

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

ENGENHARIA HÍDRICA

**Avaliação da aplicação e desempenho dos softwares HEC-
HMS e HEC-ResSim em tomada de decisão para controle
de reservatórios: caso da operação conjunta de Foz do
Areia e Segredo**

Rafael Schinoff Mércio Pereira

19 de dezembro de 2025

Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

ENGENHARIA HÍDRICA

Rafael Schinoff Mércio Pereira

**Avaliação da aplicação e desempenho dos softwares HEC-
HMS e HEC-ResSim em tomada de decisão para controle
de reservatórios: caso da operação conjunta de Foz do
Areia e Segredo**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 19 de dezembro de 2025, conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Área de concentração: Geração Hidrelétrica

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

19 de dezembro de 2025

Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA HÍDRICA

Rafael Schinoff Mércio Pereira

**Avaliação da aplicação e desempenho dos softwares
HEC-HMS e HEC-ResSim em tomada de decisão para
controle de reservatórios: caso da operação conjunta de
Foz do Areia e Segredo**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 19 de dezembro de 2025, conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Orientador)

Prof. Dr. Oswaldo Honorato de Souza Junior (docente interno)

Prof. Dr. Bruno Collischonn (convidado externo)

19 de dezembro de 2025

Itajubá, Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

À minha família.

No Rio Grande do Sul, meus pais, sempre presentes ao longo da minha jornada de vida; meu irmão e família, por serem presentes permanentemente, com enormes responsabilidades.

Em Santa Catarina, o apoio vem, da mesma maneira, na presença constante e reconfortante, além do apoio na execução desta pesquisa, cito, meu compadre, André Tiago dos Santos.

No Paraná, em Curitiba, meu núcleo. Aos gurus, Lorenzo e Miguel, por darem sentido a minha vida e me desafiarem diariamente a ser melhor a cada dia.

Agradeço, especialmente, a minha querida esposa, Joziana. Cabeça forte e coração grande. Inspiração!

À Companhia Paranaense de Energia - Copel por me proporcionar convivência com profissionais de elevado nível intelectual. Tenho certeza que esse Mestrado só se concretizou devido a essas influências.

Aos amigos que me ajudaram, mesmo quando eu estava ausente, com compreensão e confiança.

Ao meu orientador, Benedito Cláudio da Silva, que aceitou este desafio.

À Universidade Federal de Itajubá (Unifei), por proporcionar a mim e a muitos, a oportunidade de crescimento.

RESUMO

O Brasil é rico em disponibilidade hídrica para geração de energia. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) são 161 usinas hidrelétricas distribuídas pelo território nacional. Destas, 89 são usinas hidrelétricas a fio d'água e 62 com capacidade de regularização. A gestão destes reservatórios é realizada, na maior parte do tempo, visando atender a demanda de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN) associada a eventuais restrições, tais como: manter os níveis dos rios a jusante ou taxa de deplecionamento dos reservatórios. Porém, em determinados momentos, a gestão dos reservatórios passa para o modo de controle de cheia, o qual contempla a segurança da barragem e do entorno do empreendimento. Cada empreendimento possui sua regra de operação, elaborada conforme as características de projeto, das restrições hidráulicas existentes e de clima regional. Nesta esteira, esta pesquisa visa contribuir com a operação do Sistema Interligado Nacional - SIN, aplicando o software de simulações de operações hidráulicas HEC-ResSim, desenvolvido pelo Corpo de Engenharia Hidrológica (HEC) das Forças Armadas Americana (USACE), acoplado ao modelo hidrológico HEC-HMS, do mesmo desenvolvedor, voltados à operação conjunta dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, no rio Iguaçu, estado do Paraná. Esta região é conhecida pelos eventos climáticos severos a qualquer época do ano, devido à variabilidade das características meteorológicas e de terreno. O modelo hidrológico foi calibrado e validado para os eventos de maior repercussão ao longo do período operativo dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, possibilitando, assim, a geração de hidrogramas para precipitações de diferentes tempos de retorno. Estes hidrogramas foram inseridos no software HEC-ResSim para avaliação do seu desempenho diante das restrições operativas existentes. Os resultados demonstram robustez nas simulações realizadas com acoplamento dos softwares.

Palavras-Chave: Gestão de Reservatórios, Usinas Hidrelétricas, Sistema Interligado Nacional, Regras de Operação, Controle de Cheia.

ABSTRACT

Brazil is rich in water availability for power generation. According to the National Electric System Operator (ONS), there are 161 hydroelectric plants distributed across the national territory. Of these, 89 are run-of-river plants and 62 have storage capacity (ONS, 2025b). The management of these reservoirs is, for the most part, aimed at meeting the energy demand of the National Interconnected System (SIN), while also considering certain restrictions, such as maintaining downstream river levels or the reservoir depletion rate. However, at specific times, reservoir management shifts to flood control mode, which prioritizes the safety of the dam and the surrounding area. Each facility has its own operating rules, developed according to project characteristics, existing hydraulic constraints, and regional climate conditions. In this context, this research aims to contribute to the operation of the National Interconnected System (SIN) by applying the hydraulic operation simulation software HEC-ResSim, developed by the Hydrologic Engineering Center (HEC) of the U.S. Army Corps of Engineers (USACE), coupled with the hydrological model HEC-HMS, also developed by the same institution. The focus is on the joint operation of the Foz do Areia and Segredo reservoirs, located on the Iguaçu River in the state of Paraná. This region is known for severe weather events at any time of the year, due to the variability of meteorological and terrain characteristics. The hydrological model was calibrated and validated for the most significant events throughout the operational period of the Foz do Areia and Segredo reservoirs, thus enabling the generation of hydrographs for different return periods. These hydrographs were then inserted into HEC-ResSim to evaluate its performance under existing operational restrictions. The results demonstrate robustness in the simulations carried out with the coupling of the two software tools.

Keywords: Reservoir management, Hydropower Plants, National Interconnect System, Operation Rules, Flood Control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIVISÃO DO SEGUNDO PARA O TERCEIRO PLANALTO PARANAENSE	16
FIGURA 2 – SUPERFÍCIES CHAVE DE UNIÃO DA VITÓRIA.	17
FIGURA 3 – SUPERFÍCIES CHAVE DE PORTO VITÓRIA.....	17
FIGURA 4 – INFLUÊNCIA DO RESERVATÓRIO DE FOZ DO AREIA SOBRE UNIÃO DA VITÓRIA.....	18
FIGURA 5 – HIDROGRAMA DE VOLUME EXCEDENTE CALCULADO POR UNIÃO DA VITÓRIA.	20
FIGURA 6 – HIDROGRAMA DE VOLUME EXCEDENTE CALCULADO POR FOZ DO AREIA.....	22
FIGURA 7 – HIDROGRAMA DE VOLUME DO RESERVATÓRIO EQUIVALENTE PARA SEGREDO.....	23
FIGURA 8 – CICLO HIDROLÓGICO. FONTE: O AUTOR.	26
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	33
FIGURA –10 PERFIL LONGITUDINAL DO RIO IGUAÇU.	34
FIGURA –11 MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU.....	35
FIGURA –12 COMPORTAMENTO MENSAL DE CHUVA E VAZÃO EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	38
FIGURA 13 – CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS AFLUÊNCIAS E DEFLUÊNCIAS DE FOZ DO AREIA. ..	39
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MODELO HEC-HMS	42
FIGURA 15 – SUBDIVISÃO EM TRECHOS	43
FIGURA 16 – CHEIA DE 1983.....	44
FIGURA 17 – CHEIA DE 1992.....	44
FIGURA 18 – CHEIA DE 2014.....	44
FIGURA 19 – CHEIA DE 2023	44
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS.....	45
FIGURA 21 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DESVIO DO RIO DO JORDÃO	47
FIGURA 22 – SUBDIVISÃO DA BACIA A MONTANTE DO RESERVATÓRIO DE FOZ DO AREIA	50
FIGURA 23 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DO MODELO HEC-HMS.....	51
FIGURA 24 – CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS GERADAS DIRETAMENTE NO SOFTWARE.....	52
FIGURA 25 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS DE RIO.....	52
FIGURA 26 – ENCADEAMENTO DE ELEMENTOS	53
FIGURA 27 - ENCADEAMENTO DE ELEMENTOS (CONT.)	53
FIGURA 28 – LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS PARA GERAÇÃO DA EQUAÇÃO I-D-F	56
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA OPERACIONAL DO SOFTWARE HEC-RESIM.....	57
FIGURA 30 – ELEMENTOS INSERIDOS NA BACIA HIDROGRÁFICA.....	60
FIGURA 31 – REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS EM DIAGRAMA	61
FIGURA 32 – ZONAS OPERATIVAS CADASTRADAS NO HEC-RESIM.....	63
FIGURA 33 – CALIBRAÇÃO DE 1983 – UNIÃO DA VITÓRIA.....	65

FIGURA 34 – VALIDAÇÃO DE 1992 – UNIÃO DA VITÓRIA	65
FIGURA 35 – VALIDAÇÃO DE 2014 – UNIÃO DA VITÓRIA	65
FIGURA 36 – VALIDAÇÃO DE 2023 – UNIÃO DA VITÓRIA	65
FIGURA 37 – CALIBRAÇÃO DE 1983 – Foz DO AREIA	66
FIGURA 38 – VALIDAÇÃO DE 1992 – Foz DO AREIA	66
FIGURA 39 – VALIDAÇÃO DE 2014 – Foz DO AREIA	66
FIGURA 40 – VALIDAÇÃO DE 2023 – Foz DO AREIA	66
FIGURA 41 – CALIBRAÇÃO EVENTO DE 1983	67
FIGURA 42 – VALIDAÇÃO EVENTO DE 1992.....	67
FIGURA 43 – VALIDAÇÃO EVENTO DE 2014.....	67
FIGURA 44 – VALIDAÇÃO EVENTO DE 2023.....	67
FIGURA 45 – CALIBRAÇÃO EVENTO DE 2014.....	68
FIGURA 46 – VALIDAÇÃO EVENTO DE 2014.....	68
FIGURA 47 – VALIDAÇÃO EVENTO DE 2023.....	68
FIGURA 48 – DIVISÃO DA SUB-BACIA EM TRECHOS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 49 – SIMULAÇÃO PARA TR10 - AVALIAÇÃO DE REMANSO EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	71
FIGURA 50 – SIMULAÇÃO PARA TR10 – AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE EQUILÍBRIO.....	72
FIGURA 51 – SIMULAÇÃO PARA TR50 – AVALIAÇÃO DE REMANSO EM UNIÃO DA VITÓRIA	73
FIGURA 52 – SIMULAÇÃO PARA TR100 – AVALIAÇÃO DE REMANSO EM UNIÃO DA VITÓRIA	74
FIGURA – 53 SIMULAÇÃO PARA TR100 – AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE EQUILÍBRIO.....	75
FIGURA 54 – SIMULAÇÃO BRUTA PARA TR500 – COM REMANSO EM UNIÃO DA VITÓRIA	76
FIGURA 55 – SIMULAÇÃO CONSOLIDADA TR500 – SEM REMANSO EM UNIÃO DA VITÓRIA	76
FIGURA 56 – AVALIAÇÃO DA VAZÃO NATURAL EM SEGREDO	77
FIGURA 57 – SIMULAÇÃO TR 1000 – COMPARATIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS INICIAIS.....	78
FIGURA 58 – SIMULAÇÃO TRs 5000 e 10000 – COMPARATIVO DE NÍVEIS E VAZÕES	78

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS	9
QUADRO 2 - NORMATIVOS SOBRE GESTÃO DE RESERVATÓRIOS	11
QUADRO 3 - ELEMENTOS PARA SIMULAÇÃO.....	31
QUADRO 4 – RESUMO DA PARAMETRIZAÇÃO DE CALIBRAÇÃO.....	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DADOS CARACTERÍSTICOS DOS RESERVATÓRIOS E USINAS.....	36
TABELA 2: DADOS ATEMPORAIS DOS EMPREENDIMENTOS.....	37
TABELA 3 - MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	41
TABELA 4 - COMPARATIVO DAS ÁREAS DE DRENAGEM DO CADASTRO ANA E CALCULADAS.....	50
TABELA 5– PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO: TRECHO INCREMENTAL SEGREDO – FOZ DO AREIA	54
TABELA 6 - PARÂMETROS DAS CURVAS I-D-F.....	55
TABELA 7 - AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS PARA UNIÃO DA VITÓRIA.....	65
TABELA 8 – AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS PARA FOZ DO AREIA.....	67
TABELA 9 – AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS PARA SEGREDO	69
TABELA 10 - AVALIAÇÃO DAS CALIBRAÇÕES E VALIDAÇÕES	70

LISTA DE SIGLAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO
ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
CGH – CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS
CNOS – CENTRO NACIONAL DE OPERAÇÃO DO SISTEMA
COS-R – CENTRO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA REGIONAL
DO – DIAGRAMA DE OPERAÇÃO
FASG – FOZ DO AREIA / SEGREDO
IO – INSTRUÇÃO DE OPERAÇÃO
NE – NÍVEL DE EQUILÍBRIO
ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO
PCH – PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
PDF – PROGRAMA DIÁRIO DE FLUÊNCIAS
PMO – PROGRAMA MENSAL DA OPERAÇÃO
RD – REBAIXAMENTO DINÂMICO
RO – ROTINA OPERACIONAL
RT – ROTINA TÉCNICA
SIG – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS
SIN – SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

TR – TEMPO REAL

UHE – USINAS HIDRELÉTRICAS

VE_s – VOLUME DE ESPERA

VE – VOLUME EXCEDENTE

VV – VOLUME VAZIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
2.1 OBJETIVO GERAL	8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 RESERVATÓRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	9
3.2 OPERAÇÃO CONJUNTA DE FOZ DO AREIA E SEGREDO	15
3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E DE SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO	25
4. METODOLOGIA	32
4.1 ÁREA DE ESTUDO	33
4.2 MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS	40
4.2.1 Levantamento de dados	42
4.2.2 Processamento de dados	47
4.3 SIMULADOR DE RESERVATÓRIOS HEC-RESSIM	56
4.3.1 Levantamento de dados	57
4.3.2 Processamento de dados	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 RESULTADOS DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS	64
5.2 RESULTADOS DO SIMULADOR HIDRÁULICO HEC-RESSIM	71
6. CONCLUSÕES	79
APÊNDICE A – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS – 1983	80
APÊNDICE B – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS – 1992	82
APÊNDICE C – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS – 2014	84
APÊNDICE D – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS – 2023	86
APÊNDICE E – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS – 2013	87
REFERÊNCIAS	108

1. Introdução

O Brasil, por possuir abundância em recursos hídricos em sua maior parte do território, implementou as usinas hidrelétricas como principal fonte de geração de energia no país ao longo do século XX. Grandes quedas, grandes serras, muitas cachoeiras, uma riqueza natural com terrenos acidentados e grandes corpos d'água que cruzam longas distâncias propiciam naturalmente a utilização da energia constante nestes locais. Seja para movimentar pás de moinhos, seja para beneficiar alimentos, esses aproveitamentos sempre foram utilizados. Com o passar do tempo, conforme os avanços da tecnologia, passaram a ser implementadas grandes obras de engenharia. Foram feitos investimentos para construção de usinas hidrelétricas, que normalmente estão localizadas em locais remotos.

Atualmente, no Brasil, existem cerca de 168 usinas hidrelétricas em operação com aproximadamente 108.277 MW de potência instalada, o que corresponde a 43,6% de todas as fontes de geração (ONS, 2025b). Essa proporção vem diminuindo com o passar do tempo diante dos incentivos de implantações de outros sistemas geradores, tais como a energia solar, a energia eólica e as diversas formas de geração distribuída, predominantemente solar.

Essas novas fontes de energia, apesar de sustentáveis, também implicam maior complexidade de operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) devido à limitação de capacidade de contribuição em relação a atendimento à programação diária e garantia de estabilidade da frequência do sistema diante de intercorrências que possam ser verificadas em tempo real. Isto é, caso ocorram oscilações em radiação solar ou em ocorrências de ventos, os geradores que utilizam essas fontes podem comprometer o fornecimento ao sistema, obrigando a entrada imediata de outras fontes, normalmente, hidráulicas ou térmicas.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o responsável por coordenar e controlar a operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica do SIN, sob fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), de modo a garantir a segurança operacional contínua do sistema brasileiro e exercer suas atribuições. O ONS desenvolve estudos e ações sobre o sistema e seus agentes proprietários para manter o gerenciamento de diferentes fontes de energia e a complexa e extensa rede de transmissão. Assim, visando menor custo para o sistema, observando os critérios técnicos de confiabilidade contidos nos Procedimentos de Rede, garantir o acesso à rede de transmissão de forma igualitária entre os agentes e contribuir para o desenvolvimento do SIN de forma menos custosa possível (ONS, 2024a).

O gerenciamento dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHEs) brasileiras enquadrados na ordem de despacho pelo ONS é realizado mediante normativos específicos, com execução pelo centro de operação centralizado ou centros de operação regionais. Os normativos estabelecem, a partir de estudos prévios, como a operação será realizada. Em situação de controle de cheia, caso o estado operativo do aproveitamento esteja em Alerta ou Emergência, é o agente o responsável pela determinação da operação, tendo em vista que nessas ocasiões a vazão afluente é superior ao máximo engolimento das Unidades Geradoras (UG) (ONS, 2024d).

A operação hidráulica no rio Iguaçu é conhecida pela ocorrência de chuvas e estiagens significativas a qualquer época do ano. Os dados históricos de estações pluviométricas da região indicam a não sazonalidade pluviométrica na região. Diante desse conhecimento, os reservatórios alteram seus estados operativos com frequência. Para a operação hidráulica do sistema de reservatórios de Foz do Areia e Segredo, conhecido como sistema FASG, o agente responsável pela operação possui software específico para tomada de decisão em situações de cheias, visando à proteção das restrições existentes na bacia hidrográfica.

A principal restrição existente para o reservatório de Foz do Areia é o possível remanso sobre os municípios de União da Vitória e Porto Vitória, localizados aproximadamente 100 km a montante da barragem. Além disso, a metodologia aplicada na operação hidráulica em tempo real para controle de cheias contempla a regra de não ultrapassar a maior vazão afluente natural prevista no reservatório de Segredo, evitando, assim, impactos negativos para os reservatórios de jusante com a geração de cheias artificiais.

Atualmente, a documentação de regramento da operação hidráulica da cascata do rio Iguaçu já contempla a proteção de outras restrições e normalmente a operação é realizada em conjunto entre agentes e ONS, em teleconferências frequentes sempre que as condições hidrológicas se agravam na bacia.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é calibrar o modelo hidrológico HEC-HMS para gerar hidrogramas hipotéticos e estes serem utilizados como dados de entrada para verificação da capacidade de simulação do software HEC-ResSim para a operação dos reservatórios Foz do Areia e Segredo, localizados na bacia do rio Iguaçu.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são listados abaixo:

- Calibrar o modelo hidrológico HEC-HMS para o evento de cheia mais expressivo do período operativo da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, reservatório Foz do Areia, ocorrido em 1983;
- Calibrar o modelo hidrológico HEC-HMS para o evento de 2014 para a UHE Governador Ney Braga, reservatório de Segredo;
- Validar os parâmetros da calibração para Foz do Areia e Segredo;
- Gerar hidrogramas hipotéticos no modelo HEC-HMS com os parâmetros validados para utilizar como dados de entrada para o software de simulação de operação de reservatórios HEC-ResSim;
- Simular a operação do reservatório de Foz do Areia com o software HEC-ResSim;
- Analisar o desempenho do software diante das condicionantes existentes.

3. Referencial Teórico

3.1 Reservatório para geração de energia

Com o aumento gradual da população e os avanços industriais, a demanda por energia fornecida com qualidade aumenta a cada dia, o que torna necessária a busca por diferentes fontes de geração de energia elétrica para suprir os sistemas com maior eficiência (FORD, 2022). Com o passar do tempo, os impactos proporcionados pela implantação das usinas hidrelétricas no Brasil se tornaram mais relevantes e o regramento, gerenciamento e fiscalização evoluíram e seguem evoluindo (ONS, 2021).

Atualmente, existem cerca de 168 usinas hidrelétricas (ONS, 2025a) em operação no Brasil, com aproximadamente 108.277 MW de potência instalada, o que corresponde a 43,6% de todas as fontes de geração (ONS, 2025b). A responsabilidade da gestão dos reservatórios é compartilhada, atuando como órgãos fiscalizadores as Agências Reguladoras nacionais, sendo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), além de órgãos estaduais e municipais. Como órgão operador, o principal ator é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pelo planejamento, programação e operação em tempo real do Sistema Interligado Nacional (SIN), tanto de usinas geradoras de eletricidade quanto do sistema de transmissão (ONS, 2024d).

Os aproveitamentos hidrelétricos são classificados conforme exposto no Quadro 1, seguindo o normativo da legislação nacional.

Quadro 1 - Classificação dos aproveitamentos hidrelétricos

Classificação do Aproveitamento	Potência Máxima (Garantida)	Observações
Central Geradora Hidrelétrica (CGH)	Não excede 5 MW	Sem observações
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)	Não excede 30 MW	Deve atender a critérios de potência e área de reservatório que deve ser menor que 13 km ² .
Usina Hidrelétrica Autorizada (UHE)	Entre 5 MW e 50 MW	Área do reservatório maior que 13 km ² .
Usina Hidrelétrica Concedida (UHE)	Superior a 50 MW	Sujeita a outorga de concessão.

Fonte: – ANEEL (2024)

Os reservatórios podem ainda ser classificados como de regularização e fio d'água. Os reservatórios de regularização são conhecidos por possuírem capacidade de armazenar água ao longo do período chuvoso e transferir energia de uma estação chuvosa para uma estação seca (Cicogna, 2003; USACE, 2017). Assim, possibilitam a manutenção do comportamento de nível do rio para o trecho de jusante com menores variações, podendo, em muitos casos, evitar que determinadas regiões percebam épocas de maiores estiagens. Nem sempre ocorre da maneira mencionada, pois, para que isso aconteça as condições hidrológicas ocorridas devem corresponder às condições hidrológicas simuladas previamente durante a fase de planejamento anual, o que raramente ocorre diante das intercorrências naturais de um sistema continental, como o brasileiro. O que geralmente acontece, conforme ONS (2021), é o monitoramento das condições hidrometeorológicas e a gestão dos armazenamentos para decisões sobre como serão os consumos dos recursos durante o período seco ou como se dará a recuperação dos reservatórios no final do período chuvoso. Em casos de estiagem severa, algum tipo de uso pode ser privilegiado visando à regularidade para atendimento de todos os outros usos, como, por exemplo, evitar a máxima geração hidrelétrica antes do fim de um período chuvoso em algum reservatório, visando atingir 100% de volume útil ao final do período, quando as previsões mensais de precipitação indicarem chances de anomalia negativa para o horizonte de transição do período seco para o período úmido em alguma região relevante do país.

Já os reservatórios conhecidos de operação a Fio d'água não possuem capacidade de regularização de vazões ou de transferir energia de um período chuvoso para outro. Isto quer dizer que, em eventos de cheias ou de grandes estiagens, o reservatório não irá atuar com diminuição de eventuais impactos causados pela elevação de nível ou escassez de recurso hídrico (Cicogna, 2003). Porém, podem permitir outros tipos de usos com a estabilidade de nível mantida, com navegação e áreas de lazer (USACE, 2017).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o responsável pela coordenação e execução do despacho de geração das grandes usinas e controle da operação das instalações de transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), além do planejamento dos sistemas isolados existentes no país, sob fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (ONS, 2024a).

O ONS foi criado em 26 de agosto de 1998, pela Lei nº 9.648/1998, com o objetivo de: a) promover a otimização da operação do sistema eletroenergético, visando ao menor custo para o sistema, observados os padrões técnicos e os critérios de confiabilidade estabelecidos nos Procedimentos de Rede aprovados pela Aneel; b) garantir que todos os agentes do setor elétrico tenham acesso à rede de transmissão de forma não discriminatória; e c) contribuir, de

acordo com a natureza de suas atividades, para que a expansão do SIN se faça ao menor custo e vise às melhores condições operacionais futuras (ONS, 2024a).

Por meio de regras preestabelecidas, o ONS coordena e controla a operação da geração e da transmissão de energia elétrica integrantes do Sistema Interligado Nacional – SIN. Os Procedimentos de Rede, como são conhecidas estas regras, foram atribuídos ao ONS também na Lei 9.648/1998, porém, revisada pela Resolução Normativa nº 903/2020 da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (ONS, 2024a).

No caso específico da gestão dos reservatórios os normativos que regem a operação hidráulica de reservatórios são os Documentos Normativos:

Quadro 2 - Normativos sobre gestão de reservatórios

Categoria	Documento/Submódulo	Descrição ou Finalidade (Implícita no Título)
Documentos Normativos	Manuais de Procedimentos Operacionais (MPO)	Define os procedimentos detalhados para a operação.
	Rotinas Operacionais (RO)	Estabelece as rotinas e tarefas recorrentes de operação.
	Referências Técnica (RT)	Fornece bases e padrões técnicos para a operação.
	Notas Técnicas (NT)	Documentos que esclarecem ou complementam normas e procedimentos.
Submódulos	5.5 – Operação hidráulica de reservatórios	Trata especificamente dos procedimentos de controle e gestão da água nos reservatórios.
	4.5 – Programação Diária de Operação	Relacionado ao planejamento das atividades operacionais no dia a dia.
	5.13 – Apuração de dados hidrológicos e hidráulicos	Focado na coleta e análise de dados sobre vazões, níveis e outros parâmetros da água.
	4.7 – Atualização de informações sobre restrições hidráulicas dos aproveitamentos hidroelétricos	Envolve o acompanhamento e registro de limitações na operação das usinas.
	4.8 – Acompanhamento e previsão meteorológica e climática	Utilizado para integrar informações do tempo e clima no planejamento da operação.
	3.7 – Planejamento anual de prevenção de cheias	Focado na estratégia e ações de longo prazo para mitigar riscos de inundações.

Fonte: ONS

Estes procedimentos determinam as responsabilidades entre os centros de operação do ONS e os agentes, além dos procedimentos a serem seguidos por todos os envolvidos. Ainda, traz uma subordinação de regramento, subdivididos em temas necessários para o gerenciamento dos reservatórios.

O ONS disponibiliza aos agentes de geração vasta documentação orientativa com definições dos termos técnicos e objetivos de cada conceito ou metodologia, visando à operacionalização com base nos cadastros de características atemporais e dados que variam ao longo do tempo, além de condicionantes permanentes ou temporárias que podem impactar nos propósitos da geração hidrelétrica do SIN. (ONS, 2021)

Anualmente, o Inventário de Restrições (Submódulo 4.7) é revisado pelos agentes e considerado no Planejamento Anual de Prevenção de Cheias (PAPC) (Submódulo 3.7), quando é avaliado em conjunto entre o ONS e os agentes. Como produto, têm-se as Diretrizes para Regras de Operação (Submódulos 3.7 e 4.7), nas quais constam a metodologia de ocupação de volume de espera (VEs) e decisão de defluência em tempo real. Resultando, então, em Documentos Operativos (DO) voltados aos agentes com Instruções de Operação (IO), Rotinas Operacionais (RO), Referências Técnicas (RT) e Diagramas (ONS, 2021).

Em âmbito semanal, é realizada a revisão dos Volumes de Espera nos encontros de Revisões do Programa Mensal da Operação (PMO), que determina as diretrizes operativas da próxima semana, consistido diariamente pelo Programa Diário de Defluências (PDF) e executado em Tempo Real (TR) pelos Centros Nacionais de Operação do Sistema (CNOS), Centros de Operação do Sistema Regionais (COSR) e Agentes. (ONS, 2021)

Ainda, caso os reservatórios estejam em estado operativo de Alerta ou Emergência, a decisão de defluência é direta dos agentes.

A operação hidráulica dos reservatórios tem como premissa o atendimento ao propósito para o qual o empreendimento foi projetado. Porém, diante das observações naturais de evolução humana e desenvolvimento da economia, muitas mudanças podem ocorrer e interferir na execução do projeto planejado.

A operação em tempo real do SIN é realizada seguindo as etapas de planejamento e programação, definidas considerando as limitações e condicionantes associadas aos empreendimentos, que visam a garantir os usos múltiplos das águas e o cumprimento da regulamentação estadual e federal, observando as questões ambientais. (ONS, 2024d).

Os objetivos devem ser claros quanto à preservação e proteção das demandas de outros usos, pois, mesmo que um reservatório não tenha capacidade de eliminar inundações tem capacidade de minimizá-las. Reservatórios com capacidade de regularização amortecem cheias para jusante, mesmo com operação de múltiplos reservatórios na calha do rio e com existência de reservatórios a fio d'água, é possível minimizar tais cheias para jusante (USACE, 2017).

O ideal é que na concepção dos projetos já se tenham mapeados os possíveis reservatórios a serem implementados e estimar as possíveis regras contemplando as restrições

a serem consideradas, evitando ou conciliando eventuais conflitos de uso das águas (USACE, 2017).

Ferramentas de previsão hidrológica se fazem necessárias na execução do gerenciamento dos reservatórios para possibilitar tomadas de decisão com maior antecedência possível, assim se possibilita a remoção de moradores em áreas de risco ou minimização de eventuais situações de risco de estruturas como pontes e barragens, bem como eventuais perdas patrimoniais (USACE, 2017).

Diante das diversas formas de conciliar a instalação de reservatórios para geração de energia e as diferentes demandas de uso das águas, neste trabalho se considera satisfatório o atendimento aos três princípios da operação hidráulica (ARAÚJO et al., 2019; USACE, 2017), quais sejam:

1º A segurança da barragem é fundamental.

O primeiro princípio existe para garantir a estabilidade da principal estrutura de barramento, pois, em caso de colapso a tendência é de grandes danos ao vale de jusante. As barragens dos reservatórios do setor elétrico são consideradas de baixo risco, mas de grande impacto em caso de incidentes. Estas premissas são contempladas desde as etapas de planejamento da operação do SIN. Uma das práticas realizadas durante o planejamento são os estudos voltados para subsidiar o Plano Anual de Prevenção de Cheias (PAPC), que é revisado anualmente pelo ONS com a determinação dos volumes de espera em diversos reservatórios que compõem o SIN. Esta ideia se consolidou com o advento da Lei 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010).

2º Não causar efeitos piores na área de influência do reservatório do que aqueles que seriam observados em condições naturais.

Este princípio visa à tentativa da manutenção das condições naturais do rio identificadas antes da implementação dos reservatórios. Contempla atendimento a taxas de variação de níveis de rios e reservatórios para evitar formação de locais de peixes em caso de recessão ou aumento abrupto dos níveis em caso de cheias. Contempla também a manutenção de vazões para atendimento a outros usos, como lazer, irrigação ou navegação.

3º Se possível, minimizar efeitos danosos na área de influência do reservatório.

O terceiro princípio visa à melhoria da qualidade de vida diante da implementação dos reservatórios. Isso pode ser observado na regularização de vazões quando há estiagem severa ou grandes cheias, em que um reservatório de regularização ou um sistema de reservatórios colabora com patamares de vazões seguros para o vale do rio.

Com o crescente número de pesquisas sobre as mudanças climáticas, em muitos casos é possível estimar cenários hidrometeorológicos extremos (FLORES et al., 2025), o que possibilita atuação prévia das autoridades na prevenção e conscientização de comunidades integrantes da bacia hidrográfica. Ações de mitigação e adaptação se mostram cada dia mais necessárias, com atualizações periódicas das infraestruturas existentes e outras necessárias para ajustes da convivência humana com o meio ambiente (USACE, 2017).

Para viabilizar tais premissas, é necessário determinar regras de operação para os reservatórios, o que depende de diversos fatores. Normalmente, as regras são previamente estudadas em função de requisitos específicos de cada empreendimento. Seja por questões de topografia, seja por características climatológicas, seja por questões financeiras, o empreendimento é projetado e construído para atender ao quesito de produção de energia com segurança para o empreendimento e para suas áreas de impacto (ONS, 2021).

Os tipos de operação hidráulica de reservatório são caracterizados pelo atendimento a diferentes restrições, as quais impõem a necessidade de regras específicas e podem surgir após a construção do empreendimento, muitas vezes, severas. Nestes casos, o empreendimento deve se inserir ao meio ambiente e ao regramento preestabelecido (ONS, 2021), visando utilizar ao máximo os recursos para o qual foi concebido, sem deixar de observar as necessidades humanas estabelecidas após a construção. São exemplos: surgimento de comunidades, estabelecimento de propriedades, construção de pontes e meio ambiente impactado. Condicionantes temporárias em função de falha de equipamentos de segurança ou em função de manutenção obrigatória podem impor um regramento temporário específico.

A implantação de outros empreendimentos no mesmo corpo d'água também pode exigir adaptações e inserir diferentes variáveis na operação, como, utilizar melhor rendimento em outro empreendimento quando houver vazão afluyente excedente ou gerir de modo a suprir os momentos de maior demanda de energia do dia.

O ONS (2021) impõe como premissa que os reservatórios formados para geração de energia são concebidos para atendimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN), aliados à intenção de manutenção das condições naturais pré-existentes ou visando o menor impacto possível, através de regras bem definidas e constantemente revisadas e cadastradas junto aos órgãos fiscalizadores.

A implantação de um reservatório para geração de energia demanda planejamento, regramento e atualização permanente dos estudos hidrológicos, climáticos e das características que compõem a bacia hidrográfica para dirimir eventuais conflitos existentes que possam surgir em virtude de compartilhamento de recursos (FLORES et al., 2025; WANG et al., 2023).

3.2 Operação conjunta de Foz do Areia e Segredo

Em virtude das características morfológicas da bacia hidrográfica do rio Iguaçu até o reservatório de Foz do Areia, existem algumas particularidades na operação hidráulica da cascata de usinas hidrelétricas instaladas na bacia hidrográfica. A restrição operativa do reservatório de Foz do Areia que impõe maior atenção é o possível remanso em áreas das cidades de Porto União, localizada no estado de Santa Catarina, e União da Vitória, localizada no estado do Paraná. A depender dos níveis do reservatório de Foz do Areia, da estação fluviométrica de Porto Vitória e da estação fluviométrica de União da Vitória, o reservatório pode causar aumento dos níveis d'água nos municípios (MINE, 1998).

No município de Porto Vitória se localizam as chamadas corredeiras de Porto Vitória, formadas por rochas vulcânicas que afloram na superfície livre do escoamento (CASTANHARO e BUBA, 2008). Esta formação é passagem do segundo para o terceiro planalto paranaense, variando sua cota de 1200 m a leste até 300 m a oeste (Freitas). Em virtude das características dessa formação geológica associada à implantação do aproveitamento hidrelétrico, os estudos de remanso indicam a verificação em duas etapas, no trecho entre a barragem de Foz do Areia e o posto de controle de Porto Vitória e entre Porto Vitória e União da Vitória (CASTANHARO e BUBA, 2008).

Naturalmente, o controle hidráulico das corredeiras de Porto Vitória causa remanso na região de montante, chegando sua elevação de nível até os municípios de Porto União e União da Vitória. Porém, com a implementação do empreendimento, em determinadas situações, o reservatório de Foz do Areia afoga as corredeiras, podendo ser o causador do remanso (MINE, 1998).

A Figura 1 ilustra a transição do segundo para o terceiro planalto paranaense, denotando a característica acidentada com a diferença de altitude e a mudança na declividade do vale. À direita da linha pontilhada, se observa a declividade suave da bacia hidrográfica, diferente do lado esquerdo da linha pontilhada, região em que está inserido o reservatório de Foz do Areia e onde se observa declividade acentuada.

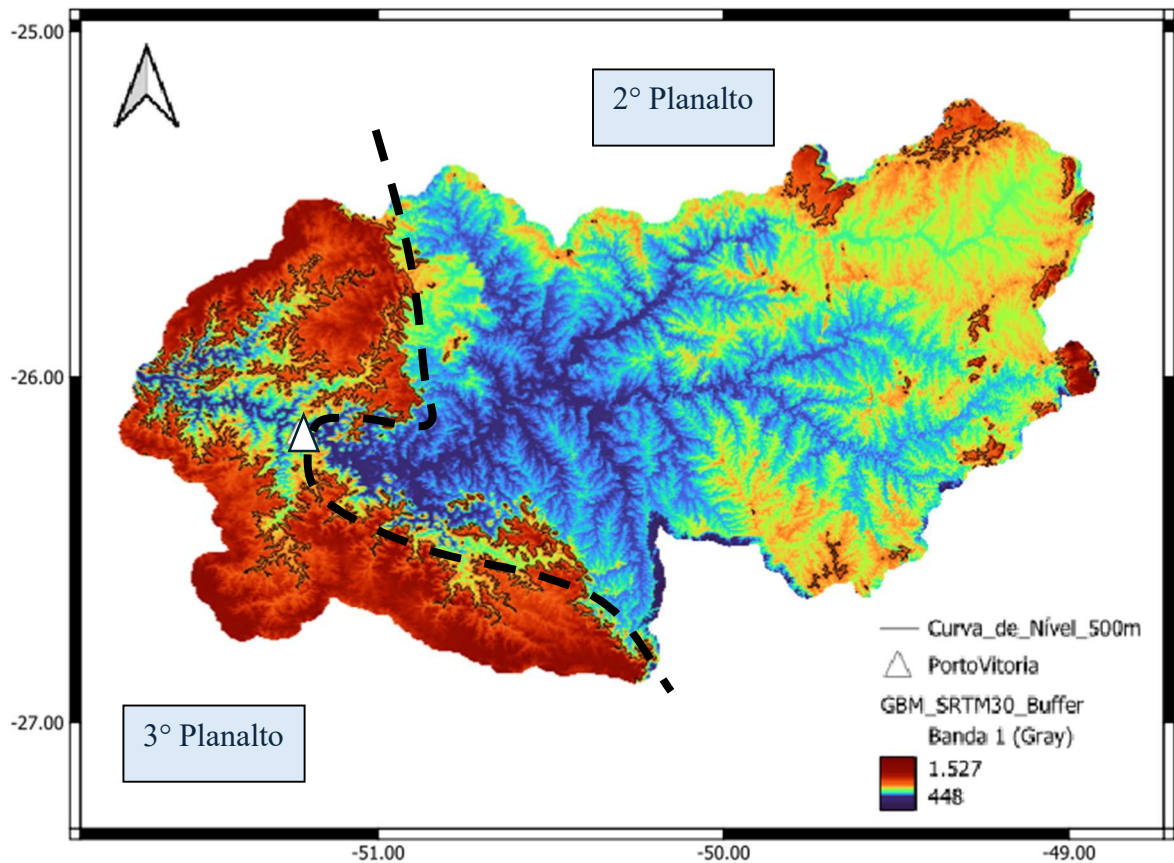


Figura 1 – Divisão do segundo para o terceiro planalto paranaense
Fonte: SRTM

A avaliação do remanso é realizada pela identificação dos parâmetros de cota nos postos associados na superfície-chave de descarga. As Figuras 2 e 3 indicam as curvas de descarga naturais e as superfícies-chave para diferentes condições dos níveis.

A Figura 2 indica a curva de descarga e a superfície chave para o posto hidrométrico de União da Vitória em virtude do nível d'água observado em Porto Vitória. Caso o nível de União da Vitória, associado ao nível de Porto Vitória, esteja à esquerda da linha preta (curva de descarga natural), indica que há remanso no local, não necessariamente causado pelo reservatório.

