



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

HELLEN XAVIER TAVARES VASCONCELOS

INTEGRAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E DE OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO REGULARIZÁVEL EM
BARRAGENS DE PERNAMBUCO

Caruaru

2023

HELLEN XAVIER TAVARES VASCONCELOS

**INTEGRAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E DE OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO REGULARIZÁVEL EM
BARRAGENS DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de mestra em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

Caruaru

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

V331i Vasconcelos, Hellen Xavier Tavares.
Integração de modelagem hidrológica e de operação de reservatórios para
determinação da vazão regularizável em barragens de Pernambuco. / Hellen Xavier
Tavares Vasconcelos. – 2023.
126 f.; il.: 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Pós-
Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.
Inclui Referências.

1. Reservatórios - Pernambuco. 2. Modelos matemáticos. 3. Estudos de
viabilidade - Pernambuco. 4. Redes neurais (Computação) - Pernambuco. 5.
Otimização matemática. 6. CAWM. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)UFPE (CAA 2023-088)

HELLEN XAVIER TAVARES VASCONCELOS

**INTEGRAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E DE OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO REGULARIZÁVEL EM
BARRAGENS DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, do Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Aprovada em: 30/08/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof.^a Dr.^a Rochele Sheila Vasconcelos (Examinadora externa)

Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Dedico este trabalho ao meu noivo, amigo e
companheiro de todas as horas, Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela paz que excede todo entendimento e pela força que me sustentou até aqui.

Ao meu noivo, Marcelo, pela empatia, apoio e companheirismo ao longo dessa jornada. Obrigada por cuidar tão bem de mim e se preocupar com cada detalhe. Você torna os meus dias mais coloridos.

Aos meus pais, Adlai e Alexei, pelo apoio e cuidado em meio a tantas mudanças, sem vocês não chegaria até aqui. Aos meus irmãos, Ábner e Noemy, pela amizade e sinceridade de sempre. Aos meus tios e primos, Alice, Aristóbulo, Beatriz, Davi, Elienai, Elisama, Emilly, Uziel e à toda minha família, pelo carinho e bons momentos compartilhados.

Aos meus amigos e companheiros, Amanda Carvalho, Anderson, Aryane, Ayane, Bruna Bandeira, Bruna Vitória, Bruno Lima, Edriane, Felipe, Fellipe, Isabela, Igor, Janaína, João Lucas, Kennendh, Lourdes, Luana, Marta, Matheus, Snorem e Thamires, pela troca de experiências e por tornarem o caminho mais leve.

Ao meu orientador, Almir, pelos ensinamentos, amizade, compreensão e paciência ao longo dessa trajetória.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pelo conhecimento transmitido.

À Rochele e a Saulo, pelas contribuições e palavras de apreço ao trabalho.

À FACEPE, pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa por meio da bolsa de pós-graduação.

“Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus, é contigo, por onde quer que andares” (BÍBLIA..., A. T., Josué 1:9, p. 448).

RESUMO

Diante dos impactos causados pelas secas no semiárido brasileiro, torna-se essencial o fortalecimento da infraestrutura hídrica aliado a uma gestão eficaz. Os reservatórios artificiais desempenham um papel fundamental na garantia da segurança hídrica das bacias hidrográficas, e sua dinâmica pode ser representada por meio de modelos de simulação. Neste contexto, a modelagem hidrológica se destaca como uma importante ferramenta para a compreensão e representação do funcionamento das bacias hidrográficas. O presente estudo busca a integração da modelagem hidrológica com um modelo de operação otimizada de reservatórios, com o objetivo de promover o uso responsável e eficiente dos recursos hídricos. Para alcançar esse propósito, foram aplicados os modelos CAWM (*Campus Agreste Watershed Model*) e CAROS (*Campus Agreste Reservoir Operation Model*) nas bacias dos rios Capibaribe, Pajeú, Brígida e Moxotó. A avaliação dos indicadores de desempenho NSE, $NSE_{\sqrt{Q}}$, $NSE_{\log Q}$ e Pbias classificou os ajustes como pelo menos satisfatórios em 74%, 84%, 42% e 50% dos casos, respectivamente, considerando o total de cenários, e, nesta mesma ordem, em 100%, 100%, 77% e 69% dos cenários com a série reduzida, destacando uma notável melhoria nos cenários desprovidos da influência de barragens. As vazões ajustadas pelas Redes Neurais Artificiais causaram melhoras significativas em parte dos casos. A utilização do modelo CAROS possibilitou a determinação das vazões regularizadas $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e $Q_{100\%}$ para reservatórios de relevância no estado de Pernambuco, onde 47% dos cenários apresentaram diferença relativa menor que 50% entre a vazão regularizada obtida com dados do CAWM e com dados obtidos por proporção de áreas.

Palavras-chave: CAWM; CAROS; PE3D; redes neurais artificiais.

ABSTRACT

Given the impacts caused by droughts in the Brazilian semi-arid region, it is essential to strengthen water infrastructure combined with effective management. Artificial reservoirs play a fundamental role in ensuring water security in river basins, and their dynamics can be represented through simulation models. In this context, hydrological modeling stands out as an important tool for understanding and representing the functioning of river basins. The present study seeks to integrate hydrological modeling with an optimized reservoir operation model, with the aim of promoting the responsible and efficient use of water resources. To achieve this purpose, the CAWM (Campus Agreste Watershed Model) and CAROS (Campus Agreste Reservoir Operation Model) models were applied in the Capibaribe, Pajeú, Brígida and Moxotó river basins. The evaluation of the performance NSE, $NSE_{\text{sqrt}Q}$, $NSE_{\text{log}Q}$ and Pbias classified the adjustments as at least satisfactory in 74%, 84%, 42% and 50% of cases, respectively, considering the total of scenarios, and, in the same order, in 100%, 100%, 77% and 69% of the scenarios with the reduced series, highlighting a notable improvement in scenarios without the influence of dams. The flow rates adjusted by Artificial Neural Networks caused significant improvements in some cases. The use of the CAROS model made it possible to determine the regularized flows $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ and $Q_{100\%}$ for relevant reservoirs in the state of Pernambuco, where 47% of the scenarios presented a relative difference of less than 50% between the regularized flow obtained with CAWM data and with data obtained by proportion of areas.

