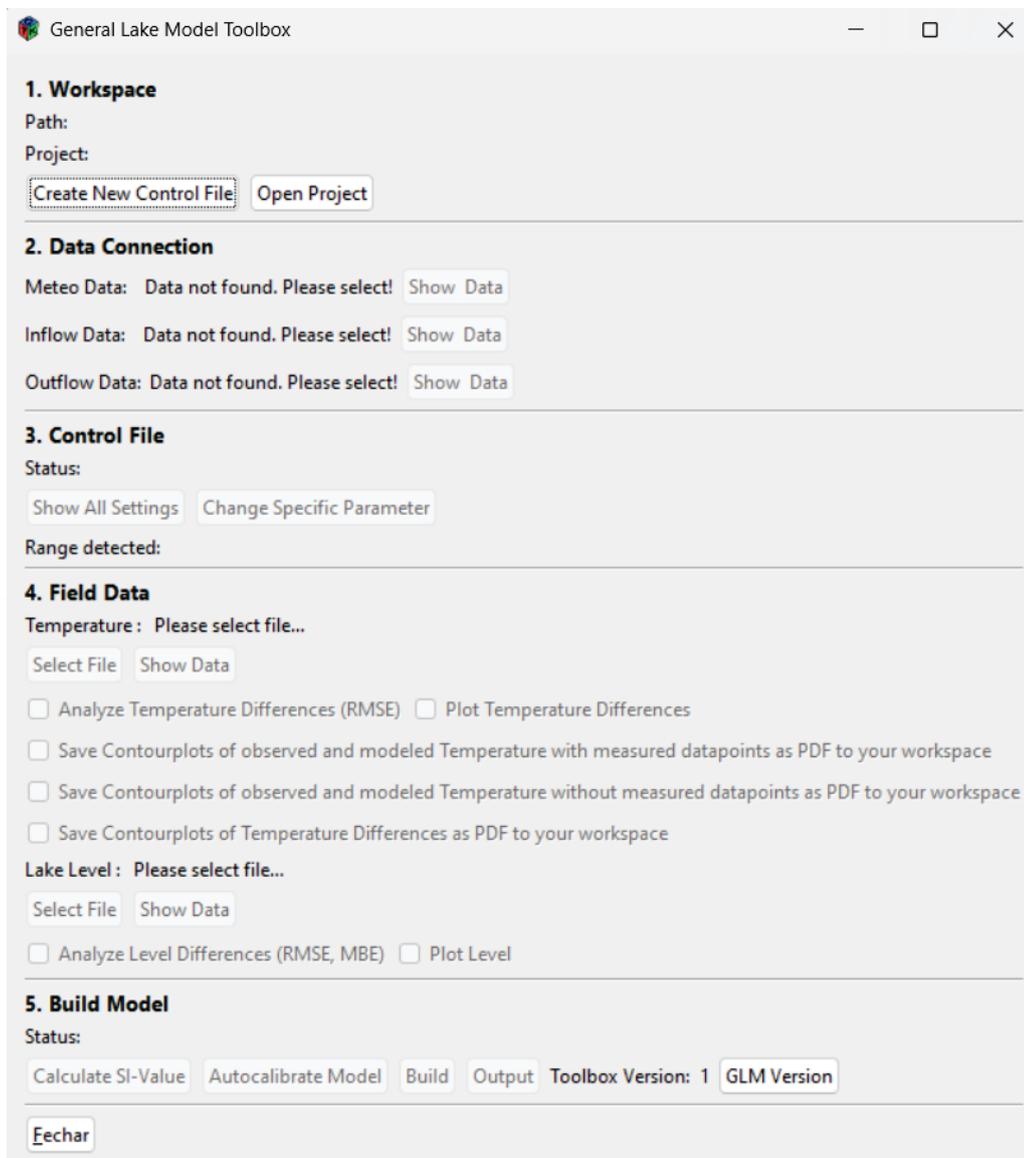
ondas longas, albedo e cobertura de nuvens foram utilizadas configurações pré-estabelecidas pelo modelo, sendo estas: “*rad_mode = 3*” e “*albedo_mode = 3*”, o “*cloud_mode*” é então obtido pelo modelo a partir das demais configurações.

A partir destes valores medidos e realizando alterações nos valores de configuração do modelo obtidos a partir da calibração manual realizada por Sales (2020), foi possível dar início a etapa da auto-calibração do modelo.

5.5.1 Aplicação da ferramenta de Auto Calibração

Nesta etapa foi inserido os arquivos de entrada na ferramenta de auto calibração do modelo, o GLMgui, desenvolvido para o modelo de linguagem R (Bueche et al. 2019). Foi verificada a sensibilidade do nível de água do reservatório em função dos dados de entrada, sendo uma análise gráfica disponível na própria ferramenta.

Figura 3 - LAYOUT DO TOOLBOX DA FERRAMENTA DE AUTO CALIBRAÇÃO DO GLMTOOLS



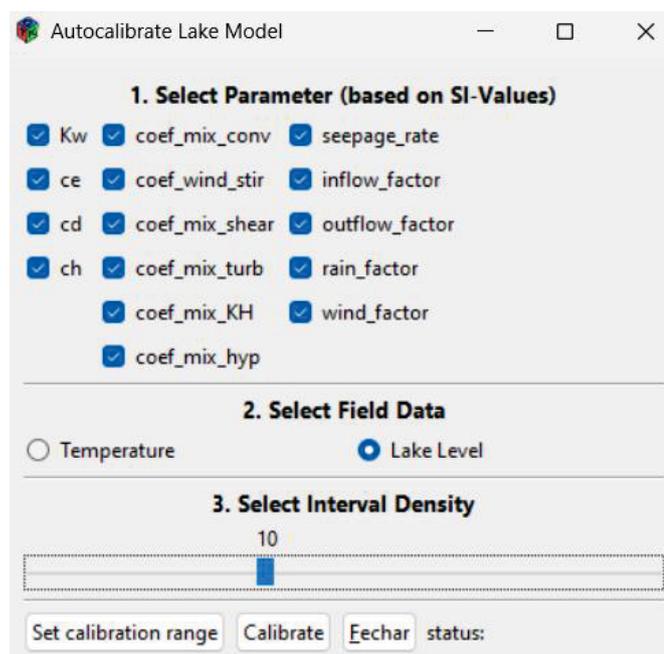
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em seguida, é definido as faixas de calibração do modelo para cada parâmetro (fatores de escala e coeficientes), estabelecendo limites inferiores e superiores para os mesmos. Feito isso, é processado a auto calibração pelo modelo.

A ferramenta de auto calibração permite realizar o ajuste dos seguintes parâmetros: `inflow_factor` (fator de escala das vazões afluentes), `outflow_factor` (fator de escala das vazões efluentes), `rain_factor` (fator de escala dos dados de

precipitação) e `wind_factor` (fator de escala dos dados de velocidade do vento), referentes à calibração dos fatores físicos, e `Kw` (coeficiente de extinção de luz), `ce` (coeficiente aerodinâmico em massa para transferência de calor latente), `cd` (coeficiente aerodinâmico em massa para transferência de momento) e `ch` (coeficiente aerodinâmico em massa para transferência de calor sensível), referentes aos fatores que influenciam na estratificação térmica.

Figura 4 - LAYOUT DA ABA DE SELEÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM CALIBRADOS E O INTERVALO DE DENSIDADE DOS MESMOS



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após encerrado o processamento, os valores dos fatores de escala e dos coeficientes gerados são alterados no arquivo `nml`, permitindo a execução do GLM. O GLMgui ainda fornece o gráfico comparativo entre o nível simulado e o nível medido (este arquivo precisa ser fornecido ao programa), bem como os valores de RMSE (raiz do erro quadrático médio) e MBE (desvio das médias) entre os níveis.

A partir destes valores medidos foi possível realizar a etapa de verificação dos cenários simulados pelo GLM. Com o resultado da auto-calibração, os

demais fatores foram corrigidos manualmente através de tentativa e erro, tendo como base os valores medidos e sendo comparados graficamente, com o intuito de diminuir os erros da simulação. Assim, uma nova etapa de auto calibração foi feita e novamente os demais fatores foram corrigidos sucessivamente.