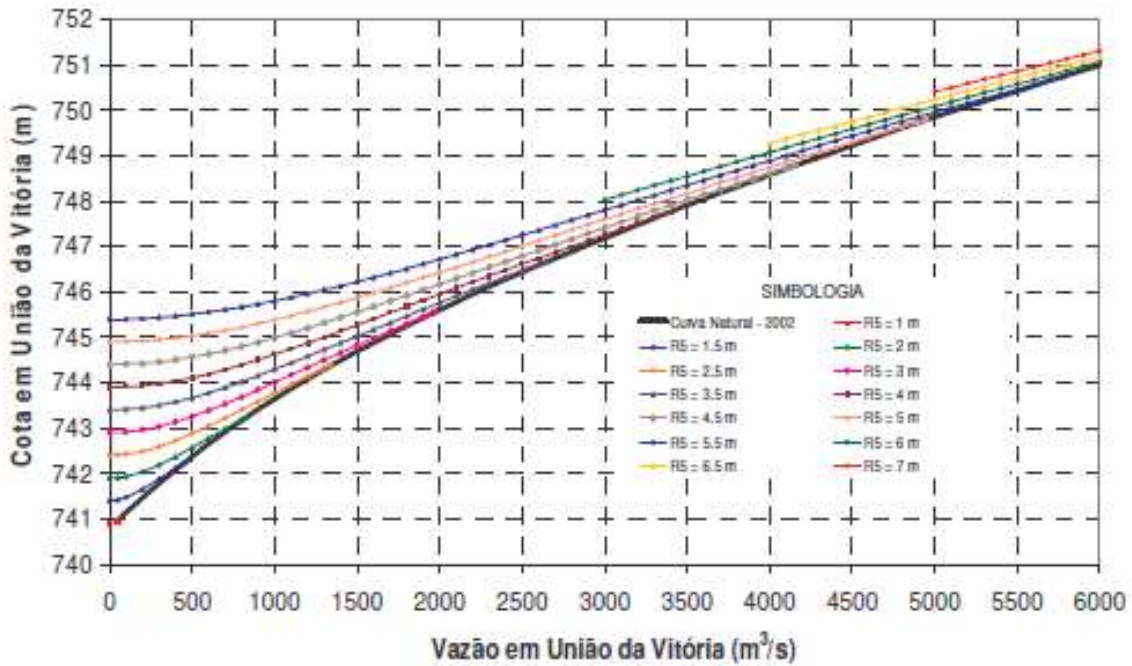


Figura 2 – Superfícies chave de União da Vitória.
Fonte: Castanharo e Buba (2008)

A Figura 3 indica a curva de descarga e a superfície chave para o posto hidrométrico de Porto Vitória em virtude do nível d'água observado no reservatório de Foz do Areia. Caso o nível de Porto Vitória, associado ao nível do reservatório de Foz do Areia, esteja à esquerda da linha preta (curva de descarga natural), indica que há afogamento das corredeiras causado pelos níveis do reservatório.

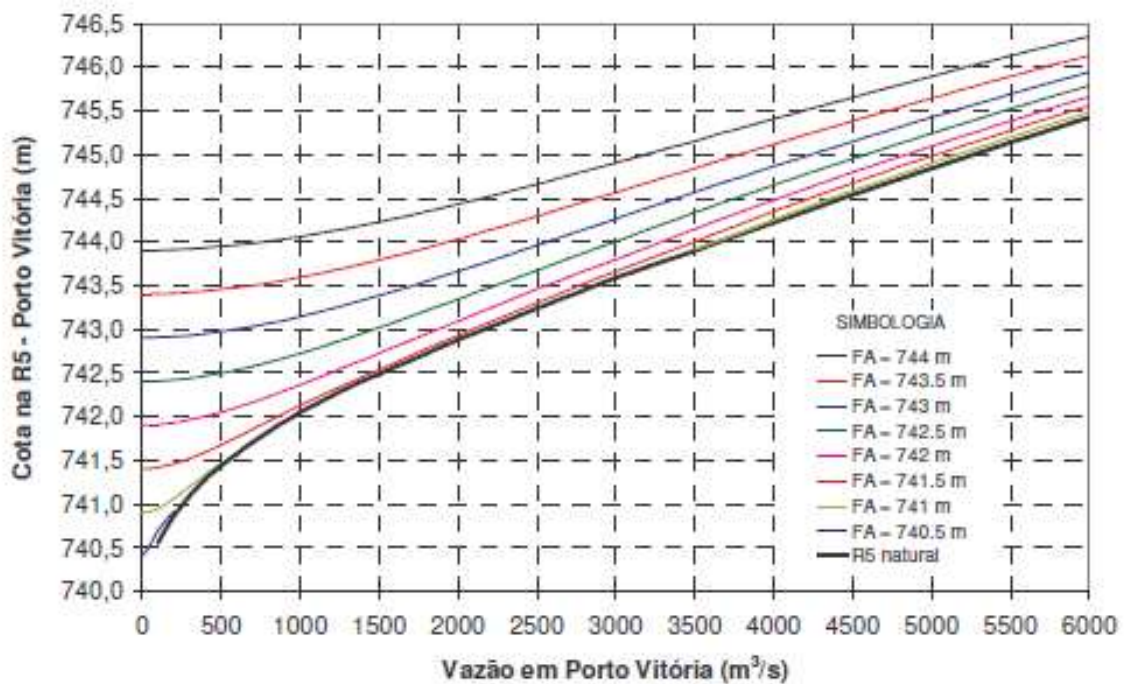


Figura 3 – Superfícies chave de Porto Vitória.
Fonte: Castanharo e Buba (2008)

Para evitar tal ocorrência, a regra de operação dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo foi criada e é executada pelo método conhecido como Rebaixamento Dinâmico (RD). Este método realiza alocação de volume de espera em tempo real no reservatório de Foz do Areia, identificando as vazões a montante, estimando o hidrograma futuro de curto prazo, considerando a vazão defluente regularizada (capacidade de turbinamento disponível para a presente cheia), para determinar o volume excedente (VE) na bacia hidrográfica. Com essas informações, o reservatório é deplecionado para manter volume vazio (VV) igual ao volume excedente identificado a montante. Quando o reservatório atinge o volume identificado, diz-se que está no Nível de Equilíbrio (NE). Neste caso, além de proteger as cidades de Porto União e União da Vitória, está se protegendo a barragem, tendo em vista que o nível máximo normal da barragem passou por revisão após a grande cheia de 1983, passando do nível 744,00 m para 742,00 m, o que implica em capacidade de vertimento comprometida para proteção do remanso (CASTANHARO e BUBA, 2008).

A Figura 4 ilustra os limites de vazão em União da Vitória e cota na barragem de Foz do Areia, onde a região com influência do reservatório, na parte superior direita haveria remanso em União da Vitória em cotas acima da área desapropriada. As duas linhas traçadas limitando as áreas são distintas em virtude de revisão do estudo de remanso em 2002 (linha azul), operacional atualmente.

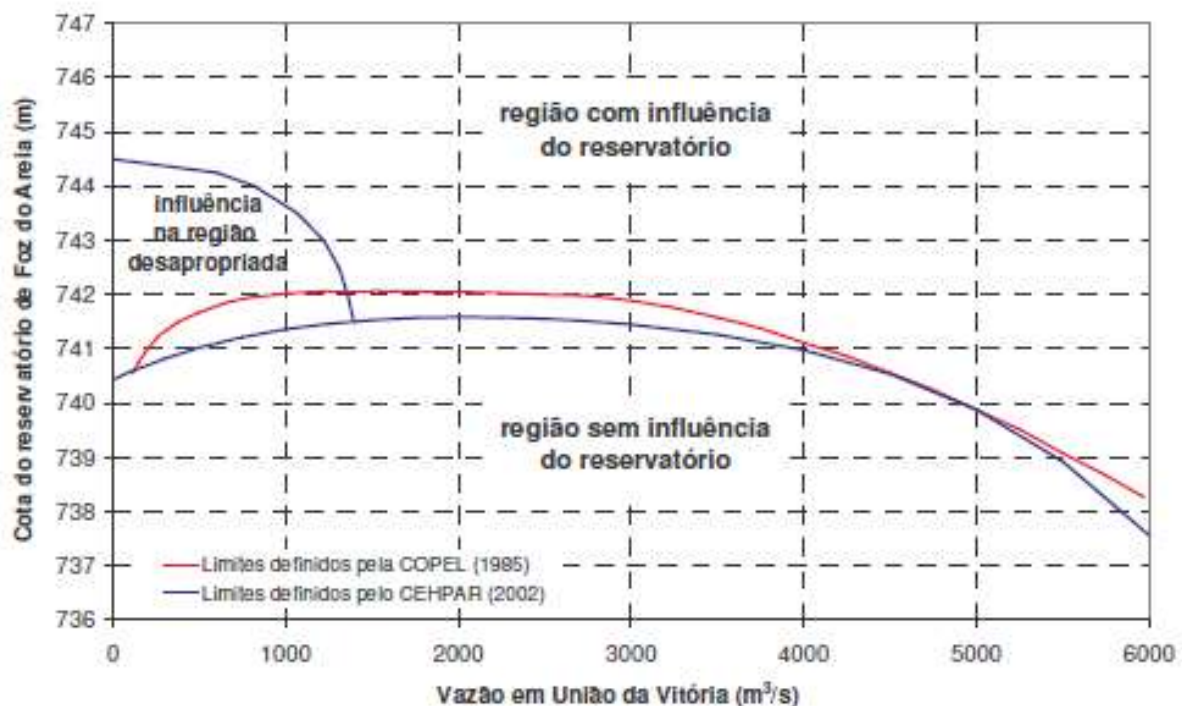


Figura 4 – Influência do reservatório de Foz do Areia sobre União da Vitória.
Fonte: Castanharo e Buba (2008)

Esta metodologia, assim como protege as restrições já citadas, privilegia a recuperação do reservatório, isto é, ao final da cheia o reservatório deve estar com seu volume pleno (CASTANHARO e BUBA, 2008).

Mori (2016), define a técnica de rebaixamento dinâmico como:

a técnica baseada no cálculo de um volume de água excedente resultante da diferença entre a previsão de vazões afluentes e a programação de vazões turbinadas. O volume excedente é, então, convertido em um modelo que consiste em determinado quantificador denominado *trajetória de vazão defluente*.

Para ONS (2024), no Cadastro de Informações Operacionais Hidráulicas da Bacia do Rio Iguaçu, o rebaixamento dinâmico é entendido como:

o rebaixamento do reservatório baseado na estimativa do volume d'água em trânsito na bacia a montante do reservatório, que exceda a necessidade de turbinamento futuro, o qual seria vertido de qualquer forma. Com o emprego do método, adiantam-se esses vertimentos, causando um rebaixamento do reservatório a partir do nível 742,00 m, ou interrompe-se o reenchimento do volume útil, dependendo do nível de partida no início da cheia.

Em situações de cheias, quando a metodologia de rebaixamento dinâmico identifica volume excedente na bacia, superior ao volume vazio no reservatório equivalente, passa a ser necessário rebaixar o reservatório antes do pico de cheia. Para cheias de pequeno porte, baixar de 741,50m já é suficiente para evitar remanso. Para cheias de grande porte, o reservatório pode não rebaixar ou até mesmo se elevar em virtude da capacidade de descarga do vertedouro, o que justifica a maximização do rebaixamento, tendo em vista que é impossível prever a magnitude de uma cheia no rio Iguaçu para horizontes acima de dois dias (ONS, 2025).

A situação dos reservatórios e as restrições hidráulicas ao longo do vale a jusante funcionam como condicionantes para o rebaixamento, bem como a necessidade de recuperação do reservatório, pois, ao fim da cheia, o ideal é o reservatório atingir o nível máximo, ou seja, 100% de armazenamento (ONS, 2025).

Em virtude da mudança de característica da bacia hidrográfica a jusante do posto fluviométrico de União da Vitória, o volume excedente pode ser calculado de duas maneiras: 1) considerando a porção da bacia hidrográfica a montante de União da Vitória, e; 2) considerando toda a bacia a montante do reservatório de Foz do Areia. É adotado o maior volume excedente entre as duas hipóteses, visando operação mais segura quanto ao remanso e à instalação (ONS, 2025).

A estimativa de volume excedente, considerando apenas a área de drenagem até a seção de controle de União da Vitória, é feita a partir da previsão de modelo estatístico

autorregressivo, o qual permite usabilidade até o limite de 48 horas, com intervalos de 12 em 12 horas (ONS, 2025).

A Figura 5 ilustra o hidrograma previsto que considera apenas a porção de montante a União da Vitória. Até o horizonte de 48 horas, há uma previsão pelo modelo autorregressivo com intervalo de 12 horas nos pontos B, C, D e E (Equações 1, 2, 3 e 4). O modelo é considerado a melhor opção de estimativa de previsão do hidrograma, porém, por perder precisão além de 48 horas, utiliza-se a recessão crítica do posto de União da Vitória. Esta metodologia busca dar relevância à recuperação do nível do reservatório após a passagem da cheia. A recessão crítica é estimada a partir da envoltória inferior do histórico de eventos de recessão, considerando o menor volume disponível para o horizonte após 48 horas (ONS, 2025).

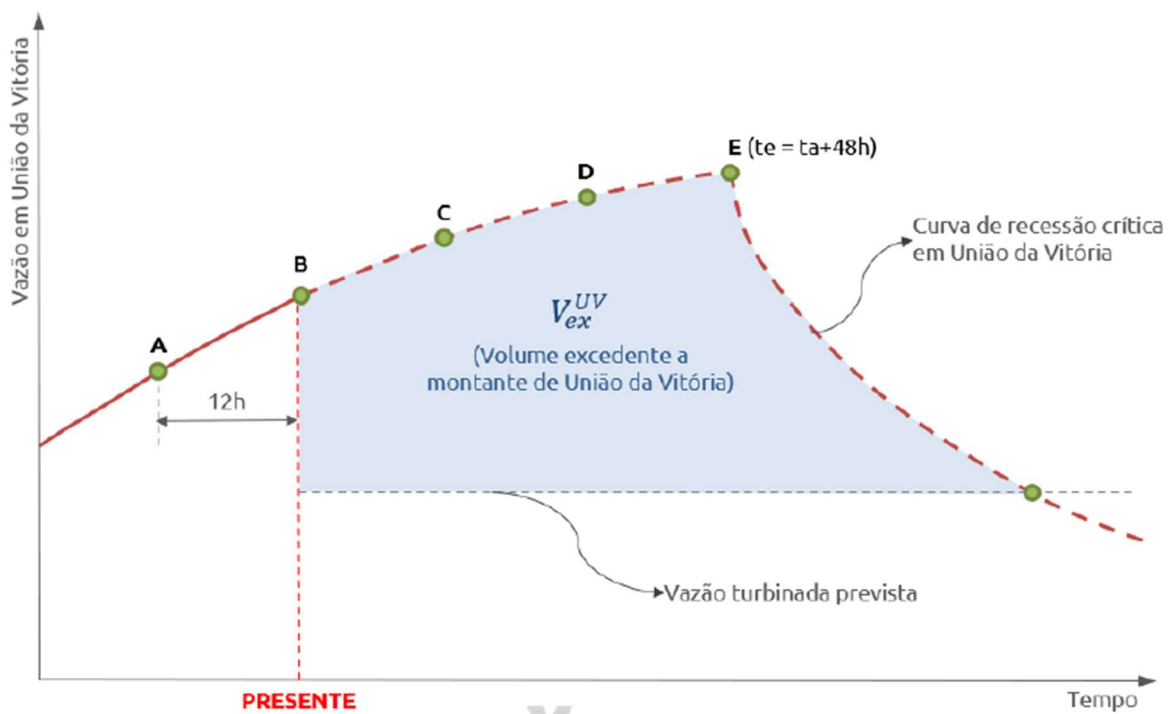


Figura 5 – Hidrograma de volume excedente calculado por União da Vitória.
Fonte: ONS (2025)

Ainda na Figura 5, considerando vazão turbinada constante, o volume da cheia a ser alocado no reservatório é a área entre vazão turbinada e o hidrograma, chamado de Volume Excedente (VE), vazão esta que seria vertida de qualquer maneira, garantindo a recuperação do reservatório ao final da cheia (ONS, 2025).

$$Q_{P(+12h)} = 1,42 Q_{obs(atual)} - 0,25 Q_{obs(-12h)} - 0,17 Q_{obs(-24h)} \quad \text{Eq. 1}$$

$$Q_{P(+24h)} = 1,76 Q_{obs(atual)} - 0,53 Q_{obs(-12h)} - 0,24 Q_{obs(-24h)} \quad \text{Eq. 2}$$

$$Q_{P(+36h)} = 1,97 Q_{obs(atual)} - 0,68 Q_{obs(-12h)} - 0,29 Q_{obs(-24h)} \quad \text{Eq. 3}$$

$$Q_{P(+48h)} = 2,12 Q_{obs(atual)} - 0,79 Q_{obs(-12h)} - 0,32 Q_{obs(-24h)} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo Q_P é a vazão prevista para União da Vitória e Q_{Obs} é a vazão observada para União da Vitória, ambas no instante “ t ”.

De maneira a atingir o objetivo do rebaixamento, um valor de vazão defluente em Foz do Areia deve ser determinado, mantendo vazão defluente acima da vazão afluyente em caso de volume excedente positivo, que indica rebaixamento do reservatório, e vazão defluente inferior à vazão afluyente em caso de recuperação do nível (ONS, 2025).

Para obtenção destes valores, a Equação 5 é aplicada:

$$D_{FA}^{UV} = \frac{V_{EX}^{UV} - V_V}{\Delta t_{reb}} + Q_{FA} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

V_V : Volume vazio real em Foz do Areia

Δt_{reb} : Intervalo de tempo de rebaixamento ou recuperação

Q_{FA} : Vazão afluyente prevista para o reservatório de Foz do Areia

Nesta equação, a variável Δt_{reb} é utilizada, o que significa o período de atingimento do objetivo de volume vazio ou volume de recuperação a ser atingido se a previsão de vazão fosse perfeita. Caso o nível atual do reservatório esteja próximo ao nível máximo, é necessário o rebaixamento com maior velocidade, por isso o valor padrão de Δt_{reb} é de 12 horas e conforme o nível do reservatório diminui, este valor pode ser de até 48 horas. Para recuperação, a metodologia se aplica da mesma maneira. A rápida velocidade de rebaixamento para cotas elevadas faz com que a vazão defluente seja bem maior que a vazão afluyente em janela de tempo de 12 horas, normalmente. Conforme a cota vai baixando, as vazões afluentes e defluyentes ficam mais próximas (ONS, 2025).

A estimativa de volume excedente considerando a área de drenagem total do reservatório de Foz do Areia, considera o mesmo valor de vazão do horário anterior durante o próximo intervalo de tempo de operação, que é no máximo de 4 horas, ao invés do modelo

autorregressivo. Isto se deve a resultados mais instáveis e horizonte de tempo limitado, conforme a Figura 6. O volume excedente é avaliado analogamente à estimativa de União da Vitória (ONS, 2025), conforme Equação 6:

$$D_{FA}^{FA} = \frac{V_{EX}^{FA} - V_V}{\Delta t_{REB}} + Q_{FA} \quad \text{Eq. 6}$$

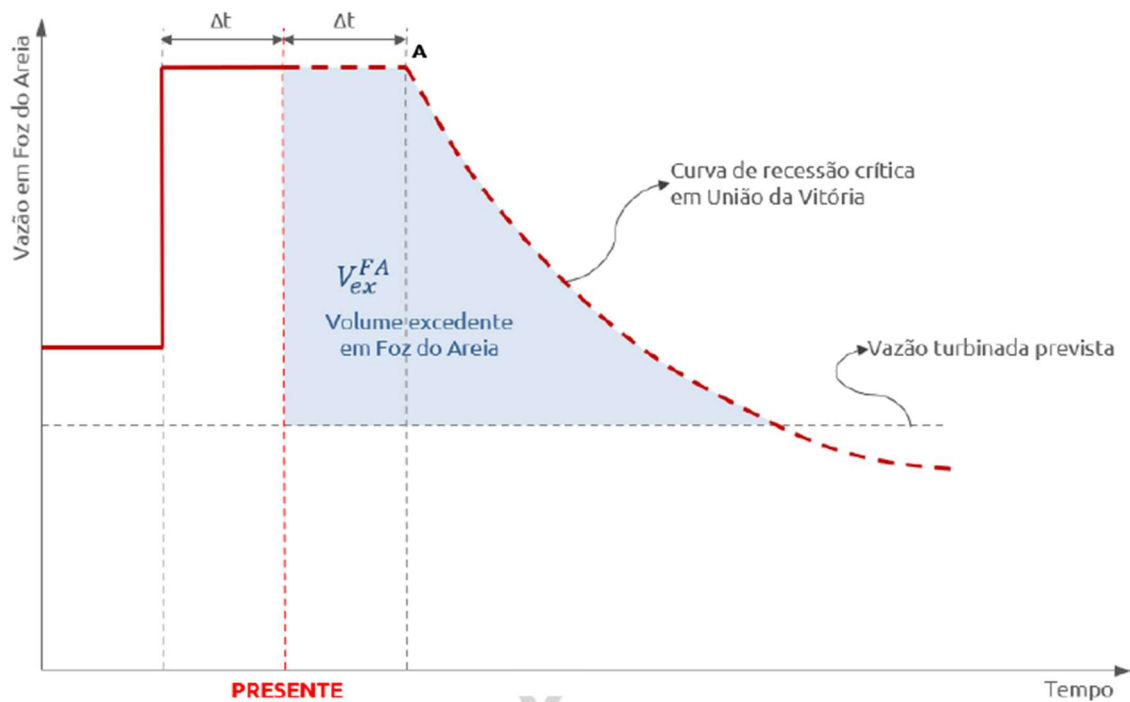


Figura 6 – Hidrograma de volume excedente calculado por Foz do Areia.
Fonte: ONS (2025)

A operação de rebaixamento dinâmico em Foz do Areia é realizada de forma conjunta com o reservatório de Segredo, o qual também tem seu reservatório rebaixado, adicionando volume ao processo, denominado como reservatório equivalente. Esse procedimento é feito por diagrama de operação normal, o que possibilita o aumento das defluências de Segredo de forma antecipada, visando, assim, o abatimento do pico de cheia, atendendo ao importante princípio de que as vazões defluídas em Segredo não sejam superiores à vazão natural que ocorreria no local (ONS, 2025).

A Figura 7 demonstra a forma de determinação da vazão defluente de Segredo, que considera o volume vazio existente nos dois reservatórios, a vazão afluyente natural em Segredo e a curva de recessão crítica das vazões naturais. Assim como feito em Foz do Areia, para

Segredo, considera-se a previsão de mínimo volume afluyente no futuro e define-se a vazão defluente de Segredo (ONS, 2025).

Para determinar a vazão defluente de Segredo, aplica-se a Equação 12, que visa atender à vazão máxima defluente inferior ao que seria observado naturalmente.



Figura 7 – Hidrograma de volume do reservatório equivalente para Segredo.
Fonte ONS (2025)

A operação integrada dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo é decidida em conjunto, levando em conta o princípio físico da continuidade (conservação de massa), a máxima vazão defluente no reservatório de Segredo e as taxas máximas de variação de vazão defluente. Assim, aplica-se a metodologia do rebaixamento dinâmico em Foz do Areia e o diagrama de operação em Segredo (ONS, 2025).

A determinação das vazões defluentes é empregada da seguinte maneira:

Para Foz do Areia pode ser definida pelo método do rebaixamento dinâmico ou pela defluência máxima prevista para Segredo, onde:

D'_{FA} é defluência em Foz do Areia considerando o método do rebaixamento dinâmico e recuperação do reservatório, expressa na Equação 7.

$$D'_{FA} = \max \left[QAP_{NATSG} + \frac{Vmax_{SG} - V_{SG}}{\Delta t} - QA_{NATFA/SG} \right] \quad \text{Eq. 7}$$

D''_{FA} : defluência máxima em Foz do Areia considerando a vazão máxima defluente em Segredo, expressa na Equação 8.

$$D''_{FA} = QAP_{NATFA} + \frac{V_{FA} - Vmax_{FA}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 8}$$

A decisão final de vazão defluente é dada pela regra contida na Equação 9:

$$D_{FA} = \text{mín} [\text{máx} (D'_{FA}, D''_{FA}), D'_{FA}] \quad \text{Eq. 9}$$

Onde na primeira decisão escolhe-se o maior valor de vazão defluente entre a necessária para rebaixamento/recuperação do reservatório e aquela para correção do nível para o máximo normal. Ou seja, limita-se no valor de defluência máxima para jusante do sistema.

A determinação da vazão defluente de Segredo leva em consideração a vazão defluente de Foz do Areia (previamente determinada), a previsão de vazão da bacia incremental entre Foz do Areia e Segredo, o controle de nível do reservatório, o diagrama de operação do reservatório equivalente em Segredo (D'_{SG}) e a vazão defluente máxima prevista, considerada como limite:

Assim, a defluência para controle de nível tem a expressão da Equação 10:

$$D''_{SG} = D_{FA} + QA_{NATFA/SG} + \frac{V_{SG} - Vmax_{SG}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde $D_{FA} + QA_{NATFA/SG}$ é a vazão afluyente média prevista para o intervalo de tempo Δt , sendo a vazão defluente de Foz do Areia somando a previsão da vazão incremental entre Foz do Areia e Segredo.

A decisão final de defluência é dada conforme a Equação 11:

$$D_{FA} = \text{mín} [\text{máx} (D'_{SG}, D''_{SG}), \text{máx} QAP_{NAT}] \quad \text{Eq. 11}$$

Ou seja, aplica-se a maior defluência entre a necessária para manter o nível em torno do máximo normal (D''_{SG}) e o resultado proveniente do “DOeq” (D'_{SG}), limitando-se ao valor da máxima vazão afluyente prevista ($\text{máx} QAP_{NATSG}$) (ONS, 2025).

A previsão de vazão realizada para a região incremental de Foz do Areia e Segredo é igual ao método da incremental entre União da Vitória e Foz do Areia, considerando o último valor calculado para o próximo intervalo de tempo, assim tende-se a minimizar os erros. A

compensação do erro é realizada constantemente ao longo do tempo pelo último termo da expressão da Equação 10.

$$D''_{SG} = D_{FA} + QA_{NATFA/SG} + \frac{V_{SG} - V_{maxSG}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 12}$$

QA_{NAT} – vazão afluente natural

QAP_{NAT} – vazão afluente natural prevista

NA – nível d'água do reservatório

QD – vazão defluente do reservatório

QA_{REG} – vazão afluente regularizada

V – volume armazenado no reservatório

V_{max} – volume no nível máximo do reservatório

Δt – intervalo de tempo para correção do NA

3.3 Modelagem hidrológica e de simulação de operação

O modelo hidrológico chuva-vazão é uma ferramenta amplamente utilizada para representar matematicamente as resultantes referentes aos reflexos de eventos do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, basicamente chuva e vazão. Um dos objetivos principais da modelagem hidrológica é a capacidade de gerar dados futuros a partir de informações de previsão de chuva ou de reconstituição de séries para estudos hidrológicos. Segundo Tucci (1998), é uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

Objetivamente, o modelo hidrológico possibilita o conhecimento da estimativa da precipitação efetiva sobre o terreno dentro da área de drenagem e as análises dos desvios desta representação, permitindo, portanto, a partir de série de dados existente, calibrar o modelo para reproduzir o comportamento das vazões. A depender da complexidade, o modelo pode exigir diversas informações, como declividade, formato da bacia hidrográfica, distâncias e comprimentos de trechos de rios. Ainda, o modelo também pode ser configurado para ajustar o método de propagação dos canais, os métodos de estimativa de perdas e qual o método de transformação chuva-vazão (USACE, 2024).

São diversos os fatores que determinam o quanto será complexa a calibração do modelo. A variabilidade do relevo e tipo de solo, a capacidade computacional pode influenciar

nesta decisão e, também, o tipo de resultado que se espera em virtude do projeto determinado, a quantidade de elementos que irão compor os estudos e familiaridade de manipulação (TUCCI, 2005).

A Figura 8 ilustra o ciclo hidrológico e os componentes do processo. O modelo hidrológico deve representar todas as etapas de forma aderente à maneira que o processo ocorre dentro da bacia. Avalia-se, então, a dimensão de pico de vazão, volume do hidrograma e as fases de elevação e recessão.

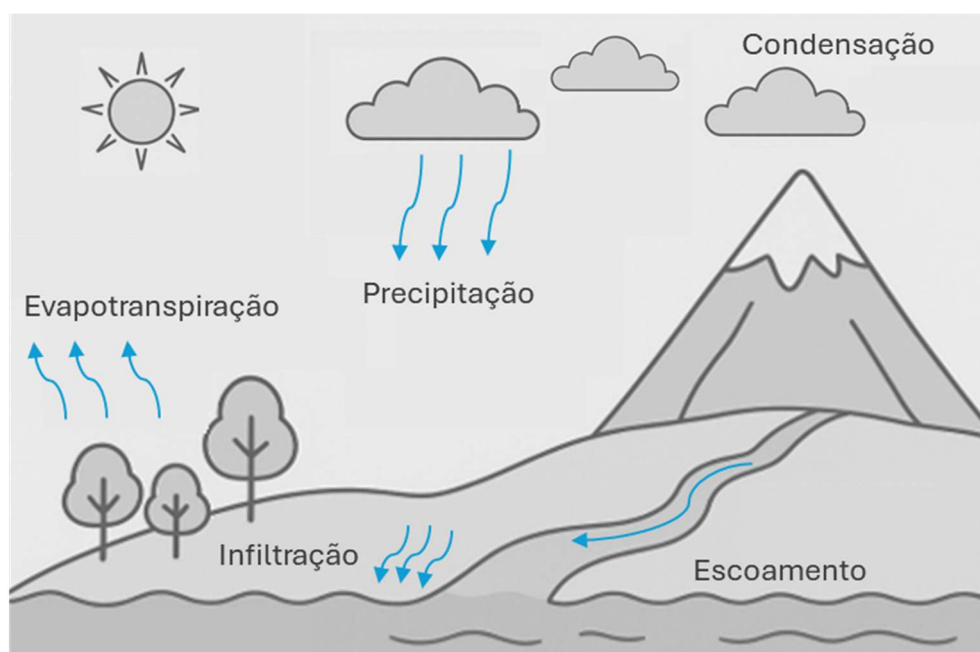


Figura 8 – Ciclo hidrológico. Fonte: O autor.

A associação de previsão hidrológica com operação hidráulica é tratada na Tese de Bravo (2010), intitulada “*Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas*”, a qual apresenta diversas discussões sobre o tema com a profundidade que o assunto requer.

As vantagens da utilização de previsão de vazão na operação hidráulica fazem parte da pesquisa e indicam ganhos na gestão do armazenamento para geração de energia quando associado a conflitos relacionados a usos múltiplos ou em relação à proteção de restrições.

Mine (1998), em sua tese “*Método Determinístico para Minimizar o Conflito entre Gerar Energia e Controlar Cheias*”, utiliza previsão de vazão para tomada de decisão em tempo real para a mesma região objeto desta pesquisa, e conclui ser de extrema importância a previsão de vazão para operação hidráulica de reservatórios, principalmente em locais onde não há sazonalidade definida.

O HEC-HMS, conforme seu Manual de Usuário (2022), foi projetado para simular o processo chuva-vazão de sistemas que compõem as bacias hidrográficas. O software tem se mostrado robusto para representar matematicamente os fenômenos físicos das bacias hidrográficas brasileiras. Diversos estudos têm sido realizados e artigos científicos produzidos, em número superior a vinte nos últimos cinco eventos do simpósio brasileiro de recursos hídricos (ABRHIDRO, 2025).

Por possuir interfaces intuitivas e com diversas possibilidades de contabilizar os diferentes fenômenos, este software se torna atrativo devido à agilidade de alteração de parametrização e, por consequência, calibração de parametrização para diferentes eventos facilitada (FILHO et al., 2012).

O modelo, da maneira que foi trabalhado neste estudo, é classificado como: 1) conceitual, por representar os processos físicos; 2) semidistribuído, pois é dividido por sub-bacia; 3) contínuo em relação à discretização temporal, mesmo que o objetivo seja a representação de evento de cheia. (FILHO et al, 2012)

Para representação do terreno, é possível inserir um MDE – Modelo Digital de Elevação por meio de arquivo de aplicativo GIS, e a partir dele extrair as características fisiográficas, como área de drenagem, declividades e distâncias (USACE, 2024).

O software possui a necessidade básica de parametrização de alguns elementos essenciais para realizar a separação do escoamento superficial e gerar o hidrograma. As perdas devem ser contabilizadas, sejam elas por evapotranspiração, infiltração ou outro tipo. O método de transformação chuva-vazão deve ser determinado conforme o interesse do estudo, contínuo ou evento isolado, por exemplo. Padrão de vazão de base para o modelo partir de patamar de umidade coerente e o método de propagação ao longo dos trechos de rio (Usó, 2020). Assim, é possível verificar a chuva efetiva e, utilizando sempre o preceito de que o modelo hidrológico deve ser o menos complexo possível (USACE, 2024; TUCCI, 2005).

Os reservatórios para geração de energia possuem regras bem definidas de operação hidráulica voltadas para tomadas de decisão, que contemplam os diferentes olhares dos usos múltiplos das águas. O ONS é o responsável pela supervisão da gestão destes reservatórios, nos quais os agentes devem manter os cadastros atualizados.

Diferentes metodologias podem ser adotadas em virtude das características dos projetos, do padrão de comportamento do clima e de restrições existentes. Em âmbito de projeto, é possível obter uma metodologia operacional prévia a partir das características construtivas, como capacidade de vertimento e de turbinamento, faixa operativa e sazonalidade

pluviométrica, porém os usos múltiplos exigem adaptações que, normalmente, restringem as capacidades projetadas (JAIN et al., 2023).

Por meio de simulações são avaliadas as possibilidades operacionais para atendimento a diferentes cenários hidrológicos ou de uso dos recursos hídricos. Um município que passe a utilizar as águas de um reservatório para abastecimento após o empreendimento ter sido concebido com proposta inicial meramente para geração de energia, em caso de escassez hídrica, este uso deve ser levado em consideração, com apropriada gestão dos recursos para evitar impactos significativos nos diferentes usos (UYSAL et al., 2016).

A simulação se baseia na parametrização de elementos e, a partir de cenários construídos pelo hidrólogo, traduzidos em hidrogramas de entrada, em virtude das observações existentes ou estudos de frequência de cheias e estiagens. A partir de simulações, análises e ressimulações, obtém-se os níveis metas ou curvas-guias (USACE, 2021).

Um exemplo prático de aplicação de utilização das curvas-guia é em local com sazonalidade pluviométrica definida, em determinada época do ano, o reservatório deve permanecer com volume vazio para absorver eventuais cheias durante o período úmido e evitar sobre-elevação dos níveis. Este é um exemplo de proteção da estrutura caso entre uma precipitação anormal ao mesmo tempo que se garante a recuperação do nível do reservatório ao final do período úmido para entregar energia durante o período seco, além de regularizar as vazões para jusante. (USACE, 2021)

O modelo de simulação de reservatório, HEC-ResSim, é um sistema de simulação de reservatórios e foi projetado para modelar a operação hidráulica de um ou mais reservatórios para atendimento a diferentes metas e restrições operacionais, sejam elas temporárias ou permanentes. O software possibilita simular operações para eventos de cheias e estiagens históricas, para estudos, planejamento de regulação e suporte à decisão em tempo real. Pode representar apenas um reservatório ou sistema de reservatórios por meio de rede de trabalho com elementos que pode ser construída pelo operador (USACE, 2021).

A metodologia de cálculo do software é pelo balanço de massa, que leva em consideração as vazões afluentes ao reservatório e defluentes em função do armazenamento. Para os reservatórios de geração de energia, é esperado que sejam conhecidos os armazenamentos em relação ao nível do reservatório, chamada curva cota x volume, as relações de nível do reservatório x vazão vertida e as relações de nível do reservatório x vazão turbinada ou produção em Megawatts (MW) (SORACHAMPA et al, 2020).

Para o simulador, é necessário ter em mãos os dados característicos dos reservatórios e barragens para parametrização das simulações realizadas no software HEC-ResSim, além de

dados de faixa operativa, nível do coroamento e largura da barragem. Também é necessário conhecer as restrições existentes na operação do sistema de reservatórios (USACE, 2021).

A presente pesquisa tratou de gerar os hidrogramas afluentes de entrada para os reservatórios pelo modelo hidrológico HEC-HMS para precipitações de diferentes tempos de retorno pelo método dos blocos alternados, com discretização diária. Este é um requisito fundamental para realização de simulações no HEC-ResSim. Este método foi utilizado por Duraisekaran, et al. (2025), que calibraram e validaram hidrogramas de entrada para diferentes tempos de retorno com o mesmo modelo.

Os hidrogramas são gerados e inseridos no software e o simulador, a partir da parametrização dos dados característicos, indica as vazões defluentes e o nível do reservatório para atendimento a critérios preestabelecidos, pelo método de conservação de massa (SORACHAMPA et al., 2020).

O software apresenta interface amigável e se divide em três módulos, sendo dois de configuração e um de simulação.

O primeiro módulo é o chamado *Watershed Setup* (Configuração da bacia hidrográfica). Ambiente onde o operador deve inserir os elementos da bacia hidrográfica, como os alinhamentos da rede de drenagem, os pontos referentes às seções de controle e os reservatórios a serem simulados. Esta implementação resulta em um banco de dados a ser utilizado na próxima etapa e fica salvo em um ambiente de configuração, o qual será importado no próximo passo. É possível importar o contorno da bacia hidrográfica, a drenagem e os pontos relativos às seções de controle a partir de arquivos *Shapefile*, para que possibilite ao operador obter proporção e visualização espacial, além de ilustração em caso de necessidade de geração de relatórios (SAHS, SAHOO, RAGUWANSI, 2022; USACE, 2021).

O segundo módulo é o *Reservoir Network* (Rede de reservatórios). Ambiente onde o operador insere as características físicas dos empreendimentos, como dados de barragem, reservatório, vertedouro, casa de força e as faixas operativas entre níveis máximos e mínimos. Também são determinadas as zonas de operação em virtude do interesse das simulações e das restrições existentes a serem atendidas. E, como preparação para a próxima etapa, cria-se o que os proprietários do software chamaram de Alternativas, onde se configura a discretização temporal, a associação do reservatório às zonas de operação, as condições iniciais das variáveis a serem simuladas e as séries de dados de entrada. Esta configuração serve de base para o próximo ambiente, que é o simulador (MESKR et al., 2024).

O terceiro módulo é o *Simulation* (Simulação). Ambiente onde o operador insere o nome da simulação, as datas de início, de aquecimento e fim da simulação com base na

alternativa configurada na seção anterior. Para realizar diferentes simulações, o software permite que o operador realize tentativas com diferentes configurações que podem ser feitas no próprio ambiente de simulação (WEBNU et al., 2024).

O software gera gráficos de visualização e exportação de tabelas para manuseio em planilhas. Além de preservar as simulações no ambiente onde o projeto foi criado na raiz do computador (WORKU et al., 2023; USACE, 2021).

Um exemplo para fácil compreensão é caso a vazão de entrada ao reservatório seja superior à máxima capacidade de liberação e a simulação inicie no nível máximo. Haverá sobre-elevação do nível do reservatório para patamares acima do nível máximo. Assim, é possível retornar aos parâmetros iniciais e realizar nova simulação alterando o nível inicial do reservatório e concluir qual nível do reservatório suporta a cheia da magnitude simulada sem que ultrapasse o nível máximo.

A operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, por estarem localizados em região de incertezas de previsibilidade pluviométrica (ONS, 2025), demanda metodologia bem definida e robusta. Com o aperfeiçoamento dos instrumentos de previsão meteorológica e medição, atualmente é possível estimar eventos com maior confiabilidade e adotar medidas de mitigação de impactos em regiões de influência dos empreendimentos (BRAVO, 2010).

O simulador leva em consideração as condicionantes existentes nas áreas de influência dos reservatórios, de modo a sugerir operações que não infrinjam esses limites ou identificar situações em que a operação hidráulica não será capaz de impedir que um evento meteorológico cause efeitos não desejados a uma determinada região, possibilitando análises de estudo de mitigação de riscos (JAIN et al., 2023).

Os softwares de autoria do Centro de Engenharia de Hidrologia (HEC) do Corpo de Engenheiros das Forças Armadas Americanas (USACE) utilizam um padrão de banco de dados produzido especificamente para promover a integração entre diferentes ambientes, seja para simulação hidrológica, simulação hidráulica ou, neste caso, o simulador de operação hidráulica (MESKR et al., 2024). Chama-se HEC-DSSVue e permite a inserção de dados de outras fontes, como planilha Excel, e permite a rápida verificação gráfica para eventual tratamento ou substituição de dado ruim ou reprovado. Neste aplicativo são criados arquivos com os hidrogramas de saída do HEC-HMS e de entrada aos reservatórios (MESKR. et al., 2024)

A inserção e distribuição dos elementos previamente determinados que compõem o projeto e as fases de preparo e configuração devem seguir uma lógica física de encadeamento para reproduzir os fenômenos da bacia hidrográfica (WUBNEH et al., 2024).

Quadro 3 - Elementos para simulação

Elemento	Função
Computation Point (Seção de controle)	quantificar vazões e conectá-las a outros elementos.
Reach (Trecho de rio)	propagar as vazões entre elementos.
Reservoir (Reservatório)	receber vazão do trecho de rio de montante e, com as características físicas inseridas, propiciar a simulação da operação hidráulica diante das zonas e regras cadastradas.
Diverted Outlet Tool (Desvio)	transferir vazões entre rios paralelos. Neste caso o elemento foi utilizado para desviar águas do rio Jordão para o reservatório de Segredo.