Keywords: CAWM; CAROS; PE3D; artificial neural networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Mapa 1 -	Comparativo da delimitação do Semiárido em 2017 e 2021	21
Gráfico 1 -	Secas no Brasil de 2017 a 2019	22
Gráfico 2 -	Participação de cada região do Brasil nas secas de 2017 a 2019	22
Mapa 2 -	Monitor de secas em dezembro de 2020	25
Mapa 3 -	Monitor de secas em junho de 2021	26
Mapa 4 -	Monitor de secas semestral de dezembro de 2018 a junho de 2020	26
Figura 1 -	Faixas de variação da criticidade do reservatório	34
Figura 2 -	Representação esquemática do modelo CAWM para regiões semiáridas	41
Figura 3 -	Representação esquemática do modelo CAWM para regiões úmidas	46
Figura 4 -	Arquitetura da rede neural Perceptron Multicamadas com duas camadas escondidas	49
Mapa 5 -	Bacias dos rios Brígida, Pajeú, Moxotó e Capibaribe	53
Mapa 6 -	Estações fluviométricas selecionadas	56
Mapa 7 -	Barragens selecionadas para o estudo	57
Fluxograma 1 -	Fluxograma do modelo CAWM	58
Fluxograma 2 -	Fluxograma do modelo CAROS	59
Figura 5 -	Arquitetura da rede neural para estações fluviométricas do Capibaribe ...	63
Figura 6 -	Espelho d'água do reservatório Goitá na cota de coroamento	67
Figura 7 -	Uso da ferramenta Profile Tool na barragem Goitá	68
Gráfico 3 -	Variação da vazão média calculada pelas RNA em estações do Capibaribe (parte 1)	72
Gráfico 4 -	Variação da vazão média calculada pelas RNA em estações do Capibaribe (parte 2)	73
Mapa 8 -	Localização dos postos fluviométricos e barragens de influência Bacia do rio Capibaribe	75
Gráfico 5 -	Variação da vazão média nas sub-bacias do Capibaribe (parte 1)	77
Gráfico 6 -	Variação da vazão média nas sub-bacias do Capibaribe (parte 2)	78
Mapa 9 -	Localização dos postos fluviométricos e barragens de influência Bacia do rio Pajeú	79
Gráfico 7 -	Variação da vazão média nas sub-bacias do Pajeú	80
Mapa 10 -	Localização dos postos fluviométricos e barragens de influência Bacia	

	do rio Brígida	81
Gráfico 8 -	Variação da vazão média nas sub-bacias do Brígida	82
Mapa 11 -	Localização do posto fluviométrico e barragem de influência Bacia do rio Moxotó	83
Gráfico 9 -	Variação da vazão média na sub-bacia do Moxotó	83
Mapa 12 -	Localização das barragens e postos fluviométricos de referência Bacia do rio Capibaribe	86
Figura 8 -	Bacia hidráulica do reservatório Poço Fundo	86
Figura 9 -	Bacia hidráulica do reservatório Jucazinho	87
Figura 10 -	Bacia hidráulica do reservatório Tapacurá	87
Figura 11 -	Bacia hidráulica do reservatório Goitá	88
Gráfico 10 -	Representação gráfica das vazões regularizadas da barragem Jucazinho no modelo CAROS	89
Mapa 13 -	Localização das barragens e postos fluviométricos de referência Bacia do rio Pajeú	90
Figura 12 -	Bacia hidráulica do reservatório Rosário	90
Figura 13 -	Bacia hidráulica do reservatório Serrinha II	91
Figura 14 -	Bacia hidráulica do reservatório Barra do Juá	91
Mapa 14 -	Localização das barragens e postos fluviométricos de referência Bacia do rio Brígida	92
Figura 15 -	Bacia hidráulica do reservatório Entremontes	93
Figura 16 -	Bacia hidráulica do reservatório Cachimbo	93
Figura 17 -	Bacia hidráulica do reservatório Chapéu	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação de severidade de seca	24
Tabela 2 -	Estações fluviométricas abordadas no estudo	55
Tabela 3 -	Barragens abordadas na operação de reservatórios	56
Tabela 4 -	Usos principais e complementares das barragens	57
Tabela 5 -	Dados de entrada dos modelos CAWM e CAROS	60
Tabela 6 -	Passos para geração de sub-bacias	61
Tabela 7 -	Períodos das séries fluviométricas brutas e consistidas para o Capibaribe	62
Tabela 8 -	Neurônios da camada de entrada das redes neurais artificiais do Capibaribe ...	63
Tabela 9 -	Variáveis de decisão e restrições do solver para o modelo de RNA do Capibaribe	65
Tabela 10 -	Estações de evaporação mensal selecionadas	66
Tabela 11 -	Períodos de calibração e validação das estações abordadas	70
Tabela 12 -	Indicadores de desempenho	70
Tabela 13 -	Indicadores de desempenho dos resultados das RNA	73
Tabela 14 -	Características físicas das sub-bacias	74
Tabela 15 -	Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM Bacia do rio Capibaribe	76
Tabela 16 -	Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM Bacia do rio Pajeú	79
Tabela 17 -	Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM Bacia do rio Brígida	81
Tabela 18 -	Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM Bacia do rio Moxotó	83
Tabela 19 -	Desempenho do modelo CAWM no total de cenários	84
Tabela 20 -	Desempenho do modelo CAWM nos cenários sem influência de barragens	84
Tabela 21 -	Características físicas das barragens em estudo	85
Tabela 22 -	Vazões regularizada das barragens abordadas no Capibaribe	88
Tabela 23 -	Vazões regularizada das barragens abordadas no Pajeú	92
Tabela 24 -	Vazões regularizada das barragens abordadas no Brígida	94

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CAROS	Campus Agreste Reservoir Operation Model
CAV	Curvas cota-área-volume
CAWM	Campus Agreste <i>Watershed Model</i>
CN	Curve Number
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONDEL	Conselho Deliberativo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FADE/UFPE	Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	Otimização Estocástica Implícita
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MI	Ministério da Integração Nacional
MLP	Multi Layer Perceptron
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
ONU	Organização das Nações Unidas
OSGEO	Open Source Geospatial Foundation
PBIAS	Percentual de tendência bias
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático
RNA	Redes Neurais Artificiais
RSR	Razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações
SIG	Sistemas de Informação Geográfica

SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
Sudene	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 O NORDESTE E O SEMIÁRIDO DO BRASIL	20
2.2 O PROBLEMA DAS SECAS NO NORDESTE	22
2.3 CRISE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	27
2.4 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	29
2.5 MODELO CAMPUS AGRESTE RESERVOIR OPERATION MODEL (CAROS)	31
2.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA	37
2.7 MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)	40
2.8 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS	48
2.9 GEOTECNOLOGIAS EM ESTUDOS E PROJETOS DE RECURSOS HÍDRICOS	50
2.9.1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	51
2.9.2 Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D)	52
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	53
3.1.1 Bacia do rio Capibaribe	54
3.1.2 Bacia do rio Pajeú.....	54
3.1.3 Bacia do rio Brígida.....	54
3.1.4 Bacia do rio Moxotó	55
3.1.5 Estações fluviométricas e barragens selecionadas para o estudo.....	55
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA METODOLOGIA	58
3.3 DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS.....	60

3.3.1 Dados fluviométricos	60
3.3.2 Geração de sub-bacias.....	60
3.3.3 Dados pluviométricos e cálculo da chuva média pelo método IDW	61
3.3.4 Expansão de séries de vazões e preenchimento de falhas	62
3.3.5 Dados de evapotranspiração e de evaporação	65
3.3.6 Parâmetro de capacidade de armazenamento do solo	66
3.3.7 Atualização de curvas cota-área-volume dos reservatórios.....	67
3.3.8 Características físicas das barragens.....	69
3.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO CAWM E SIMULAÇÃO DE VAZÕES	69
3.5 UTILIZAÇÃO DO MODELO CAROS.....	71
4 RESULTADOS	72
4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS REDES NEURAS ARTIFICIAIS	72
4.2 APLICAÇÃO DO MODELO CHUVA-VAZÃO CAWM.....	74
4.2.1 Calibração do CAWM em estações na bacia do rio Capibaribe.....	74
4.2.2 Calibração do CAWM em estações na bacia do rio Pajeú	78
4.2.3 Calibração do CAWM em estações na bacia do rio Brígida	81
4.2.4 Calibração do CAWM em estação na bacia do rio Moxotó	82
4.2.5 Análise geral dos resultados do CAWM.....	84
4.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS CAROS	85
4.3.1 Vazões regularizadas das barragens do Capibaribe	85
4.3.2 Vazões regularizadas das barragens do Pajeú.....	89
4.3.3 Vazões regularizadas das barragens do Brígida.....	92
4.3.4 Análise geral dos resultados do CAROS	94
5 CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE A – INTERFACES DAS PLANILHAS UTILIZADAS	110
APÊNDICE B – DADOS DE COTA X ÁREA X VOLUME	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

No Brasil, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento econômico, as políticas de saúde pública e o bem-estar. Fatores como mudanças no uso do solo, no crescimento econômico e no clima podem aumentar de forma considerável os riscos referentes à água, como escassez, inundações e poluição. Apesar de possuir grande oferta de água, em termos globais, o Brasil apresenta esse recurso natural distribuído de maneira heterogênea no território nacional (ANA, 2020). Enquanto a região amazônica concentra 81% das reservas hídricas do país e 5% da população, o semiárido do Nordeste dispõe apenas de 4% dos recursos hídricos do país e é ocupado por 35% da população brasileira (Cirilo, 2015).

Os principais usos da água, no Brasil, são para irrigação, abastecimento humano e animal, indústria, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, recreação e lazer, e a tendência é que a demanda para esses fins cresça cada vez mais. Nas duas últimas décadas, houve um aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado de água, e a previsão é de que, até 2030, a retirada aumente cerca de 23%. O desenvolvimento econômico e o processo de urbanização do país estão diretamente relacionados a esse histórico da evolução dos usos da água (ANA, 2020).

Cirilo (2015) aponta que os maiores déficits hídricos do país são registrados na porção semiárida do Nordeste, região ciclicamente submetida à ocorrência de secas. A escassez de água é uma realidade de muitas cidades, presentes nessa localidade, que estão constantemente à beira de um colapso de água e operam em regime de racionamento. Essa situação agrava-se ainda mais com fatores como o crescimento populacional, atividades industriais e agrícolas e diminuição da disponibilidade de água potável, limitando o desenvolvimento econômico e social da região (Farias; Curi; Diniz, 2017).

Historicamente, as secas têm tido grande influência em todos os aspectos da vida do Nordeste, e apesar de acontecerem com maior intensidade no Semiárido e no Agreste, todas as regiões acabam sendo afetadas. Dentre as várias secas registradas ao longo da história, o período de 2012-2016 foi constatado como a pior dos últimos cem anos, na região (Martins *et al.*, 2015; Marengo; Cunha; Alves, 2016; De Nys; Engle; Magalhães, 2016; Ramos, 2017; Fortunato, 2019). Diante dos alertas disparados pela comunidade científica internacional sobre as mudanças do clima nos últimos tempos, a ocorrência de secas e os seus efeitos têm sido colocados sob uma nova perspectiva. Prenuncia-se que as regiões semiáridas sofrerão com secas mais frequentes, mais prolongadas e mais severas (Teixeira; Machado, 2015).

Mesmo após uma longa história de enfrentamento das secas no Nordeste, estas ainda continuam sendo um elemento surpresa. O problema é esquecido quando o fenômeno passa, até que uma nova seca se estabeleça e comece tudo de novo. Esse ciclo se convencionou chamar de “ciclo hidro-ilógico”, uma expressão criada pelo Professor Donald Wilhite, da Universidade de Nebraska (Wilhite; Hayes; Knutson, 2005). Na verdade, a seca e a semiaridez são componentes permanentes do cenário do interior do Nordeste, assim, as atividades humanas precisam se adaptar às condições do semiárido, e não o contrário. Apesar da evolução na forma como os governos estaduais e federal reagem, costuma haver um certo imprevisto quando ocorre uma nova seca e a sociedade precisa reagir. Agora, com o cenário em constante evolução, decorrente do aumento da vulnerabilidade ambiental, é necessário investir em gestão de curto, médio e longo prazo, melhorando a capacidade governamental para responder de uma forma antecipada e eficaz à escassez hídrica (De Nys; Engle; Magalhães, 2016).