Desta forma, os parâmetros utilizados para a verificação foram de nível, sendo que para os valores medidos foram utilizados os dados da Sanepar e então comparados com o nível simulado, de tal forma:

$$\text{Erro Absoluto} = |\text{Nível Medido} - \text{Nível Simulado}| \quad (11)$$

assim, enquanto o erro foi considerado alto foram alteradas as configurações do programa e foram gerados novos resultados, até ser obtido um valor considerado aceitável.

Tabela 1 - VALORES UTILIZADOS NA AUTO CALIBRAÇÃO E CALIBRAÇÃO MANUAL DO GENERAL LAKE MODEL

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
<i>Estrutura do Modelo</i>			
<i>Nmax</i>	Número Máximo de camadas	500	-
ΔV_{min}	Volume mínimo da camada	0.025	m ³
Δz_{min}	Espessura mínima da camada	0.1	M
Δz_{mx}	Espessura máxima da camada	0.5	M
<i>Mistura</i>			
<i>CK</i>	Eficiência de mistura – retorno convectivo	0.225	-
<i>CW</i>	Eficiência de mistura – agitação do vento	0.2344	-
<i>CT</i>	Eficiência de mistura – turbulência instável (agitação)	0.765	-
<i>CS</i>	Eficiência de mistura – produção de cisalhamento	0.0375	-
<i>CKH</i>	Eficiência de mistura – ondas turbulentas de Kelvin-Helmholtz	0.8438	-
<i>CHYP</i>	Eficiência de mistura – turbulência hipolimnética	0.5625	-
<i>Luz</i>			
<i>K_w</i>	Coefficiente de extinção de luz	0.85	m ⁻¹
<i>Meteorologia</i>			
<i>f_{SW}</i>	Fator de escala para ajustar os dados de radiação de onda curta	1.0	-

<i>fRH</i>	Fator de escala para ajustar os dados de humidade relativa	1.0	-
<i>fAT</i>	Fator de escala para ajustar os dados de temperatura do ar	1.0	-
<i>fR</i>	Fator de escala para ajustar os dados de chuva	1.0	-
<i>Fu</i>	Fator de escala para ajustar os dados de velocidade do vento	0.9	-
<i>CH</i>	Coeficiente aerodinâmico em massa para transferência de calor sensível	0.00198	-
<i>CE</i>	Coeficiente aerodinâmico em massa para transferência de calor latente	0.001	-
<i>CD</i>	Coeficiente aerodinâmico em massa para transferência de momento	$6 \cdot 10^{-4}$	-

Entradas

<i>Finf_pas</i>	Fator de escala para ajustar os valores de entrada fornecidos de vazão do Rio Passaúna	1.0333	-
<i>Finf_fer</i>	Fator de escala para ajustar os valores de entrada fornecidos de vazão do Rio Ferraraia	0.9667	
<i>Finf_str</i>	Fator de escala para ajustar os valores de entrada fornecidos de vazão dos demais rios somados	0.9667	
<i>1'Ainf</i>	Meio ângulo do fluxo	82.4°	Graus
<i>Φinf</i>	Ângulo de inclinação do fundo	0.5°	Graus
<i>CDinf</i>	Coeficiente de arrasto do leito do curso de água	0.016	-

Saídas

<i>Foutf_cat</i>	Fator de escala para ajustar os dados do fluxo de saída da Captação	1.1	-
<i>Foutf_bot</i>	Fator de escala para ajustar os dados do fluxo de saída do Descarregador de Fundo	1.1	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir da temperatura de água dos afluentes e realizada a etapa de auto calibração dos parâmetros relacionados a distribuição da temperatura na coluna de água do reservatório, foi gerado o gráfico desta distribuição para todo o período de análise a partir da própria ferramenta de auto calibração, que fornece este recurso.

5.6 Cenários Alternativos

Foram tomadas medidas mitigadoras pela empresa de saneamento visando amenizar o efeito da estiagem. Foi realizado o processo de hidrossemeadura de nuvens entre dezembro de 2020 até o final deste estudo e também a captação de água da Pedreira Orleans lançada no Rio Passaúna, com vazão aproximada de 150 L/s de junho de 2020 até dezembro do mesmo ano (Silveira et al. 2021; Moreira et al. 2021).

Para fins teóricos, foi desenvolvido um cenário alternativo que desconsidera os efeitos dessas medidas. Assim, foi descontada a vazão da Pedreira Orleans na vazão do Rio Passaúna durante o período de transposição. Por ser complexo avaliar os efeitos da semeadura de nuvens, foi considerado que durante o período em que houve esta medida a precipitação seria igual a zero (para todo o período).

O segundo cenário alternativo proposto neste estudo é no caso de as medidas mitigadoras serem realizadas no período em que se observa a constante redução do nível do reservatório, assim incluindo a captação da Pedreira em abril de 2020 até setembro de 2020 – o mesmo período de 6 meses realizado pela empresa – e também de janeiro de 2020 até dezembro de 2020 – 12 meses, que constituem o dobro do tempo de transposição realizado. Para isso, foi removida a vazão de transposição de Pedreira de junho de 2020 até dezembro de 2020, e aplicada então para os períodos em questão. Novamente, por ser complexo avaliar os efeitos da semeadura nestes períodos, foi mantida a utilização dos dados de precipitação medidos nas estações.

5.6.1 Redução da Captação para preservação do nível do reservatório

Durante o período de estiagem, a Sanepar promoveu a redução da captação de água do reservatório através do sistema de rodízio na distribuição de água da região.

Com o intuito de verificar o quanto da captação seria necessário reduzir (a partir da redução já feita) para que o nível fosse preservado sem as medidas mitigatórias, foi realizado o cálculo abaixo.

É preciso que:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t} - \frac{\Delta V_2}{\Delta t} = 0 \quad (12)$$

Para tanto:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t} - \frac{\Delta V_2}{\Delta t} - \Delta diff = 0 \quad (13)$$

onde

$$\Delta diff = \frac{\Delta V_1}{\Delta t} - \frac{\Delta V_2}{\Delta t} \quad (14)$$

onde ΔV_1 e ΔV_2 representam a variação de volume do modelo de calibração e do modelo sem as medidas mitigatórias, respectivamente. $\Delta diff$ é a própria variação da diferença de volume entre os dois cenários.

Sabendo que:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_A + P_{rep} - (E_{vap} + Q_{cap} + Q_{desc} + Q_{vert}) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta diff = Q_{A1} - Q_{A2} + P_{rep1} - P_{rep1} - (E_{vap1} + Q_{cap1} + Q_{desc1} + Q_{vert1}) \\ + (E_{vap2} + Q_{cap2} + Q_{desc2} + Q_{vert2}) \end{aligned} \quad (16)$$

Sabendo que a vazão de descarregador de fundo e do vertedouro é a mesma, assumindo que a evaporação permanece a mesma nos dois casos, sabendo que a diferença da vazão de afluência é igual a vazão de transposição da Pedreira Orleans e sabendo que o volume de precipitação no cenário sem mitigação é igual a zero, chega na seguinte equação:

$$\begin{aligned} \Delta diff = Q_{A1} - Q_{A2} - Q_{cap1} + Q_{cap2} + P_{rep1} \\ = Q_{PedreiraOrleans} + Q_{Cap2-1} + P_{rep1} \end{aligned} \quad (17)$$

assim:

$$Q_{Cap1-2} = -(\Delta diff - Q_{PedreiraOrleans} - P_{rep1}) \quad (18)$$

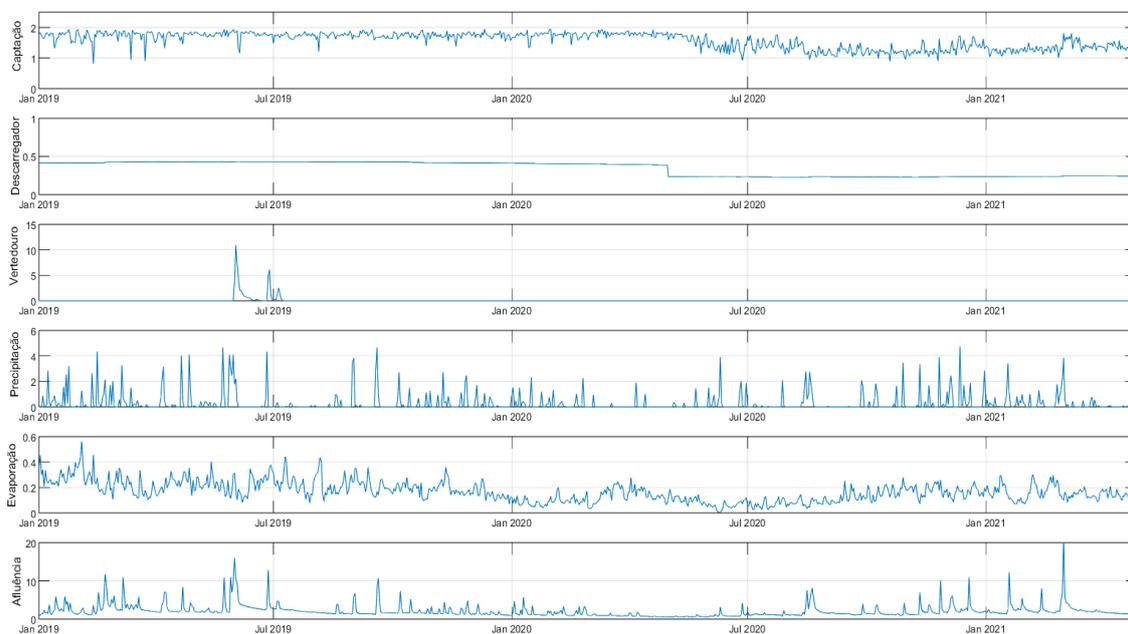
sendo Q_{Cap1-2} a redução da captação necessária do cenário sem mitigação para que o volume seja igual ao cenário com mitigação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Compilação de dados e Balanço Hídrico

A partir do levantamento de todos os dados, em que o comportamento de cada um destes pode ser observado na figura 5, foi possível realizar o cálculo do balanço hídrico de acordo com a equação 10. Passando os valores da vazão de afluência e do volume de precipitação para o lado direito da equação, verifica-se que o resultado da equação deve ser 0. Realizando o cálculo foi obtido um valor de $-0,085 \text{ m}^3/\text{s}$, o que significa que para este cálculo simplificado as entradas de água ao reservatório são de aproximadamente 85 L/s superiores do que as saídas. Um dos motivos desse desequilíbrio pode estar relacionado com o fato do cálculo não considerar perdas de água do reservatório para o solo no cálculo, por exemplo.

Figura 5 - DADOS DE ENTRADA DO MODELO E DADOS DE EVEPORAÇÃO E VAZÃO VERTIDA UTILIZADOS NO CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO

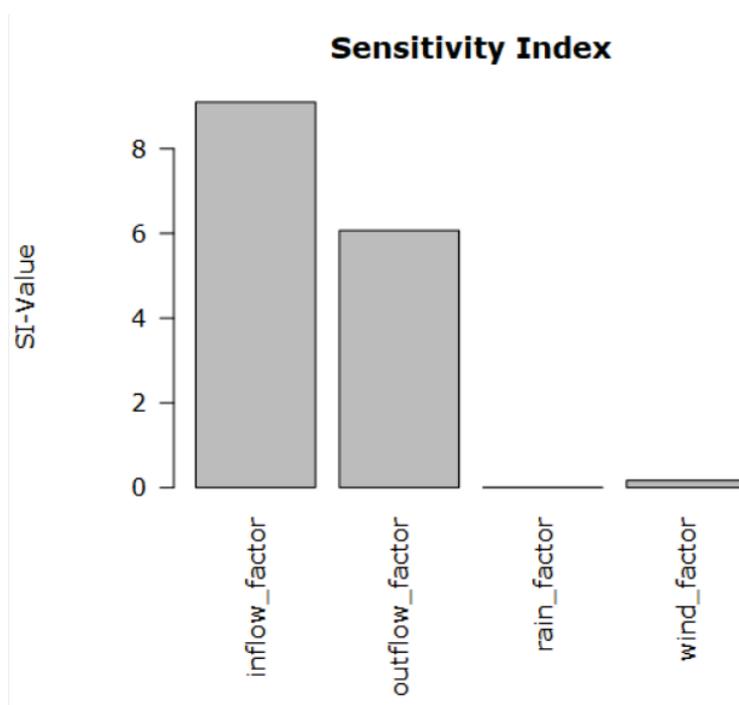


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.2 Calibração

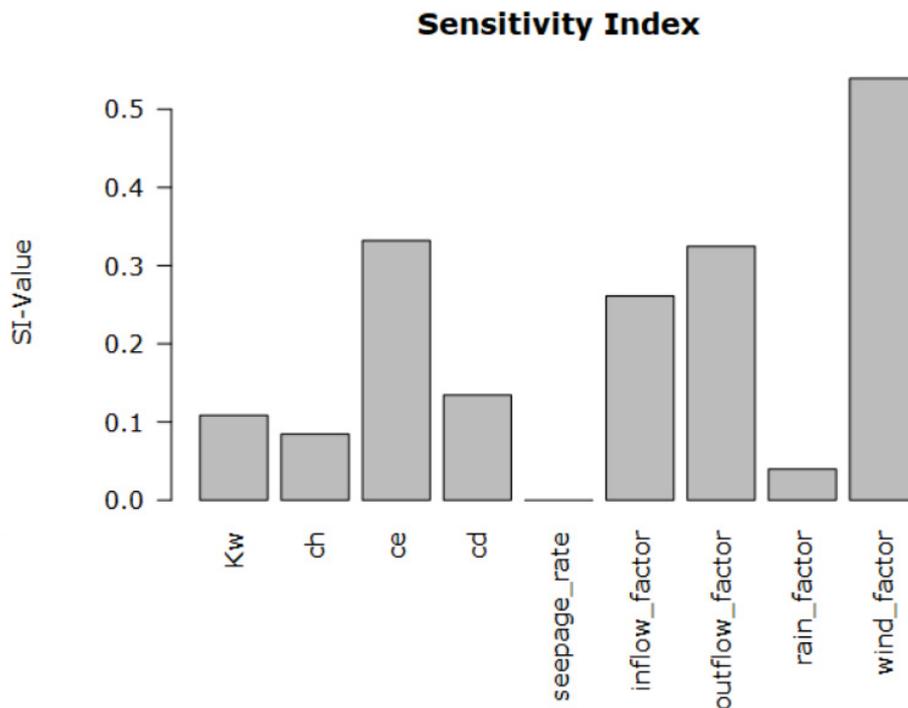
Iniciada a etapa de auto calibração, primeiramente foi verificada a sensibilidade dos dados de entrada do modelo em relação ao nível de água e da distribuição de temperatura na coluna de água do reservatório, de acordo com as figuras 6 e 7. Para o nível de água do reservatório foi possível observar que o modelo é principalmente sensível aos dados de inflow e outflow, sendo o primeiro ainda mais sensível que o segundo possivelmente por terem sido dados obtidos através de outras modelagens – e como observado no balanço hídrico os dados de entrada estão superestimados. Já para a temperatura, o modelo se mostrou sensível para os coeficientes de transferência de calor e momento, os dados de inflow e outflow, e, principalmente, sobre o fator de escala da velocidade do vento – visto que o vento é influência direta na mistura da coluna de água a partir da geração de turbulências na mesma e, portanto, tem influência na distribuição da temperatura da coluna de água.