Fonte: USACE (2021)

Segundo os estudos de Hafez, et al. (2024) e Singh, et al. (2025), ao implementar um complexo de geração de energia que mantém um reservatório, seja ele de acumulação ou fio d'água, é necessário estipular regras de operação que visam, em situações normais, privilegiar a disponibilidade dos recursos hídricos para geração de energia e atendimento ou proteção de outros interesses e usos. Porém, na relação existente nos reservatórios para armazenamento voltado para geração de energia e proteção para o caso de cheias, conforme alertam Dash, Sahoo e Raguwanshi (2022), Meskr et al. (2024) e Jain et al. (2023), esta gestão pode ser conflitante.

4. Metodologia

A pesquisa objeto desta dissertação é elaborada com base em revisão bibliográfica relacionada a metodologias para operação hidráulica de reservatórios voltadas para geração de energia, estudos de simulações de regras operativas através da utilização dos softwares HEC-HMS e HEC-ResSim, ambos voltados para assimilação de informações de dados hidrológicos e hidráulico-operativos.

Os modelos desenvolvidos pelo Centro de Engenharia de Hidrologia (HEC) do Corpo de Engenheiros das Forças Armadas Americanas (USACE) têm por objetivo colaborar com a gestão dos recursos hídricos, com pesquisas e divulgação permanente de publicação de material técnico. Englobam desde o tratamento de dados hidrológicos e meteorológicos até aplicativos para monitoramento e tomada de decisão (HEC).

Para executar os softwares, faz-se necessária a utilização de dados hidrológicos, geoespaciais, hidráulico-operativos e parâmetros característicos dos reservatórios e barragens. Os dados hidrológicos são disponibilizados para consulta no Portal Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e no banco de dados do Instituto Água e Terra (IAT), órgão gestor da rede hidrológica do Estado do Paraná. Ainda, alguns dados hidrológicos também são disponibilizados para consulta no banco de dados do Sistema Meteorológico do Paraná – Simepar, responsável pela operação da rede de telemetria dos empreendimentos objeto deste estudo.

Os dados geoespaciais para geração de mapas de localização e levantamento das características das bacias hidrográficas foram gerados via QGis, software de Sistema de Informações Geográficas (SIG), com base de dados SRTM, via Plugin *OpenTopography*. Ainda, foram utilizadas informações da base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Os dados hidráulico-operativos e parâmetros característicos foram consultados em banco de dados interno do agente operador das UHEs, Copel – Companhia Paranaense de Energia, o qual detém estudos e informações relevantes sobre a operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo.

A Figura 9 ilustra um fluxograma sequencial da metodologia adotada.

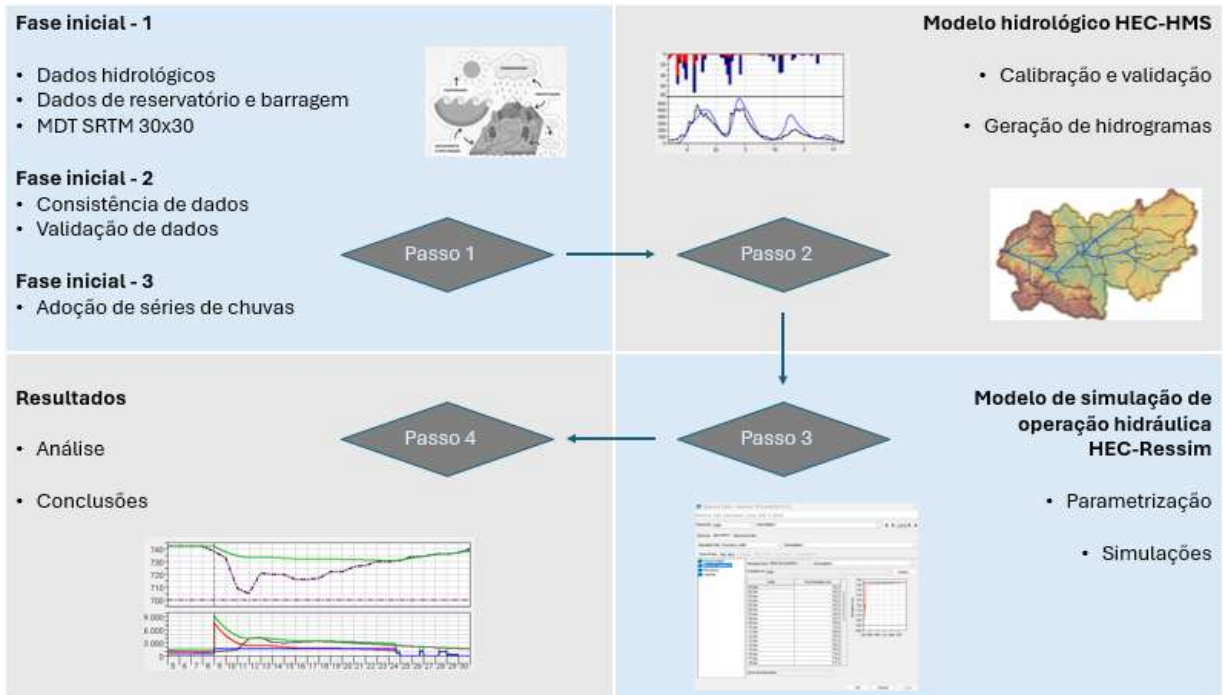


Figura 9 – Fluxograma da metodologia

4.1 Área de Estudo

A bacia do rio Iguaçu está localizada, principalmente, no estado do Paraná e drena suas águas no sentido oeste até desaguar no rio Paraná, na Tríplice Fronteira entre Brasil, Paraguai e Argentina. Com suas nascentes na face ocidental da Serra do Mar, na região metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, a bacia hidrográfica inicia com grande declividade e cruza por cidades de grande densidade populacional, principalmente a região metropolitana de Curitiba. Ainda na região da capital paranaense, as características de planície da bacia se iniciam, com declividade menos acentuada, percorrendo grande trecho com baixa declividade, chamado de Alto Iguaçu. Já na região de Porto Vitória, se inicia a porção média do rio Iguaçu, onde está localizada a transição do segundo para o terceiro planalto e se observa o aumento da declividade, favorecendo a utilização das quedas para geração de energia hidráulica (MINE, 1998). Já na região do Baixo Iguaçu, percebe-se novamente a diminuição da declividade, com exceção da queda mais expressiva, denominada Cataratas do Iguaçu, até desaguar no rio Paraná, confluência localizada a jusante da UHE Itaipu.

A Figura 10 ilustra de forma esquemática o perfil longitudinal do rio Iguaçu com o detalhamento da declividade e os aproveitamentos hidrelétricos.

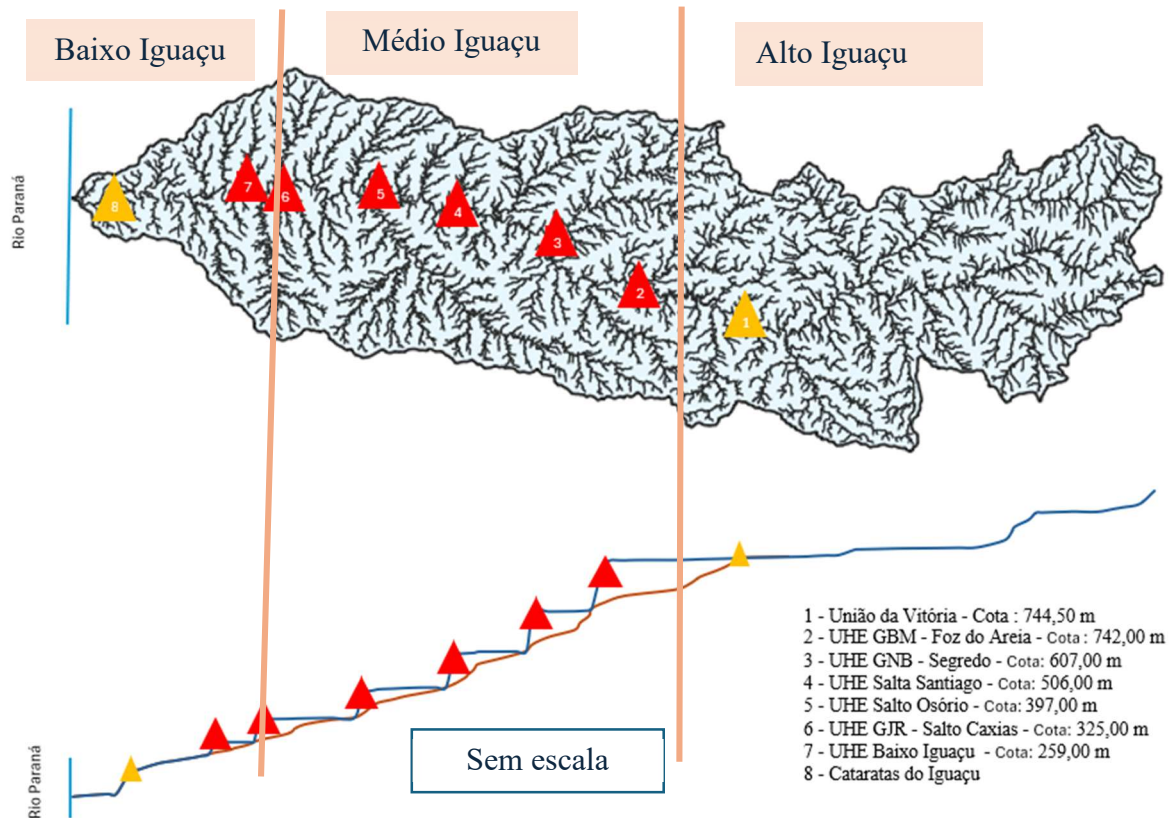


Figura –10 Perfil longitudinal do rio Iguaçu.
 Fonte: SRTM (2000), SNIRH (2017)

Com área de drenagem total de 70.799 km², sendo 80,4 % desta área no Paraná, 16,5 % em Santa Catarina e 3 % na Argentina, representa em torno de 28 % da área total do estado do Paraná (IAT, 2020). Com largura média¹ no Alto Iguaçu em torno de 100 km, no Médio e Baixo Iguaçu de 130 km, comprimento total de 1320 km (IAT, 2020) e desnível total¹ de aproximadamente 800 m, representa 28% de todo consumo de água do Paraná (IAT, 2020) e 49,19 % da capacidade de geração do sul do país. O subsistema sul, por sua vez, representa 7 % do armazenamento do SIN (ONS, 2024b).

A Figura 11 ilustra a localização da bacia do rio Iguaçu no estado do Paraná e na bacia hidrográfica do rio Paraná.

¹ Extraído de ferramenta SIG. Fonte: O autor (SRTM 30m).

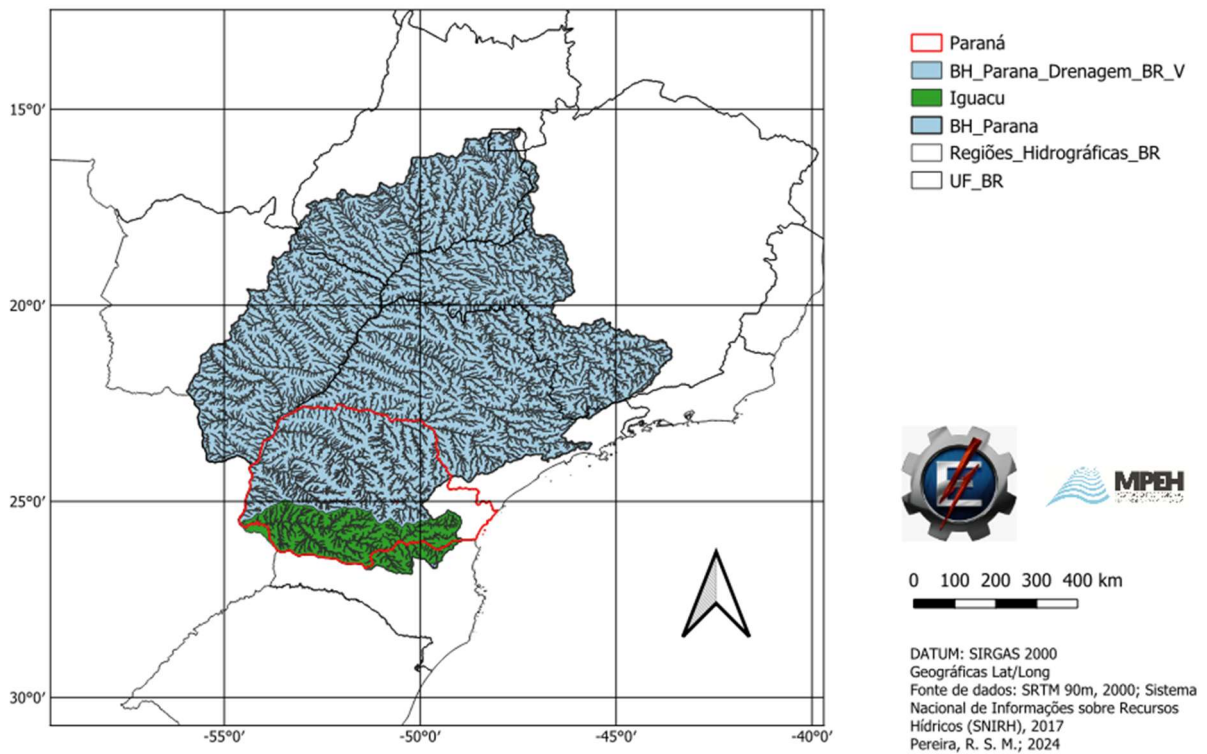


Figura –11 Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Iguazu.
 Fonte: SRTM (2000), SNIRH (2017)

Na sua porção média, se concentram as usinas hidrelétricas aproveitando os potenciais energéticos das quedas da região para gerar energia elétrica (Mine, 1998). São seis usinas hidrelétricas de grande porte, com total de capacidade de geração aproximada de 7.000 MWh, conforme se pode verificar nas Tabelas 1 e 2:

Tabela 1: Dados característicos dos reservatórios e usinas.

Reservatório	Usina	Rio	Latitude	Longitude	Classificação	Regularização	Potência (MW)	Início de operação
Foz do Areia	UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto	Iguaçu	26° 00' 37" S	51° 39' 54" W	Regularização	Mensal	1676	1980
Segredo	UHE Gov. Ney Aminthas de Barros Braga	Iguaçu	25° 47' 35" S	52° 06' 47" W	Regularização	Mensal	1260	1992
Derivação do rio Jordão	Desvio do Jordão	Jordão	25° 45' 26" S	52° 05' 13" W	Fio d'água	Mensal	6,5	1997
Salto Santiago	UHE Salto Santiago	Iguaçu	25° 36' 44" S	52° 36' 53" W	Regularização	Mensal	1420	1979
Salto Osório	UHE Salto Osório	Iguaçu	25° 32' 18" S	52° 00' 35" W	Fio d'água	Diária	1103	1975
Salto Caxias	UHE Gov. José Richa	Iguaçu	25° 32' 34" S	53° 29' 28" W	Fio d'água	Diária	1240	1998
Baixo Iguaçu	UHE Baixo Iguaçu	Iguaçu	25° 30' 12" S	53° 40' 18" W	Fio d'água	Diária	350,2	2018

Fonte: ONS (2025)

Tabela 2: Dados atemporais dos empreendimentos.

Reservatório	Nível (m)			Área de drenagem (km ²)				Extravasoares		Nível da crista da soleira
	Mínimo operativo	Máximo operativo	Máximo <i>Maximorum</i>	Coroamento	Canal de Fuga (média)	Área total	Área Incremental	Número de comportas	Capacidade	
Foz do Areia	700,00	742,00	745,00	748,00	602,00	30.127	-	4	10.000	725,50
Segredo	602,00	607,00	608,00	610,00	490,00	34.346	4.219	6	16.200	587,00
Derivação do rio Jordão	602,00	610,00	614,80	615,00	538,35	4.730	640	Soleira livre	7.080	610,00
Salto Santiago	481,00	506,00	509,00	510,00	397,00	43.852	4.776	8	27.830	486,00
Salto Osório	389,00	397,00	398,00	401,00	324,00	45.769	1.917	9	27.000	377,00
Salto Caxias	323,00	325,00	326,00	328,00	259,00	56.977	11.208	14	47.500	305,00
Baixo Iguçu	258,00	259,00	261,60	263,00	243,06	61.580	4.603	16	53.585	241,50

Fonte: ONS (2025)

No estado do Paraná atuam dois tipos climáticos predominantes, o Cfa e o Cfb. O primeiro se caracteriza pela constância da umidade em todas as estações do ano e verão quente. O segundo se caracteriza por ser úmido ao longo de todo o ano, mas com verão quente moderado. (APARECIDO et al., 2016).

A climatologia do Paraná indica, portanto, possibilidade de eventos de chuva ou seca significativos ao longo de todo o ano, não sendo observada sazonalidade pluviométrica (HOFFMANN, MENDONÇA, GOULARD, 2017)

Cabe ressaltar também que eventos de seca extrema têm sido registrados nas últimas décadas, com eventos de apelo nacional devido a impactos observados diretamente na sociedade, com racionamento e rodízio no fornecimento de água e necessidade de importação de energia de outras regiões do país por longo período devido a baixos volumes dos reservatórios de geração de energia.

A Figura 12 ilustra os dados históricos médios e máximos mensais de chuva e vazão do posto fluviométrico de União da Vitória, do período de 1938 a 2023 para chuva e 1931 a 2023 para vazão, que representa o comportamento hidrológico médio da região. Pode-se observar ocorrência de vazões máximas elevadas em todas as épocas do ano, assim como grandes acumulados de chuva a qualquer tempo. E a regularidade dos dados médios mensais de chuva e vazão.

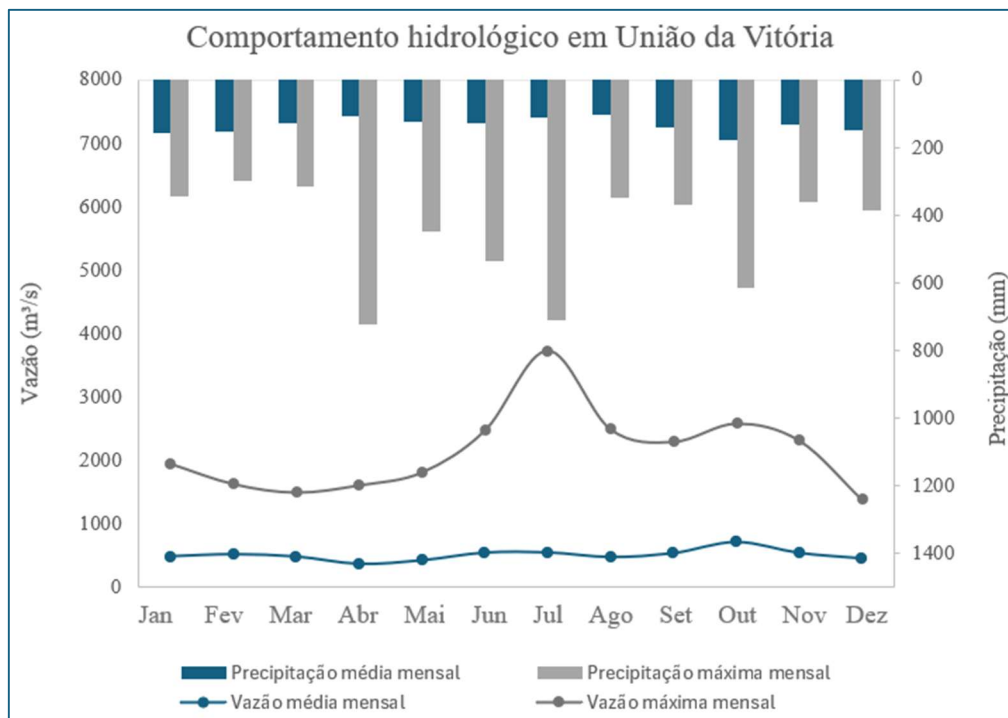


Figura –12 Comportamento mensal de chuva e vazão em União da Vitória.

Fonte: ANA (2024)

O comportamento das vazões do rio Iguaçu vem sofrendo alterações ao longo do tempo, diante da implantação das usinas hidrelétricas, que, regularizam as vazões desde o primeiro reservatório até o exutório da bacia. Esta regularização, de forma geral, traz benefícios para bacia hidrográfica, pois amortece grandes cheias e mantém vazões mais estáveis por maior tempo em casos de estiagem severa (USACE, 2017).

Como forma de ilustrar o impacto benéfico da implementação de um empreendimento gerador de energia, a vazão de longo termo (MLT) da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto é de 644 m³/s, sendo que em 40% do tempo a vazão afluyente supera esse valor, mas a vazão defluente permanece acima ou próxima a esse valor por 50% do tempo. Assim, como este reservatório é de regularização, o restante da bacia se beneficia com a estabilidade das vazões. Ainda, pode-se observar que sempre que ocorrem estiagens, o reservatório é consumido gradualmente para possibilitar a estabilidade dos níveis para jusante com vazão suficiente para manter o interesse de outros usos.

A Figura 13 ilustra a permanência das vazões afluentes e defluentes no reservatório, onde é possível perceber a maior permanência das vazões defluentes próximas da MLT. As frequências acima de 10% e inferiores a 90% foram excluídas, pois tecnicamente não podem ser comparadas, seja por representarem distorções em grandes cheias ou grandes estiagens.

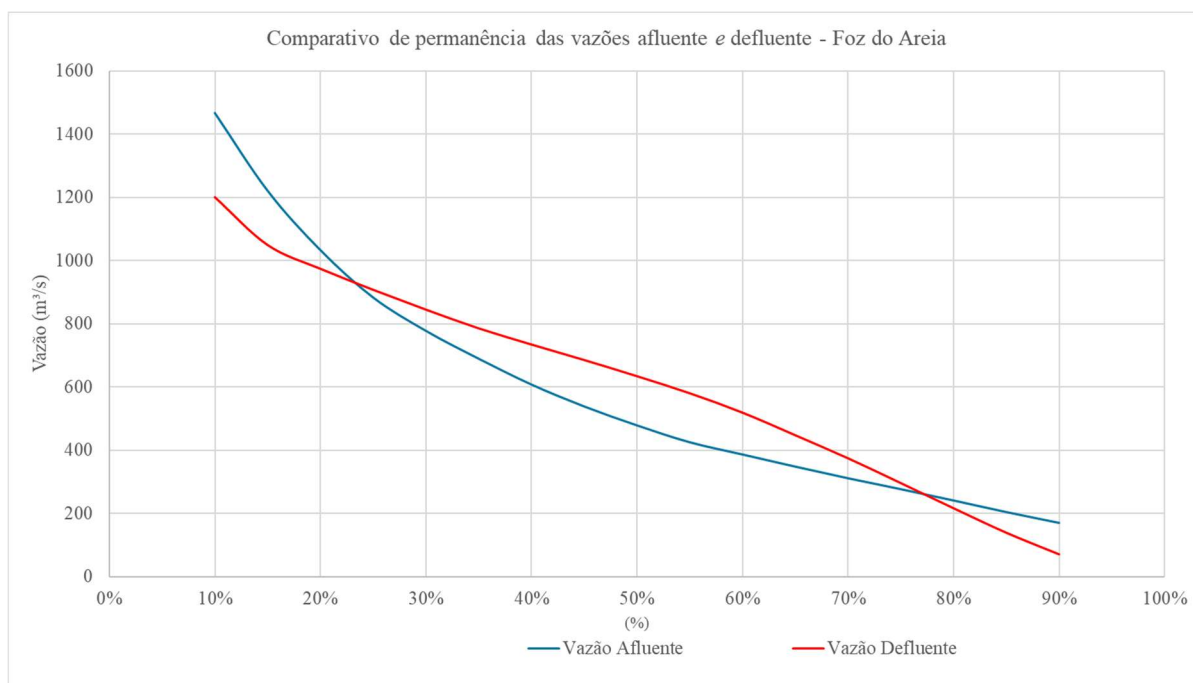


Figura 13 – Curvas de permanência das afluências e defluências de Foz do Areia.
Fonte: ONS (2023)

As áreas de análise deste trabalho são a região de montante do reservatório de Foz do Areia e a área incremental entre Segredo e Foz do Areia.

Para a região de montante do reservatório de Foz do Areia, é importante a compreensão da mudança de característica da bacia hidrográfica existente entre o reservatório de Foz do Areia e o município de União da Vitória, bem como os efeitos que o remanso do reservatório pode exercer no local.

A região incremental entre Segredo e Foz do Areia possui características similares à área entre Foz do Areia e União da Vitória, com grande declividade e pouca capacidade de retenção de água no solo, o que proporciona rápida resposta da chuva no escoamento superficial (MINE, 1998).

É histórico, em eventos de grande magnitude às áreas dos reservatórios apresentarem vazões significativamente superiores às vazões da área de montante de União da Vitória. Isto se deve às características de declividade e do solo, mas também as características dos tipos de eventos meteorológicos mais significativos já ocorridos, os quais, normalmente, ficam estacionários na região do médio Iguaçu, onde estão implementados os reservatórios da cascata de usinas hidrelétricas.

Na região incremental está localizado o chamado Desvio do Rio Jordão, o qual foi construído para o melhor aproveitamento energético das águas advindas da bacia hidrográfica do rio Jordão, afluente ao rio Iguaçu pela margem direita, entre os reservatórios de Salto Santiago e Segredo. A 5 quilômetros a montante da foz do rio Jordão, está localizado o reservatório chamado de Desvio do Rio Jordão, projetado para acumular recursos a serem transferidos ao reservatório de Segredo, no rio Iguaçu, para geração na UHE Governador Ney Braga.

4.2 Modelo Hidrológico HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS possibilita a configuração da modelagem a partir de inserção de parâmetros em interface de configuração. A ideia de que o modelo hidrológico deve ser o mais simples possível dentro da complexidade que as características da bacia hidrográfica exigem e de que o projeto exige, reflete muito bem na interação do hidrólogo com o software (TUCCI, 2005).

O modelo, da maneira que foi trabalhado nesta pesquisa, é classificado como: 1) complexo, por representar os processos físicos; 2) semidistribuído, pois é dividido por sub-bacia; 3) contínuo em relação à discretização temporal, mesmo que o objetivo seja a representação de evento de cheia (TUCCI, 2005).

Os resultados para os pontos de interesse desta dissertação são classificados conforme Moriasi et al. (2015) e Moriasi et al. (2007).

Tabela 3 - Métricas de avaliação do modelo hidrológico

PERFORMANCE	R ² (2015)	NSE (2015)	RSR (2007)	PBIAS (2015)
MUITO BOM	0,85 < R² < 1,0	0,8 < NSE ≤ 1,0	0 < RSR ≤ 0,5	PBIAS < ±5
BOM	0,75 < R² < 0,85	0,7 < NSE ≤ 0,8	0,5 < RSR ≤ 0,6	± 5 < PBIAS ≤ ±10
SATISFATÓRIO	0,60 < R² < 0,75	0,5 < NSE ≤ 0,7	0,6 < RSR ≤ 0,7	±10 < PBIAS ≤ ±15
NÃO SATISFATÓRIO	R² ≤ 0,60	NSE ≤ 0,50	RSR > 0,7	PBIAS ≥ ±15

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015)

Para possibilitar que o modelo hidrológico represente os fenômenos da bacia hidrográfica, são necessários dados confiáveis. Para tanto, devem passar por análises para atestar que as informações são consistentes para serem utilizadas na calibração do modelo.

Basicamente, são necessários dados de topografia do terreno, para possibilitar o conhecimento das características fisiográficas da bacia hidrográfica; de pluviometria da região, para obter o comportamento da chuva em cada evento, e dados fluviométricos de seções de controle, tanto série histórica para verificação da qualidade das simulações quanto da geometria das seções.

A Figura 14 demonstra de forma simplificada o fluxograma de utilização do software HEC-HMS.

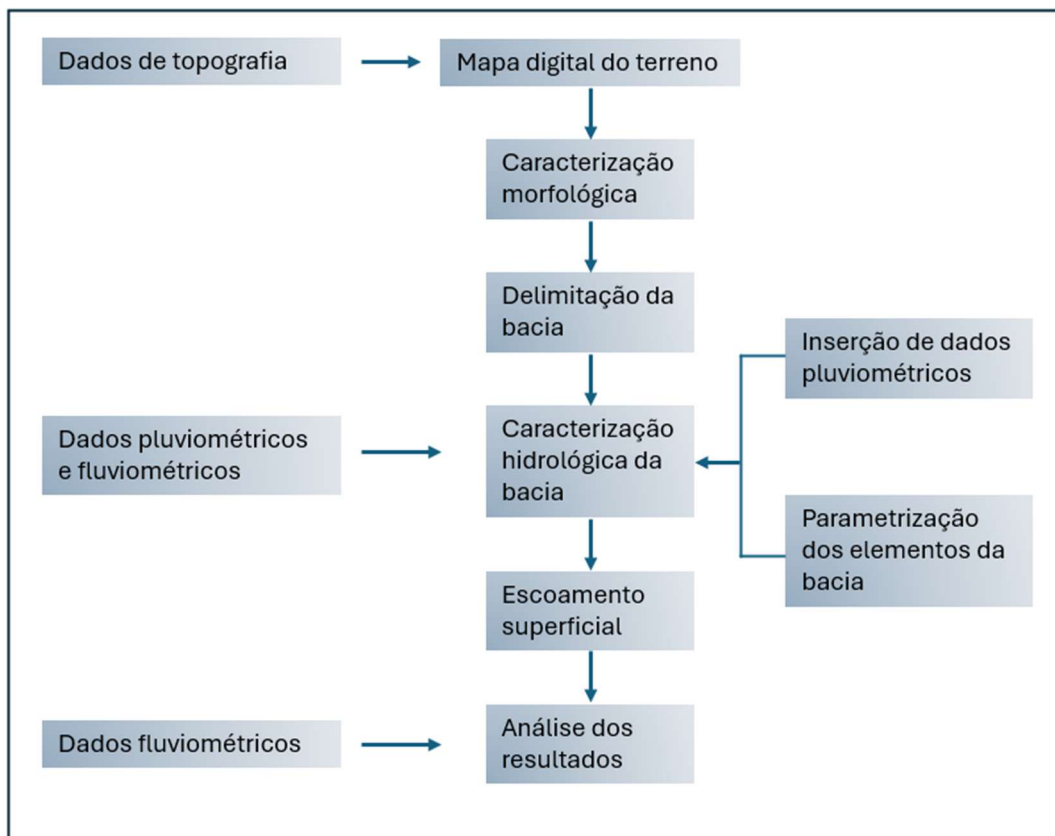


Figura 14 – Fluxograma de funcionamento do modelo HEC-HMS

4.2.1 Levantamento de dados

As características físicas da bacia devem ser inseridas ou representadas de alguma maneira no software. Para representar as características de terreno, foi obtido o Modelo Digital de Elevação (MDE) por meio dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com discretização espacial de 30 m x 30 m. O projeto SRTM foi uma missão de levantamento de dados topográficos de alta resolução de escala global que durou 11 dias em fevereiro de 2000. É um projeto internacional liderado pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) e National Aeronautics and Space Administration (NASA) (OPENTOPOGRAPHY, 2024).

Com auxílio do Software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS, obteve-se o recorte do MDE da região de interesse para posterior processamento no HEC-HMS. De modo a facilitar as análises e a compreensão dos fenômenos físicos da bacia hidrográfica, houve a divisão em trechos, conforme a Figura 15.

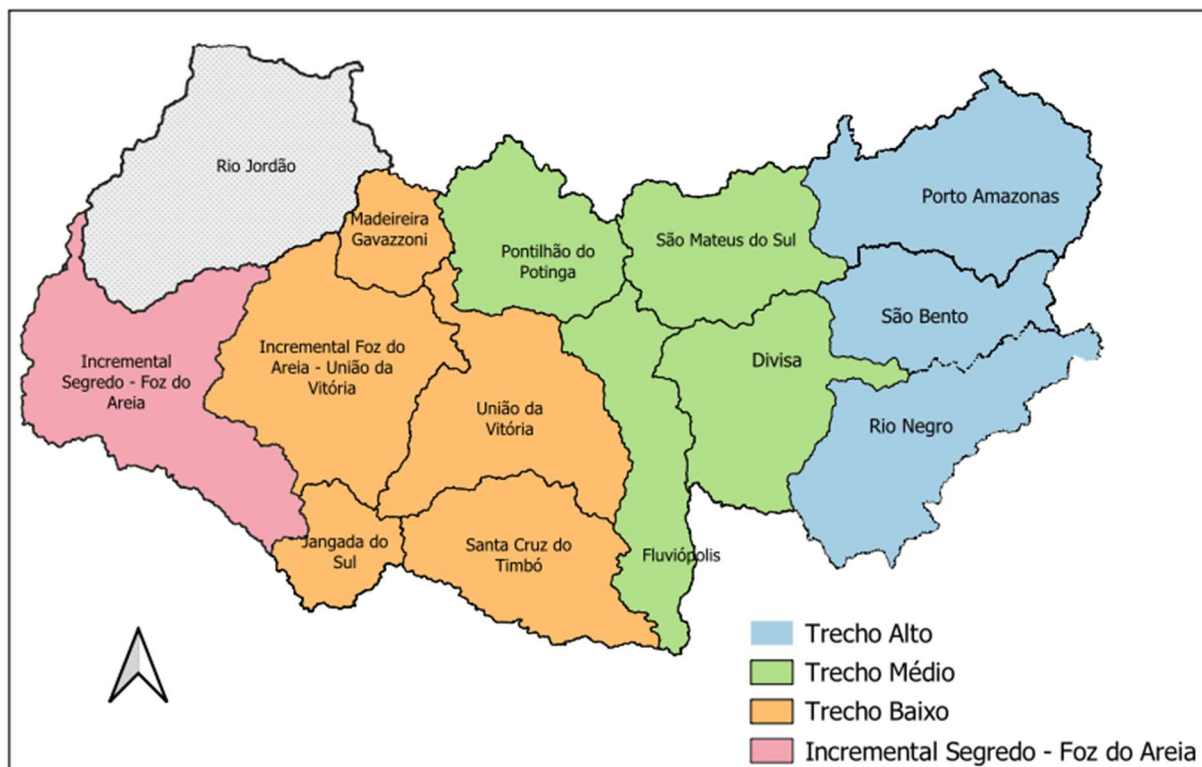


Figura 15 – Subdivisão em trechos

Esta subdivisão se deve à forma como os eventos meteorológicos ocorrem na região, normalmente com início e maior intensidade na região entre os Trechos Baixo e Incremental Segredo – Foz do Areia, o que possibilita a rápida ascensão do hidrograma nos reservatórios. O restante da bacia hidrográfica contribui para manter os níveis elevados por tempo prolongado, principalmente na região de União da Vitória, em virtude das características físicas do rio.

Conforme Tucci (2005) alerta, uma bacia hidrográfica com mudanças nas características do terreno ao longo do percurso, deve ser mais bem detalhada, aconselhando a utilizar modelo distribuído ou semidistribuído, com a devida atenção. Portanto, a modelagem, para a região de montante da bacia de Foz do Areia, por possuir diferentes declividades e armazenamentos em áreas laterais, demanda atenção. Ainda, na região em que os reservatórios estão inseridos, a variabilidade meteorológica também é um fator que chama atenção.

As Figuras 16, 17, 18 e 19 ilustram o comportamento padrão dos eventos de chuva significativos que ocorrem na região. Em geral, os eventos atmosféricos ocorrem com maior expressividade no sentido oeste para leste. Os acumulados de chuva dos gráficos são as médias para os trechos Alto, Médio e Baixo para os eventos de cheia de 1983, 1992, 2014 e 2023.

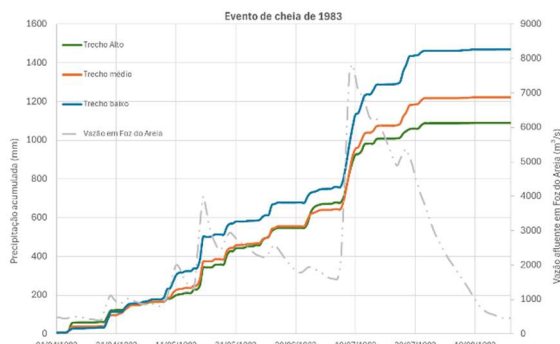


Figura 16 – Cheia de 1983

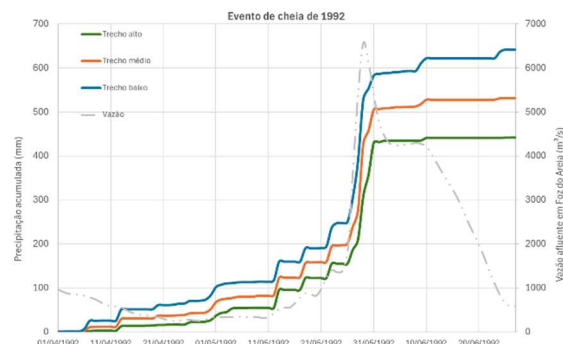


Figura 17 – Cheia de 1992

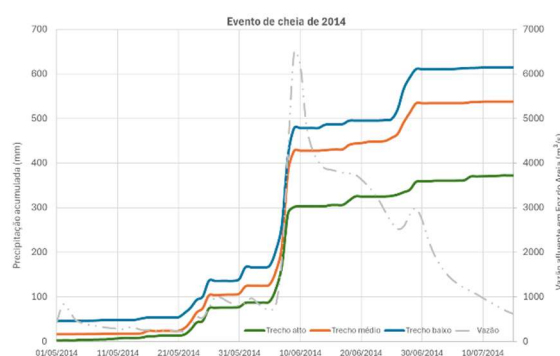


Figura 18 – Cheia de 2014

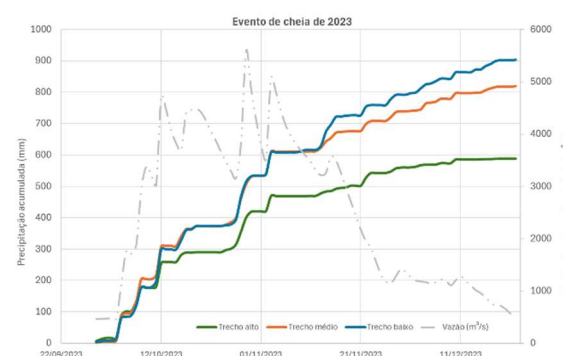


Figura 19 – Cheia de 2023

Para levantamento das estações de chuva localizadas na bacia hidrográfica, foi utilizado o software QGis, especificamente o Plugin ANA, que permite identificar as estações hidrométricas localizadas em uma determinada região delimitada por polígono e exportar suas informações de código, coordenadas, data de início e fim da série, para, posteriormente, consultar o banco de dados da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA) para seleção das estações elegíveis.

Após esse processo, foi realizado o download dos dados e a análise das séries para determinação final das estações a serem utilizadas, para posteriormente retornar ao QGis para verificação da representatividade de área pelo método de Thiessen, possibilitando estimar as proporções em relação às áreas das sub-bacias, visando à maior densidade e melhor distribuição de estações com dados considerados bons.

Para adoção das chuvas médias das sub-bacias, foram realizadas análises das precipitações acumuladas por período representativo anterior até o fim do evento e, ainda, a análise gráfica de distribuição espacial através da geração dos mapas de isoietas.

A Figura 20 ilustra a distribuição da chuva ocorrida no evento de 1983 na área a montante do reservatório de Foz do Areia, os postos pluviométricos utilizados, as sub-bacias analisadas e os polígonos de Thiessen traçados. Apesar de haver alterações nas estações pluviométricas entre os eventos históricos analisados, por haver estações extintas ou novas

instalações, em média, a área de cada polígono das estações pluviométricas representou cerca de 2,38% da área total.