A perspectiva de aumentos na frequência e duração dos períodos secos combinada à sobreposição de secas e mudanças climáticas tem gerado preocupações e despertado o interesse de pesquisadores dos recursos naturais, de agricultores e de gestores públicos para entender até que ponto essas mudanças vão afetar os recursos hídricos, a produção de alimentos, a renda e os meios de subsistência (Marengo; Cunha; Alves, 2016; Gutiérrez *et al.*, 2014). Cirilo (2015) e Cirilo (2008) argumentam que, de forma global, a implantação de infraestruturas capazes de disponibilizar água suficiente para assegurar o abastecimento humano e animal e viabilizar a irrigação ainda não é o bastante para resolver os problemas resultantes da escassez de água. Isso provoca a continuidade da vulnerabilidade dessas regiões à ocorrência de secas, especialmente quando se trata do uso difuso da água no meio rural. Diante disso, os requisitos essenciais para a solução dessa questão estão na ampliação e no fortalecimento da infraestrutura hídrica com adequada gestão. Como afirma Medeiros (2011), os caminhos para criar-se uma estratégia para adaptação das sociedades do semiárido à natureza envolvem a construção de infraestrutura hídrica, o gerenciamento dos recursos hídricos e o gerenciamento do risco climático.

As características climáticas do semiárido brasileiro tornam a gestão das águas um grande desafio para as instituições e os tomadores de decisão. Uma das alternativas adotadas para atenuar os impactos dos eventos de secas é a construção de reservatórios, também chamados de açudes, que acumulam e redistribuem a água na estiagem para os diversos fins, como abastecimento humano, dessedentação dos animais, agricultura e atividades industriais. O armazenamento e as transferências hídricas dessas infraestruturas reduziram

significativamente a vulnerabilidade em diversos locais do semiárido, bem como atenuaram maiores inundações em zonas urbanas (Medeiros, 2011; ANA, 2017; Virões, 2018).

Os reservatórios artificiais visam garantir a segurança hídrica nas bacias hidrográficas, potencializando a disponibilidade hídrica superficial ao armazenar água nos períodos úmidos e ofertá-la, sobretudo, nos períodos de estiagem (ANA, 2020). De modo a promover benefícios para a sociedade, esta infraestrutura hídrica deve ser implantada, operada e mantida, ou seja, após a sua construção, são necessárias sua operação e manutenção, e a gestão da apropriação desses recursos escassos (Medeiros, 2011). Com os cenários de seca prolongada em que o Semiárido tem passado, uma das iniciativas de planejamento constitui-se em aprofundar o conhecimento sobre a oferta, as demandas e as condições de operação dos reservatórios, estabelecendo-se um melhor conhecimento sobre o atual balanço hídrico da região e aprimorando-se a operação desses açudes (ANA, 2017).

No entanto, durante os estudos hidrológicos necessários para realizar as ações citadas acima, encontram-se algumas dificuldades como a inexistência de séries históricas de dados hidrológicos, seja por falta de monitoramento ou por não serem longas o suficiente (Virões, 2018). Nesse sentido, aplicações de modelos hidrológicos para representar o comportamento de bacias hidrográficas têm apresentado resultados animadores e sua utilização tem sido bastante difundida (Perrin; Michel; Andréassian, 2003; Marinho Filho *et al.*, 2012; Traore *et al.*, 2014; Kan *et al.*, 2017; Cabral; Sakuragi; Silveira, 2017). A modelagem hidrológica é um importante recurso para auxiliar na tomada de decisão em projetos que envolvam recursos hídricos, constituindo-se numa ferramenta capaz de representar o funcionamento das bacias hidrográficas e simular diferentes cenários, sendo bastante úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos (Almeida; Serra, 2017).

A eficiência do modelo hidrológico está intimamente ligada com a qualidade dos dados envolvidos. Dessa forma, Silva e Rosa (2017) explanam sobre o uso das geotecnologias, as quais vêm sendo cada vez mais utilizadas no aprimoramento de técnicas e ferramentas de coleta, armazenamento, processamento, análise, previsão e simulação de dados espaciais e temporais. Com o uso destas técnicas, a modelagem hidrológica pode otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos, além de avaliar impactos de mudança do uso da terra e das mudanças climáticas, analisar a extensão de séries hidrológicas em locais com poucas informações, alertar quanto à operação de recursos hídricos, entre outros.

Nesse contexto, o presente trabalho buscou avaliar o desempenho da versão aprimorada do modelo chuva-vazão CAWM (Campus Agreste Watershed Model), desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco e apresentado por Cirilo *et al.* (2020), a

partir de aplicações em sub-bacias presentes predominantemente no semiárido pernambucano. Associado a isso, empregou-se a versão aperfeiçoada do modelo de operação de reservatórios CAROS (*Campus Agreste Reservoir Operation Model*), desenvolvido pelo mesmo grupo de pesquisadores, para a determinação da vazão regularizada de reservatórios relevantes do estado de Pernambuco.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Aprimorar a gestão sustentável dos recursos hídricos por meio da integração entre modelagem hidrológica e operação de reservatórios, com o propósito de otimizar a utilização responsável e eficiente das fontes de água.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar versão aprimorada do modelo chuva-vazão CAWM com o propósito de eliminar o efeito de escala presente no modelo digital do terreno;
- Avaliar a viabilidade da utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) no preenchimento de falhas e expansão dos dados de vazão;
- Estimar as vazões regularizadas de barragens em Pernambuco através da integração do modelo de operação de reservatórios CAROS com séries fluviométricas geradas pelo modelo hidrológico CAWM.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O NORDESTE E O SEMIÁRIDO DO BRASIL