Figura 6 - SENSIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA NA AUTO CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA O NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 7 - SENSIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA NA AUTO CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA COLUNA DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO

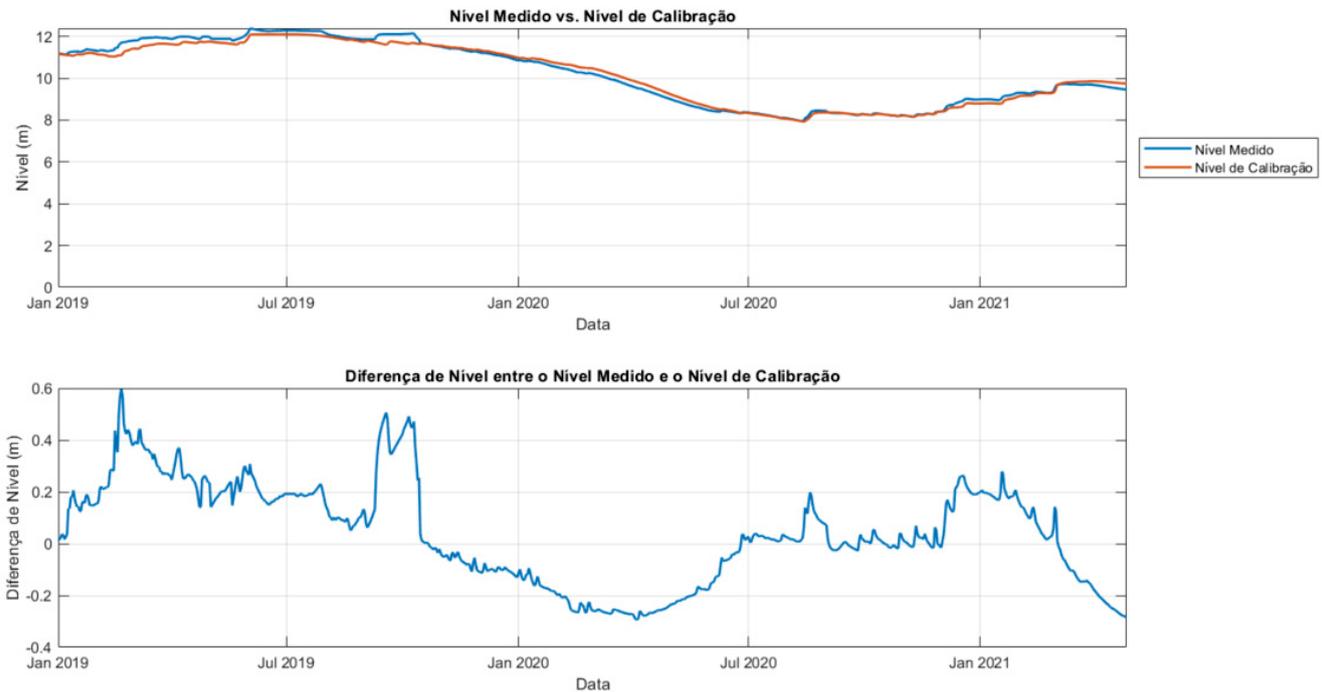


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Verificado a sensibilidade do modelo, foi realizada a calibração do mesmo e comparada a diferença do nível medido em comparação com o nível simulado. A figura 8 permite observar que o comportamento do nível simulado é similar ao do nível medido, apresentando resultados próximos e obtendo uma simulação satisfatória. Contudo, o maior erro observado chega a 0,57 metros no dia 19 de fevereiro de 2019, o que representa um imenso volume de água subestimado pelo modelo. O valor do erro médio para todo o período foi de 0,19 metros.

Além disso, o RMSE (raiz do erro quadrático médio) foi de aproximadamente 0,199 e o MBE (mean bias error) foi de -0,041. Isso demonstra que de maneira global o modelo representou bem as variações do nível de água do reservatório, porém subestimando o volume de água real do mesmo.

Figura 8 - COMPARAÇÃO DO NÍVEL MEDIDO X NÍVEL SIMULADO E OS ERROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Comparativamente com o estudo de Sales (2020), o RMSE desta pesquisa foi significativamente abaixo do observado pela autora para a profundidade de 12 metros, que obteve o erro de 0,52, e sendo pouco acima do erro de 0,16 alcançado pela autora para a profundidade de 17 metros em seu estudo.

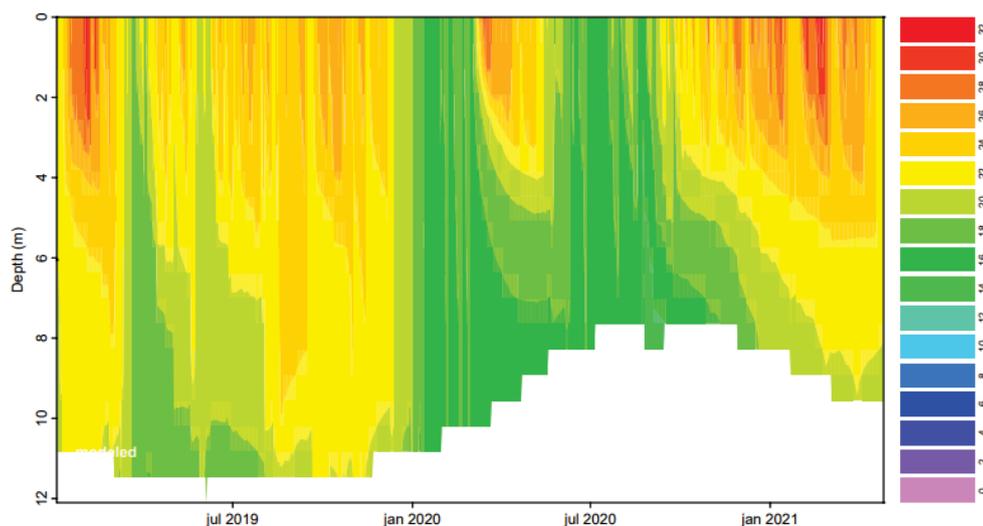
Ainda, o modelo apresentou bons resultados e erros menores durante o período de seca, sendo o foco principal deste estudo. O erro durante o período de cheia pode estar relacionado à não fornecer dados ou fórmulas que controlam a saída de água do reservatório por meio do vertedouro, assim compreende-se pelo modelo que todo o nível de água que ultrapasse a cota do vertedouro é vertido pelo mesmo – sendo possível observar esta constatação na figura 7 durante julho de 2019 e o período que o antecede com os elevados picos de extração de água do reservatório por meio do vertedouro neste período de cheia.

Para a calibração, o maior nível observado foi de 12,1 metros em 03 de junho de 2019 e o menor foi de 7,93 metros em 14 de agosto de 2020, apresentação variação máxima de 4,17 metros durante o período de estudo. Para o nível medido o máximo ocorreu no dia 02 de junho de 2019, 1 dia antes da previsão pela calibração, com 12,39 metros e o mínimo ocorreu em 13 de agosto de 2020, também 1 dia antes da previsão da calibração, com 7,95 metros e a variação máxima entre todo o período foi de 4,44 metros.

Além deste fato, os erros na calibração podem estar relacionados com a escolha do Δt de 1 dia, sendo que os efeitos no nível do reservatório a partir das variações de vazão dos rios afluentes pode ocorrer num prazo maior do que o período escolhido. Ainda, é importante destacar que também estão sendo desprezadas perdas de água para o solo ou afluições de água ao reservatório dependendo do nível do lençol freático para os diferentes pontos do mesmo.

Concluída a etapa de auto calibração do nível de água do reservatório foi então realizada a auto calibração da distribuição de temperatura ao longo da coluna de água e obtido os resultados da distribuição, como demonstra a figura 9.

Figura 9 - COMPARAÇÃO DO NÍVEL MEDIDO X NÍVEL SIMULADO E OS ERROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A variação da temperatura ao longo da coluna de água, demonstrado na figura 9, registrou a ocorrência de estratificação vertical na maior parte do

período analisado, com temperaturas mais altas registradas na superfície – por conta da sua interação com a atmosfera e as radiações solares que incidem sobre a mesma. O RMSE obtido nesta análise foi de 2.9°C, valor considerado satisfatório por manter a precisão ao longo do período analisado, ainda levando em consideração as diversas variações das condições ambientais no período de estudo.