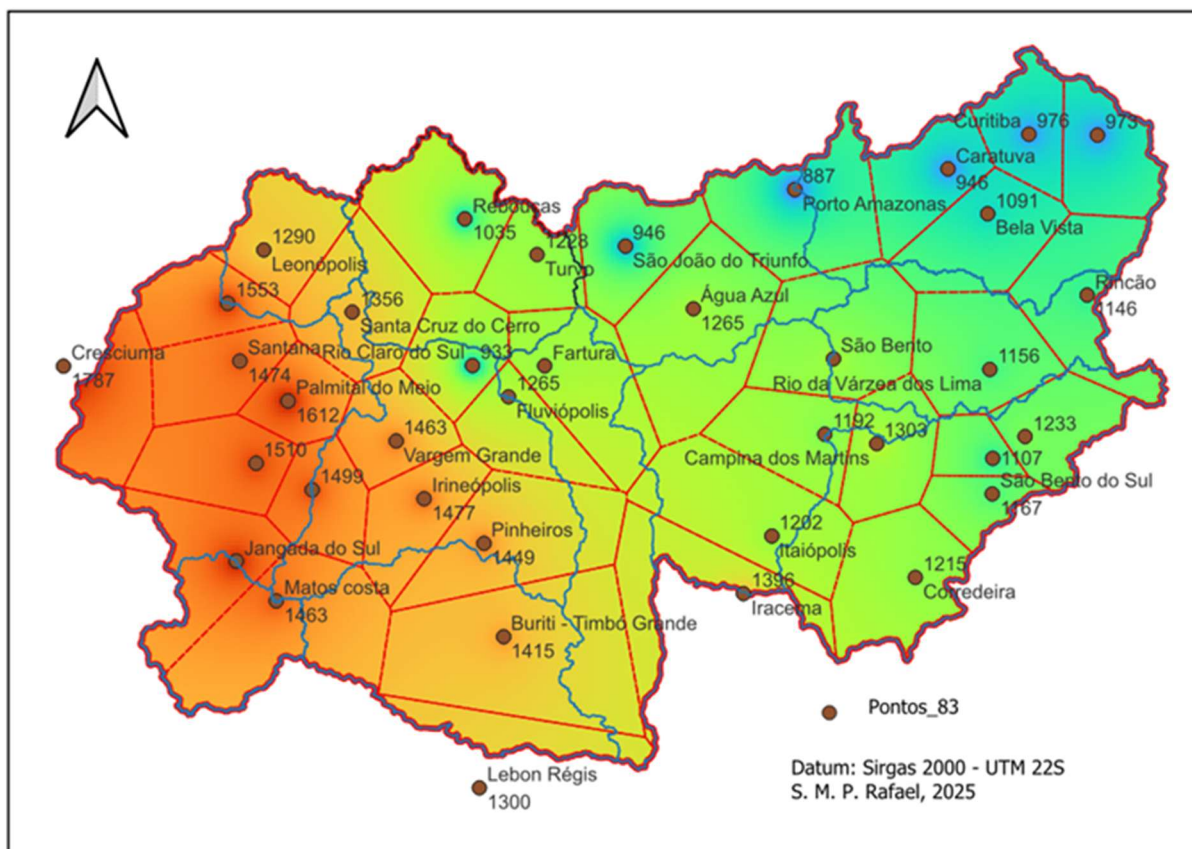


Figura 20 – Representação das estações pluviométricas

Para área incremental entre Segredo e Foz do Areia, foram selecionadas cinco estações que possuem séries nos três eventos de cheias analisados para a região, quais sejam: 2013, 2014 e 2023. Considera-se satisfatório esse quantitativo e a também a distribuição dos pontos, pois, a representatividade de cada ponto em relação à bacia hidrográfica ficou aderente ao adotado para o restante da bacia hidrográfica.

Nos Apêndices A, B, C, D e E estão relacionadas as estações utilizadas para cada evento.

O processo de análise para habilitar ou descartar os dados de cada estação e validar para utilização nas médias das sub-bacias passou por análise regional e representatividade espacial.

A análise de correlação entre as estações também foi feita por método similar ao Dupla Massa. Segundo Tucci (2001), o método de análise da Dupla Massa deve ser utilizado para séries mensais ou anuais, para verificar se a correlação possibilita a consistência dos dados de

um posto pluviométrico por outro confiável. Neste caso, a análise foi unicamente para verificação de uniformidade dos acumulados das chuvas ao longo do evento.

Para a bacia hidrográfica da região de montante do reservatório de Foz do Areia, os quatro eventos de cheia analisados tiveram a representação da distribuição espacial aceitáveis, conforme o Manual da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008).

Para o evento de 1983, foram acumulados dados entre 01 de abril e 31 de agosto, sendo que as fases de ascensão, pico e recessão tenham durado de 04 de julho a 20 de agosto.

Para o evento de 1992, foram acumulados dados entre 01 de abril a 27 de junho, mesmo que o evento de cheia tenha ocorrido entre os dias 25 de maio e 26 de junho.

Para o evento de 2014, foram acumulados dados entre 01 de maio e 15 de julho, mesmo que o evento tenha ocorrido entre 05 de junho e 10 de julho.

Para o evento de 2023, foram acumulados dados entre 29 de setembro e 23 de dezembro, neste caso, a cheia transcorreu durante o período analisado.

Para sub-bacia incremental entre Segredo e Foz do Areia, os eventos analisados foram de duração menor, devido às características das cheias.

Para os eventos de 2013, 2014 e 2023 as chuvas consideradas foram de 15, 18 e 23 dias, respectivamente.

Assim, com a boa correlação entre os postos pluviométricos, adotam-se os dados de cada estação para composição das chuvas médias das sub-bacias.

O levantamento dos dados dos postos pluviométricos foi realizado consultando as bases de dados da ANA (2024) e do IAT (2024), para séries de dados históricos e geometria das seções transversais. As estações utilizadas foram as mesmas em todos os eventos analisados.

O método de adoção da série de vazões observadas na área incremental de Segredo foi definido para levar em consideração os valores de resposta da precipitação no escoamento ocorrido na área incremental com o intuito de determinar a vazão, pois é uma variável não medida, e sim calculada, tendo em vista que a operação é realizada de maneira conjunta e a defluência praticada em Foz do Areia é conhecida, o que tem mais relevância é o conhecimento da vazão resultante da precipitação direta na região.

No reservatório de Segredo há o recebimento, em regra, das águas desviadas do rio Jordão através de um túnel de desvio. A Equação 13 demonstra o método para encontrar a vazão relativa à área Incremental de Segredo.

$$Q_{INCSEG} = QAf_{SEG} - (QDef_{FA} + QTransf_{Desvio})$$

Eq. 13

Onde:

Q_{INCSEG} – vazão incremental de Segredo

Q_{AfSEG} – vazão total afluente de Segredo

Q_{DefFA} – vazão defluente de Foz do Areia

$Q_{\text{TransfDesvio}}$ – vazão transferida do rio Jordão

Neste caso, a variação observada na vazão transferida se deve ao desnível entre os reservatórios de Desvio do rio Jordão e Segredo, o que normalmente ocorre no sentido Jordão – Iguaçu, justamente para viabilizar a produção na UHE Governador Ney Braga.

A Figura 21 ilustra em forma de diagrama a representação do túnel escavado em rocha de 4.700 metros de comprimento e 9,0 metros de altura, com seu nível mínimo localizado na cota 595,00 metros e capacidade de transferência de 250 m³/s para o maior desnível, que é de 13,0 metros, referente à diferença entre o nível máximo *maximorum* do Desvio do rio Jordão e o nível mínimo de Segredo.

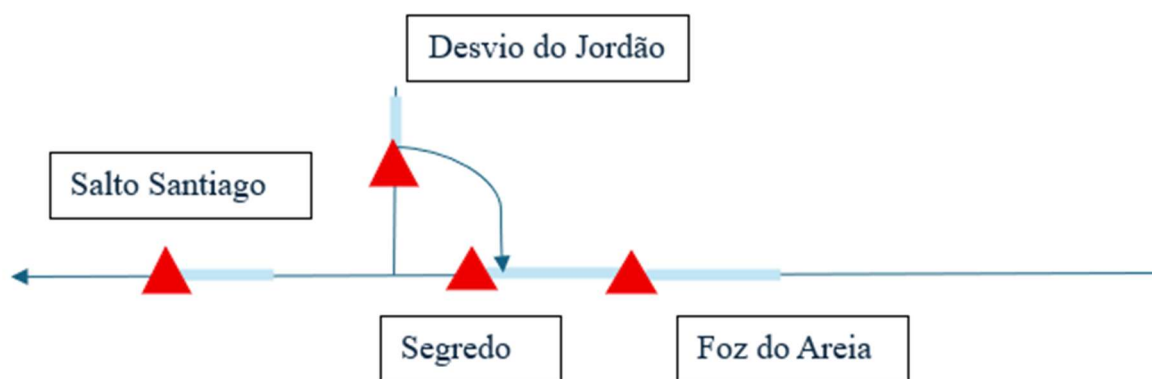


Figura 21 – Diagrama esquemático do Desvio do rio do Jordão

4.2.2 Processamento de dados

Para a calibração do modelo para o trecho de montante do reservatório de Foz do Areia foi selecionado o evento de 1983, considerado o evento de maior repercussão devido à chuva ocorrida e magnitude da cheia. Para a validação foram analisados outros três eventos de relevante comoção: 1992, 2014 e 2023. As possíveis diferenças de uso e ocupação do solo ao longo do tempo foram desprezadas.

O evento de 1983, tem o registro da maior vazão média diária afluente ao reservatório do histórico operativo, 7.830 m³/s no dia 09/07/1983, quando o reservatório de Foz do Areia

havia entrado em operação há apenas 3 anos. As chuvas iniciaram em maio e persistiram ao longo dos meses de junho e julho. Entre os dias 18 e 20/05, houve chuva bem distribuída pela bacia de média de 100 mm, que elevou a vazão de 1.300 para 4.000 m³/s. No evento principal, a vazão estava em torno de 1.600 m³/s no dia 04/07 e se elevou para 7.830 m³/s no dia 09/07. As chuvas observadas neste evento foram mais significativas na região do reservatório, onde a resposta na vazão é mais rápida. A distribuição da chuva foi a seguinte: no trecho alto o acumulado foi de 238 mm, no trecho médio foi de 321mm e no trecho baixo foi de 373mm.

Este evento foi o escolhido para calibração do modelo hidrológico, tendo em vista o acumulado e as características da ocorrência da chuva, a umidade presente e os valores de vazão observados.

No evento ocorrido em 1992, as chuvas se intensificaram a partir de abril, com acumulados em torno de 100 mm entre os dias 11 e 25, elevando a vazão afluente de 314 para 1.386 m³/s de média diária. Entre os dias 25/05 e 01/06, ocorreu a chuva que ocasionou a cheia analisada, com acumulados de 290 mm no trecho alto, 300 mm no trecho médio e 350 mm no trecho baixo, elevando a vazão afluente de 1.386 m³/s no dia 25/05 para 6.570 m³/s no dia 29/05. O acumulado de chuva no trecho baixo da bacia foi mais expressivo também neste evento, justamente onde as características da bacia são propícias para o rápido escoamento superficial.

O evento de 2014 ocorreu logo após um período importante de seca, quando o reservatório havia atingido sua menor vazão média diária afluente e seu menor armazenamento ao longo dos 30 anos de histórico operativo, até aquele momento. Com chuvas uniformes ao longo da bacia, com acumulados de 100 mm entre os dias 21 e 27/05, a vazão afluente se elevou de 240 para 1.000 m³/s. Entre os dias 04 e 09/06 ocorreu a chuva que ocasionou a cheia em análise, com os seguintes acumulados: 210 mm no trecho alto e 300 mm nos trechos médio e baixo, elevando as vazões de 666 m³/s no dia 05/06 para 7.450 m³/s no dia 08/06.

O evento de 2023 ocorreu entre os meses de outubro e novembro. Já no início do mês, no dia 03/10, as chuvas se intensificaram na bacia, com acumulados de 250 mm no trecho alto e 300 mm nos trechos médio e baixo, elevando as vazões de 466 m³/s no dia 03/10 para 4.721 m³/s no dia 12/10. Entre os dias 26 e 30/10, outra chuva relevante ocorreu, acumulando em torno de 130 mm no trecho alto e 150 mm nos trechos médio e baixo, elevando a vazão afluente ao reservatório de 3.160 m³/s no dia 27/10 para 5.584 m³/s no dia 29/10. Os dados de chuva indicam que os maiores acumulados ocorreram nos trechos médio e baixo, com média de 600 mm. Já no trecho alto, o total de chuva acumulada no evento foi de 470 mm.

Chama atenção que os eventos de cheia significativos têm como coincidência a ocorrência de chuva intensa e persistente nos trechos próximos aos reservatórios, onde a bacia

hidrográfica tem maior declividade e menor capacidade de retenção, com tempo de concentração muito inferior ao restante da bacia.

A calibração do modelo hidrológico, segundo Bravo et al. (2007), é uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário ou por técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída (por exemplo, a vazão nos rios).

Já a validação, segundo Ditt (2025), é o processo em que se faz uma comparação entre os resultados do modelo e as observações, em um período diferente do período utilizado na calibração, com o objetivo de avaliar se os modelos são adequados para um determinado propósito.

O software HEC-HMS possui a funcionalidade de geração das informações fisiográficas das bacias hidrográficas a partir dos dados do Modelo Digital de Elevação (MDE). Essas informações são necessárias pois compõem os fatores necessários para o software transformar a precipitação em escoamento superficial. Para validar o bom processamento do software, foi realizada a comparação entre as áreas de drenagem calculadas pelo software e as áreas de drenagem cadastradas na Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA).

O conhecimento das características fisiográficas é de suma importância para determinação da resposta da precipitação no escoamento. Além da área de drenagem, o software fornece ao hidrólogo informações como formato da bacia hidrográfica, declividade, comprimentos dos trechos de rio, centroides, dentre outras.

A Tabela 4 demonstra o comparativo entre as áreas de drenagem de cada sub-bacia. Nota-se nas áreas incrementais as diferenças entre as áreas de drenagem do cadastro da ANA e as calculadas pelo software.

Essas características, aliadas ao conhecimento de outros fenômenos, subsidiam a calibração do modelo hidrológico.

Tabela 4 - Comparativo das áreas de drenagem do cadastro ANA e calculadas

Posto Fluviométrico		Áreas de drenagem incrementais (km ²)		Áreas de drenagem totais (km ²)
Nome	Código	ANA	HEC-HMS	ANA
Porto Amazonas	65035000	3.620	3.605	3.620
São Mateus do Sul	65060000	2.430	2.415	6.050
Pontilhão do Potinga	65208001	2.100	2.210	2.100
Rio Negro	65100000	3.450	3.092	3.450
São Bento	65155000	2.000	2.000	2.000
Divisa	65175001	2.600	2.754	8.050
Fluviópolis	65220000	2.400	2.293	18.600
Santa Cruz do Timbó	65295000	2.610	2.343	2.610
União da Vitória	65310000	2.990	3.289	24.200
Jangada do Sul	65370001	1.010	1.011	1.010
Madeira Gavazzoni	65764001	976	976	976
Foz do Areia Barragem	65774400	3.914	3.942	30.100
Segredo Barragem	65803002	4.300	4.228	34.400

Fonte: Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e HEC-HMS

O software sugere a divisão das sub-bacias a partir da discretização de área máxima escolhida pelo usuário, porém, igualmente, permite o controle para determinar as sub-bacias conforme o interesse do projeto e histórico de elementos existentes. Neste caso, as divisões foram adotadas conforme a Tabela 4 e a distribuição espacial está demonstrada na Figura 22.

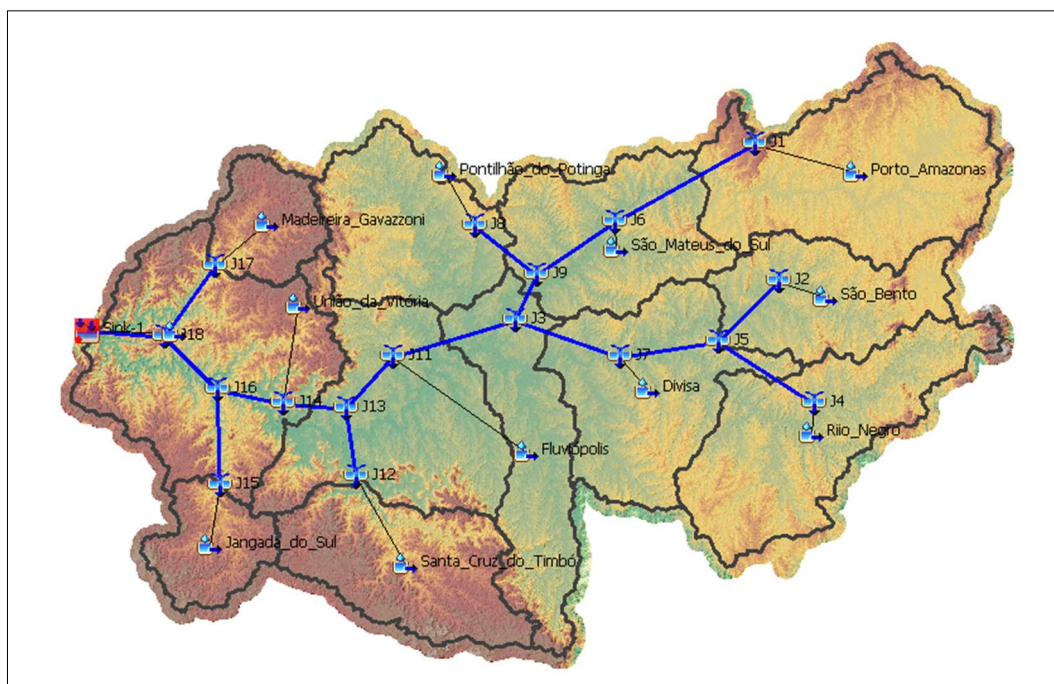


Figura 22 – Subdivisão da bacia a montante do reservatório de Foz do Areia

Além de determinar as divisões das áreas de drenagem de cada posto fluviométrico, o software também cria os elementos necessários para o devido processamento, como segue:

Elemento sub-bacia, o qual será configurado com a área de drenagem, coordenadas do exutório e os métodos de perdas, transformação chuva-vazão e vazão de base. E, também, será estruturado na ordem de montante para jusante com a identificação do ponto de onde a sub-bacia irá desaguar, neste caso chamado de junção.

Quando há diversas subdivisões na bacia hidrográfica, a configuração demanda uma sub-bacia para representar a captação da precipitação e de elementos chamados de *Junction* (junção) e *Reach* (rio). O elemento *Junction* é responsável pela conexão entre elementos, sem configuração física, e pode estar relacionado a um exutório, mas nem sempre estará. O exutório da bacia que capta todas as sub-bacias é denominado *Sink*: neste ponto se contabiliza o resultado total da simulação. O elemento *Reach*, demanda configuração de propagação da vazão, que neste caso foi adotado o método Muskingum-Gunge, e a geometria das seções transversais relacionadas às *Junctions* (seção de controle), que são basicamente a menor largura da seção já observada e a inclinação das margens em metros horizontais por metro vertical, a depender do tipo de perfil escolhido (*Shape*), que neste caso foi trapezoidal.

A Figura 23 ilustra a distribuição e encadeamento necessários entre os elementos que compõem o modelo. A sub-bacia captará a precipitação e, a partir das configurações dos métodos de perdas (*Loss*), transformação (*Transform*) e vazão de base (*Baseflow*), irá propagar a vazão para jusante pelo trecho de rio até o elemento *Sink* ou até adentrar a sub-bacia a jusante, onde se repetirá o processo, acumulando a precipitação da sub-bacia e propagando pelas áreas das sub-bacias por meio dos trechos de rio.

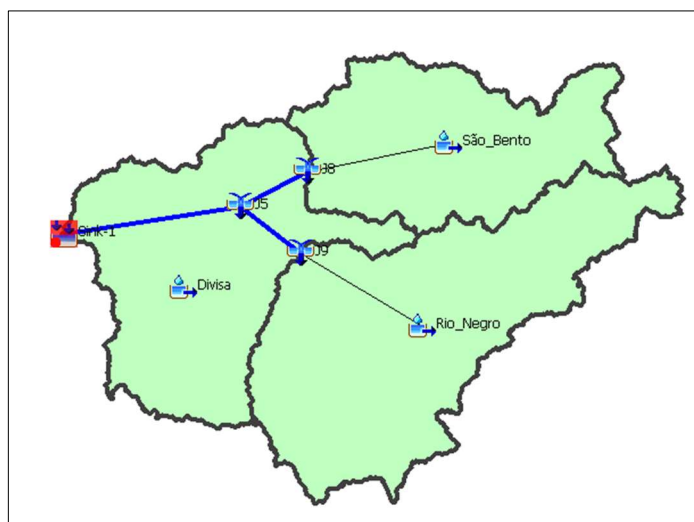


Figura 23 – Exemplo de configuração do modelo HEC-HMS

A Figura 24 ilustra os dados gerados pelo software para cada sub-bacia dos trechos Alto, Médio e Baixo, os quais foram adotados para rodar o modelo.

Subbasin	Longest Flowpath Length (KM)	Longest Flowpath Slope (M/M)	Centroidal Flowpath Length (KM)	Centroidal Flowpath Slope (M/M)	10-85 Flowpath Length (KM)	10-85 Flowpath Slope (M/M)	Basin Slope (M/M)	Basin Relief (M)	Relief Ratio	Elongation Ratio	Drainage Density (KM/KM ²)
Porto_A Amazonas	139,01966	0,00453	61,35425	0,00123	104,26474	0,00053	0,10143	667,00000	0,00480	0,48732	0,00000
São_Mateus_do_Sul	113,86498	0,00207	42,62121	0,00022	85,39873	0,00025	0,11954	262,00000	0,00230	0,48699	0,00000
Pontalão_do_Potinga	110,06123	0,00430	50,32569	0,00037	82,54592	0,00055	0,12157	567,00000	0,00515	0,48197	0,00000
Rio_Negro	160,55471	0,00409	65,11569	0,00017	120,41604	0,00032	0,13716	753,00000	0,00469	0,39077	0,00000
São_Bento	133,43901	0,00378	57,68559	0,00041	100,07926	0,00105	0,11835	509,00000	0,00381	0,37814	0,00000
Divisa	137,76552	0,00159	66,85656	0,00025	103,32414	0,00036	0,10880	266,00000	0,00193	0,42981	0,00000
Fluviópolis	152,20690	0,00353	68,40124	0,00015	114,15518	0,00031	0,11661	595,00000	0,00391	0,35500	0,00000
Santa_Cruz_do_Timbó	119,29509	0,00434	46,60839	0,00301	89,47132	0,00360	0,17484	664,00000	0,00557	0,45785	0,00000
União_da_Vitória	185,30513	0,00281	59,08035	0,00010	138,97885	0,00114	0,12620	560,00000	0,00302	0,34922	0,02294
Jangada_do_Sul	76,89232	0,00589	27,54295	0,00320	57,66924	0,00342	0,17668	518,00000	0,00674	0,46661	0,00000
Madeiraira_Gavazzoni	71,82854	0,00649	39,72491	0,00434	53,87141	0,00386	0,15631	539,00000	0,00750	0,49088	0,00000
Foz_do_Areia_INC	146,26758	0,00366	66,20443	0,00071	109,70069	0,00035	0,19513	685,00000	0,00468	0,48435	0,02805

Figura 24 – Características das sub-bacias geradas diretamente no software

A Figura 25 ilustra os dados característicos do software para os mesmos trechos de rio. É possível perceber que o trecho de rio 3, que conecta a sub-bacia Fluviópolis até a junção que conecta a sub-bacia de Santa Cruz do Timbó ao rio Iguazu, apresenta declividade muito próxima de zero em trecho com 75 km de distância. Assim como o trecho de rio 15, o qual apresenta declividade nula, em trecho do reservatório de Foz do Areia. Nestes casos, o software se perde e é necessário manipular com valor mínimo para gerar sentido de fluxo. Isto demonstra o quanto a metodologia do software é robusta na representação das características fisiográficas, desde que o MDE de entrada seja de qualidade.

Reach	Length (KM)	Slope (M/M)	Relief (M)	Sinuosity
Reach-4	99,80398	0,00025	25,00000	1,60390
Reach-5	30,12866	0,00023	7,00000	1,48641
Reach-10	18,85551	0,00027	5,00000	1,52617
Reach-9	1,99268	0,00050	1,00000	1,10697
Reach-6	26,70806	0,00004	1,00000	1,49907
Reach-1	26,75464	0,00011	3,00000	1,55845
Reach-2	73,28443	0,00026	19,00000	1,85658
Reach-8	32,34846	0,00015	5,00000	1,60829
Reach-7	12,17961	0,00016	2,00000	1,70291
Reach-3	75,47022	0,00001	1,00000	1,77648
Reach-14	13,37525	0,00007	1,00000	1,30174
Reach-11	35,79151	0,00017	6,00000	1,82384
Reach-13	35,86224	0,00067	24,00000	1,64399
Reach-17	56,21042	0,00265	149,00000	1,95798
Reach-15	69,74897	0,00000	0,00000	1,84222
Reach-19	74,94280	0,00119	89,00000	1,86970
Reach-18	4,99785	0,01120	56,00000	1,22089

Figura 25 – Resumo das características dos trechos de rio

O encadeamento final dos elementos de configuração do modelo consta nas Figuras 26 e 27, as quais foram extraídas diretamente do software. Sendo as informações constantes na Figura 27 a continuação da Figura 26.

Element Name	Element Type	Drainage Area (KM2)
Porto_A Amazonas	Subbasin	3604.7
J1	Junction	3604.7
Reach-4	Reach	3604.7
São_Mateus_do_Sul	Subbasin	2415.0
J6	Junction	6019.7
Reach-5	Reach	6019.7
Pontilhão_do_Potinga	Subbasin	2210.1
J8	Junction	2210.1
Reach-10	Reach	2210.1
J9	Junction	8229.8
Reach-9	Reach	8229.8
Rio_Negro	Subbasin	3091.5
J4	Junction	3091.5
Reach-6	Reach	3091.5
São_Bento	Subbasin	1999.6
J2	Junction	1999.6
Reach-1	Reach	1999.6
J5	Junction	5091.1
Reach-2	Reach	5091.1
Divisa	Subbasin	2753.8
J7	Junction	7844.9
Reach-8	Reach	7844.9
J3	Junction	16074.7
Reach-7	Reach	16074.7

Figura 26 – Encadeamento de elementos

Element Name	Element Type	Drainage Area (KM2)
Reach-7	Reach	16074.7
Fluviópolis	Subbasin	2293.0
J11	Junction	18367.7
Reach-3	Reach	18367.7
Santa_Cruz_do_Timbó	Subbasin	2343.1
J12	Junction	2343.1
Reach-14	Reach	2343.1
J13	Junction	20710.8
Reach-11	Reach	20710.8
União_da_Vitória	Subbasin	3289.1
J14	Junction	23999.9
Reach-13	Reach	23999.9
Jangada_do_Sul	Subbasin	1011.0
J15	Junction	1011.0
Reach-17	Reach	1011.0
J16	Junction	25010.9
Reach-15	Reach	25010.9
Madeiraira_Gavazzoni	Subbasin	976.40
J17	Junction	976.40
Reach-19	Reach	976.40
J18	Junction	25987.30
Reach-18	Reach	25987.30
Foz_do_Areia_INC	Subbasin	3942.0
Sink-1	Sink	29929.30

Figura 27 - Encadeamento de elementos (Cont.)

Para os trechos de rio, o coeficiente de rugosidade de Manning adotado médio foi 0,045 em virtude das grandes planícies de inundação e as avaliações aqui realizadas serem para vazões elevadas, com ocupação de várzeas. (Castanharo e Buba, 2008).

A parametrização final de calibração das sub-bacias, utilizada nas validações, é apresentada na Quadro 4. O método adotado para contabilização de perdas foi o *Deficit and Constant*, devido ao modelo ser calibrado para um período contínuo, mesmo que a análise seja para um evento único. O método de transformação da chuva em vazão foi o *Clark Unit Hydrograph*.

Quadro 4 – Parametrização de calibração: Trechos Alto, Médio e Baixo

Sub-bacia	Loss (Deficit and Constant)				Transform (Clark Unit Hydrograph)		Baseflow		
	Initial Deficit (mm)	Maximum Deficit (mm)	Constant rate (mm/hr)	Impervious (%)	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)	Initial Discharge (m ³ /s)	Recession Constante	Ratio
Porto Amazonas	3	3	0,8	20	150	50	50	0,9	0,9
São Mateus do Sul	1	1	1	30	150	50	48	0,9	0,9
São Bento	1	1	1,5	30	100	200	30	0,93	0,93
Rio Negro	1	1	0,5	30	130	100	58	0,9	0,9
Divisa	2	2	2	20	300	200	120	0,95	0,95
Fluviópolis	3	3	1	20	300	200	260	0,95	0,95
Pontilhão do Potinga	1	1	1	50	350	100	25	0,94	0,94
Santa Cruz do Timbó	1	1	1	30	100	150	26	0,95	0,95
União da Vitória	1	1	1	60	300	300	370	0,95	0,95
Jangada do Sul	3	3	3	90	15	50	19	0,7	0,7
Madeiraira Gavazzoni	1	1	0,5	90	8	80	17	0,7	0,7
Foz do Areia	2	2	1	100	1	5	489	0,7	0,7

Fonte: O autor

No caso específico do trecho Incremental Segredo – Foz do Areia, devido ao fato de haver controle por outro reservatório a montante, sua área e suas características fisiográficas serem similares a área incremental entre Foz do Areia e União da Vitória, foi adotado o método de transformação *Soil Conservation Service (SCS) Unit Hydrograph Method*. Este método é utilizado para evento único e demanda informações de *Curve Number (CN)* e *Impermeabilidade*.

Tabela 5– Parâmetros de calibração: Trecho Incremental Segredo – Foz do Areia

Sub-bacia	Loss (Deficit and Constant)			Graph time	Lag Time (min)
	Initial Abstraction (mm)	Curve Number	Impervious (%)		
Incremental Segredo - Foz do Areia	5	15	40	Standard (PRF 484)	180

Fonte: O autor.

Com o software calibrado e validado, foram gerados hidrogramas hipotéticos para simulação da operação hidráulica dos reservatórios. Foi utilizado o método da equação das curvas de Intensidade, Duração e Frequência (I-D-F) para os tempos de recorrência de 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000 e 10.000 para duração de sete dias para cidades representativas localizadas dentro das regiões dos quatro trechos adotados na bacia hidrográfica. A duração de sete dias foi escolhida, pois é igual ao tempo de concentração estimado para a bacia hidrográfica.

Para determinação dos valores das chuvas para os diferentes tempos de recorrência, foi utilizado o software Plúvio 2.1, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (UFV). O Plúvio 2.1 é um programa computacional concebido para construção de curvas I-D-F em locais onde não há parâmetros determinados, a partir de interpolação de parâmetros regionais já conhecidos na literatura.

A Equação 14 foi utilizada para determinação das chuvas para os diferentes tempos de retorno para os municípios representativos. Os parâmetros da equação, os quais variam de local para local, constam na Equação 14, extraídos do Plúvio 2.1.

$$i = \frac{a \cdot T_r^b}{(t+c)^d} \quad \text{Eq. 14}$$

Tabela 6 - Parâmetros das curvas I-D-F

Estação	Trecho	Parâmetro a	Parâmetro b	Parâmetro c	Parâmetro d
Porto Amazonas	Alto	2543,310	0,196	27,000	0,952
Rio Claro do Sul	Médio	966,652	0,177	9,085	0,790
União da Vitória	Baixo	1141,025	0,157	10,714	0,804
Mangueirinha	Incremental Segredo - Foz do Areia	1714,550	0,155	16,368	0,830

A metodologia de estimar a precipitação para geração de hidrogramas de entrada em software de previsão de vazão foi utilizada nas pesquisas de Duraisekaran et al. (2025) e Singh et al. (2025).

A Figura 28 ilustra a localização dos municípios utilizados para a estimativa da precipitação nos trechos. Para o Trecho Alto foi utilizado o município de Porto Amazonas; para o Trecho Médio o município de Rio Claro do Sul; para o Trecho Baixo o município de União da Vitória; e, para o Trecho Incremental Segredo - Foz do Areia o município de Mangueirinha.



Figura 28 – Localização dos municípios para geração da equação I-D-F

A distribuição temporal da chuva estimada foi feita pelo método dos blocos alternados para duração de sete dias, para atender ao tempo de concentração da bacia, assim como Duraisekaran et al. (2025) realizaram sua pesquisa.

Para avaliar o dimensionamento de grandes estruturas, existem diversos métodos de estimativa de hidrogramas de entrada (ELETROBRAS, 1987). Na presente pesquisa, a geração de diferentes cheias em referência ao tempo de recorrência da chuva possibilita flexibilidade quanto às possibilidades de análise da operação hidráulica necessária para atender às características existentes na operação dos reservatórios.

4.3 Simulador de reservatórios HEC-ResSim

O software HEC-ResSim possibilita ao analista realizar simulações de operação hidráulica de reservatórios a partir de hidrogramas afluentes como dados de entrada, associados às demais informações necessárias para decisão de atendimento a condições preestabelecidas de armazenamento do reservatório com decisão de aumento e diminuição de defluências (DASH, SAHOO e RAGUWANSHI, 2022; USACE, 2021).

Na presente pesquisa, o software foi avaliado como ferramenta para simulação de operação hidráulica utilizando o conceito de horizonte de previsão, que, conforme Bravo (2010), se define como o maior intervalo de tempo no futuro e, neste caso, seria para previsão de curto prazo, pois a antecedência simulada é de dois dias.

Foram adotados cenários de vazão de entrada aos reservatórios, sejam eles por eventos passados ou hipotéticos, nos quais se avaliou o ganho de ações com antecedência.

Conforme o manual do usuário (USACE, 2021), o software foi construído para ser utilizado por projetos, onde se configura inicialmente o sistema de coordenadas, o fuso horário e o local onde o projeto será salvo no computador.

A Figura 29 demonstra, de forma simplificada o fluxograma de utilização do software HEC-ResSim adotado nesta pesquisa.

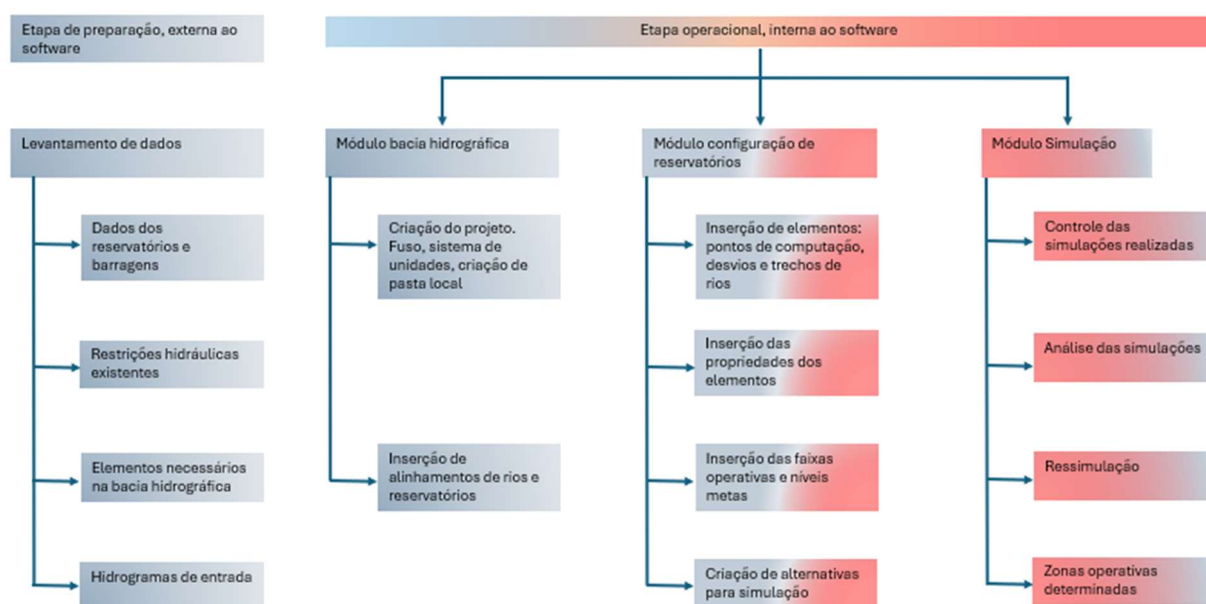


Figura 29 – Fluxograma operacional do software HEC-ResSim

4.3.1 Levantamento de dados

Os dados utilizados nas simulações foram levantados em momento prévio à operação do software, pois demandou pesquisa em diversas fontes. Em algumas situações, é necessário realizar estudos para determinar a parametrização a ser adotada no software. As características físicas das barragens e reservatórios foram encontradas no banco de dados do ONS e no banco de dados da Companhia Paranaense de Energia - Copel, empresa detentora da licença de operação.

Para o cálculo de balanço hídrico pelo método de conservação de massa, o software demanda os dados de curva cota x volume, curva de descarga de vertedouro, relação de nível d'água pela capacidade de geração, tanto em energia quanto em vazão, cota do coroamento da barragem e da sua largura, além das cotas de nível mínimo e máximo (USACE, 2021)

Os dados providenciados na fase inicial foram:

- Curvas de armazenamento, conhecidas por curvas Cota x Volume, as quais relacionam o armazenamento do reservatório ao nível do reservatório. O conhecimento desta relação é primordial para o cálculo de balanço de massa, o qual necessita da variação de volume no intervalo de tempo;
- Curvas de descarga dos vertedouros para estimativa de volume defluído pelo dispositivo no intervalo de tempo para o cálculo de balanço hídrico;
- Curvas de rendimento das unidades geradoras para estimativa da vazão turbinada para uma determinada geração em função do desnível entre o reservatório e o canal de fuga;
- Identificação das restrições existentes;
- Hidrogramas de entrada para possibilitar as análises, criar alternativas e regras operacionais e identificar situações limitantes ou de risco.

Em análise prévia à operação do software, também é necessário estudar a bacia hidrográfica para identificar os elementos que compõem a estrutura computacional que será utilizada no projeto e a avaliação das suas relevâncias e necessidades (MATROSOV, HAROU, LOUCKS, 2011)

O software permite a inserção de arquivo GIS para visualização espacial da área de estudo, onde é possível inserir e distribuir os elementos selecionados. Esta etapa é importante devido a eventuais restrições existentes de elementos externos às barragens ou reservatórios, caso desta pesquisa, que analisa a restrição em posto hidrométrico localizado em torno de cem quilômetros a montante (DASH, SAHOO, RAGUWANSHI, 2022; USACE, 2021)

Os elementos podem ser inseridos no software em forma de diagrama, não sendo necessário trabalhar com a imagem da bacia hidrográfica ao fundo. Isto facilita o esforço computacional e a visualização do projeto pelo analista.

Neste projeto, o inventário final de elementos inseridos é listado abaixo, em ordem de montante para jusante:

1 *Computation Point* (Ponto de controle) a montante do reservatório de Foz do Areia, onde considera a série de vazões afluentes ao reservatório;

1 *Reach* (Trecho de rio) conectando o *Computation Point* 1 ao reservatório, sem fator de ajuste de vazões e sem propagação. Isto quer dizer que a mesma vazão que entrar no trecho do rio, sai por ele instantaneamente e sem acréscimo ou perda;

1 *Reservoir* (Reservatório de Foz do Areia) que irá receber a vazão do trecho de rio de montante e, com as características físicas inseridas, propiciar a simulação da operação hidráulica diante das zonas e regras cadastradas;

1 *Reach* conectando o reservatório de Foz do Areia a um ponto de controle antes do reservatório de Segredo;

1 *Computation Point* (Ponto de controle) antes do reservatório de Segredo para inserção da série de vazão incremental;

1 *Reach* conectando o Ponto de Controle ao Reservatório de Segredo, sem fator de ajuste de vazões e sem propagação. Este trecho de rio propagará ao reservatório de Segredo a soma da vazão incremental e a vazão defluente de Foz do Areia;

1 *Diverted Outlet Tool* (Fluxo advindo do reservatório do Desvio do rio Jordão) simulando a transferência das águas da bacia hidrográfica do rio Jordão para o rio Iguaçu;

1 *Reservoir* (Reservatório de Segredo), o qual irá receber as águas do trecho de rio de montante e propiciar a simulação do reservatório;

1 *Computation Point* (Ponto de controle) a jusante do reservatório de Segredo, após a confluência com o rio Jordão.

Pelo rio Jordão, há um ponto de controle na entrada do reservatório, onde há série de vazão afluyente; o reservatório com sua parametrização para simulação, e; um ponto de controle na junção com o rio Iguaçu.

As séries de vazões, discretizadas temporalmente conforme o planejamento inicial do projeto, são inseridas no banco de dados específico do software HEC-DSSVue, o qual se relaciona diretamente com o HEC-ResSim.

Para determinar o nível de remanso em União da Vitória, é estimado pela superfície-chave da estação hidrométrica de forma objetiva, sendo que as simulações realizadas visam manter o nível no patamar da curva de descarga natural.