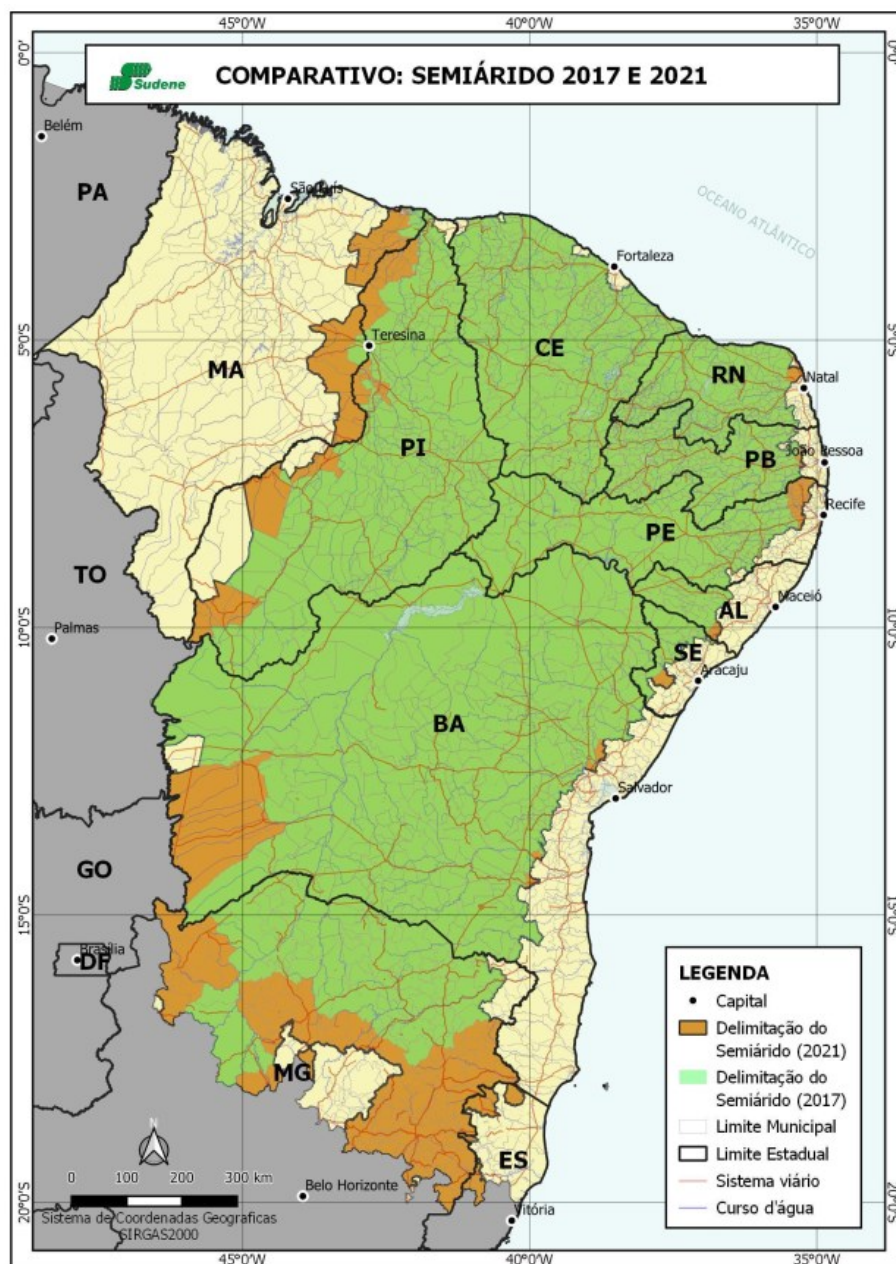
O Brasil é um país de grande extensão territorial e diversificado no que tange os seus biomas, refletindo diretamente no seu clima. Ao mesmo tempo em que pode estar geando no Sul e no Sudeste do país, no Nordeste e no Norte as temperaturas podem ultrapassar 30 graus centígrados. A seca pode até estar presente em todas as regiões do país, mas é na região Nordeste que estas se manifestam com maior frequência e intensidade, proporcionando impactos mais acentuados.

Confunde-se o Nordeste com a zona de incidência de secas, o chamado Polígono das Secas, criado em 1936, pela Lei 175, tendo seus limites revisados em 1951, pela Lei 1348. Em 1968, o Decreto-Lei 63.778 delegou à Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) a competência de declarar quais os municípios pertencentes ao Polígono das Secas. Em 1977, este passou a ser denominado de Semiárido Brasileiro. Em 2005, os limites da região semiárida foram redefinidos pelo Ministério da Integração Nacional (MI), que ampliou os critérios de inclusão dos municípios para: precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; Índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,5; percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.

A delimitação do Semiárido Brasileiro foi atualizada em 2017 pelo Conselho Deliberativo (Condel) da Sudene por meio da Resolução nº 107/2017 (Sudene, 2017; ANA, 2021). Em 2021, a Sudene (2021) alterou a delimitação das fronteiras com base na Resolução 150/2021, excluindo 50 municípios e agregando mais outros 215, passando de 1262 para 1527 municípios. Com isso, o Semiárido brasileiro compreende parte dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais (Mapa 1).

O Semiárido Brasileiro caracteriza-se por seus longos períodos de secas e rios intermitentes, que passam a maior parte do ano sem água (ANA, 2020). A pobreza em volume de escoamento de água dos rios pode ser explicada em razão da variabilidade temporal das precipitações e das características geológicas dominantes, onde se predominam os solos rasos baseados sobre rochas cristalinas e consequentemente baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente. Como resultado, tem-se uma densa rede de rios temporários. A maior exceção é o grande rio São Francisco, que nasce na serra da Canastra, em Minas Gerais, e só após centenas de quilômetros de percurso entra na região Nordeste (Cirilo, 2008).

Mapa 1 – Comparativo da delimitação do Semiárido em 2017 e 2021



Fonte: Sudene (2021)

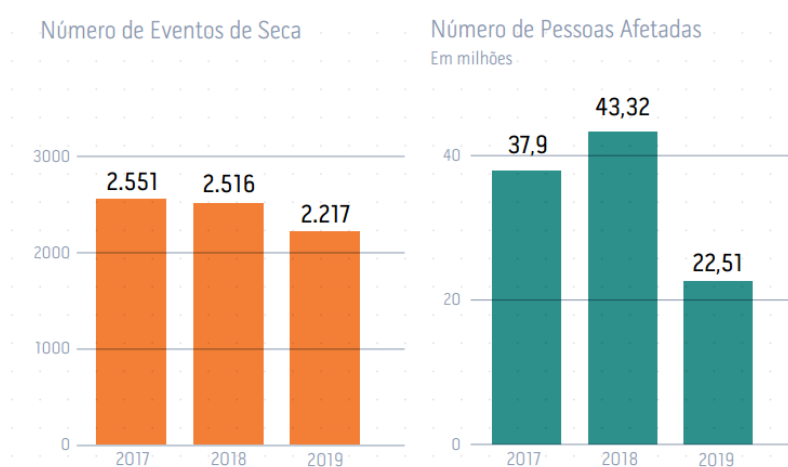
Durante todo o ano, apresenta temperaturas elevadas, baixas amplitudes térmicas, da ordem de 2 a 3°C, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração. As chuvas apresentam totais pluviométricos irregulares e inferiores a 800 mm, que normalmente são superadas pelos elevados índices de evapotranspiração, configurando taxas negativas no balanço hídrico (ANA, 2006). O período chuvoso se estende de janeiro a maio, sendo as chuvas definidas pela irregularidade temporal e espacial, impondo um verdadeiro desafio ao desenvolvimento das atividades das comunidades e setor produtivo dessa região. As secas cíclicas afligem ainda mais as duras condições de vida e de produção do Semiárido, provocando impactos

devastadores quando são severas e duram vários anos (Teixeira; Machado, 2015). A diversidade e a heterogeneidade do Semiárido demandam soluções específicas adequadas a cada uma de suas paisagens (Medeiros, 2011).