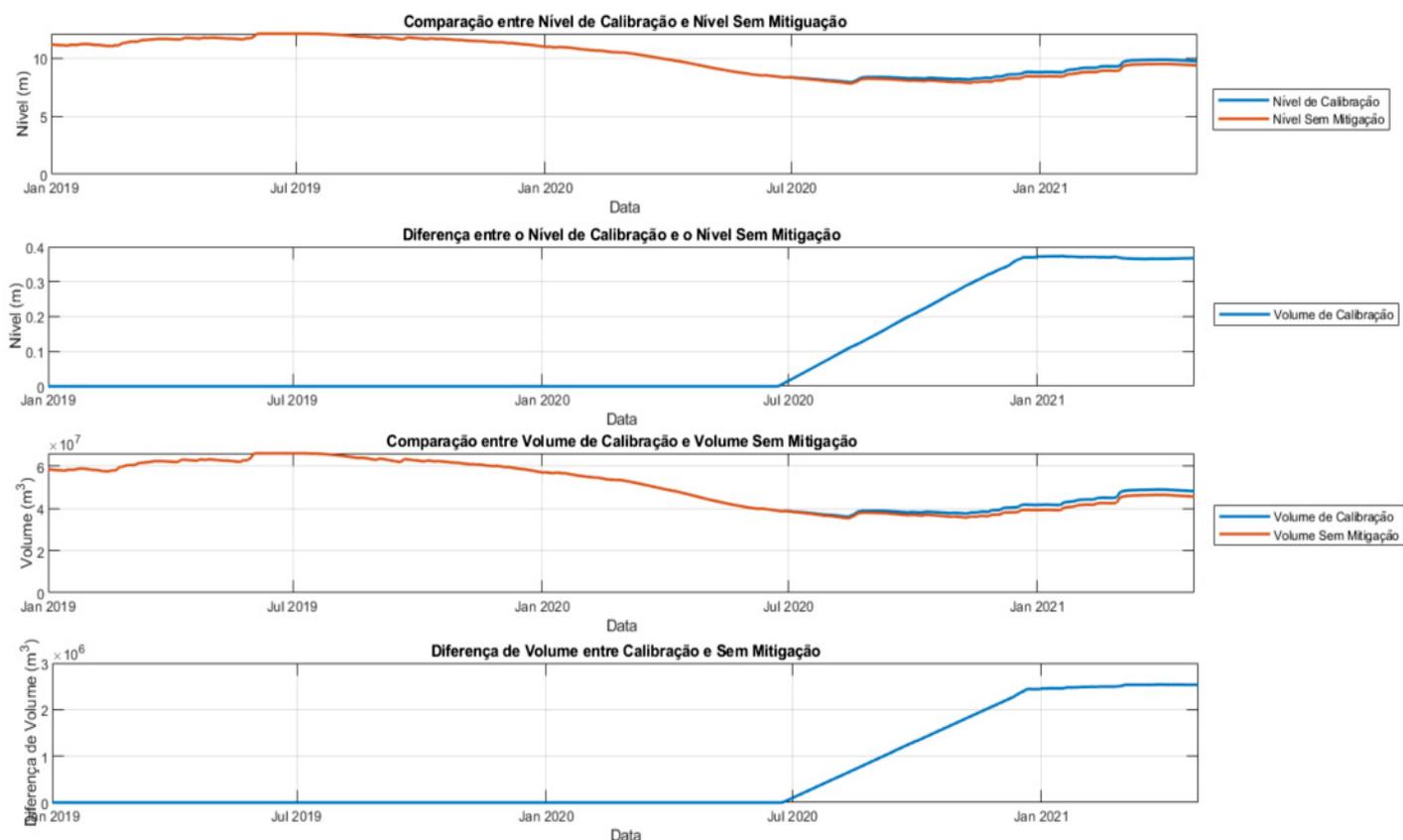
O estado lântico da água nos reservatórios é um fator agravante na ocorrência de variação de temperatura ao longo da coluna de água, uma vez que não possui turbulência o suficiente para a homogeneização térmica do sistema. A distribuição heterogênea de temperatura no sentido vertical dificulta a dispersão de compostos (dentre estes poluentes). Nesse sentido, criando diferentes camadas de concentração ao longo da profundidade do reservatório.

A homogeneização das camadas ocorreu em condições de temperaturas mais baixas. Por conta de o fundo do reservatório naturalmente apresentar menores temperaturas, em dias que a temperatura do ar registradas foram mais baixas promoveram temperaturas mais baixas na superfície da água, e, assim, permitiu a homogeneização da distribuição de temperatura ao longo da coluna de água. Diferentemente de Sales (2020) que demonstrou esse efeito apenas durante períodos de inverno, na figura 9 foi possível observar a ocorrência de uma distribuição homogênea de temperatura durante o verão de 2020. Antagonicamente, foram registradas temperaturas elevadas durante o inverno de 2019 e conseqüente estratificação térmica na coluna de água. Estes registros demonstram os efeitos das mudanças climáticas sofridas na região, podendo estar diretamente relacionado com a ocorrência do período de estiagem observado neste estudo.

6.3 Cenários Alternativos

A partir da realização da calibração do modelo, foi proposta a análise de diferentes cenários para o nível e volume de água do reservatório. A figura 10 demonstra o resultado do cenário sem medidas de mitigação, partindo da calibração realizada do modelo e comparado com a mesma.

Figura 10 - COMPARAÇÃO DO NÍVEL MEDIDO X NÍVEL SIMULADO E OS ERROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

É possível reparar a partir da diferença dos dois cenários que os efeitos das medidas mitigadoras foram de um crescimento praticamente constante no nível e volume de água do reservatório de junho de 2020 até dezembro de 2020, destacando que o efeito da transposição de água da Pedreira Orleans foi fundamental e predominante neste período. Ao final do período (após dezembro de 2020) houve um pequeno crescimento proveniente dos efeitos da sementeira de nuvens. É importante destacar que esse efeito é apenas sobre a incidência de chuva diretamente ao reservatório, visto que os efeitos sobre a bacia hidrográfica dos rios não foram desconsiderados e, conseqüentemente, contribuem na vazão dos afluentes. Desta forma, se desconsiderasse também a precipitação e os efeitos nas vazões dos rios o nível de água do reservatório sem

os efeitos mitigadores seria ainda mais crítico do que o apresentado neste estudo.

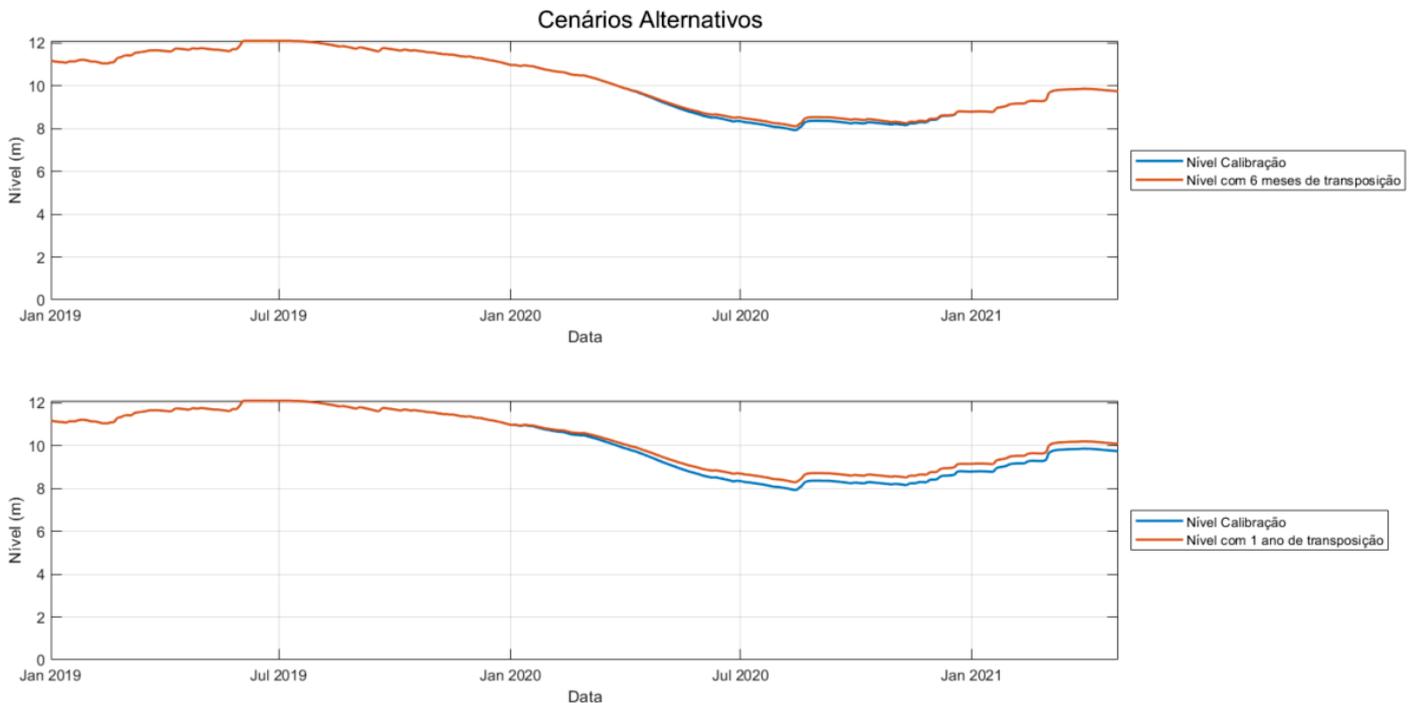
Qualitativamente, os efeitos mitigadores contribuíram com a recuperação de 0,37 metros no nível de água do reservatório, além da recuperação do nível ocorrer de maneira acelerada a partir do ponto crítico ocorrido em agosto. É possível observar esse efeito, uma vez que mesmo após encerrar o processo de transposição a diferença de nível entre os dois casos permanece praticamente constante durante os 4 primeiros meses de 2021.