Para determinar o nível de equilíbrio, o cálculo de estimativa total de volume do hidrograma afluyente é realizado utilizando a vazão conhecida que ocorrerá no intervalo que se deseja. Neste caso, antecipando as ações para o evento conhecido e adicionando a recessão crítica ao final do horizonte. Diferente da metodologia atual, onde o volume é calculado em tempo real para horizontes mais curtos.

Quanto maior a confiabilidade no modelo de previsão de vazão, mais preciso será o cálculo de volume afluyente e melhor será a avaliação de aumento da antecedência.

4.3.2 Processamento de dados

Ao iniciar um novo projeto no software HEC-ResSim, é necessário informar o Sistema de Unidades que será utilizado, o fuso horário e o local onde o projeto será armazenado no computador. Neste ambiente serão criadas pastas de armazenamento dos dados gerados.

A primeira etapa da fase de operação do software ocorre no módulo *Watershed* (bacia hidrográfica) onde são inseridos alguns elementos necessários e realizada a primeira análise do que realmente seria necessário para execução das simulações.

A análise de distribuição espacial está representada na Figura 30, onde foram inseridas a rede de drenagem, a delimitação da bacia hidrográfica, as seções de controle que compõem a rede de monitoramento da bacia e os reservatórios sob análise. Nesta fase é apenas criado o ambiente para originar a próxima etapa. Ao final desta configuração, é criada uma Configuração, nomeada e descrita, para ser carregada na etapa seguinte.

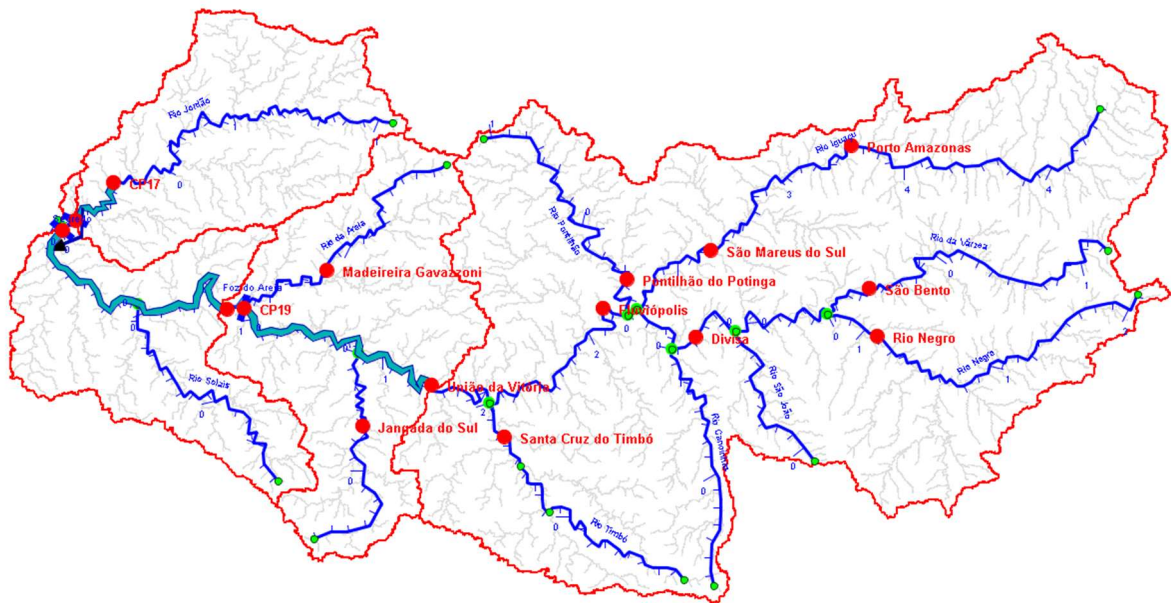


Figura 30 – Elementos inseridos na bacia hidrográfica

No módulo *Reservoir Network* (Rede de reservatórios) ocorre a consolidação dos elementos que compõem o projeto. Aqui ocorre a importação da Configuração criada na etapa *Watershed*, a qual traz elementos iniciais de configuração da bacia e a distribuição dos elementos.

A Figura 31 ilustra a representação dos elementos necessários já filtrados em diagrama, onde se observa o encadeamento final de elementos.

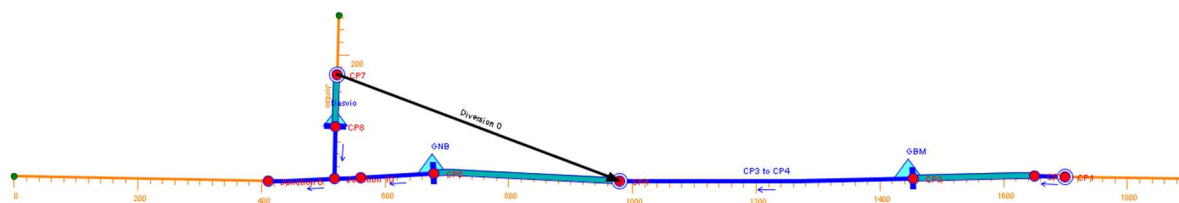


Figura 31 – Representação dos elementos em diagrama

Para entrada dos hidrogramas no reservatório de Foz do Areia, foi criado um elemento que suporta série de dados, chamado de Ponto de Computação (*Computation Point*). Este é representado por um ponto circular vermelho com borda branca. Esta simbologia representa que o elemento possui uma série de dados. Neste ponto, foi inserida a série de vazões afluentes ao reservatório, porém, para que este hidrograma chegue ao reservatório da mesma maneira que sai deste ponto de computação, é necessário inserir um trecho de rio (*Reach*), representado por uma linha azul, que neste caso não possui método nem fator de propagação, justamente para propiciar a afluência original. Isto é necessário para conectar os elementos e criar um fluxo de evolução na bacia hidrográfica.

O próximo elemento é o reservatório, sendo o primeiro da cascata, Foz do Areia, representado por uma linha verde suave. Ao criar este elemento, o software cria automaticamente dois Pontos de Computação, um na entrada e outro na saída.

Como o projeto demanda um sistema de reservatórios, é necessário conectar a jusante da barragem de Foz do Areia um trecho de rio para que a vazão defluente chegue ao reservatório de Segredo. Nesta área, denominada com Incremental Segredo – Foz do Areia, é inserido um novo Ponto de Computação para acrescentar a vazão correspondente a incremental. A afluência ao reservatório de Segredo será a soma da vazão defluente de Foz do Areia e a incremental.

A área incremental ainda recebe, em regra, as águas advindas da sub-bacia do rio Jordão. O software permite criar o elemento de divisão de fluxo (*Diversión Tool*), para direcionar a vazão transferida de um reservatório a outro.

Para jusante, foram criados Pontos de Computação, um imediatamente a jusante do reservatório de Segredo, um na confluência do rio Jordão com o rio Iguaçu e outro a jusante, contabilizando a vazão total. Estes dados foram inseridos apenas para representação lógica do projeto, sem compor as análises dos resultados.

É necessário, então, para cada reservatório, inserir as características físicas do reservatório, que neste caso há apenas a curva cota x volume, as informações da barragem, que

contempla a curva de descarga do vertedouro e quantos vãos existem, as características da usina hidrelétrica, que é a relação de elevação por capacidade máxima de vazão turbinada e geração para cada cota, a eficiência, as perdas existentes e a perda hidráulica e, para cálculo de queda, o nível do canal de fuga.

Também, é necessário inserir em ambiente denominado *Operations* as faixas operativas dos reservatórios para serem utilizadas na simulação. Estas serão as zonas de operação. O software sugere um padrão de divisão do reservatório, sendo *Inactive* (cota do volume morto), *Conservation* (cota de interesse da simulação) e *Flood Control* (nível máximo operacional).

As simulações são realizadas com evolução temporal, portanto, para cada intervalo de tempo futuro, o nível de conservação pode ser diferente. No caso da presente pesquisa, os níveis de conservação são variáveis devido à dinâmica de variação do hidrograma de entrada, que resulta em variação no nível de remanso em União da Vitória e variação no nível de equilíbrio.

A Figura 32 ilustra um exemplo prático de divisão da faixa operativa do reservatório em zonas de operação. No gráfico superior, é possível verificar o nível mínimo operacional na linha pontilhada cinza, na cota 700 m, o nível máximo operacional na linha pontilhada verde e o nível a ser atingido na simulação na linha pontilhada azul. Este exemplo demonstra que a linha azul passa a ser o nível máximo do reservatório para aquela data e hora e que o reservatório deve ser rebaixado para atender ao critério da metodologia determinada na fase de estudos prévios ao simulador. O gráfico inferior apresenta a vazão afluente ao reservatório, representando a entrada de uma cheia. A metodologia indica que, nesta situação, o reservatório deve ser rebaixado para proteção das restrições. Ilich (2024) utiliza metodologia similar em sua pesquisa, porém utiliza dados estatísticos para estimativa do próximo nível objetivo.

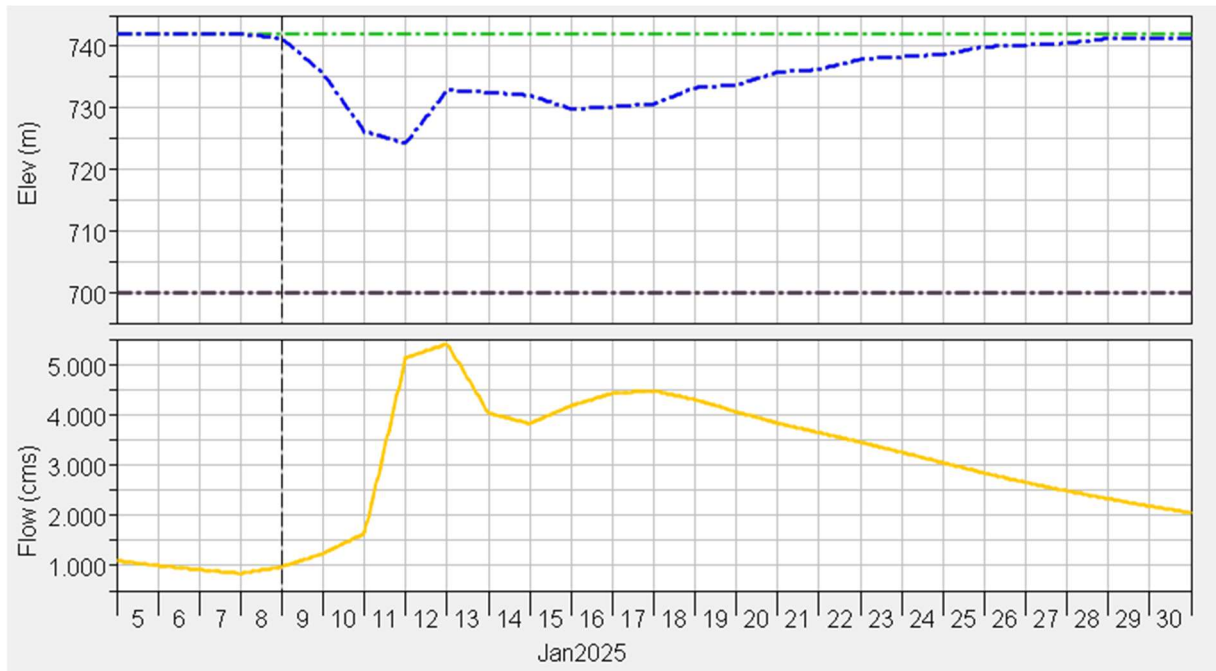


Figura 32 – Zonas operativas cadastradas no HEC-ResSim

A partir da determinação da estratégia e inserção da parametrização no software, o módulo necessita que se crie a conexão com o próximo ambiente, chamado de *Alternative*, onde se insere o passo de tempo em que a simulação deve ser realizada a configuração de operação, que são os níveis a serem atendidos com variações de vazão defluentes as condições iniciais das simulações e as séries de vazões afluentes.

Após estes passos, o próximo módulo denominado *Simulation* já pode ser acessado para realizar as simulações. Neste ambiente são feitas as simulações, análise dos dados, se há alguma correção possível de ser feita para proteção de alguma restrição, reinserção de dados de entrada, como antecedência ou nível inicial para fazer a ressimulação. Este é o ciclo do ambiente de simulação para definir as chamadas regras para atingir as curvas-guia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo hidrológico, HEC-HMS demonstra capacidade de representação dos fenômenos físicos da bacia hidrográfica, a qual possui características complexas, sejam elas físicas, de dados hidrológicos observados ou até mesmo do reflexo de fenômenos meteorológicos.

O simulador de operação de reservatório, HEC-ResSim, também teve sua avaliação positiva. A operação hidráulica do complexo FASG (Foz do Areia – Segredo) é muito particular, devido às variabilidades climáticas onde está inserido, mas também devido às características fisiográficas da bacia hidrográficas associadas às condicionantes existentes.

O acoplamento entre os softwares, juntamente com a análise aprofundada do conhecimento hidrológico e dos métodos de mitigação de impactos, se demonstrou robusto para determinação e conhecimento da operação hidráulica dos reservatórios.

5.1 Resultados do modelo hidrológico HEC-HMS

Os resultados evidenciam que o modelo tem capacidade de representar os fenômenos hidrológicos característicos da bacia hidrográfica para a proposta da pesquisa.

O modelo foi calibrado para todas as sub-bacias, com o intuito de verificação da capacidade de propagação da vazão ao longo do rio. As métricas de avaliação são demonstradas no Apêndice E, onde pode-se observar certa variabilidade nos índices de qualidade das simulações. Os fatores que podem comprometer a qualidade das simulações são a distribuição temporal e espacial dos eventos meteorológicos, os horários de ocorrência das chuvas e a qualidade das observações, a complexidade das diferentes características geomorfológicas da bacia e a própria metodologia de parametrização de perdas, método de transformação e tempo de concentração.

As seções de interesse são União da Vitória, reservatório de Foz do Areia e reservatório de Segredo, localizadas no Trecho Baixo e Incremental de Segredo - Foz do Areia.

As Figuras 33, 34, 35 e 36 ilustram o comportamento das vazões simuladas e observadas na seção de controle União da Vitória, a qual recebe a propagação das sub-bacias de montante, Fluvioópolis e Santa Cruz do Timbó. A área de drenagem desta seção representa 80% da área total da bacia hidrográfica de Foz do Areia. A representação para este local é importante, pois a avaliação de remanso em União da Vitória é feita com base na vazão passante pela seção, portanto, este dado simulado é utilizado para simular a operação hidráulica no software HEC-ResSim. A região onde a seção se localiza se caracteriza por pouca declividade

e impacto direto no escoamento, com transbordamento das margens e grandes armazenamentos laterais, o que torna complexa a representação pelo modelo hidrológico. Além disso, há o controle natural existente no município de Porto Vitória, conhecido como corredeiras de Porto Vitória. Este controle natural pode ocasionar remanso natural na seção de controle de União da Vitória. Nos dados observados, as vazões consideradas já estão relacionadas à superfície chave nos momentos de remanso ou na curva de descarga natural quando o remanso é inexistente.

Apesar da boa representação do fenômeno ocorrido em 1983, para os outros eventos não houve a mesma aderência, onde a fase de pico do hidrograma ficou superestimada. Mesmo assim, de maneira geral, as métricas de avaliação indicam que as simulações são classificadas entre “Satisfatório” e “Muito bom”, segundo Moriasi.



Figura 33 – Calibração de 1983 – União da Vitória



Figura 34 – Validação de 1992 – União da Vitória



Figura 35 – Validação de 2014 – União da Vitória

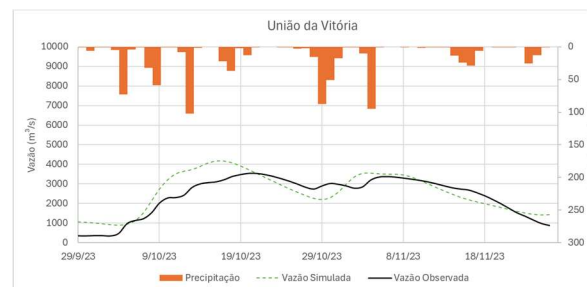


Figura 36 – Validação de 2023 – União da Vitória

Tabela 7 - Avaliação das métricas para União da Vitória

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²
Baixo	União da Vitória	Calibração	1983	0,884	-1,56	0,3	0,890
		Validação	1992	0,866	17,57	0,4	0,896
			2014	0,566	39,24	0,7	0,872
			2023	0,706	7,86	0,5	0,756
Muito bom	Bom	Satisfatório	Não satisfatório				

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015).

FOZ DO AREIA

As Figuras 37, 38, 39 e 40 ilustram o comportamento das vazões simuladas e observadas na seção de controle da barragem de Foz do Areia, exutório desta análise.

A bacia hidrográfica até o reservatório se caracteriza pela mudança de declividade e capacidade de armazenamento nas várzeas nos trechos a montante e jusante de União da Vitória. O trecho a jusante de União da Vitória se caracteriza pela resposta da chuva no hidrograma rápida e com poucas perdas, diferente do trecho de montante. Esta característica é importante para a análise dos resultados das simulações.

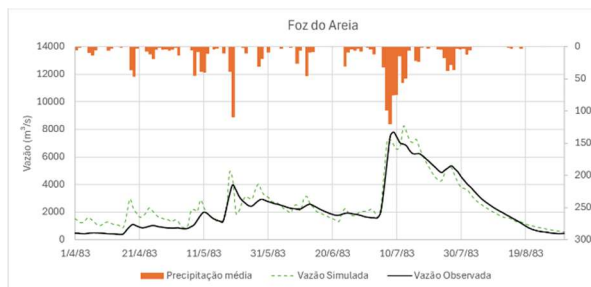


Figura 37 – Calibração de 1983 – Foz do Areia

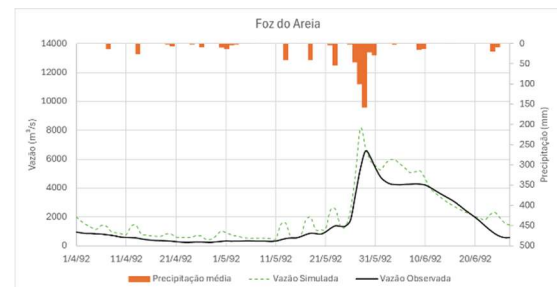


Figura 38 – Validação de 1992 – Foz do Areia

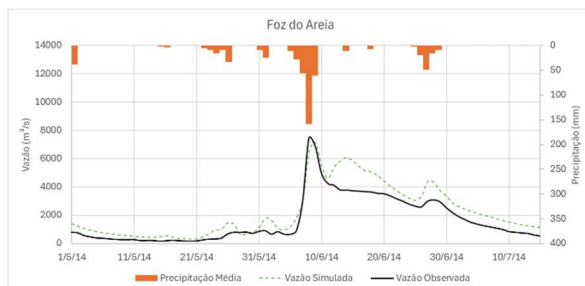


Figura 39 – Validação de 2014 – Foz do Areia

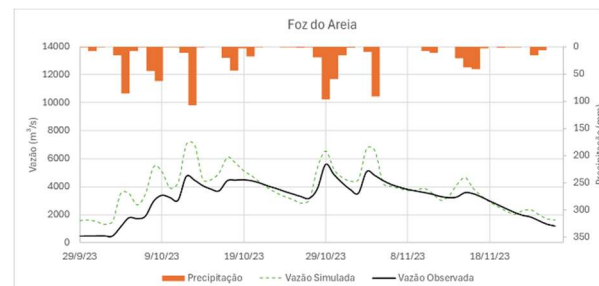


Figura 40 – Validação de 2023 – Foz do Areia

Nas Figuras 49, 50 e 51 estão as validações para os eventos de cheia de 1992, 2014 e 2023. Se observa boa representação do modelo na análise gráfica e pelas métricas de avaliação.

Apesar de a avaliação de Bias estar classificada como “Não satisfatório” pelos critérios de Moriasi, conforme Tabela 6, se considerou que o modelo representou corretamente os fenômenos da bacia.

A complexidade regional no que tange à meteorologia, distinção de armazenamento e perdas do solo ao longo da área de drenagem, registros de dados observados, dados de vazões gerados com eventuais inconsistências devido às curvas de descarga ou de superfície, torna a calibração do modelo complexa e, por isso tudo, se considera o modelo adequado para simular o hidrograma de projeto a ser utilizado em simulador para operação do reservatório em casos de cheias históricas.

Tabela 8 – Avaliação das métricas para Foz do Areia

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²
Baixo	Foz do Areia	Calibração	1983	0,880	8,95	0,3	0,893
			1992	0,817	30,08	0,4	0,922
		Validação	2014	0,765	36,16	0,5	0,930
			2023	0,355	21,38	0,8	0,766
Muito bom		Bom		Satisfatório		Não satisfatório	

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015).

Cabe ainda a observação do quesito de volume acumulado ao longo do evento. As métricas de avaliação da calibração do modelo avaliam todo o período de dados inseridos, porém, é relevante a melhor representação das cheias. As Figuras 41, 42, 43 e 44 ilustram os hidrogramas e os volumes acumulados ao longo das fases de ascensão, pico e recessão dos hidrogramas. Nota-se a ótima representação simulada da estimativa de volume que chega ao reservatório de Foz do Areia para a cheia de 1983, para os outros eventos pode-se observar a antecipação dos volumes simulados. Isto pode ser explicado devido as características do evento escolhido para calibração, por possuir umidade significativa antes do pico do hidrograma.

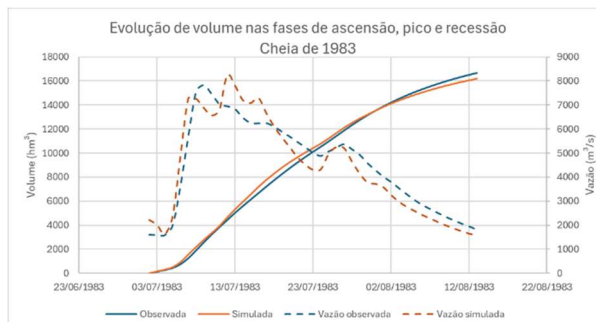


Figura 41 – Calibração Evento de 1983

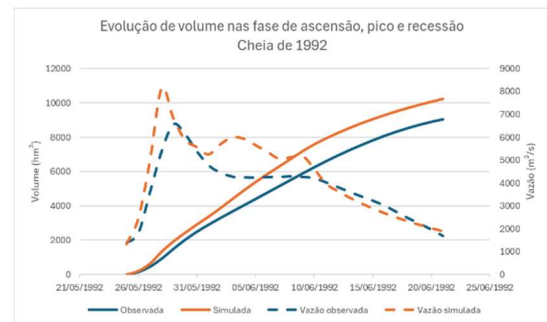


Figura 42 – Validação Evento de 1992

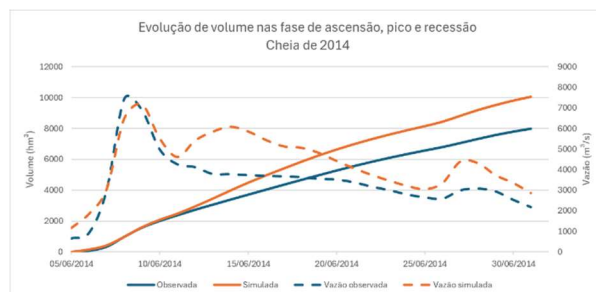


Figura 43 – Validação Evento de 2014



Figura 44 – Validação Evento de 2023

INCREMENTAL DE SEGREDO

As Figuras 45, 46 e 47 ilustram o comportamento das vazões simuladas e observadas na seção de controle da barragem de Segredo.

O trecho incremental entre os reservatórios de Segredo e Foz do Areia se caracteriza pela declividade acentuada e grande capacidade de escoamento superficial com pouca retenção no solo. Esta característica é importante para a análise dos resultados das simulações.

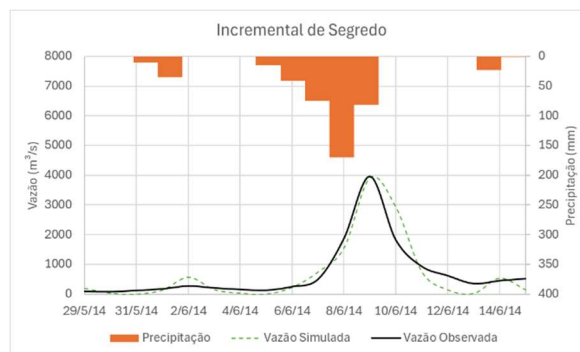


Figura 45 – Calibração Evento de 2014

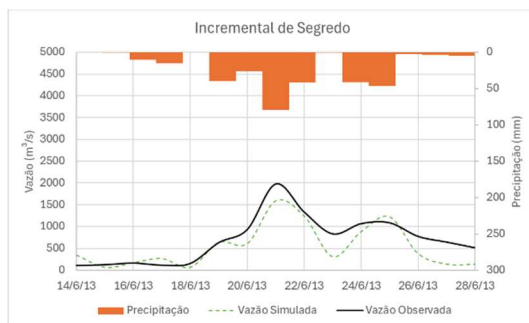


Figura 46 – Validação Evento de 2013

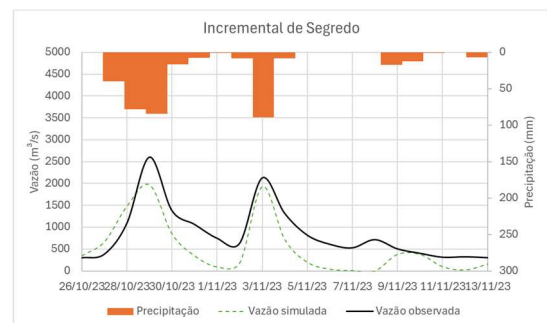


Figura 47 – Validação Evento de 2023

A Tabela 7 apresenta as métricas de avaliação, onde se observa que a validação do evento de 2013 pode ser considerada “Satisfatória”, pelos critérios de Moriasi. Mas, por outro lado classificada como “Não Satisfatória” para o evento de 2023. O evento de 2023 possui características que demandam análise específica diante de ocorrências de eventos similares.

Tabela 9 – Avaliação das métricas para Segredo

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²
Incremental Segredo – Foz do Areia	Segredo	Calibração	2014	0,872	-3,89	0,4	-
		Validação	2013	0,687	-24,82	0,6	-
			2023	0,425	-38,87	0,8	-
Muito bom	Bom	Satisfatório		Não satisfatório			

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015).

Tabela 10 - Avaliação das calibrações e validações

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²	
Alto	Porto Amazonas	Calibração	1983	0,848	-2,99	0,4	0,852	
			1992	-2,304	98,76	1,8	0,726	
		Validação	2014	-2,601	110,02	1,9	0,659	
			2023	0,774	21,32	0,5	0,807	
Alto	São Bento	Calibração	1983	-	-	-	-	
			1992	0,778	3,05	0,5	0,779	
		Validação	2014	0,462	21,77	0,7	0,492	
			2023	0,788	-18,19	0,5	0,812	
Alto	Rio Negro	Calibração	1983	0,906	-8,87	0,3	0,916	
			1992	0,878	29,30	0,3	0,961	
		Validação	2014	0,842	-8,47	0,4	0,850	
			2023	0,887	-16,52	0,3	0,948	
Médio	São Mateus do Sul	Calibração	1983	-	-	-	-	
			1992	0,773	28,54	0,5	0,818	
		Validação	2014	-0,233	79,47	1,1	0,973	
			2023	0,637	2,57	0,6	0,631	
Médio	Divisa	Calibração	1983	0,425	-0,36	0,8	0,707	
			1992	-0,054	58,67	1,0	0,931	
		Validação	2014	0,934	7,97	0,3	0,938	
			2023	0,712	-24,57	0,5	0,817	
Médio	Pontilhão do Potinga	Calibração	1983	-	-	-	-	
			1992	-1,134	58,16	1,5	0,793	
		Validação	2014	-1,765	90,97	1,7	0,722	
			2023	0,344	40,52	0,8	0,835	
Médio	Fluviópolis	Calibração	1983	0,797	-2,74	0,5	0,819	
			1992	0,816	23,5	0,4	0,753	
		Validação	2014	0,440	-5,25	0,7	0,966	
			2023	0,801	0,74	0,4	0,708	
Baixo	Santa Cruz do Timbó	Calibração	1983	-	-	-	-	
			1992	0,366	-53,83	0,8	0,878	
		Validação	2014	0,655	-	0,6	0,443	
			2023	0,358	21,53	0,8	0,622	
Baixo	Madeira Gavazzoni	Calibração	1983	0,797	13,03	0,5	0,774	
			1992	0,655	60,76	0,6	0,851	
		Validação	2014	0,624	21,11	0,6	0,850	
			2023	0,837	7,78	0,4	0,707	
Baixo	Jangada do Sul	Calibração	1983	0,534	36,86	0,7	0,781	
			1992	0,463	66,63	0,7	0,800	
		Validação	2014	0,345	25,74	0,8	0,823	
			2023	0,218	15,99	0,9	0,545	
Baixo	União da Vitória	Calibração	1983	0,884	-1,56	0,3	0,890	
			1992	0,805	20,1	0,4	0,892	
		Validação	2014	0,566	39,24	0,7	0,872	
			2023	0,825	13,49	0,4	0,820	
Baixo	Foz do Areia	Calibração	1983	0,880	8,95	0,3	0,893	
			1992	0,817	30,08	0,4	0,922	
		Validação	2014	0,733	34,98	0,5	0,930	
			2023	0,623	26,43	0,6	0,798	
Incremental Segredo – Foz do Areia	Segredo	Calibração	2014	0,872	-3,89	0,4	-	
			Validação	2013	0,687	-24,82	0,6	-
				2023	0,425	-38,87	0,8	-

- Parâmetro não avaliado.

5.2 Resultados do simulador hidráulico HEC-ResSim

Foram realizadas simulações baseadas em diferentes cenários de vazões afluentes com o intuito de verificação de atendimentos de três condicionantes essenciais para atendimento aos princípios da operação hidráulica:

- Remanso em União da Vitória;
- Nível de equilíbrio, e;
- Vazão natural afluente em Segredo diante da defluência praticada.

As séries de vazões hipotéticas utilizadas, foram geradas no HEC-HMS a partir dos parâmetros da calibração do evento de cheia histórica de 1983, sendo os hietogramas gerados pelo método de equação IDF e blocos alternados para diferentes tempos de retorno, para cidades representativas da subdivisão por trechos da bacia hidrográfica.

Para o cenário da cheia para precipitação de 10 anos de tempo de retorno (TR10), onde o maior valor de vazão chega a 4.207 m³/s, o software indica que o nível do reservatório deve ser rebaixado para o nível 741,50 m, possibilitando que a operação transcorra sem influenciar nos níveis do município.

Na Figura 49, percebe-se na hora 100 um aumento e diminuição da vazão defluente. Isto ocorre para atingir o nível máximo da zona de conservação, neste caso, nível máximo para evitar remanso. A partir da hora 100, o reservatório tende a trabalhar a fio d'água. Neste patamar, os valores de vazão vertida praticados estão dentro da capacidade de vertimento por orifício, e ainda não é necessário praticar os valores máximos de vazão vertida.

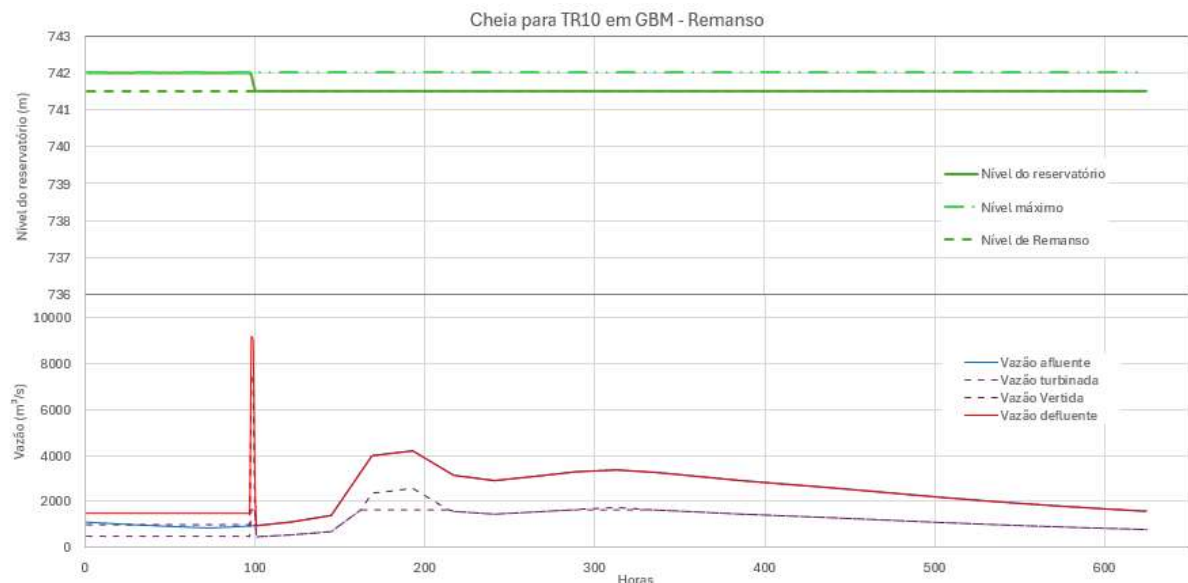


Figura 48 – Simulação para TR10 - Avaliação de remanso em União da Vitória

Já a operação voltada para atender ao critério do nível de equilíbrio, o software indica que, com início do rebaixamento dois dias antes do início da cheia, o nível do reservatório não atinge o nível de equilíbrio sugerido devido à carga sobre o vertedouro em lâmina livre. O nível sugerido pela metodologia de estimativa de nível de equilíbrio foi de 732,19 m e o nível que o reservatório atingiria seria 734,22 m.

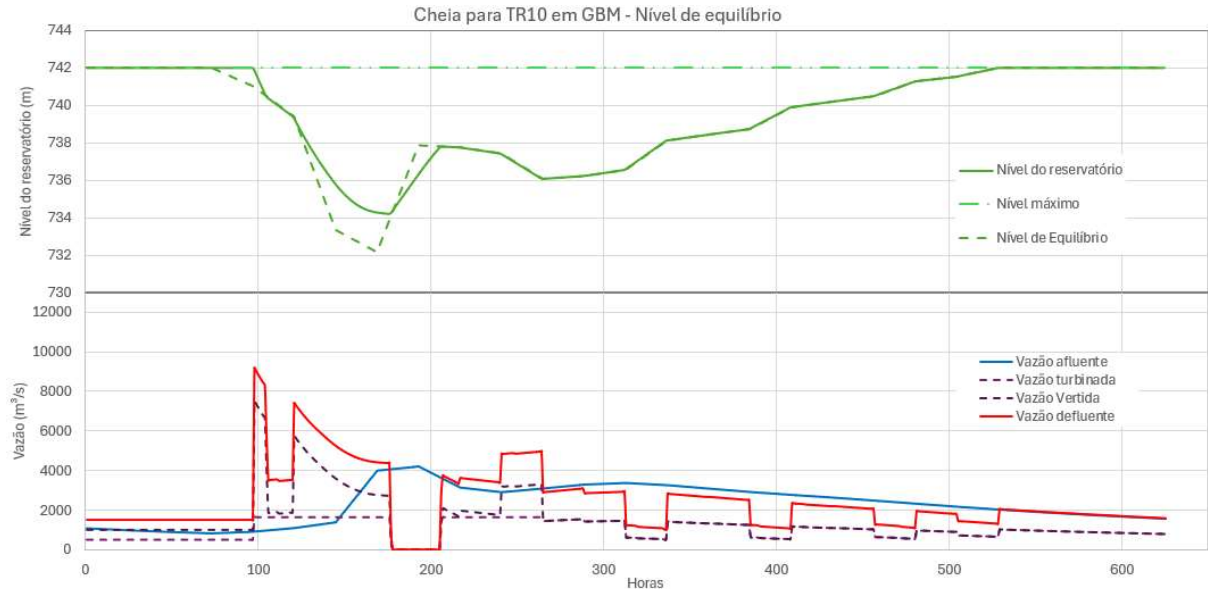


Figura 49 – Simulação para TR10 – Avaliação do Nível de Equilíbrio

Para o cenário da cheia para chuva de 50 anos de tempo de retorno, onde o maior valor de vazão chega a 5.406 m³/s, o software indica que o nível do reservatório deve ser rebaixado para o nível 741,15 m, possibilitando que a operação transcorra sem influenciar nos níveis do município.

No gráfico abaixo, percebe-se na hora 100 um aumento e diminuição da vazão defluente. Isto ocorre para atingir o nível máximo da zona de conservação, neste caso, nível máximo para evitar remanso. A partir da hora 100, o reservatório tende a trabalhar a fio d'água. Neste patamar, os valores de vazão vertida praticados estão dentro da capacidade de vertimento por orifício, e ainda não é necessário praticar os valores máximos de vazão vertida, abertura em lâmina livre.

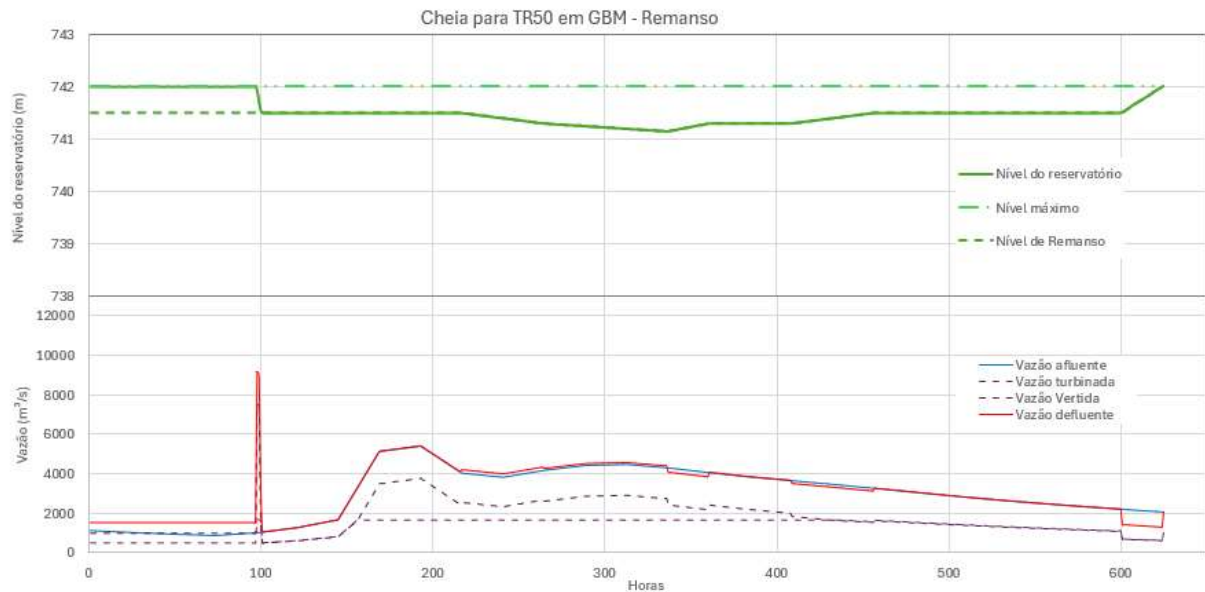


Figura 50 – Simulação para TR50 – Avaliação de remanso em União da Vitória

A Figura 52 apresenta o cenário de cheia para chuva de 100 anos, onde o maior valor de vazão chega a 6.033 m³/s, o software indica que o nível do reservatório sugerido pela metodologia, 740,80 m, é atingido e a operação do reservatório transcorre sem influenciar nos níveis do município.

No gráfico abaixo, percebe-se na hora 100 um aumento e diminuição da vazão defluente. Isto ocorre para atingir o nível máximo da zona de conservação, neste caso, nível máximo para evitar remanso. A partir da hora 100, o reservatório tende a trabalhar a fio d'água. Neste patamar, os valores de vazão vertida praticados estão dentro da capacidade de vertimento por orifício, e ainda não é necessário praticar os valores máximos de vazão vertida, abertura em lâmina livre.