2.2 O PROBLEMA DAS SECAS NO NORDESTE

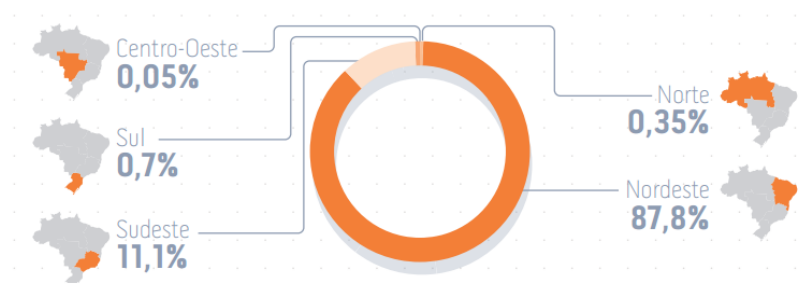
A maioria dos desastres naturais ocorridos no Brasil constituem-se em estiagens, secas, enxurradas e inundações. Estes eventos extremos são decorrentes do excesso ou da escassez de chuva, tendo esta última um padrão de distribuição naturalmente variável. De acordo com a ANA (2020), em 2019, cerca de 22 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil, quase 11 vezes mais que por cheias, e quase 94% dessas pessoas vivem na região Nordeste. Em termos de danos humanos, o ano de 2019 foi menos crítico que os anteriores, como mostra a Gráfico 1. O Gráfico 2 apresenta a participação de cada região do Brasil nas secas dos anos de 2017 a 2019, onde nota-se a grande maioria das secas ocorrendo no Nordeste, com uma participação de quase 90%.

Gráfico 1 – Secas no Brasil de 2017 a 2019



Fonte: ANA (2020)

Gráfico 2 – Participação de cada região do Brasil nas secas de 2017 a 2019



Fonte: ANA (2020)

A seca é um dos mais complexos desastres naturais, sendo frequentemente descrita como um fenômeno sorrateiro. Esta pode ser vista como um desvio em relação às condições de longo prazo de variáveis como precipitação, umidade do solo, água subterrânea e vazão fluvial, e resultam em taxas de precipitação baixas e/ou de evaporação altas, provenientes de um índice de disponibilidade de água abaixo da média devido à variabilidade climática. As principais consequências da seca envolvem mudanças no ecossistema, diminuição do escoamento de captação de água, redução da produção agrícola, degradação do solo, e, em longo prazo, à desertificação, com uma mudança de um regime climático de semiárido para árido (Marengo; Bernasconi, 2014; Cirilo, 2015; De Nys; Engle; Magalhães, 2016).

Diversos estudos demonstram uma alta correlação entre a ocorrência de eventos extremos (secas e cheias) em diferentes partes do planeta e o fenômeno denominado *El Niño*, associado ao aumento da temperatura da água no oceano pacífico. Enquanto na região Sul e Sudeste o *El Niño* provoca grandes enchentes, na região semiárida do Nordeste a seca torna-se mais severa, resultando em precipitações menores do que a média histórica, que é cerca de 800 mm por ano (Cirilo, 2008). Apesar de ser relativamente alta, essa precipitação anual média se concentra em poucos meses do ano. Além disso, os níveis de evapotranspiração ultrapassam os 2000 mm por ano. Nos casos extremos de seca, a queda na precipitação é superior a 50% (De Nys; Engle; Magalhães, 2016).

O problema da seca na região Nordeste do Brasil vem sendo registrado desde o início do período de colonização, com primeiro registro histórico em 1583. Entre esses registros, encontram-se as secas de 1877-1879 (que dizimou metade da população e quase todo o rebanho bovino), 1888-89, 1898, 1900, 1903, 1915, 1919-20, 1931-32, 1942, 1951, 1953, 1958, 1970, 1979-83, 1987, 1990, 1992-93, 1997-98, 2002-03, 2010 e a de 2012-16, sendo esta última considerada como a mais grave das últimas décadas (Martins *et al.*, 2015; Marengo; Cunha; Alves, 2016; De Nys; Engle; Magalhães, 2016; Ramos, 2017; Fortunato, 2019).

Cirilo (2015) comenta que os governos das regiões atingidas pelas secas têm o enorme desafio de mitigar seus efeitos com ações de curto prazo, e, em longo prazo, reduzir a vulnerabilidade da sociedade para convívio com este fenômeno de recorrência inevitável. Os efeitos das secas podem se acumular e perdurar por anos, dificultando a delimitação do início, do fim e do grau de severidade do fenômeno. Gutiérrez *et al.* (2014) expõem que a preparação proativa contra a seca e as medidas de gerenciamento de risco podem ajudar a reduzir as perdas econômicas e os custos associados a uma resposta mais reativa a desastres.

Desde o ano de 2017, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) tem coordenado uma importante ferramenta específica para o acompanhamento de secas: o Monitor de Secas. Esse instrumento possibilita a supervisão regular e periódica da situação da seca, divulgando mensalmente os resultados consolidados por meio do Mapa do Monitor de Secas. Esse projeto, em operação desde 2014, teve início na região Nordeste, e tem sido expandido gradualmente para o restante do Brasil. Aos poucos, o Monitor terá sua área de abrangência expandida para outros estados, contribuindo para adoção de um modelo de monitoramento de secas uniforme no Brasil, derivado de uma base de dados unificada (ANA, 2020). Dessa forma, o Monitor de Secas constitui-se em um instrumento de apoio à tomada de decisão, visto que se propõe tanto a preparação como a resposta aos efeitos das secas, a partir da severidade e da tendência de duração (curto, médio ou longo prazo), servindo como base e mecanismo de apoio à política proativa contra a seca (Martins *et al.*, 2015).