Ainda, quando considerado a variação total de nível do período de 4,17 metros (entre o ponto de máxima e mínima), que seria de 4,54 metros sem as medidas tomadas, 0,37 metros representa uma redução de aproximadamente 8,15% na variação total do nível água do reservatório. Em questão do volume, as medidas mitigadoras apresentam um acréscimo médio de aproximadamente 1,74 milhões de metros cúbicos por dia.

Para que não fosse necessário realizar medidas mitigatórias, a partir do cálculo sugerido no item 5.6.1, seria necessário reduzir a captação em mais de 0,32 m³/s de forma a manter o mesmo volume medido. Isso representaria uma redução de mais de 24,46% da vazão de captação no período de estiagem, visto que a empresa de saneamento já havia reduzido a captação nesse período em mais de 24%. Ao todo, seria necessário a redução de mais de 57,29% da captação no período de estiagem em comparação com o período que a antecede.

A Figura 11 compara os níveis do reservatório Passaúna em dois cenários de transposição de água: um iniciado em abril de 2020, com duração de 6 meses, e outro iniciado em janeiro de 2020, com duração de 1 ano. Ambos são comparados ao nível obtido na calibração padrão do modelo GLM. É importante destacar que o cenário de 6 meses com início em abril se alinha à transposição realizada pela empresa na prática, que tradicionalmente começa em junho e também dura 6 meses. A antecipação da transposição para abril, embora mantendo a mesma duração, permite uma preservação mais eficaz do nível do reservatório durante o período crítico.

Figura 11 - COMPARAÇÃO ENTRE O NÍVEL COM TRANSPOSIÇÃO DE 6 MESES INICIADO EM ABRIL DE 2020 E DE 1 ANO INICIADO EM JANEIRO DE 2020 EM COMPARAÇÃO COM O NÍVEL DE CALIBRAÇÃO



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

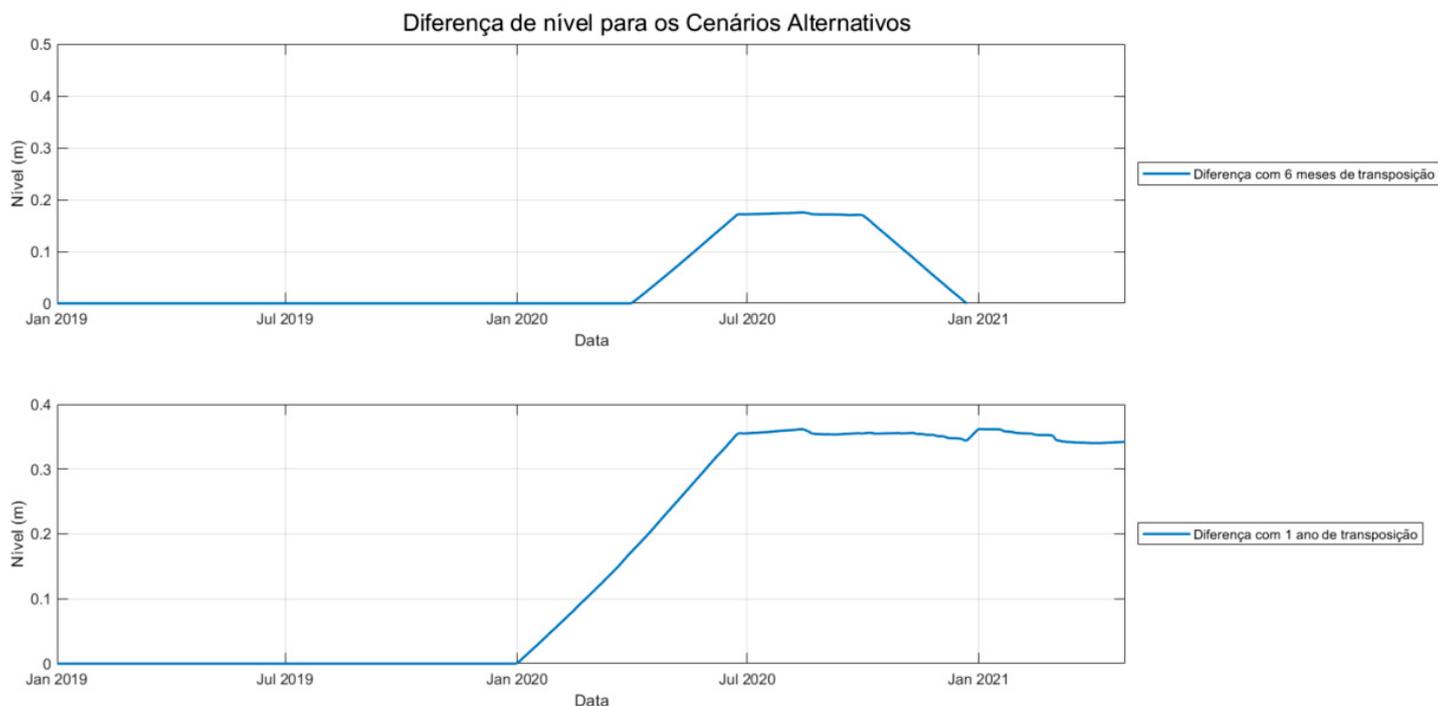
Ao final dos 6 meses de transposição, que para o cenário iniciado em abril termina em outubro e para o cenário real em dezembro, seria esperado que o nível calibrado, que ainda contava com transposição em novembro e dezembro, ultrapassasse o cenário de transposição iniciado em abril. No entanto, isso não ocorreu, indicando que ambos os cenários resultaram em uma recuperação de nível muito semelhante. Este resultado sugere que a antecipação da transposição para abril não só preservou melhor o nível durante o período mais crítico, mas também foi capaz de manter essa recuperação de forma equivalente até o final do período de estudo, mesmo quando a transposição efetiva já havia terminado em outubro.

Quando comparamos a transposição de 6 meses iniciada em abril com a transposição de 1 ano iniciada em janeiro, observamos que o cenário de 1 ano resulta em uma elevação e estabilização mais consistentes do nível do reservatório ao longo do tempo. Este cenário oferece uma recuperação mais

sustentada, que ajuda a proteger o reservatório não apenas durante o período crítico de seca, mas também a garantir níveis mais elevados ao final do período de transposição, demonstrando maior resiliência do sistema frente às flutuações climáticas.

A Figura 12 mostra as diferenças entre os níveis de água simulados para os cenários de transposição em comparação com o nível obtido na calibração do modelo. A diferença no cenário de transposição de 1 ano indica um aumento do nível de água de mais de 30 centímetros em relação ao nível calibrado, que em termos de volume indica uma vasta quantidade de água preservada neste cenário. O maior valor observado desta diferença foi de 36.18 centímetros em 02 de janeiro de 2021. Quando o reservatório apresentou o menor nível observado durante todo o período, em 15 de agosto de 2020, o valor observado foi de 36,15 – apenas 0,03 cm menor do que a máxima observada.