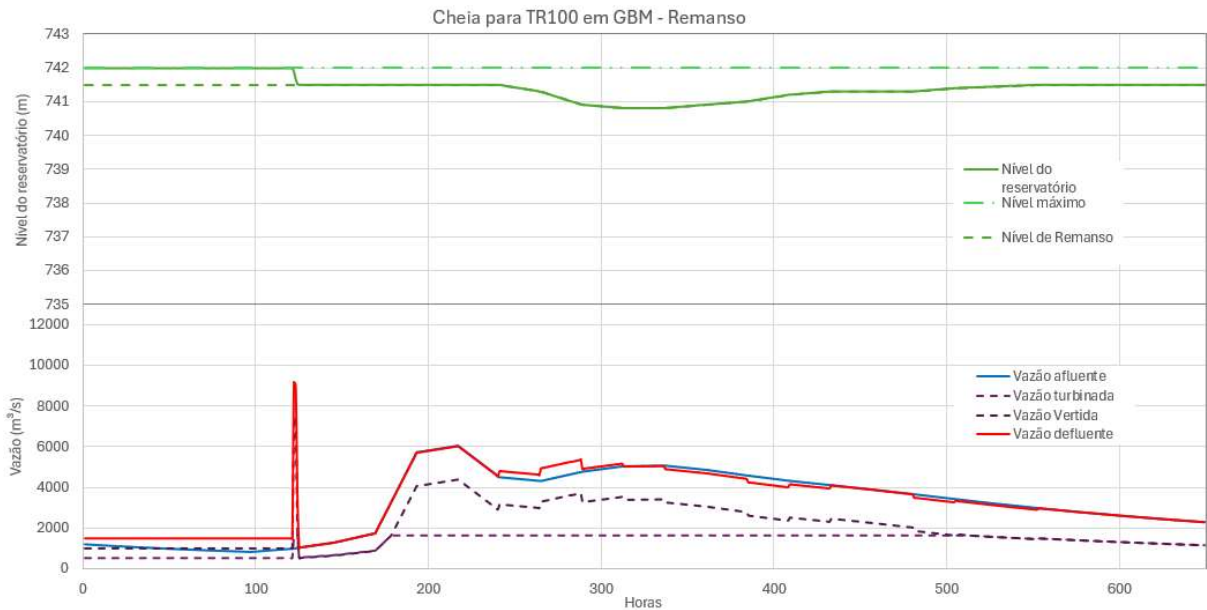


Figura 51 – Simulação para TR100 – Avaliação de remanso em União da Vitória

A Figura 53 demonstra a operação voltada para atender ao critério do nível de equilíbrio para chuva de 100 anos de tempo de recorrência, o software indica que, com início do rebaixamento dois dias antes do início da cheia, o nível do reservatório não atinge o nível de equilíbrio sugerido devido à carga sobre o vertedouro em lâmina livre. O nível sugerido pela metodologia de estimativa de nível de equilíbrio foi de 718,16 m e o nível que o reservatório atingiria seria 734,16 m.

Pode-se notar a resposta imediata da necessidade de rebaixamento do reservatório na linha vermelha, próximo à hora 120, onde eleva para a maior capacidade defluente possível e, com o passar das horas, nota-se a diminuição da capacidade em função da diminuição do nível.



Figura – 52 Simulação para TR100 – Avaliação do Nível de Equilíbrio

A mesma simulação para verificação do nível de equilíbrio foi realizada partindo do nível do reservatório nas cotas 740 e 738 m e, nos dois casos, o nível do reservatório atingiria o nível 733,48 m, 0,68 m abaixo do nível que a simulação partindo do nível máximo indica.

Para o cenário da cheia para chuva de 500 anos de tempo de retorno, onde o maior valor de vazão chega a 7.876 m³/s, o software indica que o nível do reservatório deve ser rebaixado para o nível 738,45 m confirmar dados. Neste cenário, durante o processo de rebaixamento do reservatório para atingir a cota requerida, a vazão afluente atinge a capacidade de defluência do reservatório, fazendo com que o nível do reservatório tenha sua tendência invertida e passe a se elevar.

A Figura 54, demonstra que o nível do reservatório acompanha o nível máximo de remanso, porém, quando o software identifica o momento de realizar aumento da vazão defluente para permanecer em patamar inferior à cota de remanso, a vazão afluente já está em valores elevados e o vertedouro abre totalmente. Devido ao atraso na tomada de decisão, se observa que o reservatório provocaria incremento no nível de União da Vitória. Deste modo, o simulador possibilita a realização de testes para adoção de práticas para avaliar outras possibilidades de modo a evitar esta influência.

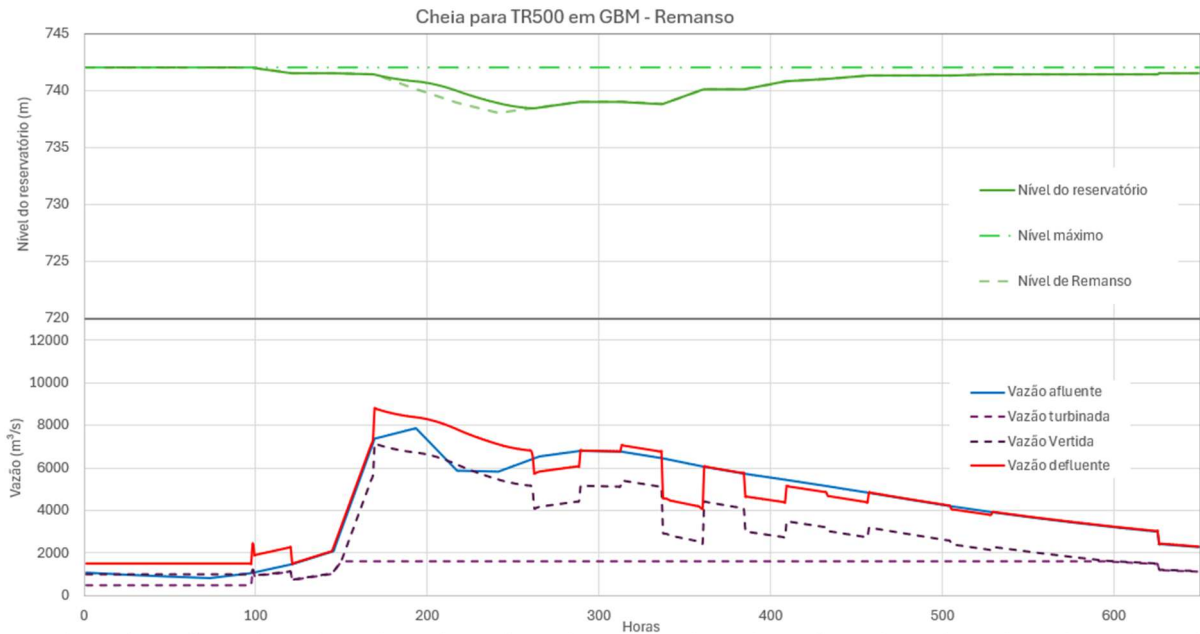


Figura 53 – Simulação bruta para TR500 – Com remanso em União da Vitória

Com a observação por meio da simulação da possibilidade de influenciar na elevação do nível em União da Vitória, foi realizada nova simulação onde se antecipa o rebaixamento, conforme Figura 5. O nível do reservatório se comporta dentro dos parâmetros desejados de elevação de nível.

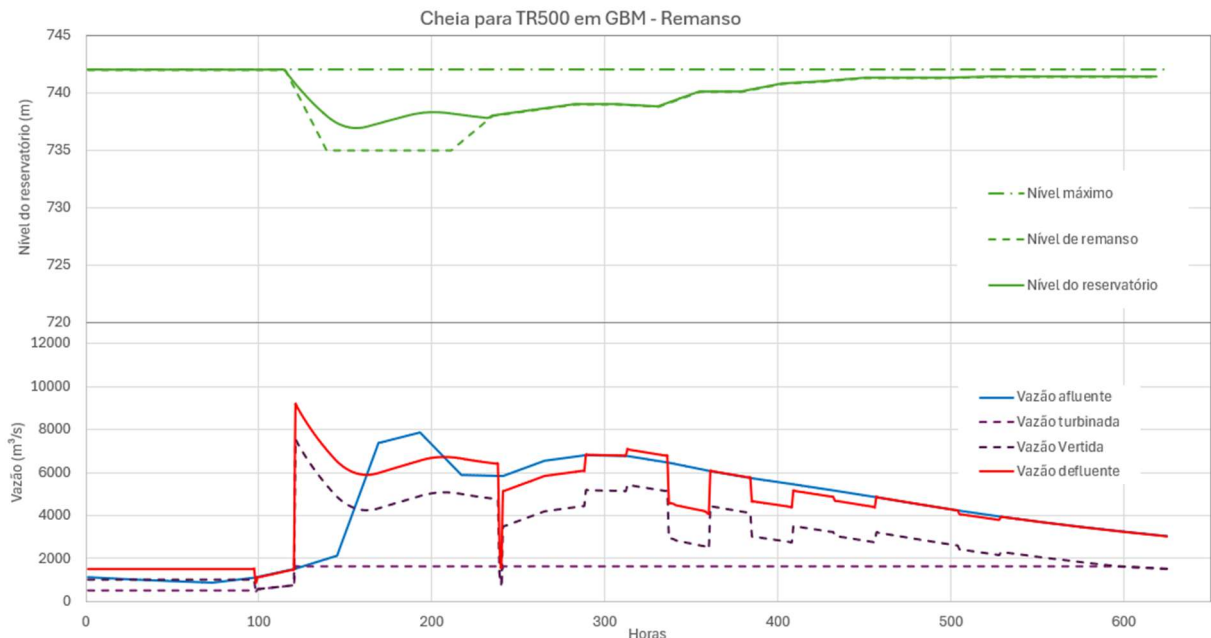


Figura 54 – Simulação consolidada TR500 – Sem remanso em União da Vitória

Mesmo neste caso, a vazão afluente a Segredo permanece abaixo de sua capacidade máxima de descarga, mantendo a vazão defluente de Segredo ao longo de todo o período de cheia, inferior à vazão natural estimada. Deste modo, conforme a Figura 56 a vazão afluente se eleva, a vazão defluente é elevada na mesma proporção, visando à manutenção do nível do

reservatório no nível máximo normal, sendo este o referencial inserido no software como prioritário a ser atendido.

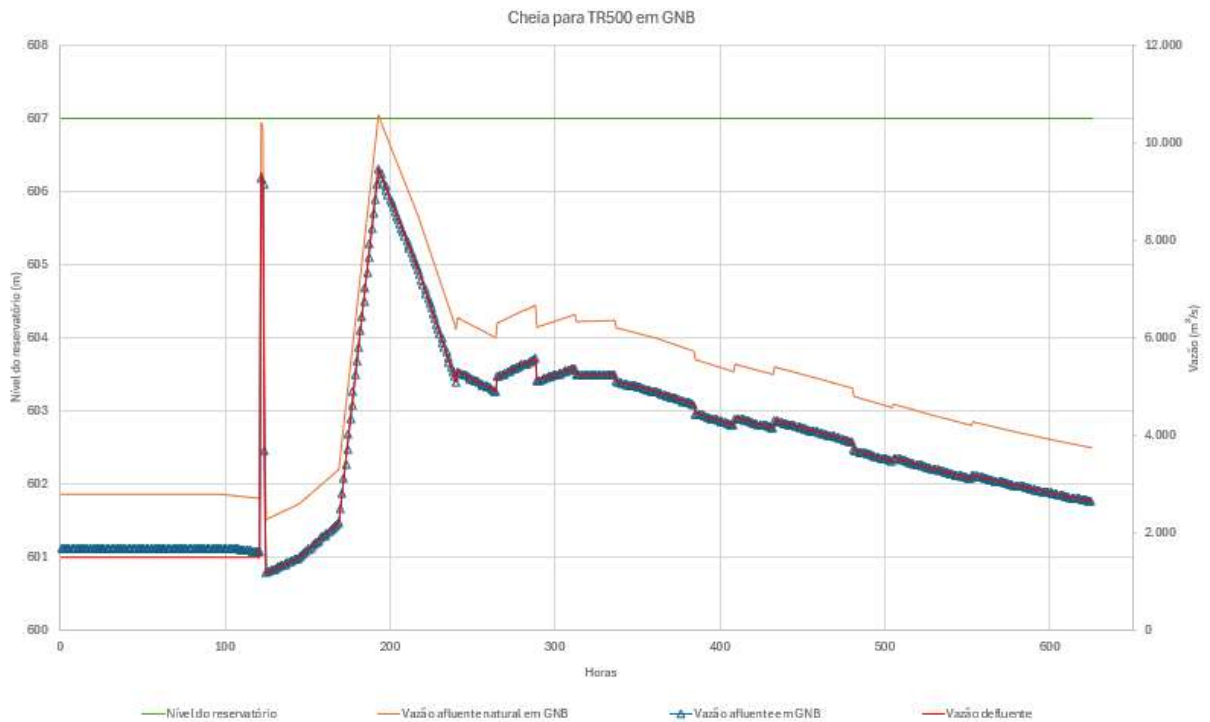


Figura 55 – Avaliação da vazão natural em Segredo

Para o cenário da cheia para chuva de 1.000 anos de Tempo de Retorno, onde o maior valor de vazão chega a $8.850 \text{ m}^3/\text{s}$, o software indica que, com a calibração utilizada, onde se observa a elevação gradual dos níveis em União da Vitória, com pico ocorrendo após o pico do reservatório de Foz do Areia, mesmo se a cheia iniciasse quando o nível do reservatório estivesse no mínimo operativo, com o vertedouro totalmente aberto quando sua soleira fosse atingida e a geração da usina maximizada, haveria agravamento da elevação do nível d'água em União da Vitória.

Na Figura 57 se observa no gráfico superior as simulações iniciando nas cotas 700 m na cor lilás, na cota 720 m na cor laranja e 736 m na linha contínua de cor verde. No gráfico inferior, se observa a afluência na linha azul e as defluências referentes as cotas iniciais com o mesmo referencial de cores do gráfico de níveis.

Pouco antes da hora 200, as três simulações indicam abertura total do vertedouro e maximização da usina, mas, devido ao nível do reservatório, em nenhum dos casos há carga suficiente para implementar defluência igual à afluência e o reservatório permanece com o nível em elevação.

Mesmo a linha lilás, onde se observa estável até próximo à hora 250, só inicia o vertimento quando o nível atinge a soleira do vertedouro na cota 725,50 m e o nível estabiliza

pouco antes da hora 400, o nível do reservatório permaneceria algumas horas acima do nível que evitaria influenciar na elevação do nível em União da Vitória.

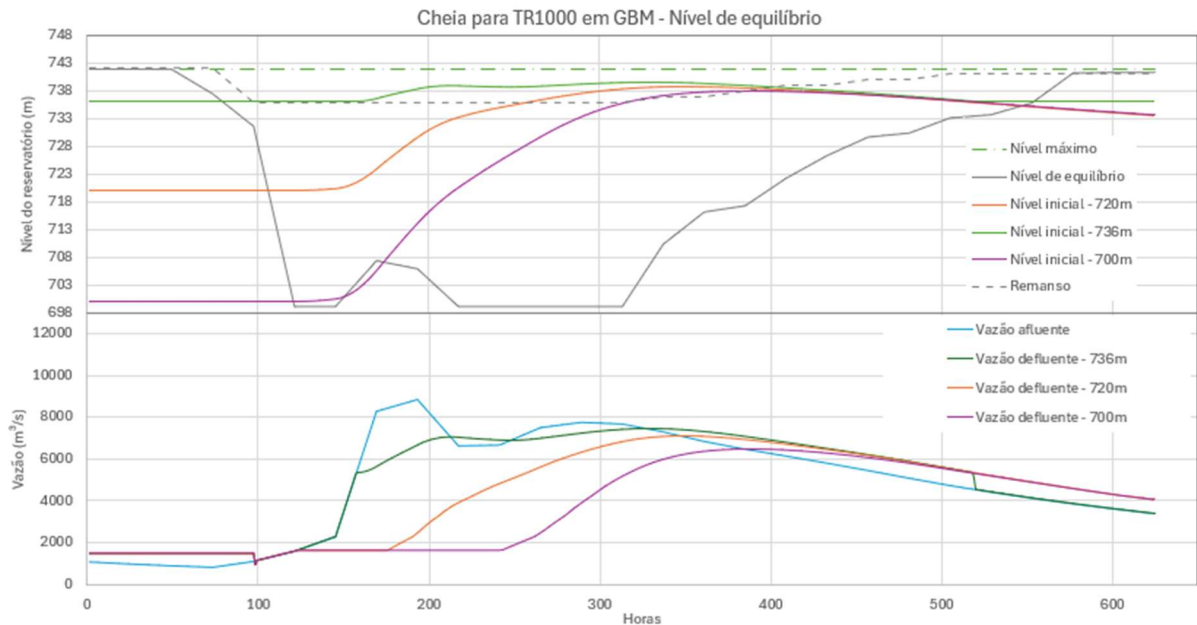


Figura 56 – Simulação TR 1000 – Comparativo para diferentes níveis iniciais

Para os cenários de cheia para chuvas com tempo de retorno de 5.000 e 10.000 anos, o software indica a elevação da cota para patamares superiores ao nível máximo normal, com todos os vãos do vertedouro abertos totalmente e geração máxima. A Figura 58 ilustra o comparativo entre as vazões afluentes e os níveis que seriam atingidos no reservatório, com a cota inicial no nível mínimo operativo.

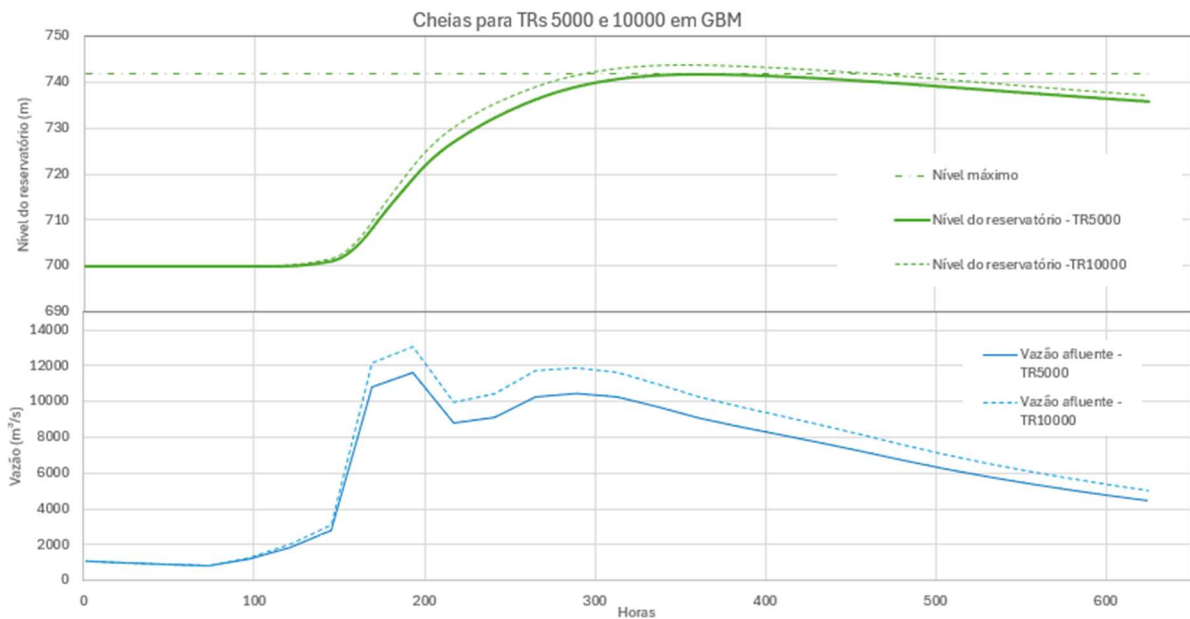


Figura 57 – Simulação TRs 5000 e 10000 – Comparativo de níveis e vazões

6. Conclusões

O acoplamento off-line dos modelos HEC-HMS e HEC-ResSim foi executada de forma satisfatória diante da metodologia adotada e dos resultados esperados.

As métricas de avaliação da calibração do modelo hidrológico HEC-HMS para Foz do Areia e Segredo, com a discretização temporal de um dia, classificaram o modelo como “Muito Bom”. Importante levar em consideração a complexidade das características físicas e meteorológicas da bacia hidrográfica. Apesar de parametrização distinta entre as regiões de montante de Foz do Areia e a área incremental de Segredo.

A validação do modelo hidrológico para Foz do Areia, de maneira geral, foi classificada como “Boa”, segundo Moriasi. Os percentuais de PBias ficaram comprometidos, provavelmente pela magnitude da cheia calibrada, evento de 1983, a qual iniciou com a bacia hidrográfica em nível elevado de umidade e saturação do solo.

A validação do modelo para o reservatório Segredo foi avaliada em “Satisfatório” para o evento de 2013 e “Não satisfatório” para o evento de 2023. O evento meteorológico de 2023 possui características diferentes do que os outros eventos avaliados, portanto, o modelo tende a não representar bem este evento em todos os trechos da bacia hidrográfica, tendo em vista o evento utilizado na calibração.

Com o software calibrado e validado, foram gerados os hidrogramas no software HEC-HMS para precipitações de diferentes tempos de retorno, possibilitando, então, as simulações de operação hidráulica dos reservatórios pelo software HEC-ResSim.

As simulações realizadas para as diferentes condições de precipitação possibilitaram simular cenários para avaliação da proteção das restrições, principalmente avaliação de remanso em União da Vitória e a busca pelo nível de equilíbrio.

A pesquisa concluiu que o acoplamento off-line entre o modelo hidrológico HEC-HMS e o modelo de simulação de operação hidráulica de reservatórios HEC-ResSim, possui grande capacidade de gerar regras operacionais e auxiliar com geração de dados e informações para adoção das melhores tomadas de decisão aos agentes operadores de reservatórios voltados para geração de energia elétrica.

APÊNDICE A – Estações pluviométricas – 1983

Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição
Caratua	2459015	-25,50	-49,50	Porto Amazonas
Curitiba	2549002	-25,42	-49,30	Porto Amazonas
Fazenda Exp. Fac. Agronomia - Pinhais	2549004	-25,4	-49,1	Porto Amazonas
Piraquara	2549004	-25.45	-49.07	Porto Amazonas
Bela Vista	2549024	-25,60	-49,40	Porto Amazonas, São Bento
Porto Amazonas	2549001	-25,55	-49,88	Porto Amazonas, São Mateus do Sul
São Bento	2549000	-25,93	-49,78	São Bento, Divisa
Rincão	2549063	-25,78	-49,15	São Bento, Porto Amazonas
Rio da Várzea dos Lima	2549003	-25,95	-49,39	São Bento, Rio Negro
Campina dos Martins	2649045	-26,12	-49,67	Rio Negro
Corredeira	2649055	-26,42	-49,57	Rio Negro
São Bento do Sul	2649062	-26,23	-49,38	Rio Negro
Iracema	2650022	-26,46	-50,00	Rio Negro, Divisa
Rio Negro	2649021	-26,10	-49,80	Rio Negro, Divisa
Colônia Padre Paulo	2649047	-26,10	-49,30	Rio Negro, São Bento
Fragosos	2649018	-26,15	-49,38	Rio Negro, São Bento
São João do Triunfo	2550036	-25,68	-50,30	São Mateus do Sul
Água Azul	2550032	-25,82	-50,13	São Mateus do Sul, Divisa
São Mateus do Sul	2550001	-25,88	-50,39	São Mateus do Sul, Pontilhão do Potinga, Fluiópolis
Divisa	2650026	-26,09	-50,33	Divisa, Fluiópolis
Itaiópolis	2649056	-26,33	-49,93	Divisa, Rio Negro
Rebouças	2550038	-25,62	-50,70	Pontilhão do Potinga
Turvo	2550035	-25,70	-50,52	Pontilhão do Potinga
Pontilhão do Potinga	2550017	-25,91	-50,52	Pontilhão do Potinga, Fluiópolis, São Mateus do Sul
Santa Cruz do Cerro	2550027	-25,83	-50,98	Pontilhão do Potinga, União da Vitória, Madeireira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia
Fatura	2550022	-26,0	-50,5	Fluiópolis, Pontilhão do Potinga, Divisa, São Mateus do Sul
Fluiópolis	2650006	-26,0	-50,6	Fluiópolis, União da Vitória
Lebon Régis	2650019	-26,90	-50,66	Santa Cruz do Timbó
Buriti - Timbó Grande	2650016	-26,56	-50,60	Santa Cruz do Timbó, Fluiópolis
Santa Cruz do Timbó	2650008	-26,38	-50,88	Santa Cruz do Timbó, União da Vitória
Vargem Grande	2650011	-26,12	-50,87	União da Vitória
União da Vitória	2651000	-26,23	-51,08	União da Vitória, Incremental de Foz do Areia
Rio Claro do Sul	2550005	-25,95	-50,68	União da Vitória, Pontilhão do Potinga
Irineópolis	2650002	-26,25	-50,80	União da Vitória, Santa Cruz do Timbó
Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição

Pinheiros	2650018	-26,35	-50,65	União da Vitória, Santa Cruz do Timbó
Cresciúma	2551016	-25,95	-51,70	Incremental de Foz do Areia
Palmital do Meio	2651005	-26,03	-51,14	Incremental de Foz do Areia
Porto Vitória	2651004	-26,2	-51,2	Incremental de Foz do Areia
Santana	2551017	-25,94	-51,26	Incremental de Foz do Areia
Matos costa	2651061	-26,48	-51,17	Jangada do Sul e Santa Cruz do Timbó
Jangada do Sul	2651003	-26,39	-51,27	Jangada do Sul, Incremental de Foz do Areia
Calmon	2651044	-26,59	-51,12	Jangada do Sul, Santa Cruz do Timbó
Inácio Martins	2551014	-25,57	-51,07	Madeira Gavazzoni
Leonópolis	2551001	-25,69	-51,20	Madeira Gavazzoni
Madeira Gavazzoni	2551022	-25,8	-51,3	Madeira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia

APÊNDICE B – Estações pluviométricas – 1992

Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição
Caratua	2459015	-25,50	-49,50	Porto Amazonas
Curitiba	2549002	-25,42	-49,30	Porto Amazonas
Piraquara	2549004	-25,45	-49,07	Porto Amazonas
Bela Vista	2549024	-25,60	-49,40	Porto Amazonas, São Bento
Porto Amazonas	2549001	-25,55	-49,88	Porto Amazonas, São Mateus do Sul
São Bento	2549000	-25,93	-49,78	São Bento, Divisa
Rincão	2549063	-25,78	-49,15	São Bento, Porto Amazonas
Rio da Várzea dos Lima	2549003	-25,95	-49,39	São Bento, Rio Negro
Campina dos Martins	2649045	-26,12	-49,67	Rio Negro
Corredeira	2649055	-26,42	-49,57	Rio Negro
Iracema	2650022	-26,46	-50,00	Rio Negro, Divisa
Rio Negro	2649021	-26,10	-49,80	Rio Negro, Divisa
Colônia Padre Paulo	2649047	-26,10	-49,30	Rio Negro, São Bento
Fragosos	2649018	-26,15	-49,38	Rio Negro, São Bento
São João do Triunfo	2550036	-25,68	-50,30	São Mateus do Sul
Água Azul	2550032	-25,82	-50,13	São Mateus do Sul, Divisa
São Mateus do Sul	2550001	-25,88	-50,39	São Mateus do Sul, Pontilhão do Potinga, Fluiópolis
Divisa	2650026	-26,09	-50,33	Divisa, Fluiópolis
Itaiópolis	2649056	-26,33	-49,93	Divisa, Rio Negro
Rebouças	2550038	-25,62	-50,70	Pontilhão do Potinga
Turvo	2550035	-25,70	-50,52	Pontilhão do Potinga
Santa Cruz do Cerro	2550027	-25,83	-50,98	Pontilhão do Potinga, União da Vitória, Madeireira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia
Fartura	2550022	-26,0	-50,5	Fluiópolis, Pontilhão do Potinga, Divisa, São Mateus do Sul
Lebon Régis	2650019	-26,90	-50,66	Santa Cruz do Timbó
Buriti - Timbó Grande	2650016	-26,56	-50,60	Santa Cruz do Timbó, Fluiópolis
Vargem Grande	2650011	-26,12	-50,87	União da Vitória
União da Vitória	2651000	-26,23	-51,08	União da Vitória, Incremental de Foz do Areia
Rio Claro do Sul	2550005	-25,95	-50,68	União da Vitória, Pontilhão do Potinga
Pinheiros	2650018	-26,35	-50,65	União da Vitória, Santa Cruz do Timbó
Cresciúma	2551016	-25,95	-51,70	Incremental de Foz do Areia
Palmital do Meio	2651005	-26,03	-51,14	Incremental de Foz do Areia
Porto Vitória	2651004	-26,2	-51,2	Incremental de Foz do Areia
Santana	2551017	-25,94	-51,26	Incremental de Foz do Areia
Jangada do Sul	2651003	-26,39	-51,27	Jangada do Sul, Incremental de Foz do Areia
Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição

Calmon	2651044	-26,59	-51,12	Jangada do Sul, Santa Cruz do Timbó
Leonópolis	2551001	-25,69	-51,20	Madeira Gavazzoni
Madeira Gavazzoni	2551022	-25,8	-51,3	Madeira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia

APÊNDICE C – Estações pluviométricas – 2014

Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição
Caratua	2459015	-25,50	-49,50	Porto Amazonas
Curitiba	2549002	-25,42	-49,30	Porto Amazonas
Piraquara	2549004	-25,45	-49,07	Porto Amazonas
Bela Vista	2549024	-25,60	-49,40	Porto Amazonas, São Bento
Porto Amazonas	2549001	-25,55	-49,88	Porto Amazonas, São Mateus do Sul
São Bento	2549000	-25,93	-49,78	São Bento, Divisa
Rincão	2549063	-25,78	-49,15	São Bento, Porto Amazonas
Rio da Várzea dos Lima	2549003	-25,95	-49,39	São Bento, Rio Negro
Pedra Branca do Araraquara	2548020	-25,92	-48,88	Rio Negro
Corredeira	2649055	-26,42	-49,57	Rio Negro
Iracema	2650022	-26,46	-50,00	Rio Negro, Divisa
Rio Negro	2649021	-26,10	-49,80	Rio Negro, Divisa
Campo Alegre	2649057	-26,18	-49,28	Rio Negro
Fragosos	2649018	-26,15	-49,38	Rio Negro, São Bento
Guaiaca	2550037	-25,62	-50,20	São Mateus do Sul
Fluviópolis	2650006	-26,02	-50,59	Fluviópolis, União da vitória
Pedra Alta	2549059	-25,80	-49,88	São Mateus do Sul
São Mateus do Sul	2550001	-25,88	-50,39	São Mateus do Sul, Pontilhão do Potinga, Fluviópolis
Divisa	2650026	-26,09	-50,33	Divisa, Fluviópolis
Itaiópolis	2649056	-26,33	-49,93	Divisa, Rio Negro
Rebouças	2550038	-25,62	-50,70	Pontilhão do Potinga
Turvo	2550035	-25,70	-50,52	Pontilhão do Potinga
Fazenda Zaniolo	2551023	-25,82	-51,12	Madeira Gavazzoni
Pontilhão do Potinga	2550017	-25,91	-50,52	Fluviópolis, Pontilhão do Potinga
Lebon Régis	2650019	-26,90	-50,66	Santa Cruz do Timbó
Santa Cruz do Timbó	2650008	-26,38	-50,88	União da Vitória, Santa Cruz do Timbó
Buriti - Timbó Grande	2650016	-26,56	-50,60	Santa Cruz do Timbó, Fluviópolis
União da Vitória	2651000	-26,23	-51,08	União da Vitória, Incremental de Foz do Areia
Rio Claro do Sul	2550005	-25,95	-50,68	União da Vitória, Pontilhão do Potinga
Pinheiros	2650018	-26,35	-50,65	União da Vitória, Santa Cruz do Timbó
Palmital do Meio	2651005	-26,03	-51,14	Incremental de Foz do Areia
Porto Vitória	2651004	-26,2	-51,2	Incremental de Foz do Areia
Santana	2551017	-25,94	-51,26	Incremental de Foz do Areia
Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição
Jangada do Sul	2651003	-26,39	-51,27	Jangada do Sul, Incremental de Foz do Areia

Calmon	2651044	-26,59	-51,12	Jangada do Sul, Santa Cruz do Timbó
Leonópolis	2551001	-25,69	-51,20	Madeira Gavazzoni
Madeira Gavazzoni	2551022	-25,80	-51,30	Madeira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia
Foz do Areia	2651055	-26,00	-51,66	Incremental de Foz do Areia
Inácio Martins	2551014	-25,57	-51,07	Madeira Gavazzoni, Pontilhão do Potinga
Solais Novo	2651051	-26,07	-51,91	Incremental de Segredo
Reserva do Iguaçu (Rondinha)	2552022	-25,80	-52,02	Incremental de Segredo
UHE Fundação Barramento	2551060	-25,70	-52,00	Incremental de Segredo
Pedro Lustosa	2551037	-25,8	-51,85	Incremental de Segredo

APÊNDICE D – Estações pluviométricas – 2023

Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição
Porto Amazonas	2549001	-25,55	-49,88	Porto Amazonas, São Mateus do Sul
Curitiba	2549002	-25,42	-49,30	Porto Amazonas
Pinhais (Met)	-	-25,39	-49,13	Porto Amazonas
Lapa (Met)	2549104	-25,78	-49,76	São Mateus do Sul, São Bento
Gralha Azul (Met)	-	-25,65	-49,27	São Bento
São Bento	2549000	-25,93	-49,78	São Bento, Divisa
Fragosos	2649018	-26,15	-49,38	Rio Negro, São Bento
Corredeira	2649055	-26,42	-49,57	Rio Negro
Palmas (Met)	-	-26,47	-51,98	Rio Negro
Entre Rios (Met)	2551072	-25,55	-51,49	Jangada do Sul
Rio Negro	2649021	-26,10	-49,80	Rio Negro
Divisa	2650026	-26,09	-50,33	Divisa, Fluvioópolis
São Mateus do Sul	2550001	-25,88	-50,39	São Mateus do Sul, Pontilhão do Potinga, Fluvioópolis
Pontilhão do Potinga	2550017	-25,91	-50,52	Pontilhão do Potinga, União da Vitória, Madeira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia
Fluvioópolis	2650006	-26,00	-50,60	Fluvioópolis, União da Vitória
Porto Vitória	2651004	-26,20	-51,20	Incremental de Foz do Areia
Madeira Gavazzoni	2551022	-25,80	-51,3	Madeira Gavazzoni, Incremental de Foz do Areia
Foz do Cachoeira	2650028	-26,59	-50,73	Santa Cruz do Timbó
Jangada do Sul	2651003	-26,39	-51,27	Jangada do Sul, Incremental de Foz do Areia
Fernandes Pinheiro (Met)	-	-25,45	-50,58	Pontilhão do Potinga, Madeira Gavazzoni
União da Vitória (Met)	2651060	-26,23	-51,07	União da Vitória, Incremental de Foz do Areia
União da Vitória (Plu)	2651000	-26,23	-51,08	União da Vitória, Incremental de Foz do Areia
Foz do Areia	2651055	-26,00	-51,66	Incremental de Foz do Areia, Incremental de Segredo
Palmital do Meio	2651005	-26,03	-51,14	Incremental de Foz do Areia
Santa Cruz do Timbó	2650008	-26,38	-50,88	Santa Cruz do Timbó, União da Vitória
Pedro Lustosa	2551037	-25,80	-51,85	Incremental de Segredo
UHE Gov. Ney Aminthas Barramernto	2552057	-25,79	-52,12	Incremental de Segredo
UHE Gov. Ney Aminthas Solais Novo	2651054	-26,09	-51,88	Incremental de Segredo
UHE Fundação Pinhão	2551071	-25,65	-51,96	Incremental de Segredo

- Sem código ANA. Dado extraído do banco de dados do Simepar

APÊNDICE E – Estações pluviométricas – 2013

Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Sub-bacias de contribuição
Solais Novo	2651051	-26,07	-51,91	Incremental de Segredo
Reserva do Iguaçú (Rondinha)	2552022	-25,80	-52,02	Incremental de Segredo
UHE Fundão Barramento	2551060	-25,70	-52,00	Incremental de Segredo
Pedro Lustosa	2551037	-25,80	-51,85	Incremental de Segredo

APÊNDICE F – PRODUTO DA DISSERTAÇÃO

Acoplamento off-line dos softwares HEC-HMS e HEC-ResSim para controle de reservatórios: caso da operação conjunta de Foz do Areia e Segredo

Offline coupling of HEC-HMS and HEC-ResSim software for reservoir control: a case study of the joint operation of Foz do Areia and Segredo

Rafael Schinoff Mércio Pereira. UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Minas Gerais, Brasil. IRN – Instituto de Recursos Naturais. Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica E-mail: rmercio@gmail.com. ORCID: 0009-0009-1090-9190. Autor.

Benedito Cláudio da Silva. UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Minas Gerais, Brasil. IRN – Instituto de Recursos Naturais. Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica. E-mail: silvabenedito@unifei.edu.br. ORCID: 0000-0002-3357-3679. Orientador.

Resumo: O Brasil é rico em disponibilidade hídrica para geração de energia. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) são 161 usinas hidrelétricas distribuídas pelo território nacional. Destas, 89 são usinas hidrelétricas a fio d'água e 62 com capacidade de regularização. A gestão destes reservatórios é realizada, na maior parte do tempo, visando atender a demanda de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN) associada a eventuais restrições, tais como: manter os níveis dos rios a jusante ou taxa de deplecionamento dos reservatórios. Porém, em determinados momentos, a gestão dos reservatórios passa para o modo de controle de cheia, o qual contempla a segurança da barragem e do entorno do empreendimento. Cada empreendimento possui sua regra de operação, elaborada conforme as características de projeto, das restrições hidráulicas existentes e de clima regional. Nesta esteira, esta pesquisa visa contribuir com a operação do Sistema Interligado Nacional - SIN, aplicando o software de simulações de operações hidráulicas HEC-ResSim, desenvolvido pelo Corpo de Engenharia Hidrológica (HEC) das Forças Armadas Americana (USACE), acoplado ao modelo hidrológico HEC-HMS, do mesmo desenvolvedor, voltados à operação conjunta dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, no rio Iguaçu, estado do Paraná. Esta região é conhecida pelos eventos climáticos severos a qualquer época do ano, devido à variabilidade das características meteorológicas e de terreno. O modelo hidrológico foi calibrado e validado para os eventos de maior repercussão ao longo do período operativo dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, possibilitando, assim, a geração de hidrogramas para precipitações de diferentes tempos de retorno. Estes hidrogramas foram inseridos no software HEC-ResSim para avaliação do seu desempenho diante das restrições operativas existentes. Os resultados demonstram robustez nas simulações realizadas com acoplamento dos softwares.

Palavras-Chave: Gestão de Reservatórios, Usinas Hidrelétricas, Sistema Interligado Nacional, Regras de Operação, Controle de Cheia.

Abstract: Brazil is rich in water availability for power generation. According to the National Electric System Operator (ONS), there are 161 hydroelectric plants distributed across the national territory. Of these, 89 are run-of-river plants and 62 have storage capacity (ONS, 2025b). The management of these reservoirs is, for the most part, aimed at meeting the energy demand of the National Interconnected System (SIN), while also considering certain restrictions, such as maintaining downstream river levels or the reservoir depletion rate. However, at specific times, reservoir management shifts to flood control mode, which prioritizes the safety of the dam and the surrounding area. Each facility has its own operating rules, developed according to project characteristics, existing hydraulic constraints, and regional climate conditions. In this context, this research aims to contribute to the operation of the National Interconnected System (SIN) by applying the hydraulic operation simulation software HEC-ResSim, developed by the Hydrologic Engineering Center (HEC) of the U.S. Army Corps of Engineers (USACE), coupled with the hydrological model HEC-HMS, also developed by the same institution. The focus is on the joint operation of the Foz do Areia and Segredo reservoirs, located on the Iguaçu River in the state of Paraná. This region is known for severe weather events at any time of the year, due to the variability of meteorological and terrain characteristics. The hydrological model was calibrated and validated for the most significant events throughout the operational period of the Foz do Areia and Segredo reservoirs, thus enabling the generation of hydrographs for different return periods. These hydrographs were then inserted into HEC-ResSim to evaluate its performance under existing operational restrictions. The results demonstrate robustness in the simulations carried out with the coupling of the two software tools.

Keywords: Reservoir management, Hydropower Plants, National Interconnect System, Operation Rules, Flood Control.

INTRODUÇÃO

A gestão eficiente de recursos hídricos em bacias com aproveitamentos hidrelétricos em cascata representa um dos maiores desafios da engenharia hídrica contemporânea. O aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos, intensificado pelas mudanças climáticas e pela alteração do uso do solo, exige sistemas de suporte à decisão que integrem precisão na previsão de vazões e agilidade na definição de estratégias operativas. Na bacia do Rio Iguaçu, esta problemática é acentuada pela declividade acentuada e pelos tempos de concentração reduzidos, que impõem uma janela temporal estreita para ações de controle de cheias.