Apresenta-se na Tabela 1 os estágios de seca (ou categorias) e seus impactos associados, as quais definem a intensidade de seca no mapa do Monitor e a caracterização das secas no Nordeste do Brasil. As áreas de secas são classificadas pela intensidade, variando de S1 (seca menos intensa) até S4 (a mais intensa). S0 indica que são áreas com condições de umidade anormalmente baixa e estão secando, podendo, possivelmente, virar áreas secas.

Tabela 1 – Classificação de severidade de seca

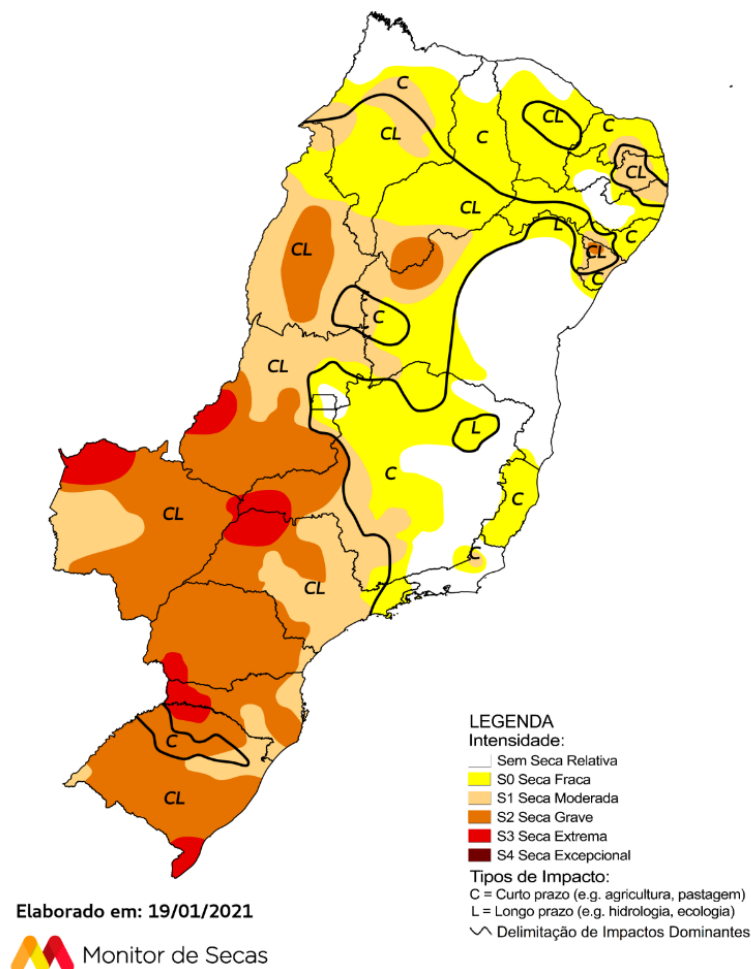
Categoria	Percentil (%)	Descrição	Impactos Possíveis
S0	30	Seca Fraca	Entrando em seca: secura de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas.
S1	20	Seca Moderada	Alguns danos às culturas, pastagens; rios, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas.
S2	10	Seca Grave	Provável perda de cultura ou pastagens; escassez de água comuns; restrições de água impostas.
S3	5	Seca Extrema	Grandes perdas de culturas ou pastagem; escassez de água generalizada ou restrições.
S4	2	Seca Excepcional	Perdas de cultura ou pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, rios e poços de água, gerando situações de emergência.

Fonte: *National Drought Mitigation Center*, adaptado por Monitor de secas (2021)

A seguir, os Mapas 2 e 3 representam o Monitor de Secas para os meses de dezembro de 2020 e junho de 2021, respectivamente. As letras C e L indicam como a seca e o déficit de umidade têm impactos sociais, ambientais ou econômicos ao longo do tempo. A letra C representa a seca de curto prazo, normalmente atuando por 4 meses ou menos (ex.:

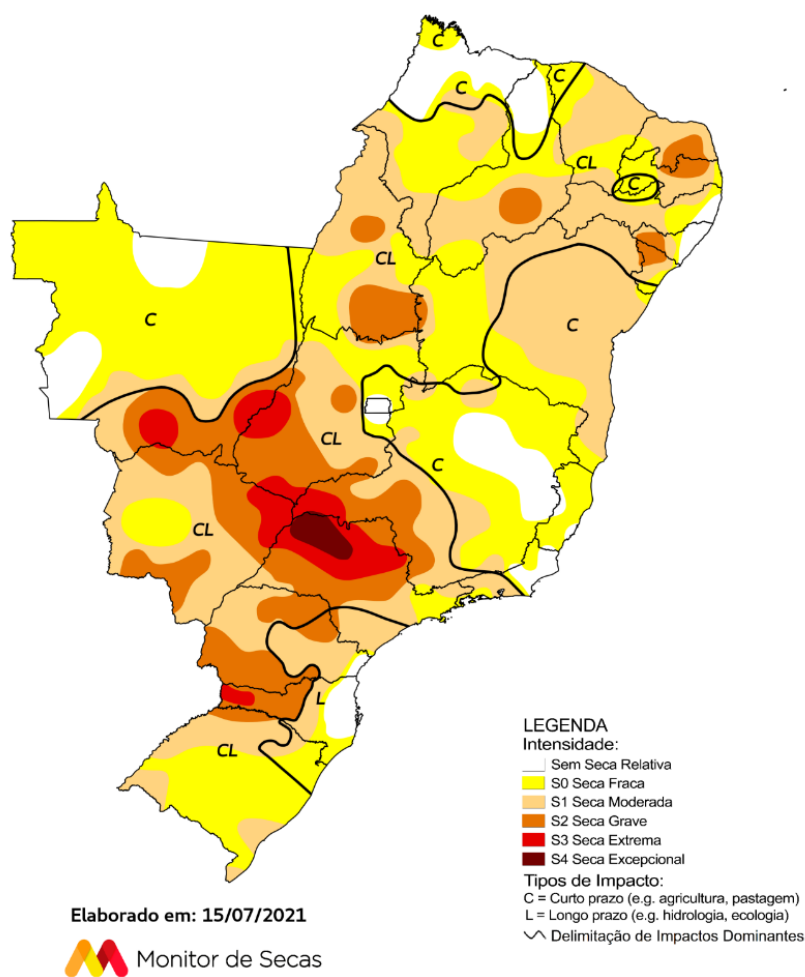
agricultura). A letra L indica uma seca de longo prazo, normalmente atuando por mais de 12 meses (ex.: hidrológico e ecológico).