Figura 12 - DIFERENÇA ENTRE O NÍVEL COM TRANSPOSIÇÃO DE 6 MESES INCIADO EM ABRIL DE 2020 E DE 1 ANO INCIADO EM JANEIRO DE 2020 EM COMPARAÇÃO COM O NÍVEL DE CALIBRAÇÃO

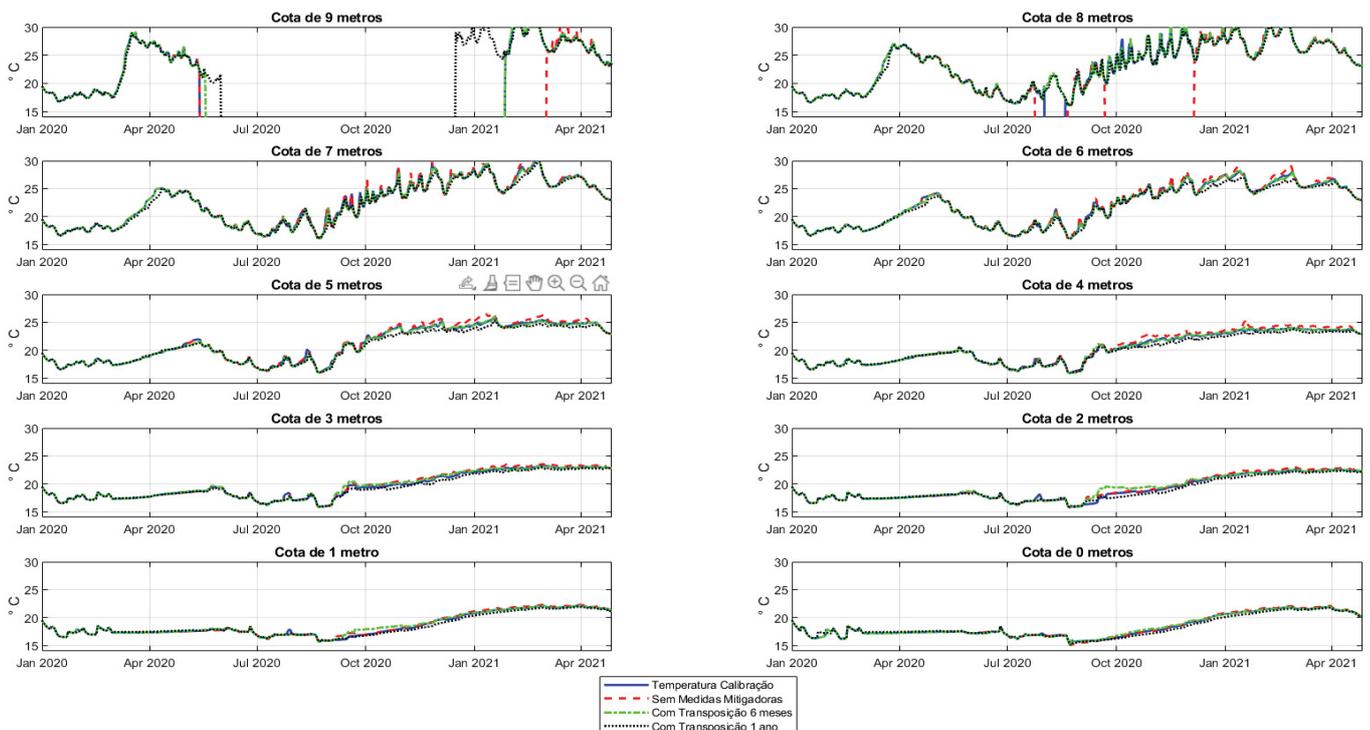


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O cenário de 6 meses iniciado em abril, embora menos prolongado, conseguiu preservar o nível durante o período crítico em mais de 17 centímetros e, ao contrário do que poderia ser esperado, ao final dos 6 meses, a diferença de nível permaneceu em 0 em relação ao nível calibrado. Isso indica que a antecipação da transposição proporcionou uma recuperação robusta do reservatório, que se manteve mesmo após o término da transposição. O maior valor observado entre a diferença dos níveis para este cenário foi de 17.53 centímetros, novamente ocorrendo no dia 15 de agosto de 2020 quando o reservatório apresenta o menor nível do período.

Comparando os dois cenários, fica claro que a transposição de 1 ano oferece uma proteção mais ampla e duradoura contra a queda nos níveis do reservatório, tornando-se uma estratégia mais confiável em situações de seca prolongada. No entanto, a análise também mostra que a transposição de 6 meses iniciada antecipadamente pode ser quase tão eficaz, especialmente quando o objetivo é mitigar os impactos imediatos de uma estiagem iminente.

Figura 13 - TEMPERATURA SIMULADA DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO PARA OS CENÁRIOS ALTERNATIVOS EM DIFERENTES COTAS



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A figura 13 permite comparar a diferença de temperatura entre os cenários alternativos propostos para cada cota de água do reservatório. No gráfico da cota de 9 e 8 metros é possível observar a linha de temperatura caindo para 0°C, isso ocorreu pois nestes períodos o nível de água está abaixo dessa cota para os cenários, assim o modelo considera como zero.

Os gráficos não apresentam uma grande variação de temperatura entre os cenários, entretanto é possível observar que para o cenário sem medidas de mitigação a temperatura da água é maior entre as camadas quando em comparação com os demais, enquanto o cenário com 1 ano de transposição apresenta as menores temperaturas. Isso ocorre pois o cenário sem medidas de mitigação apresenta o menor nível de água (assim como volume menor), fazendo com que a radiação solar atinja cotas mais baixas aquecendo a coluna de água, enquanto para o cenário com 1 ano de transposição o efeito é o oposto. Ainda sobre o comportamento dos gráficos, é importante destacar que foi aplicado os coeficientes e parâmetros que interferem na temperatura calibrados para o cenário real e não foi realizada uma calibração para cada um dos cenários específicos, o que pode interferir no resultado e promover o comportamento similar entre estes.

Ainda sobre os efeitos da radiação na coluna de água, é possível observar que quanto menor a cota mais as linhas de temperatura se aproximam uma das outras para os diferentes cenários. À medida que a cota aumenta, podemos observar as linhas de temperatura em ordem crescente: primeiro, com um ano de transposição, seguido de seis meses de transposição, a temperatura do modelo calibrado e, por fim, o cenário sem as medidas de mitigação.

Novamente, o cenário com 1 ano de transposição se torna vantajoso em relação aos demais, sendo que temperaturas mais baixas podem ajudar a manter a qualidade da água, uma vez que águas mais frias tendem a ter maior solubilidade de oxigênio - sendo a saturação de oxigênio crucial para a sobrevivência de peixes e outros organismos aquáticos. Além disso, reservatórios com temperaturas mais baixas são menos propensos a proliferações de algas, que são responsáveis pelo processo de eutrofização e, conseqüentemente, na diminuição da oxigenação do ecossistema. De acordo

com Wetzel (2001), em termos de estabilidade térmica, reservatórios frios tendem a ter uma distribuição de temperatura mais homogênea, permitindo que organismos que preferem águas mais frias prosperem e, assim, aumentando a biodiversidade. Por fim, a temperatura da água também impacta diretamente muitos processos biológicos e químicos: em temperaturas mais baixas, as taxas de decomposição e de atividade microbiana são reduzidas, ajudando a manter os níveis de nutrientes e a reduzir a contaminação da água (Keller & Vardi, 2018).

7. CONCLUSÃO

Este trabalho aplicou o General Lake Model (GLM) ao Reservatório Passaúna, proporcionando uma visão detalhada sobre a dinâmica hidrológica e térmica do sistema em resposta a diferentes condições climáticas e operacionais. A modelagem foi fundamental para entender como os períodos de estiagem entre 2019 e 2021 afetaram tanto o nível da água quanto a estratificação térmica, revelando padrões importantes que devem ser considerados na gestão hídrica.

A análise das condições hidrológicas mostrou que os períodos de estiagem impactaram significativamente o nível do reservatório, com uma redução acentuada durante os meses de menor precipitação. O estudo demonstrou que a aplicação do GLM, especialmente quando calibrado com o glmgui, é capaz de replicar com precisão essas variações, oferecendo uma ferramenta robusta para a simulação e o planejamento de ações de manejo.