O sistema composto pelas Unidades Geradoras de Energia (UHEs) Governador Bento Munhoz da Rocha Netto (Foz do Areia) e Governador Ney Aminthas de Barros Braga (Segredo) assume papel estratégico no Sistema Interligado Nacional (SIN) e na segurança hídrica regional. Enquanto Foz do Areia atua como o principal reservatório de regularização da cascata, com grande capacidade de armazenamento, a UHE Segredo opera com restrições de remanso e metas de vazão que dependem diretamente da coordenação entre os dois barramentos. A complexidade desta operação reside no trade-off entre a maximização da geração hidrelétrica e a manutenção de volumes de espera para amortecimento de ondas de cheia, visando mitigar impactos em áreas vulneráveis a jusante, como a região de União da Vitória.

Historicamente, a operação desses reservatórios baseia-se em curvas-guia e regras rígidas que podem não contemplar a dinâmica hidrológica de eventos de curtíssimo prazo. Nesse contexto, a utilização de ferramentas de modelagem computacional, como o *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) e o *Reservoir System Simulation* (HEC-ResSim), surge como uma alternativa robusta para a simulação de cenários em tempo quase-real. Entretanto, a literatura técnica aponta que a eficácia dessas ferramentas depende de uma parametrização rigorosa e da validação da interoperabilidade entre os modelos hidrológico e operativo em bacias com alta variabilidade espacial da precipitação.

Apesar dos avanços na modelagem individualizada, há uma lacuna na avaliação do desempenho conjunto desses softwares frente a eventos históricos críticos de diferentes magnitudes no Rio Iguaçu. A integração eficiente entre a chuva-vazão e a simulação das regras de rebaixamento dinâmico ainda carece de análises detalhadas que quantifiquem a confiabilidade das respostas simuladas para suporte à tomada de decisão sob incerteza.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação e o desempenho dos softwares HEC-HMS e HEC-ResSim na operação conjunta das UHEs Foz do Areia e Segredo. Busca-se investigar a sensibilidade dos modelos na reprodução de eventos extremos e analisar como a integração dessas ferramentas pode otimizar as manobras operativas para controle de reservatórios. A pesquisa pretende fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento das políticas de operação em cascata, visando o equilíbrio entre a segurança das estruturas e a minimização de danos socioambientais decorrentes de eventuais cheias, com a devida proteção das restrições hidráulicas existentes, sendo as principais evitar remanso no município de União da Vitória e atender ao critério de alocação dinâmica de volume no reservatório de Foz do Areia.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada fundamenta-se na modelagem integrada chuva-vazão e na simulação da operação de reservatórios em cascata para controle de cheias. O fluxo metodológico foi estruturado para avaliar a sensibilidade dos softwares HEC-HMS e HEC-ResSim na reprodução de eventos históricos e na simulação de cenários críticos no sistema Foz do Areia - Segredo.

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Iguaçu está localizada predominantemente no estado do Paraná e tem suas nascentes na face oeste da Serra do Mar. Suas águas correm no sentido oeste e desaguam no rio Paraná, na cidade de Foz do Iguaçu, especificamente na divisa dos países Brasil, Argentina e Paraguai. A área de interesse no presente estudo é a região do Alto Iguaçu e parte do médio Iguaçu. No Alto Iguaçu predomina a baixa declividade e grandes armazenamentos nas várzeas. No Médio Iguaçu, porção onde estão inseridas as usinas hidrelétricas, as características se alteram para declividades acentuadas e baixa capacidade armazenamento. A Figura 1 ilustra a geolocalização da bacia hidrográfica do rio Iguaçu, com destaque em amarelo para a região a montante do reservatório de Segredo, que compreende a área de drenagem dos pontos de interesse, os reservatórios de Foz do Areia e Segredo, concebidos para geração de energia nas Usinas Hidrelétricas Governador Bento Munhoz da Rocha Netto e Governador Ney Braga, respectivamente.



Figura 58- Localização da bacia hidrográfica do rio Iguaçu

Esta região foi subdividida em quatro regiões: Trecho Alto, Trecho Médio, Trecho Baixo e Incremental de Segredo. Cada trecho é dividido por sub-bacias para possibilitar a calibração do modelo hidrológico.

O Trecho Alto (TA) compreende a região mais a leste da bacia, onde estão localizadas as nascentes formadoras do rio Iguaçu. Este trecho tem variação em relação a declividade ao longo das sub-bacias, pois as nascentes estão localizadas na Serra do Mar, com grande declividade e sujeitas a eventos de precipitação distintas do restante da bacia. Estes eventos distintos são provenientes de condições atmosféricas influenciadas pelo Oceano Atlântico.

O Trecho Médio (TM) se caracteriza por regiões de pouca declividade e existência de várzeas com grande armazenamento. Modelar este trecho representa um grande desafio devido as grandes áreas de armazenamento laterais e suas velocidades de enchimento e esvaziamento, influenciando diretamente na velocidade da ascensão, duração de pico e tempo de recessão.

O Trecho Baixo (TB), áreas próximas ao reservatório, se caracteriza pelo rápido tempo de resposta e grande produção de escoamento superficial.

O trecho referente a Incremental de Segredo (IS) tem características de solo, declividade e meteorológicos similares ao Trecho Baixo (TB).

A Figura 2 detalha a divisão em trechos contemplando as sub-bacias analisadas na calibração e validação do modelo hidrológico. No Trecho Alto estão contempladas as sub-bacias de Porto Amazonas, São Bento e Rio Negro. No Trecho Médio estão localizadas as sub-bacias de São Mateus do Sul, Pontilhão do Potinga, Divisa e Fluiópolis. No Trecho Baixo estão as sub-bacias de União da Vitória, Santa Cruz do Timbó, Jangada do Sul e Foz do Areia (Incremental). O trecho Incremental de Segredo não foi dividido em sub-bacias, pois a área de drenagem referente ao trecho é similar a área da sub-bacia Foz do Areia (Incremental).

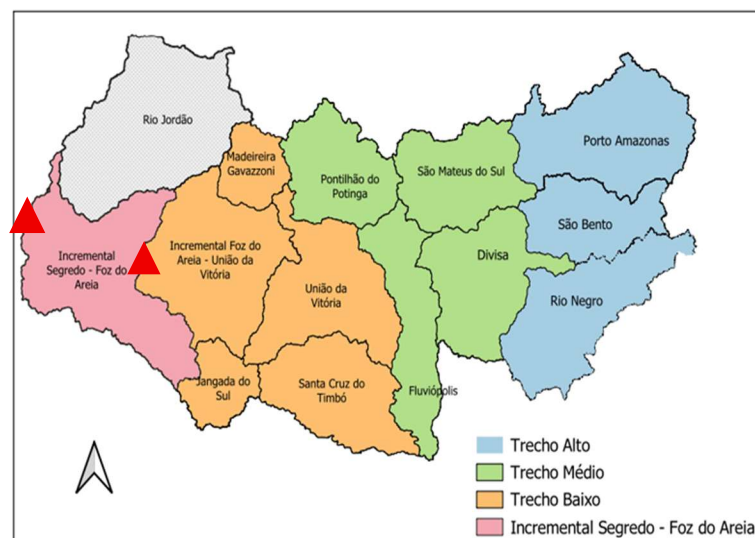


Figura 59 - Divisão da bacia hidrográfica em trechos

A climatologia do Paraná indica, possibilidade de eventos de chuva ou seca significativos ao longo de todo o ano, não sendo observada sazonalidade pluviométrica (Hoffmann, Mendonça, Goulard, 2017). A Figura 3 ilustra o comportamento da precipitação e das vazões em União da Vitória, local onde há série histórica desde 1931 e que é posicionado em local representativo da bacia hidrográfica, em relação a área de interesse deste trabalho. Nota-se que

Apesar de haver alterações nas estações pluviométricas entre os eventos ocorridos, por haver estações extintas ou novas instalações, em média cada polígono das estações pluviométricas representou em torno de 2,56% ou 1 estação para cada 770 km² em relação a área de drenagem total o que se considerou satisfatório diante das distribuições espaciais dos eventos. Conforme a Organização Mundial de Meteorologia – OMM (2008), para regiões com as características similares ao estudo de caso, a densidade de pluviômetros recomendada é de 1 pluviômetro para 575 km².

Os postos fluviométricos utilizados possuem séries históricas que compreende o período dos eventos, portanto não houve alteração de localização. Isso quer dizer que os comparativos entre as séries de vazões observadas e simuladas possuem sempre o mesmo referencial de localização.

Processamento de dados

Para a calibração do modelo para o trecho de montante do reservatório de Foz do Areia foi selecionado o evento de 1983, considerado o evento de maior repercussão devido à chuva ocorrida e magnitude da cheia. Para a validação foram analisados outros três eventos de relevante comoção: 1992, 2014 e 2023. As possíveis diferenças de uso e ocupação do solo ao longo do tempo foram desprezadas.

O evento de 1983, tem o registro da maior vazão média diária afluente ao reservatório do histórico operativo, 7.830 m³/s no dia 09/07/1983, quando o reservatório de Foz do Areia havia entrado em operação há apenas 3 anos. As chuvas iniciaram em maio e persistiram ao longo dos meses de junho e julho. Entre os dias 18 e 20/05, houve chuva bem distribuída pela bacia de média de 100 mm, que elevou a vazão de 1.300 para 4.000 m³/s. No evento principal, a vazão estava em torno de 1.600 m³/s no dia 04/07 e se elevou para 7.830 m³/s no dia 09/07. As chuvas observadas neste evento foram mais significativas na região do reservatório, onde a resposta na vazão é mais rápida. A distribuição da chuva foi a seguinte: no trecho alto o acumulado foi de 238 mm, no trecho médio foi de 321mm e no trecho baixo foi de 373mm.

Este evento foi o escolhido para calibração do modelo hidrológico, tendo em vista o acumulado e as características da ocorrência da chuva, a umidade presente e os valores de vazão observados.

No evento ocorrido em 1992, as chuvas se intensificaram a partir de abril, com acumulados em torno de 100 mm entre os dias 11 e 25, elevando a vazão afluente de 314 para 1.386 m³/s de média diária. Entre os dias 25/05 e 01/06, ocorreu a chuva que ocasionou a cheia analisada, com acumulados de 290 mm no trecho alto, 300 mm no trecho médio e 350 mm no trecho baixo, elevando a vazão afluente de 1.386 m³/s no dia 25/05 para 6.570 m³/s no dia 29/05. O acumulado de chuva no trecho baixo da bacia foi mais expressivo também neste evento, justamente onde as características da bacia são propícias para o rápido escoamento superficial.

O evento de 2014 ocorreu logo após um período importante de seca, quando o reservatório havia atingido sua menor vazão média diária afluente e seu menor armazenamento ao longo dos 30 anos de histórico operativo, até aquele momento. Com chuvas uniformes ao longo da bacia, com acumulados de 100 mm entre os dias 21 e 27/05, a vazão afluente se elevou de 240 para 1.000 m³/s. Entre os dias 04 e 09/06 ocorreu a chuva que ocasionou a cheia em análise, com os seguintes acumulados: 210 mm no trecho alto e 300 mm nos trechos médio e baixo, elevando as vazões de 666 m³/s no dia 05/06 para 7.450 m³/s no dia 08/06.

O evento de 2023 ocorreu entre os meses de outubro e novembro. Já no início do mês, no dia 03/10, as chuvas se intensificaram na bacia, com acumulados de 250 mm no trecho alto e 300 mm nos trechos médio e baixo, elevando as vazões de 466 m³/s no dia 03/10 para 4.721 m³/s no dia 12/10. Entre os dias 26 e 30/10, outra chuva relevante ocorreu, acumulando em torno de 130 mm no trecho alto e 150 mm nos trechos médio e baixo, elevando a vazão afluente ao reservatório de 3.160 m³/s no dia 27/10 para 5.584 m³/s no dia 29/10. Os dados de chuva indicam que os maiores acumulados ocorreram nos trechos médio e baixo, com média de 600 mm. Já no trecho alto, o total de chuva acumulada no evento foi de 470 mm.

Chama atenção que os eventos de cheia significativos têm como coincidência a ocorrência de chuva intensa e persistente nos trechos próximos aos reservatórios, onde a bacia hidrográfica tem maior declividade e menor capacidade de retenção, com tempo de concentração muito inferior ao restante da bacia.

A calibração do modelo hidrológico, segundo Bravo et al. (2007), é uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário ou por técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída (por exemplo, a vazão nos rios).

Já a validação, segundo Ditt (2025), é o processo em que se faz uma comparação entre os resultados do modelo e as observações, em um período diferente do período utilizado na calibração, com o objetivo de avaliar se os modelos são adequados para um determinado propósito.

O software sugere a divisão das sub-bacias a partir da discretização de área máxima escolhida pelo usuário, porém, igualmente, permite o controle para determinar as sub-bacias conforme o interesse do projeto e histórico de elementos existentes. A Figura 5 ilustra a divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias conforme a distribuição da rede de monitoramento hidrométrico.

Figura 64 - Encadeamento de elementos

Element Name	Element Type	Drainage Area (KM2)
Porto_Amazonas	Subbasin	3604.7
J1	Junction	3604.7
Reach-4	Reach	3604.7
São_Mateus_do_Sul	Subbasin	2415.0
J6	Junction	6019.7
Reach-5	Reach	6019.7
Pontilhão_do_Potinga	Subbasin	2210.1
J8	Junction	2210.1
Reach-10	Reach	2210.1
J9	Junction	8229.8
Reach-9	Reach	8229.8
Rio_Negro	Subbasin	3091.5
J4	Junction	3091.5
Reach-6	Reach	3091.5
São_Bento	Subbasin	1999.6
J2	Junction	1999.6
Reach-1	Reach	1999.6
J5	Junction	5091.1
Reach-2	Reach	5091.1
Divisa	Subbasin	2753.8
J7	Junction	7844.9
Reach-8	Reach	7844.9
J3	Junction	16074.7
Reach-7	Reach	16074.7

Figura 65 - Encadeamento de Elementos (Continuação)

Element Name	Element Type	Drainage Area (KM2)
Reach-7	Reach	16074.7
Fluviópolis	Subbasin	2293.0
J11	Junction	18367.7
Reach-3	Reach	18367.7
Santa_Cruz_do_Timbó	Subbasin	2343.1
J12	Junction	2343.1
Reach-14	Reach	2343.1
J13	Junction	20710.8
Reach-11	Reach	20710.8
União_da_Vitória	Subbasin	3289.1
J14	Junction	23999.9
Reach-13	Reach	23999.9
Jangada_do_Sul	Subbasin	1011.0
J15	Junction	1011.0
Reach-17	Reach	1011.0
J16	Junction	25010.9
Reach-15	Reach	25010.9
Madeiraira_Gavazzoni	Subbasin	976.40
J17	Junction	976.40
Reach-19	Reach	976.40
J18	Junction	25987.30
Reach-18	Reach	25987.30
Foz_do_Areia_INC	Subbasin	3942.0
Sink-1	Sink	29929.30

Para os trechos de rio, o coeficiente de rugosidade de Manning adotado médio foi 0,045 em virtude das grandes planícies de inundação e as avaliações aqui realizadas serem para vazões elevadas, com ocupação de várzeas. (Castanharo e Buba, 2008).

A parametrização final de calibração das sub-bacias, utilizada nas validações, é apresentada na Quadro 1. O método adotado para contabilização de perdas foi o *Deficit and Constant*, devido ao modelo ser calibrado para um período contínuo, mesmo que a análise seja para um evento único. O método de transformação da chuva em vazão foi o *Clark Unit Hydrograph*.

Quadro 5 – Parametrização de calibração: Trechos Alto, Médio e Baixo

Sub-bacia	Loss (Deficit and Constant)				Transform (Clark Unit Hydrograph)		Baseflow		
	Initial Deficit (mm)	Maximum Deficit (mm)	Constant rate (mm/hr)	Impervious (%)	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)	Initial Discharge (m ³ /s)	Recession Constante	Ratio
Porto Amazonas	3	3	0,8	20	150	50	50	0,9	0,9
São Mateus do Sul	1	1	1	30	150	50	48	0,9	0,9
São Bento	1	1	1,5	30	100	200	30	0,93	0,93
Rio Negro	1	1	0,5	30	130	100	58	0,9	0,9
Divisa	2	2	2	20	300	200	120	0,95	0,95
Fluviópolis	3	3	1	20	300	200	260	0,95	0,95
Pontilhão do Potinga	1	1	1	50	350	100	25	0,94	0,94
Santa Cruz do Timbó	1	1	1	30	100	150	26	0,95	0,95
União da Vitória	1	1	1	60	300	300	370	0,95	0,95
Jangada do Sul	3	3	3	90	15	50	19	0,7	0,7
Madeiraira Gavazzoni	1	1	0,5	90	8	80	17	0,7	0,7
Foz do Areia	2	2	1	100	1	5	489	0,7	0,7

Fonte: O autor

No caso específico do trecho Incremental Segredo – Foz do Areia, devido ao fato de haver controle por outro reservatório a montante, sua área e suas características fisiográficas serem similares a área incremental entre Foz do Areia e União da Vitória, foi adotado o método de transformação *Soil Conservation Service (SCS) Unit Hydrograph Method*. Este método é utilizado para evento único e demanda informações de *Curve Number (CN)* e Impermeabilidade. O Quadro 2 ilustra os parâmetros adotados.

Quadro 6 – Parâmetros de calibração: Trecho Incremental Segredo – Foz do Areia

Sub-bacia	Loss (Deficit and Constant)			Graph time	Lag Time (min)
	Initial Abstraction (mm)	Curve Number	Impervious (%)		
Incremental Segredo - Foz do Areia	5	15	40	Standard (PRF 484)	180

Fonte: O autor.

Com o software calibrado e validado, foram gerados hidrogramas hipotéticos para simulação da operação hidráulica dos reservatórios. Foi utilizado o método da equação das curvas de Intensidade, Duração e Frequência (I-D-F) para os tempos de recorrência de 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000 e 10.000 para duração de sete dias para cidades representativas localizadas dentro das regiões dos quatro trechos adotados na bacia hidrográfica. A duração de sete dias foi escolhida, pois é igual ao tempo de concentração estimado para a bacia hidrográfica.

Para determinação dos valores das chuvas para os diferentes tempos de recorrência, foi utilizado o software Plúvio 2.1, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (UFV). O Plúvio 2.1 é um programa computacional concebido para construção de curvas I-D-F em locais onde não há parâmetros determinados, a partir de interpolação de parâmetros regionais já conhecidos na literatura.

A Equação 14 foi utilizada para determinação das chuvas para os diferentes tempos de retorno para os municípios representativos. Os parâmetros da equação, os quais variam de local para local, constam na Equação 1, extraídos do Plúvio 2.1.

$$i = \frac{a \cdot T_r^b}{(t+c)^d}$$

Eq. 1

Quadro 7 – Parâmetros da curva I-D-F

Estação	Trecho	Parâmetro a	Parâmetro b	Parâmetro c	Parâmetro d
Porto Amazonas	Alto	2543,310	0,196	27,000	0,952
Rio Claro do Sul	Médio	966,652	0,177	9,085	0,790
União da Vitória	Baixo	1141,025	0,157	10,714	0,804
Mangueirinha	Incremental Segredo - Foz do Areia	1714,550	0,155	16,368	0,830

A metodologia de estimar a precipitação para geração de hidrogramas de entrada em software de previsão de vazão foi utilizada nas pesquisas de Duraisekaran et al. (2025) e Singh et al. (2025).

A Figura 9 ilustra a localização dos municípios utilizados para a estimativa da precipitação nos trechos. Para o Trecho Alto foi utilizado o município de Porto Amazonas; para o Trecho Médio o município de Rio Claro do Sul; para o Trecho Baixo o município de União da Vitória; e, para o Trecho Incremental Segredo - Foz do Areia o município de Mangueirinha.



Figura 66- Localização dos municípios para geração da equação I-D-F

A distribuição temporal da chuva estimada foi feita pelo método dos blocos alternados para duração de sete dias, para atender ao tempo de concentração da bacia, assim como Duraisekaran et al. (2025) realizaram sua pesquisa. Para avaliar o dimensionamento de grandes estruturas, existem diversos métodos de estimativa de hidrogramas de entrada (ELETROBRAS, 1987). Na presente pesquisa, a geração de diferentes cheias em referência ao tempo de recorrência da chuva possibilita flexibilidade quanto às possibilidades de análise da operação hidráulica necessária para atender às características existentes na operação dos reservatórios.

Simulador de reservatórios HEC-ResSim

O software HEC-ResSim possibilita ao analista realizar simulações de operação hidráulica de reservatórios a partir de hidrogramas afluentes como dados de entrada, associados às demais informações necessárias para decisão de atendimento a condições preestabelecidas de armazenamento do reservatório com decisão de aumento e diminuição de defluências (DASH, SAHOO e RAGUWANSI, 2022; USACE, 2021).

Na presente pesquisa, o software foi avaliado como ferramenta para simulação de operação hidráulica utilizando o conceito de horizonte de previsão, que, conforme Bravo (2010), se define como o maior intervalo de tempo no futuro e, neste caso, seria para previsão de curto prazo, pois a antecedência simulada é de dois dias.

Foram adotados cenários de vazão de entrada aos reservatórios, sejam eles por eventos passados ou hipotéticos, nos quais se avaliou o ganho de ações com antecedência.

Conforme o manual do usuário (USACE, 2021), o software foi construído para ser utilizado por projetos, onde se configura inicialmente o sistema de coordenadas, o fuso horário e o local onde o projeto será salvo no computador.

Levantamento de dados

Os dados utilizados nas simulações foram levantados em momento prévio à operação do software, pois demandou pesquisa em diversas fontes. Em algumas situações, é necessário realizar estudos para determinar a parametrização a ser adotada no software. As características físicas das barragens e reservatórios foram encontradas no banco de dados do ONS e no banco de dados da Companhia Paranaense de Energia - Copel, empresa detentora da licença de operação.

Para o cálculo de balanço hídrico pelo método de conservação de massa, o software demanda os dados de curva cota x volume, curva de descarga de vertedouro, relação de nível d'água pela capacidade de geração, tanto em energia quanto em vazão, cota do coroamento da barragem e da sua largura, além das cotas de nível mínimo e máximo (USACE, 2021)

Os dados providenciados na fase inicial foram:

- Curvas de armazenamento, conhecidas por curvas cota x volume, as quais relacionam o armazenamento do reservatório ao nível do reservatório. O conhecimento desta relação é primordial para o cálculo de balanço de massa, o qual necessita da variação de volume no intervalo de tempo;
- Curvas de descarga dos vertedouros para estimativa de volume defluído pelo dispositivo no intervalo de tempo para o cálculo de balanço hídrico;
- Curvas de rendimento das unidades geradoras para estimativa da vazão turbinada para uma determinada geração em função do desnível entre o reservatório e o canal de fuga;
- Identificação das restrições existentes;
- Hidrogramas de entrada para possibilitar as análises, criar alternativas e regras operacionais e identificar situações limitantes ou de risco.

Em análise prévia à operação do software, também é necessário estudar a bacia hidrográfica para identificar os elementos que compõem a estrutura computacional que será utilizada no projeto e a avaliação das suas relevâncias e necessidades (MATROSOV, HAROU, LOUCKS, 2011)

O software permite a inserção de arquivo GIS para visualização espacial da área de estudo, onde é possível inserir e distribuir os elementos selecionados. Esta etapa é importante devido a eventuais restrições existentes de elementos externos às barragens ou reservatórios, caso desta pesquisa, que analisa a restrição em posto hidrométrico localizado em torno de cem quilômetros a montante (DASH, SAHOO, RAGUWANSI, 2022; USACE, 2021)

Os elementos podem ser inseridos no software em forma de diagrama, não sendo necessário trabalhar com a imagem da bacia hidrográfica ao fundo. Isto facilita o esforço computacional e a visualização do projeto pelo analista. Neste projeto, o inventário final de elementos inseridos é listado abaixo, em ordem de montante para jusante:

1 *Computation Point* (Ponto de controle) a montante do reservatório de Foz do Areia, onde considera a série de vazões afluentes ao reservatório;

1 *Reach* (Trecho de rio) conectando o *Computation Point* 1 ao reservatório, sem fator de ajuste de vazões e sem propagação. Isto quer dizer que a mesma vazão que entrar no trecho do rio, sai por ele instantaneamente e sem acréscimo ou perda;

1 *Reservoir* (Reservatório de Foz do Areia) que irá receber a vazão do trecho de rio de montante e, com as características físicas inseridas, propiciar a simulação da operação hidráulica diante das zonas e regras cadastradas;

- 1 *Reach* conectando o reservatório de Foz do Areia a um ponto de controle antes do reservatório de Segredo;
- 1 *Computation Point* (Ponto de controle) antes do reservatório de Segredo para inserção da série de vazão incremental;
- 1 *Reach* conectando o Ponto de Controle ao Reservatório de Segredo, sem fator de ajuste de vazões e sem propagação. Este trecho de rio propagará ao reservatório de Segredo a soma da vazão incremental e a vazão defluente de Foz do Areia;
- 1 *Diverted Outlet Tool* (Fluxo advindo do reservatório do Desvio do rio Jordão) simulando a transferência das águas da bacia hidrográfica do rio Jordão para o rio Iguazu;
- 1 *Reservoir* (Reservatório de Segredo), o qual irá receber as águas do trecho de rio de montante e propiciar a simulação do reservatório;
- 1 *Computation Point* (Ponto de controle) a jusante do reservatório de Segredo, após a confluência com o rio Jordão.

Pelo rio Jordão, há um ponto de controle na entrada do reservatório, onde há série de vazão afluente; o reservatório com sua parametrização para simulação, e; um ponto de controle na junção com o rio Iguazu.

As séries de vazões, discretizadas temporalmente conforme o planejamento inicial do projeto, são inseridas no banco de dados específico do software HEC-DSSVue, também de autoria da USACE, o qual se relaciona diretamente com o HEC-ResSim.

Para determinar o nível de remanso em União da Vitória, é estimado pela superfície-chave da estação hidrométrica de forma objetiva, sendo que as simulações realizadas visam manter o nível no patamar da curva de descarga natural.

Para determinar o nível de equilíbrio, o cálculo de estimativa total de volume do hidrograma afluente é realizado utilizando a vazão conhecida que ocorrerá no intervalo futuro que se deseja. Neste caso, antecipando as ações para o hidrograma conhecido e adicionando a recessão crítica ao final do horizonte. Diferente da metodologia atual, onde o volume é calculado em tempo real para horizontes mais curtos.

Quanto maior a confiabilidade no modelo de previsão de vazão, mais preciso será o cálculo de volume afluente e melhor será a avaliação de aumento da antecedência.

Processamento de dados

Ao iniciar um novo projeto no software HEC-ResSim, é necessário informar o Sistema de Unidades que será utilizado, o fuso horário e o local onde o projeto será armazenado no computador. Neste ambiente serão criadas pastas de armazenamento dos dados gerados.

A primeira etapa da fase de operação do software ocorre no módulo *Watershed* (bacia hidrográfica) onde são inseridos alguns elementos necessários e realizada a primeira análise do que realmente seria necessário para execução das simulações.

A análise de distribuição espacial está representada na Figura 10, onde foram inseridas a rede de drenagem, a delimitação da bacia hidrográfica, as seções de controle que compõem a rede de monitoramento da bacia e os reservatórios sob análise. Nesta fase é apenas criado o ambiente para originar a próxima etapa. Ao final desta configuração, é criada uma Configuração, nomeada e descrita, para ser carregada na etapa seguinte.

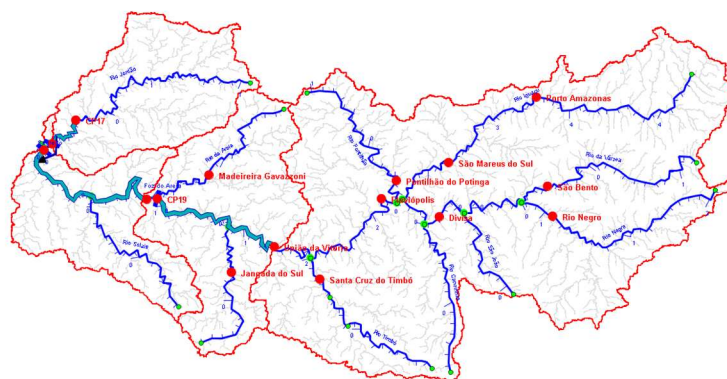


Figura 67 – Elementos inseridos na bacia hidrográfica

No módulo *Reservoir Network* (Rede de reservatórios) ocorre a consolidação dos elementos que compõem o projeto. Aqui ocorre a importação da Configuração criada na etapa *Watershed*, a qual traz elementos iniciais de configuração da bacia e a distribuição dos elementos.

A Figura 11 ilustra a representação dos elementos necessários já filtrados em diagrama, onde se observa o encadeamento final de elementos.

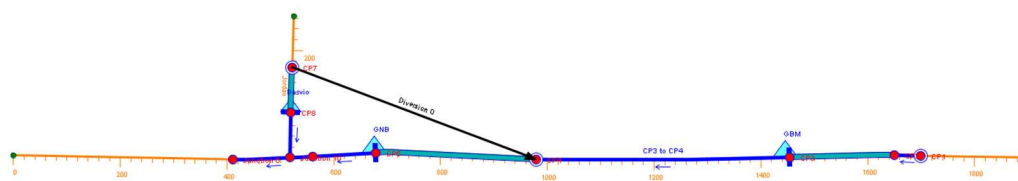


Figura 68 – Representação dos elementos em diagrama

Para entrada dos hidrogramas no reservatório de Foz do Areia, foi criado um elemento que suporta série de dados, chamado de Ponto de Computação (*Computation Point*). Este é representado por um ponto circular vermelho com borda branca. Esta simbologia representa que o elemento possui uma série de dados. Neste ponto, foi inserida a série de vazões afluentes ao reservatório, porém, para que este hidrograma chegue ao reservatório da mesma maneira que sai deste ponto de computação, é necessário inserir um trecho de rio (*Reach*), representado por uma linha azul, que neste caso não possui método nem fator de propagação, justamente para propiciar a afluência original. Isto é necessário para conectar os elementos e criar um fluxo de evolução na bacia hidrográfica.

O próximo elemento é o reservatório, sendo o primeiro da cascata, Foz do Areia, representado por uma linha verde suave. Ao criar este elemento, o software cria automaticamente dois Pontos de Computação, um na entrada e outro na saída.

Como o projeto demanda um sistema de reservatórios, é necessário conectar a jusante da barragem de Foz do Areia um trecho de rio para que a vazão defluente chegue ao reservatório de Segredo. Nesta área, denominada com Incremental Segredo – Foz do Areia, é inserido um novo Ponto de Computação para acrescentar a vazão correspondente a incremental. A afluência ao reservatório de Segredo será a soma da vazão defluente de Foz do Areia e a incremental.

A área incremental ainda recebe, em regra, as águas advindas da sub-bacia do rio Jordão. O software permite criar o elemento de divisão de fluxo (*Diversion Tool*), para direcionar a vazão transferida de um reservatório a outro. Para jusante, foram criados Pontos de Computação, um imediatamente a jusante do reservatório de Segredo, um na confluência do rio Jordão com o rio Iguaçu e outro a jusante, contabilizando a vazão total. Estes dados foram inseridos apenas para representação lógica do projeto, sem compor as análises dos resultados.

É necessário, então, para cada reservatório, inserir as características físicas do reservatório, que neste caso há apenas a curva cota x volume, as informações da barragem, que contempla a curva de descarga do vertedouro e quantos vãos existem, as características da usina hidrelétrica, que é a relação de elevação por capacidade máxima de vazão turbinada e geração para cada cota, a eficiência, as perdas existentes e a perda hidráulica e, para cálculo de queda, o nível do canal de fuga.

Também, é necessário inserir em ambiente denominado *Operations* as faixas operativas dos reservatórios para serem utilizadas na simulação. Estas serão as zonas de operação. O software sugere um padrão de divisão do reservatório, sendo *Inactive* (cota do volume morto), *Conservation* (cota de interesse da simulação) e *Flood Control* (nível máximo operacional).

As simulações são realizadas com evolução temporal, portanto, para cada intervalo de tempo futuro, o nível de conservação pode ser diferente. No caso da presente pesquisa, os níveis de conservação são variáveis devido à dinâmica de variação do hidrograma de entrada, que resulta em variação no nível de remanso em União da Vitória e variação no nível de equilíbrio.

A Figura 12 ilustra um exemplo prático de divisão da faixa operativa do reservatório em zonas de operação. No gráfico superior, é possível verificar o nível mínimo operacional na linha pontilhada cinza, na cota 700 m, o nível máximo operacional na linha pontilhada verde e o nível a ser atingido na simulação na linha pontilhada azul. Este exemplo demonstra que a linha azul passa a ser o nível máximo do reservatório para aquela data e hora e que o reservatório deve ser rebaixado para atender ao critério da metodologia determinada na fase de estudos prévios ao simulador. O gráfico inferior apresenta a vazão afluente ao reservatório, representando a entrada de uma cheia. A metodologia indica que, nesta situação, o reservatório de ser rebaixado para proteção das restrições. Ilich (2024) utiliza metodologia similar em sua pesquisa, porém parte de utiliza dados estatísticos para estimativa do próximo nível objetivo.

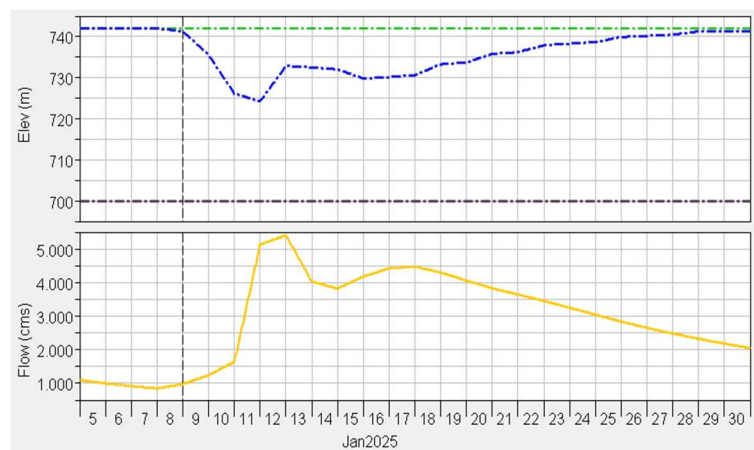


Figura 69 – Zonas operativas cadastradas no HEC-ResSim

A partir da determinação da estratégia e inserção da parametrização no software, o módulo necessita que se crie a conexão com o próximo ambiente, chamado de *Alternative*, onde se insere o passo de tempo em que a simulação deve ser realizada a configuração de operação, que são os níveis a serem atendidos com variações de vazão defluentes as condições iniciais das simulações e as séries de vazões afluentes.

Após estes passos, o próximo módulo denominado *Simulation* já pode ser acessado para realizar as simulações. Neste ambiente são feitas as simulações, análise dos dados, se há alguma correção possível de ser feita para proteção de alguma restrição, reinserção de dados de entrada, como antecedência ou nível inicial para fazer a ressimulação. Este é o ciclo do ambiente de simulação para definir as chamadas regras para atingir as curvas-guia.

RESULTADOS

O modelo hidrológico, HEC-HMS demonstra capacidade de representação dos fenômenos físicos da bacia hidrográfica, a qual possui características complexas, sejam elas físicas, de dados hidrológicos observados ou até mesmo do reflexo de fenômenos meteorológicos.

O simulador de operação de reservatório, HEC-ResSim, também teve sua avaliação positiva. A operação hidráulica do complexo FASG (Foz do Areia – Segredo) é muito particular, devido às variabilidades climáticas onde está inserido, mas também devido às características fisiográficas da bacia hidrográficas associadas às condicionantes existentes.

O acoplamento entre os softwares, juntamente com a análise aprofundada do conhecimento hidrológico e dos métodos de mitigação de impactos, se demonstrou robusto para determinação e conhecimento da operação hidráulica dos reservatórios.

Resultados do modelo hidrológico HEC-HMS

Os resultados evidenciam que o modelo tem capacidade de representar os fenômenos hidrológicos característicos da bacia hidrográfica para a proposta da pesquisa.

O modelo foi calibrado para todas as sub-bacias, com o intuito de verificação da capacidade de propagação da vazão ao longo do rio. As métricas de avaliação são demonstradas no Apêndice E, onde pode-se observar certa variabilidade nos índices de qualidade das simulações. Os fatores que podem comprometer a qualidade das simulações são a distribuição temporal e espacial dos eventos meteorológicos, os horários de ocorrência das chuvas e a qualidade das observações, a complexidade das diferentes características geomorfológicas da bacia e a própria metodologia de parametrização de perdas, método de transformação e tempo de concentração.

As seções de interesse são União da Vitória, reservatório de Foz do Areia e reservatório de Segredo, localizadas no Trecho Baixo e Incremental de Segredo - Foz do Areia.

As Figuras 13, 14, 15 e 16 ilustram o comportamento das vazões simuladas e observadas na seção de controle União da Vitória, a qual recebe a propagação das sub-bacias de montante, Fluviópolis e Santa Cruz do Timbó. A área de drenagem desta seção representa 80% da área total da bacia hidrográfica de Foz do Areia. A representação para este local é importante, pois a avaliação de remanso em União da Vitória é feita com base na vazão passante pela seção, portanto, este dado simulado é utilizado para simular a operação hidráulica no software HEC-ResSim. A região onde a seção se localiza se caracteriza por pouca declividade e impacto direto no escoamento, com transbordamento das margens e grandes armazenamentos laterais, o que torna complexa a representação pelo modelo hidrológico. Além disso, há o controle natural existente no município de Porto Vitória, conhecido como corredeiras de Porto Vitória. Este controle natural pode ocasionar remanso natural na seção de controle de União da Vitória. Nos dados observados, as vazões consideradas já estão relacionadas à superfície chave nos momentos de remanso ou na curva de descarga natural quando o remanso é inexistente.

Apesar da boa representação do fenômeno ocorrido em 1983, para os outros eventos não houve a mesma aderência, onde a fase de pico do hidrograma ficou superestimada. Mesmo assim, de maneira geral, as métricas de avaliação indicam que as simulações são classificadas entre “Satisfatório” e “Muito bom”, segundo Moriasi.

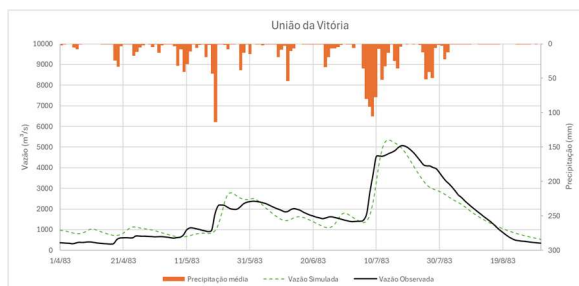


Figura 70 – Calibração de 1983 – União da Vitória

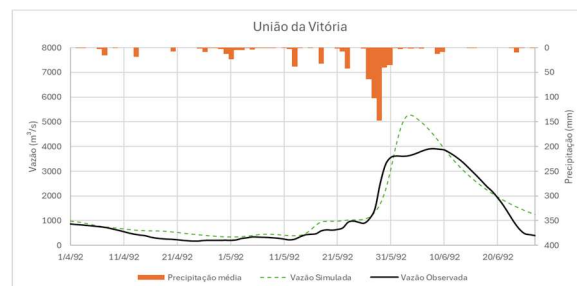


Figura 71 – Validação de 1992 – União da Vitória

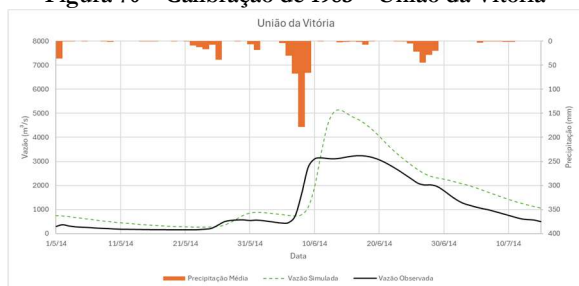


Figura 72 – Validação de 2014 – União da Vitória



Figura 73 – Validação de 2023 – União da Vitória

Tabela 11 - Avaliação das métricas para União da Vitória

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	DE SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²
		Calibração	1983	0,884	-1,56	0,3	0,890
Baixo	União da Vitória	Validação	1992	0,866	17,57	0,4	0,896
			2014	0,566	39,24	0,7	0,872
			2023	0,706	7,86	0,5	0,756
Muito bom		Bom		Satisfatório		Não satisfatório	

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015).