Em comparação com o estudo realizado por Sales (2020), este trabalho alcançou a calibração do modelo do reservatório utilizando a profundidade de 12 metros, em contraste com a profundidade de 17 metros adotada por Sales, que corresponde à profundidade máxima do reservatório. A principal vantagem dessa abordagem reside na escolha da profundidade média do reservatório, que reflete de maneira mais representativa o comportamento hidrológico do reservatório como um todo, especialmente ao se considerar a aplicação de um modelo unidimensional.

Em relação à estratificação térmica, os resultados evidenciaram a formação de camadas térmicas distintas durante os meses mais quentes, uma característica típica de reservatórios em regiões subtropicais. No entanto, também foram observados períodos de homogeneização térmica, particularmente durante os meses de inverno e em certos dias de verão, sugerindo que a dinâmica térmica do reservatório é fortemente influenciada por variações sazonais e possivelmente por eventos climáticos atípicos.

A eficácia da auto calibração do modelo, utilizando o glmgui, foi um dos destaques do trabalho. Esse processo permitiu ajustar os parâmetros do modelo de maneira precisa, resultando em simulações que refletiram de forma fiel as condições observadas no reservatório. A capacidade de reduzir os erros entre os dados simulados e observados reforça a confiança no uso do GLM como uma ferramenta preditiva para a gestão de reservatórios.

A partir desses modelos, o estudo explorou cenários de transposição de água como uma estratégia para mitigar os efeitos da seca no reservatório Passaúna. Foi analisada a eficácia de diferentes cenários de transposição, incluindo uma transposição de 6 meses iniciada em abril e outra de 1 ano iniciada em janeiro. Os resultados mostraram que a antecipação da transposição para abril preservou melhor o nível de água durante os períodos críticos, enquanto a transposição de 1 ano proporcionou uma recuperação mais estável ao longo do tempo.

Além disso, a comparação dos cenários de transposição destacou que a decisão sobre o momento e a duração da transposição pode ter impactos significativos na eficácia da recuperação do reservatório. A análise dos cenários demonstrou que uma abordagem adaptativa, que responda às condições hidrológicas e climáticas em tempo real, é essencial para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos, especialmente em um contexto de mudanças climáticas.

Em um contexto de mudanças climáticas globais, onde eventos extremos, como secas severas e variações térmicas atípicas, tornam-se cada vez mais frequentes, a gestão eficiente dos recursos hídricos torna-se essencial. Este estudo sublinha a importância de ferramentas robustas, como o GLM, na simulação e previsão dos impactos dessas mudanças em sistemas hídricos críticos. A capacidade de antecipar cenários futuros e ajustar as estratégias de manejo em resposta às condições climáticas emergentes é crucial para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos. Decisões baseadas em modelagem precisa e em tempo real podem fazer a diferença entre a resiliência e a vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água.

Em suma, este trabalho oferece uma contribuição significativa para a compreensão da dinâmica hidrológica e térmica do Reservatório Passaúna, fornecendo abordagens valiosas para a gestão hídrica. A utilização do GLM, apoiada pela autocalibração do glmgui, demonstrou ser uma abordagem eficaz para simular cenários futuros e planejar estratégias de mitigação, reforçando a importância de uma gestão hídrica adaptativa e bem-informada.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEN-PR. Estiagem mantém impacto na RMC e afeta bacias dos rios Paraná e Iguazu. Agência de Notícias do Paraná. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/>.

ALCÂNTARA, E. H. et al. Análise de séries temporais da temperatura da superfície da água e componentes do fluxo de calor no reservatório de Itumbiara (GO), Brasil. *Jornal Acta Limnologica Brasiliensis*, 2012.

ALMEIDA, M. P. et al. Cianobactérias em reservatórios de abastecimento público de água: fatores ambientais e riscos à saúde pública. *Revista Ambiente & Água*, 2021.

AMARAL, L. et al. Abastecimento de água na região metropolitana de Curitiba: análise da qualidade da água do reservatório Passaúna. *Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sustentabilidade*, 2020.

ANA. Estados do Sul entram no Monitor de Secas com Paraná na pior situação de seca em agosto. Agência Nacional de Águas, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/>.

BARROSO, G. R. et al. Avaliação da qualidade da água do reservatório da Usina Hidrelétrica de Nova Ponte (MG) e sua relação com o volume de água do reservatório. *Revista Geográfica Acadêmica*, 2018.

BUECHE, T. et al. GLMgui v1.0: An R-based Geographical User Interface and Preprocessor for the General Lake Model (GLM), 2019.

CASTRO, M. et al. Gestão integrada da bacia hidrográfica do reservatório do Passaúna: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, 2020.

CLIMAINFO. Mudança do clima e a estiagem no Paraná, 2020.

COLOMBO, Geovana Thaís. Dinâmica térmica em rios e relações com variáveis meteorológicas. Curitiba, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná.

DIAS, L. N. Estudo integrado da bacia hidrográfica do reservatório Passauna (Araucária-Paraná-Brasil), considerando a inter-relação da ocupação dos solos com a qualidade de água. São Carlos, 1997. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FENDRICH, R. *Bacia Experimental do Rio Passauna – Características Físicas do rio Passauna.* Convênio DNAEE/PUC, Curitiba, 1984.

FRASSL, M. A. et al. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM): Stress testing across a global observatory network. *Environmental Modelling & Software*, 2018.

GUIMARÃES, Daniel Pereira. Mapeamento das áreas afetadas pela estiagem no Brasil. *Embrapa*, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>.

HIPSEY, M. R. et al. A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Environmental Modelling & Software*, 2019.

INEA. Estiagem x Seca: Você sabia que existe diferença entre esses dois conceitos? *Instituto Estadual do Ambiente*, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: www.inea.rj.gov.br.

KELLER, A. A.; VARDI, E. "The thermal dynamics of a shallow reservoir: Implications for fish habitats." *Hydrobiologia*, 2018.

KUMAR, A. et al. Hydrological modeling for reservoir management: A review. *Water*, 2021.

MARKKULA, I. et al. Predicting future water quality in Finnish lakes under climate change and nutrient abatement with the General Lake Model (GLM). *Science of the Total Environment*, 2019.

MEDEIROS, J. et al. O reservatório Passaúna como fonte de abastecimento para Curitiba e região metropolitana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2020.

MOREIRA, F. M. et al. Estimativa de volume de água em reservatórios para gestão adequada dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 2020.

MuDak-WRM. Multidisciplinary Data Acquisition as Key for a Globally Applicable Water Resource Management, 2019. Dados não publicados de parceiros de projetos de pesquisa.

MÜLLER, E. et al. Educação ambiental na gestão do reservatório do Passaúna. In: Anais do Congresso Brasileiro de Educação Ambiental. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

PANDE, S. et al. Remote sensing in reservoir management: A review. *Journal of Hydrology*, 2019.

RIGOTTI, J. A. et al. Effects of Hydrological Drought Periods on Thermal Stability of Brazilian Reservoirs. *Water*, v. 15, n. 2877, 2023.

SALES, Gabriela Gomes Nogueira. Water Quality Modeling in a subtropical water supply reservoir. 2020. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SANTOS, M. L. S. et al. Hydrodynamic modeling of a reservoir used to supply water to Belem (Lake Agua Preta, Para, Brazil). *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, 2015.

SILVA, A. et al. Mudanças climáticas e qualidade da água do reservatório do Passaúna. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020.

SOARES, L. M. V. et al. A parameterization strategy for hydrodynamic modelling of a cascade of poorly monitored reservoirs in Brazil. *Environmental Modelling & Software*, 2020.

SOUZA, F. F. C. et al. Modelagem do regime térmico de um reservatório tropical de abastecimento público, Juiz de Fora, MG, Brasil. *Revista Ambiente e Água*, v. 11, n. 1, Taubaté, 2016.

STULL, R. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. Vancouver, 2017.

WANG, H. et al. Reservoir modelling based on integrated hydrological processes: A review. *Journal of Hydrology*, 2019.

WETZEL, R. G. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic Press, 2001

WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. 6 ed. McGraw Hill Brasil, 2011. 200 p.

ZHANG, Y. et al. Advances in hydrological modeling of water balance in reservoirs: A review. *Journal of Hydrology*, 2019.