FOZ DO AREIA

As Figuras 17, 18, 19 e 20 ilustram o comportamento das vazões simuladas e observadas na seção de controle da barragem de Foz do Areia, exutório desta análise.

A bacia hidrográfica até o reservatório se caracteriza pela mudança de declividade e capacidade de armazenamento nas várzeas nos trechos a montante e jusante de União da Vitória. O trecho a jusante de União da Vitória se caracteriza pela resposta da chuva no hidrograma rápida e com poucas perdas, diferente do trecho de montante. Esta característica é importante para a análise dos resultados das simulações.

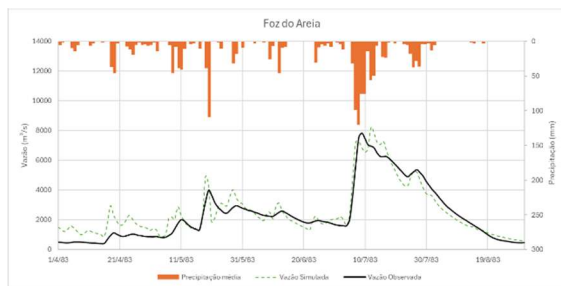


Figura 74 – Calibração de 1983 – Foz do Areia

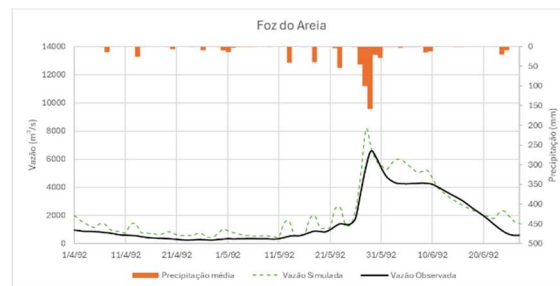


Figura 75 – Validação de 1992 – Foz do Areia

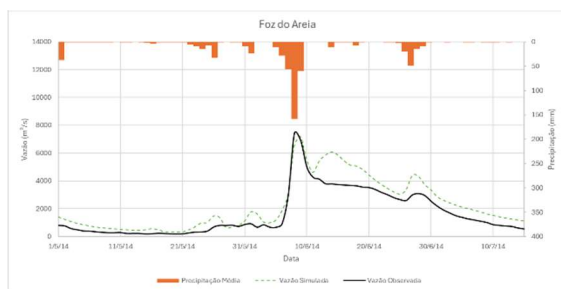


Figura 76 – Validação de 2014 – Foz do Areia

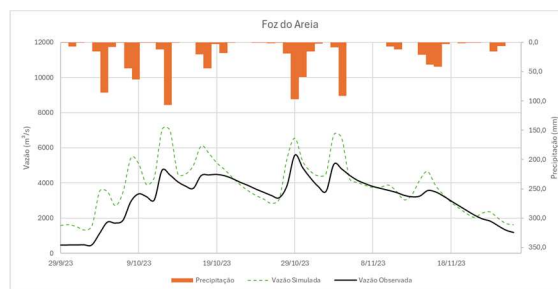


Figura 77 – Validação de 2023 – Foz do Areia

Apesar de a avaliação de Bias estar classificada como “Não satisfatório” pelos critérios de Moriasi, conforme Tabela 4, se considerou que o modelo representou corretamente os fenômenos da bacia.

A complexidade regional no que tange à meteorologia, distinção de armazenamento e perdas do solo ao longo da área de drenagem, registros de dados observados, dados de vazões gerados com eventuais inconsistências devido às curvas de descarga ou de superfície, torna a calibração do modelo complexa e, por isso tudo, se considera o modelo adequado para simular o hidrograma de projeto a ser utilizado em simulador para operação do reservatório em casos de cheias históricas.

Tabela 12 – Avaliação das métricas para Foz do Areia

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	DE	SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²
		Calibração		1983	0,880	8,95	0,3	0,893
Baixo	Foz do Areia	Validação		1992	0,817	30,08	0,4	0,922
				2014	0,765	36,16	0,5	0,930
				2023	0,355	21,38	0,8	0,766
Muito bom		Bom		Satisfatório			Não satisfatório	

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015).

INCREMENTAL DE SEGREDO

As Figuras 21, 22 e 23 ilustram o comportamento das vazões simuladas e observadas na seção de controle da barragem de Segredo.

O trecho incremental entre os reservatórios de Segredo e Foz do Areia se caracteriza pela declividade acentuada e grande capacidade de escoamento superficial com pouca retenção no solo. Esta característica é importante para a análise dos resultados das simulações.

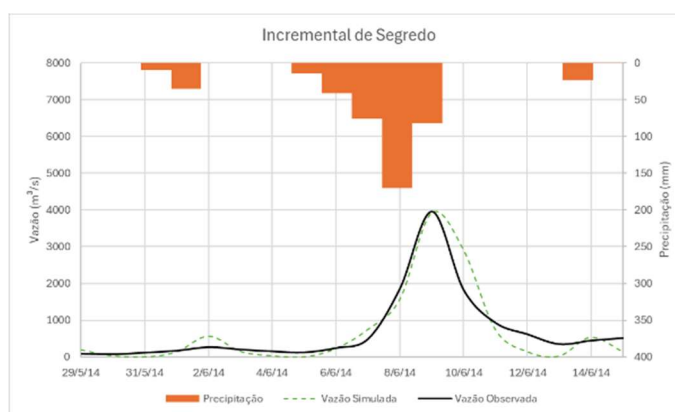


Figura 78 – Calibração Evento de 2014

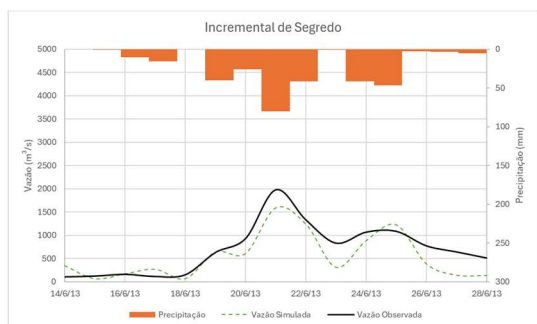


Figura 79 – Validação Evento de 2014



Figura 80 – Validação Evento de 2023

A Tabela 5 apresenta as métricas de avaliação, onde se observa que a validação do evento de 2013 pode ser considerada “Satisfatória”, pelos critérios de Moriasi. Mas, por outro lado classificada como “Não Satisfatória” para o evento de 2023. O evento de 2023 possui características que demandam análise específica diante de ocorrências de eventos similares.

Tabela 13 – Avaliação das métricas para Segredo

TRECHO	POSTO DE CONTROLE	SIMULAÇÃO	EVENTO	NSE	PBias	RSR	R ²
Incremental Segredo – Foz do Arcaia	Segredo	Calibração	2014	0,872	-3,89	0,4	-
		Validação	2013	0,687	-24,82	0,6	-
			2023	0,425	-38,87	0,8	-
Muito bom	Bom	Satisfatório	Não satisfatório				

Fonte: Moriasi et al. (2007); Moriasi et al. (2015).

Resultados do simulador hidráulico HEC-ResSim

Foram realizadas simulações baseadas em diferentes cenários de vazões afluentes com o intuito de verificação de atendimentos de três condicionantes essenciais para atendimento aos princípios da operação hidráulica:

- Remanso em União da Vitória;
- Nível de equilíbrio, e;
- Vazão natural afluente em Segredo diante da defluência praticada.

As séries de vazões hipotéticas utilizadas, foram geradas no HEC-HMS a partir dos parâmetros da calibração do evento de cheia histórica de 1983, sendo os hietogramas gerados pelo método de equação IDF e blocos alternados para diferentes tempos de retorno, para cidades representativas da subdivisão por trechos da bacia hidrográfica.

Para o cenário da cheia para precipitação de 10 anos de tempo de retorno (TR10), onde o maior valor de vazão chega a 4.207 m³/s, o software indica que o nível do reservatório deve ser rebaixado para o nível 741,50 m, possibilitando que a operação transcorra sem influenciar nos níveis do município.

Na Figura 24, percebe-se na hora 100 um aumento e diminuição da vazão defluente. Isto ocorre para atingir o nível máximo da zona de conservação, neste caso, nível máximo para evitar remanso. A partir da hora 100, o reservatório tende a trabalhar a fio d'água. Neste patamar, os valores de vazão vertida praticados estão dentro da capacidade de vertimento por orifício, e ainda não é necessário praticar os valores máximos de vazão vertida.

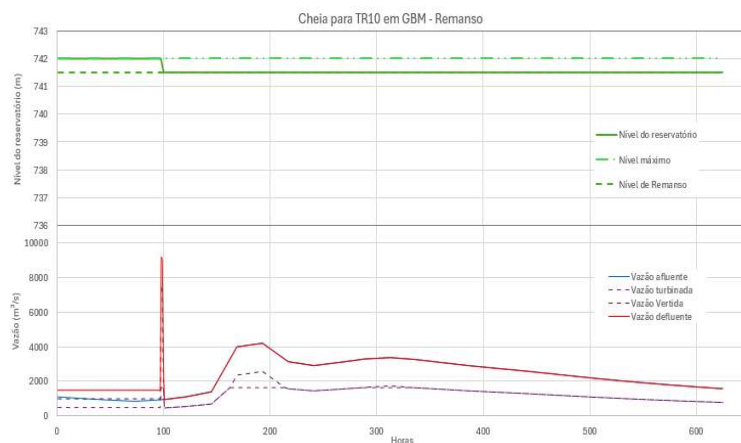


Figura 81 – Simulação para TR10 - Avaliação de remanso em União da Vitória

Já a operação voltada para atender ao critério do nível de equilíbrio, o software indica que, com início do rebaixamento dois dias antes do início da cheia, o nível do reservatório não atinge o nível de equilíbrio sugerido devido à carga d'água sobre o vertedouro em lâmina livre. O nível sugerido pela metodologia de estimativa de nível de equilíbrio foi de 732,19 m e o nível que o reservatório atingiria seria 734,22 m. A Figura 25 ilustra que na hora 100 o vertedouro é aberto em sua totalidade e mesmo assim o reservatório não atinge o nível correspondente ao volume vazio referente ao nível de equilíbrio.

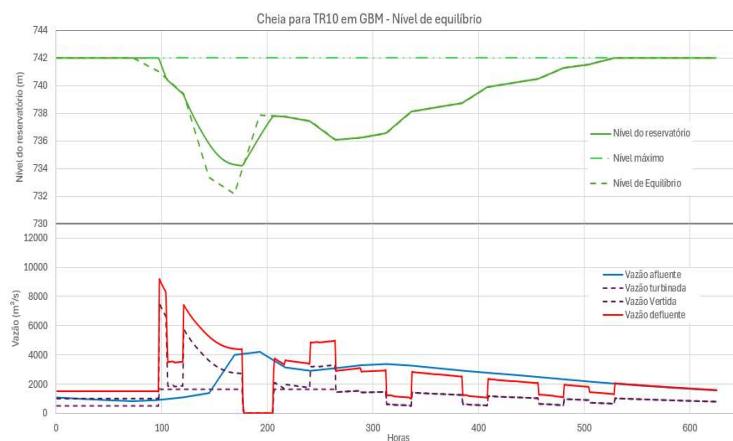


Figura 82 – Simulação para TR10 – Avaliação do Nível de Equilíbrio

A Figura 26 apresenta o cenário da cheia para chuva de 50 anos de tempo de retorno, onde o maior valor de vazão chega a 5.406 m³/s, o software indica que o nível do reservatório deve ser rebaixado para o nível 741,15 m, possibilitando que a operação transcorra sem influenciar nos níveis do município.

Percebe-se na hora 100 um aumento e diminuição da vazão defluente. Isto ocorre para atingir o nível máximo da zona de conservação, neste caso, nível máximo para evitar remanso. A partir da hora 100, o reservatório tende a trabalhar a fio d'água. Neste patamar, os valores de vazão vertida praticados estão dentro da capacidade de vertimento por orifício, e ainda não é necessário praticar os valores máximos de vazão vertida, abertura em lâmina livre.

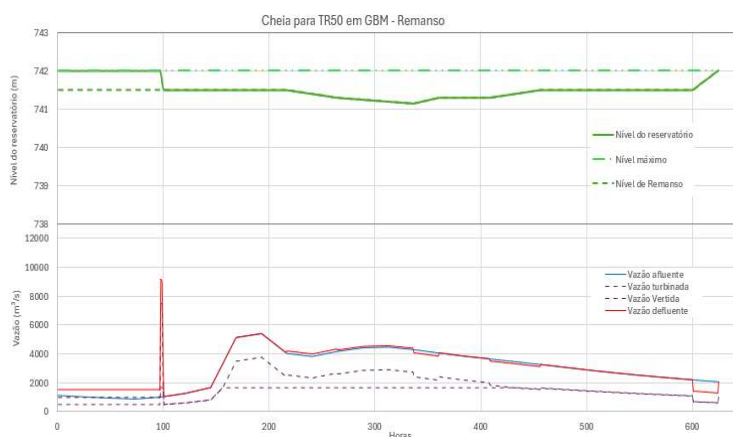


Figura 83 – Simulação para TR50 – Avaliação de remanso em União da Vitória

A Figura 27 apresenta o cenário de cheia para chuva de 100 anos, onde o maior valor de vazão chega a 6.033 m³/s, o software indica que o nível do reservatório sugerido pela metodologia, 740,80 m, é atingido e a operação do reservatório transcorre sem influenciar nos níveis do município.

No gráfico abaixo, percebe-se na hora 100 um aumento e diminuição da vazão defluente. Isto ocorre para atingir o nível máximo da zona de conservação, neste caso, nível máximo para evitar remanso. A partir da hora 100, o reservatório tende a trabalhar a fio d'água. Neste patamar, os valores de vazão vertida praticados estão dentro da capacidade de vertimento por orifício, e ainda não é necessário praticar os valores máximos de vazão vertida, abertura em lâmina livre.

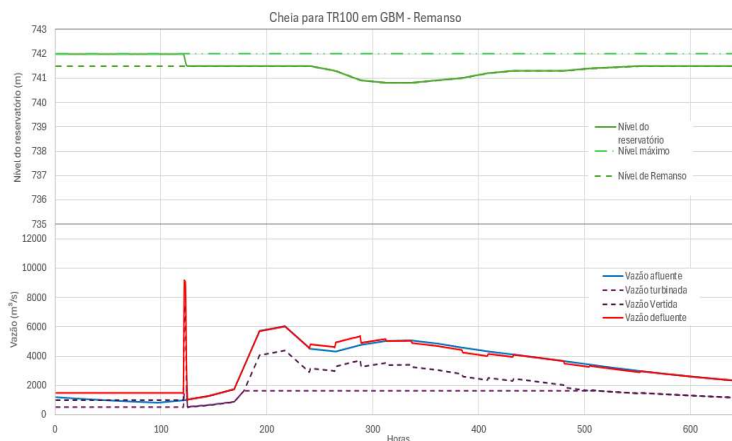


Figura 84 – Simulação para TR100 – Avaliação de remanso em União da Vitória

A Figura 28 demonstra a operação voltada para atender ao critério do nível de equilíbrio para chuva de 100 anos de tempo de recorrência, o software indica que, com início do rebaixamento dois dias antes do início da cheia, o nível do reservatório não atinge o nível de equilíbrio sugerido devido à carga sobre o vertedouro em lâmina livre. O nível sugerido pela metodologia de estimativa de nível de equilíbrio foi de 718,16 m e o nível que o reservatório atingiria seria 734,16 m.

Pode-se notar a resposta imediata da necessidade de rebaixamento do reservatório na linha vermelha, próximo à hora 120, onde eleva para a maior capacidade defluente possível e, com o passar das horas, nota-se a diminuição da capacidade em função da diminuição do nível.

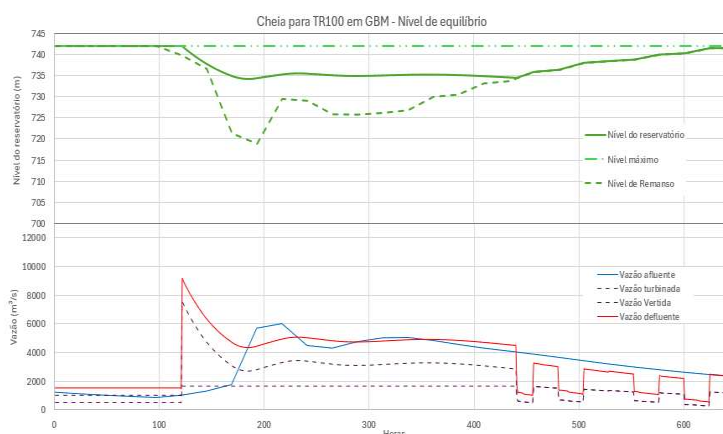


Figura 85 - Simulação para TR100 – Avaliação do Nível de Equilíbrio

A mesma simulação para verificação do nível de equilíbrio foi realizada partindo do nível do reservatório nas cotas 740 e 738 m e, nos dois casos, o nível do reservatório atingiria o nível 733,48 m, 0,68 m abaixo do nível que a simulação partindo do nível máximo indica.

Para o cenário da cheia para chuva de 500 anos de tempo de retorno, onde o maior valor de vazão chega a 7.876 m³/s, o software indica que o nível do reservatório deve ser rebaixado para o nível 738,45 m confirmar dados. Neste cenário, durante o processo de rebaixamento do reservatório para atingir a cota requerida, a vazão afluente atinge a capacidade de defluência do reservatório, fazendo com que o nível do reservatório tenha sua tendência invertida e passe a se elevar.

A Figura 29, demonstra que o nível do reservatório acompanha o nível máximo de remanso, porém, quando o software identifica o momento de realizar aumento da vazão defluente para permanecer em patamar inferior à cota de remanso, a vazão afluente já está em valores elevados e o vertedouro abre totalmente. Devido ao atraso na tomada de decisão, se observa que o reservatório provocaria incremento no nível de União da Vitória. Deste modo, o simulador possibilita a realização de testes para adoção de práticas para avaliar outras possibilidades de modo a evitar esta influência.

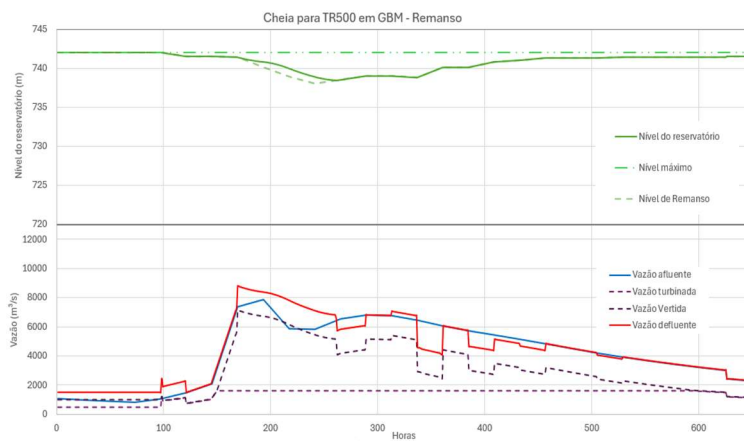


Figura 86 – Simulação bruta para TR500 – Com remanso em União da Vitória

Com a observação por meio da simulação da possibilidade de influenciar na elevação do nível em União da Vitória, foi realizada nova simulação onde se antecipa o rebaixamento, conforme Figura 30. O nível do reservatório se comporta dentro dos parâmetros desejados de elevação de nível.

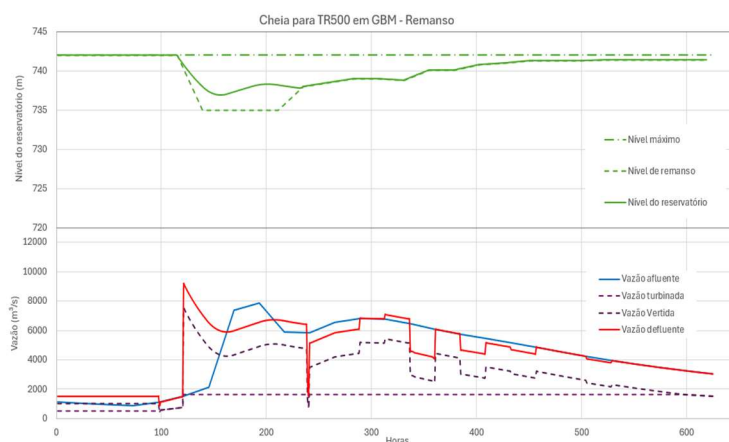


Figura 87 – Simulação consolidada TR500 – Sem remanso em União da Vitória

Mesmo neste caso, a vazão afluente a Segredo permanece abaixo de sua capacidade máxima de descarga, mantendo a vazão defluente de Segredo ao longo de todo o período de cheia, inferior à vazão natural estimada. Deste modo, conforme a Figura 31 a vazão afluente se eleva, a vazão defluente é elevada na mesma proporção, visando à manutenção do nível do reservatório no nível máximo normal, sendo este o referencial inserido no software como prioritário a ser atendido.

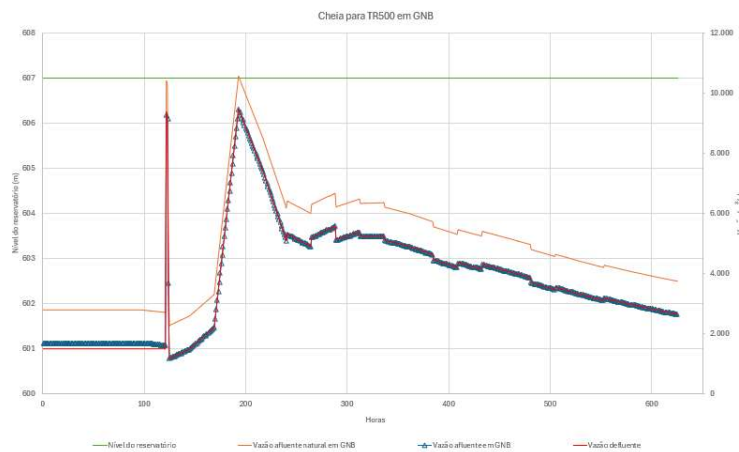


Figura 88 – Avaliação da vazão natural em Segredo

Para o cenário da cheia para chuva de 1.000 anos de Tempo de Retorno, onde o maior valor de vazão chega a $8.850 \text{ m}^3/\text{s}$, o software indica que, com a calibração utilizada, onde se observa a elevação gradual dos níveis em União da Vitória, com pico ocorrendo após o pico do reservatório de Foz do Areia, mesmo se a cheia iniciasse quando o nível do reservatório estivesse no mínimo operativo, com o vertedouro totalmente aberto quando sua soleira fosse atingida e a geração da usina maximizada, haveria agravamento da elevação do nível d'água em União da Vitória.

Na Figura 32 se observa no gráfico superior as simulações iniciando nas cotas 700 m na cor lilás, na cota 720 m na cor laranja e 736 m na linha contínua de cor verde. No gráfico inferior, se observa a afluência na linha azul e as defluências referentes as cotas iniciais com o mesmo referencial de cores do gráfico de níveis. Pouco antes da hora 200, as três simulações indicam abertura total do vertedouro e maximização da usina, mas, devido ao nível do reservatório, em nenhum dos casos há carga suficiente para implementar defluência igual à afluência e o reservatório permanece com o nível em elevação.

Mesmo a linha lilás, onde se observa estável até próximo à hora 250, só inicia o vertimento quando o nível atinge a soleira do vertedouro na cota 725,50 m e o nível estabiliza pouco antes da hora 400, o nível do reservatório permaneceria algumas horas acima do nível que evitaria influenciar na elevação do nível em União da Vitória.

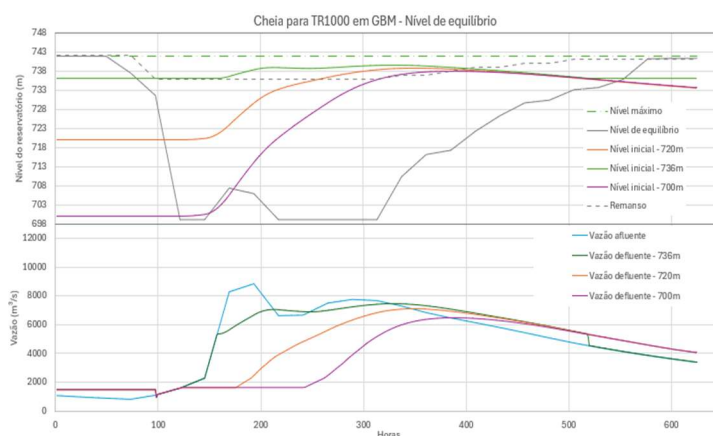


Figura 89 – Simulação TR 1000 – Comparativo para diferentes níveis iniciais

Para os cenários de cheia para chuvas com tempo de retorno de 5.000 e 10.000 anos, o software indica a elevação da cota para patamares superiores ao nível máximo normal, com todos os vãos do vertedouro abertos totalmente e geração máxima. A Figura 33 ilustra o comparativo entre as vazões afluentes e os níveis que seriam atingidos no reservatório, com a cota inicial no nível mínimo operativo.

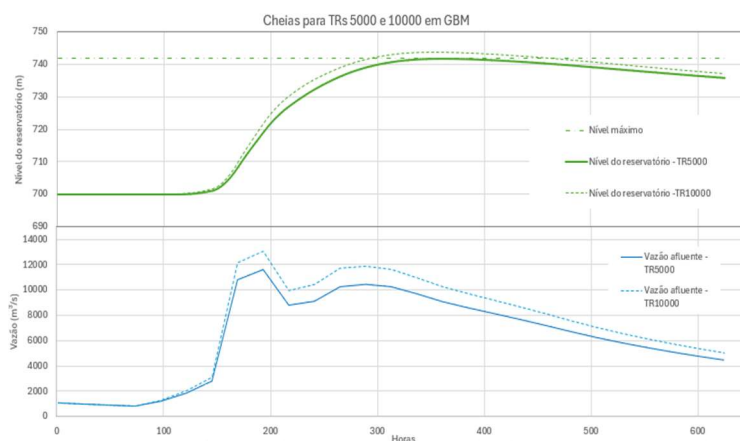


Figura 90 – Simulação TRs 5000 e 10000 – Comparativo de níveis e vazões

CONCLUSÕES

O acoplamento off-line dos modelos HEC-HMS e HEC-ResSim foi executada de forma satisfatória diante da metodologia adotada e dos resultados esperados.

As métricas de avaliação da calibração do modelo hidrológico HEC-HMS para Foz do Areia e Segredo, com a discretização temporal de um dia, classificaram o modelo como “Muito Bom”. Importante levar em consideração a complexidade das características físicas e meteorológicas da bacia hidrográfica. Apesar de parametrização distinta entre as regiões de montante de Foz do Areia e a área incremental de Segredo.

A validação do modelo hidrológico para Foz do Areia, de maneira geral, foi classificada como “Boa”, segundo Moriasi. Os percentuais de PBias ficaram comprometidos, provavelmente pela magnitude da cheia calibrada, evento de 1983, a qual iniciou com a bacia hidrográfica em nível elevado de umidade e saturação do solo.

A validação do modelo para o reservatório Segredo foi avaliada em “Satisfatório” para o evento de 2013 e “Não satisfatório” para o evento de 2023. O evento meteorológico de 2023 possui características diferentes do que os outros eventos avaliados, portanto, o modelo tende a não representar bem este evento em todos os trechos da bacia hidrográfica, tendo em vista o evento utilizado na calibração.

Com o software calibrado e validado, foram gerados os hidrogramas no software HEC-HMS para precipitações de diferentes tempos de retorno, possibilitando, então, as simulações de operação hidráulica dos reservatórios pelo software HEC-ResSim.

As simulações realizadas para as diferentes condições de precipitação possibilitaram simular cenários para avaliação da proteção das restrições, principalmente avaliação de remanso em União da Vitória e a busca pelo nível de equilíbrio.

A pesquisa concluiu que o acoplamento off-line entre o modelo hidrológico HEC-HMS e o modelo de simulação de operação hidráulica de reservatórios HEC-ResSim, possui grande capacidade de gerar regras operacionais e auxiliar com geração de dados e informações para adoção das melhores tomadas de decisão aos agentes operadores de reservatórios voltados para geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- BRAVO, J. M.; ALASSIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2007). “Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais” In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, 2007, São Paulo, SP, Anais... São Paulo.
- CASTANHARO, G.; BUBA, H. Revisão do comportamento hidráulico do rio Iguaçu na região de União da Vitória e seu impacto na operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo. Espaço Energia. 2008. p. 28 a 39.
- DASH, S. S., SAHOO, B., RAGHUWANSHI, N. S. An adaptive multi-objective reservoir operation scheme for improved supply-demand management. Journal of Hydrology. 615. 2022.
- DITT, B. G. Avaliação de desempenho de modelo hidrológico conforme a estratégia de divisão de dados na calibração, 2025. (trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.
- DURAISEKARAN, E., KUMAR, K., PULIPATI, Y., BINDHU V. M., N. BALAJI. HydroAmal: A simulation-optimization framework for effective flood management in a conservation reservoir. Environmental Modelling & Software. 2025.
- ELETRONBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras. Guia para cálculo de cheia de projeto de vertedores. Ministério de Minas e Energia. 1987.
- HOFFMANN, T. C. P.; MENDONÇA, F.; GOULARD, G.; Riscos Climáticos: Vulnerabilidades e Resiliência Associados. In: FRANCISCO DE ASSIS MENDONÇA (Org.). Eventos climáticos extremos: Inundação e gestão de riscos no Paraná. Jundiaí: Paco Editorial. 2017.
- ILICH, N. Dynamic reservoir rule curves – Their creation and utilization. Journal of Hydrology. 22. p 101 a 166. 2024.
- MATROSOV, E. S., HAROU, J. J., LOUCKS, D. P. A computationally efficient open-source water resource system simulator – Application to London and the Thames Basin. Environmental Modelling & Software. 26. p. 1599 a 1610. 2011.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations”. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50, pp. 885-900. 2007.
- MORIASI, D.N.; GITAU, M. W.; DAGGUPATI, P. “Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria”. American Society of Agricultural and Biological Engineers, pp. 1763 – 1785. 2015.
- HOFFMANN, T. C. P.; MENDONÇA, F.; GOULARD, G. “Eventos climáticos extremos: Inundação e gestão de riscos no Paraná”, in Riscos Climáticos: Vulnerabilidades e Resiliência Associados. Org. por Mendonça, F. A. Paco Editorial, Jundiaí – SP, p. 223-260. 2014.
- SINGH, A., SREEPARVATHY, V., DEBDUT, S., PREGNOLATO, M. A critical review of flood risk assessment in Kerala Post-2018: Methodological approaches, gaps, and future directions. Journal of Hydrology: Regional Studies. 58. 2025.
- USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-ResSim Reservoir System Simulation: Manual do Usuário 2021. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hecressim/documentation/HEC-ResSim_33_UsersManual.pdf. Acesso em: 25/11/2025.
- WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Hydrological Practices: hydrology - from measurement to hydrological information. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168). 2008.

Referências

- ABRHIDRO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. 2025. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/events.php?fPalavra=SBRH>. Acesso em: 29/11/2025.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO. **Hidro - Sistema de Informações Hidrológicas**. 2023. Disponível em: < <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas> >. Acesso em: 20/08/2024.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **OUTORGAS**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao/outorgas>. Acesso em: 05/08/2024.
- APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S.; JOHANN, J. A.; Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. 2016. Universidade Federal de Lavras: Ciência e Agrotecnologia. 2016. p. 405 a 417.
- ARAUJO, A. N.; FREITAS, C.; PAULEK, D. M.; BUBA, H.; OLIVEIRA, P. D.; NASCIMENTO, J. J.; ALMEIDA, R.; PEREIRA, R. S. M.; RESCIGNO, J. V.; OPERAÇÃO HIDRÁULICA DOS RESERVATÓRIOS DA CASCATA DO RIO IGUAÇU. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6271>.
- BRASIL. **LEI FEDERAL nº 12.334. Institui o Plano Nacional de Segurança de Barragens, de 20 de setembro 2010**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 06 dez. 2025.
- BRAVO, J. M.; ALASSIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2007). “**Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais**” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, Nov. 2007.
- BRAVO, J. M. **Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas**. 2010. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CASTANHARO, G.; BUBA, H. **Revisão do comportamento hidráulico do rio Iguaçu na região de União da Vitória e seu impacto na operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo**. 2008. Espaço Energia. 2008. p. 28 a 39.
- Cicogna, M. **Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- DASH, S. S., SAHOO, B., RAGHUWANSHI, N. S. **An adaptative multi-objective reservoir operation scheme for improved supply-demand management**. 2022. Journal of Hydrology. 615.
- DITT, B. G. **Avaliação de desempenho de modelo hidrológico conforme a estratégia de divisão de dados na calibração**. 2025. (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia

Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

Duraisekaran, E., Kumar, K., Pulipati, Y., Bindhu V. M., N. Balaji. **HydroAmal: A simulation-optimization framework for effective flood management in a conservation reservoir.** 2025. Environmental Modelling & Software. 2025.

ELETRONBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras. **Guia para cálculo de cheia de projeto de vertedores.** 1987. Ministério de Minas e Energia.

FILHO, G. M. M., ANDRADE, R. S., JUNIOR, J. C. Z., FILHO, L. N. L. M. **Modelos hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades.** 2012. Revista de Ciências Ambientais. 2012. p. 35 a 47.

FLORES, I. A. C., PAZ, S. M., GÓMEZ, M. F. V., WILLIEMS, P., GOBIN, A. **Impacts of climate change on the hydropower potential os a multipurpose storage system Project in Bolivian Andes.** 2025. Journal of Hydrology: Regional Studies. v. 62.

FORD, L., QUEIROZ, A., DECAROLIS, J., SANKARASUBRAMANIAN, A. **Co-Optimization of Reservoir na Power Systems (COREGS) for seasonal planning and operation.** 2022. Energy Reports. v. 8. p. 8061 a 8078.

FREITAS, M. M. S. **RELEVO DO PARANÁ.** s.d. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geografia/relevo-do-parana/>. Acesso em: 01/09/2024.

HAFEZ, A. M., HAGGAG, M., WAGDY, A., RADWAN, H. G. **Assessing the influences of future water development projects in Tekeze-Atbara-Setit on the Nile River inflow at Aswan, Egypt.** 2024. Journal of Hydrology: Regional Studies. 56.

HEC – Hydrologic Engineering Center. About: History. s.d. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/about/history.aspx>. Acesso em 04/09/2024.

HOFFMANN, T. C. P.; MENDONÇA, F.; GOULARD, G.; Riscos Climáticos: Vulnerabilidades e Resiliência Associados. *In*: FRANCISCO DE ASSIS MENDONÇA (Org.). **Eventos climáticos extremos: Inundação e gestão de riscos no Paraná.** Jundiaí: Paco Editorial. 2017.

IAT. INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Bacias hidrográficas do Paraná – Bacia do rio Iguacu.** Curitiba, 2020. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/iguacu.pdf. Acesso em: 23/08/2024.

IAT. INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Bacias hidrográficas do Paraná – Bacia do rio Iguacu.** Curitiba, 2024. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>. Acesso em: 20/08/2024.

ILICH, N. **Dynamic reservoir rule curves – Their creation and utilization.** 2024. Journal of Hydrology. 22. p 101 a 166.

JAIN, S. K., SHILPA, L. S., RANI, D., SUDHEER, K. P. **State of the art review: Operation of multi purpose reservoirs during flood season.** 2023. Journal of Hydrology. 2023.

MATROSOV, E. S., HAROU, J. J., LOUCKS, D. P. **A computationally efficient open-source water resource system simulator – Application to Londo and the Thames Basin.** 2011. Environmental Modelling & Software. 26. p. 1599 a 1610.

MESKR, Y. M., MOHAMMED, A. K., AYALEM, A. T., LOHANI, T. K. **Multi-purpose reservoir operation concomitant with estimating hydropower potential using multifarious hydrological models.** 2024. Heliyon. 10.

MINE, M. R. M. **Método Determinístico para Minimizar o Conflito entre Gerar Energia e Controlar Cheias**. 1998. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007) “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations”. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 50, pp. 885-900.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W., PAI, N., DAGGUPATI, P. **Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria**. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 58, pp. 1763-1785.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Sobre o ONS: O que é o ONS. 2024a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons#>. Acesso em: 25/08/2024.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Diagrama esquemático das usinas hidroelétricas do SIN. 2025a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em 21/11/2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Sobre o SIN: O Sistema em números. 2025b. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em 21/11/2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Sobre o ONS: Procedimentos de Rede. 2024c. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/o-que-sao>. Acesso em 03/09/2024.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **NT-ONS DOP 0051/2024 - APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE GESTÃO DE CONDICIONANTES OPERATIVOS HIDRÁULICOS DE USINAS HIDROELÉTRICAS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**. Rio de Janeiro. Maio, 2024d.

ONS. **PROCEDIMENTO DE REDE – MÓDULO 5 – OPERAÇÃO DO SISTEMA: Operação Hidráulica de Reservatórios, Submódulo 5.5**. 2020. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%205.5-RS_2020.12.pdf. Acesso em: 01/09/2024.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **MANUAL DE PROCEDIMENTOS DA OPERAÇÃO: Cadastro de Informações Operacionais Hidráulicas da Bacia do Rio Iguçu, Submódulo 5.11**. 2025. Disponível em: https://www.ons.org.br/%2FMPO%2FDocumento%20Normativo%2F2.%20Cadastros%20de%20Informa%C3%A7%C3%B5es%20Operacionais%20-%20SM%205.11%2F2.3.%20Cadastros%20de%20Informa%C3%A7%C3%B5es%20Operacionais%20Hidr%C3%A1ulicas%2FCD-OR.PR.IGU_Rev.40.pdf. Acesso em: 25/11/2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **MANUAL DE PROCEDIMENTOS DA OPERAÇÃO: Conceitos e Metodologias para a Operação Hidráulica dos Sistemas de Reservatórios**. 2021. Disponível em: https://www.ons.org.br/%2FMPO%2FDocumento%20Normativo%2F7.%20Refer%C3%Aancias%20T%C3%A9cnicas%2F7.8.%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Reservat%C3%B3rios%2FRT-OR.BR.01_Rev.07.pdf. Acesso em: 01/08/2024.

OPEN TOPOGRAPHY. **SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION: The Mission to Map the World**. Disponível em: <https://portalOpentopographyorg/raster?opentopo ID=OTSRTM.082016.4326.1>. Acesso em: 08/08/2024.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Management of Water Control Systems**. 2017. Disponível em: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-3600.pdf. Acesso em: 25/08/2024.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-ResSim Reservoir System Simulation: Manual do Usuário** 2021. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/documentation/HEC-ResSim_33_UsersManual.pdf. Acesso em: 25/11/2025.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS Hydrologic Modeling System: Manual do Usuário** 2024. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.12>. Acesso em: 25/11/2025.

SINGH, A., SREEPARVATHY, V., DEBDUT, S., PREGNOLATO, M. **A critical review of flood risk assessment in Kerala Post-2018: Methodological approaches, gaps, and future directions**. 2025. Journal of Hydrology: Regional Studies. 58.

SORACHAMPA, P., TIPPAYAWONG, N., NGAMSANROAJ, K. **Optimizing multiple reservoir system operation for maximum hydroelectric power generation**. 2020. Energy Reports: The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering. 6. p 67 a 75.

TUCCI, C. E. M.; **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. UFRGS. 2005.

USÓ, M. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do rio Bauru, Bauru, SP**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

UYSAL, G., AKKOL, B., TOPCU, M. I., SENSOY, A., SCHWANENBERG, D. **Comparison of Different Reservoir Models for Short Term Operation of Flood Management**. 2016. Procedia Engineering: 12th International Conference on Hydroinformatics. 154. p 1385 a 1392.

WANG, J., WEI, J., SHAN, W., ZHAO, J. **Moedling the water-energy-food-environment nexus and transboundary cooperation opportunity in the Brahmaptura River Basin**. 2023. Journal of Hydrology: Regional Studies. 49

WMO – World Meteorological Organization. **Guide to Hydrological Practice**. 2008. v. 1.

WORKU, T. A., AMAN, T. F., WUBNEH, M. A., KIFELEW, M. S. **Assessment of reservoir performance under climate change: A case study in shumbrate reservoir, South Gojjam sub-basin**. 2023. Scientific African. 19.

WUBNEH, W. A., WORKU, T. A., FIKADIE, T. T., AMAN, T. F., ALEMU, M. G. **Operational analysis of lake Tana under climate change, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia**. 2024. Scientific African. 24.