Mapa 2 – Monitor de secas em dezembro de 2020

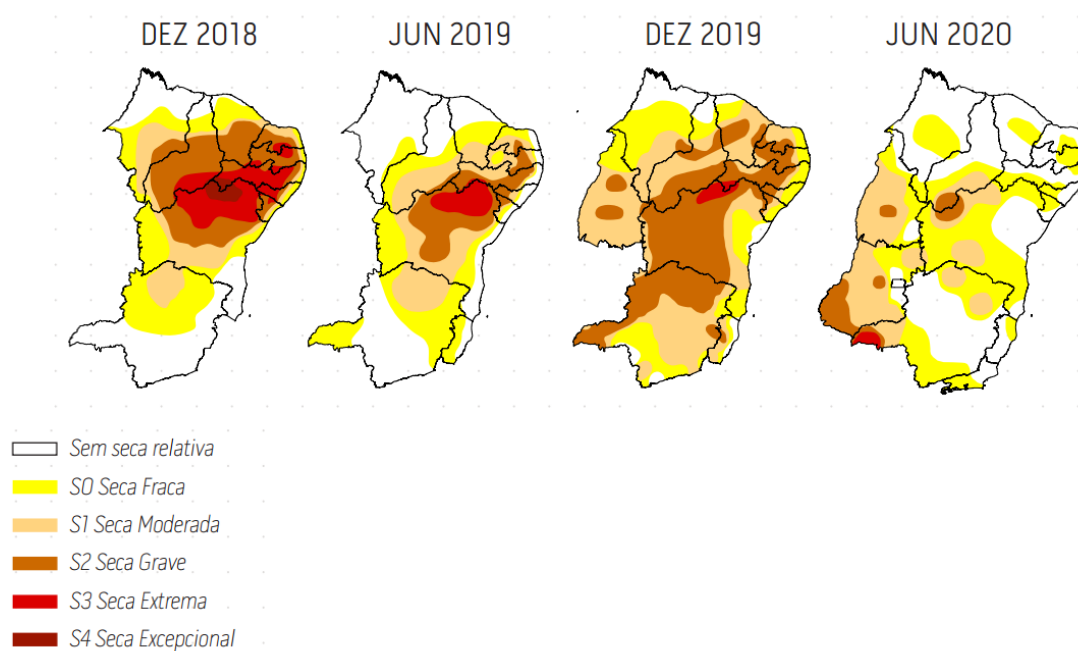


Normalmente, o mês de dezembro apresenta a situação de seca mais severa durante o ano, pois, climatologicamente, é o mês que antecede o início da estação chuvosa em boa parte da região Nordeste (ANA, 2020). Observa-se no Mapa 4 a evolução da seca entre dezembro de 2018 e junho de 2020. Comparando-se os mapas de dezembro de 2018 e junho de 2019, nota-se a extinção da área de seca excepcional (S4) e uma expressiva diminuição das áreas de seca grave (S2) e seca extrema (S3) ao longo desses seis meses. Há um aumento da área de seca grave (S2) no mapa de dezembro de 2019, que diminui significativamente seis meses depois, como pode-se ver no mapa de junho de 2020.

Mapa 3 – Monitor de secas em junho de 2021



Mapa 4 – Monitor de secas semestral de dezembro de 2018 a junho de 2020



Fonte: ANA (2020)

Percebe-se, também, por meio dos Mapas 2 a 4, a incorporação dos estados do Brasil no Monitor de Secas ao longo do tempo. A expansão do território do Monitor permite incluir mais dados e indicadores, de forma a melhorar a verificação da severidade da seca, o traçado dos mapas correspondentes e o conhecimento sobre os impactos decorrentes do fenômeno (Monitor de Secas, 2021).

2.3 CRISE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

O uso irracional dos recursos naturais põe em risco, em grande parte do planeta, o bem essencial à vida humana, a água. Muitas regiões do mundo vivem hoje em regime de crise hídrica, independentemente de mudanças climáticas globais, e isso tende a se agravar com o crescimento populacional e as atividades produtivas (Cirilo, 2015). Rebouças (1997) já argumentava que a crise da água seria a marca do século XXI, tanto em nível nacional quanto mundial, e, nas suas primeiras décadas, já se veem grandes impactos causados pela escassez hídrica, assunto bastante discutido atualmente por gestores e profissionais da área.

Em 1997, após cerca de dez anos tramitando, o parlamento brasileiro aprovou a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433/1997 (chamada de Lei das Águas), que estabeleceu como um de seus objetivos a prevenção aos eventos hidrológicos críticos de origem natural. Em 2000, com a missão de coordenar a implementação da PNRH, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), instituída pela Lei nº 9.984/2000. Esta ação inspirou o melhoramento do ambiente institucional e técnico indispensável para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos aplicáveis à região semiárida (Teixeira; Machado, 2015). Com o novo marco legal do saneamento básico, aprovado pela Lei nº 14.026/2020, a ANA, agora nomeada de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, também passou a regular os serviços de saneamento básico, que inclui o abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais (ANA, 2021).

A ANA tem feito diversas publicações de estudos que visam contribuir para a segurança hídrica e para o saneamento básico no Brasil. Dentre estes estudos, pode-se citar o ATLAS Nordeste – Abastecimento Urbano de Água (ANA, 2006), cujo objetivo principal foi o de proporcionar a articulação de ações públicas voltadas para a ampliação da oferta de água à população urbana do Semiárido Brasileiro, de forma a identificar os déficits e propor soluções técnicas com garantia hídrica para atender as demandas por água para abastecimento humano. O estudo dos mananciais existentes permitiu verificar que o rio São Francisco é a maior fonte hídrica para abastecimento da população contemplada pelo ATLAS. Outro estudo

foi o relatório síntese publicado pela (ANA, 2017), no qual foram analisados os problemas e as potencialidades dos grandes sistemas de reservatórios do Semiárido, englobando um total de 204 reservatórios (que totaliza mais de 80% da capacidade de armazenamento existente no Semiárido), gerando subsídios e ferramentas para o planejamento racional do uso múltiplo dos recursos hídricos armazenados no curto, médio e longo prazo.

No Brasil, o relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos é a referência para o acompanhamento sistemático e anual das estatísticas e indicadores relacionados à água no País, de modo a estruturar e disponibilizar estas informações à sociedade. A sua primeira versão foi publicada em 2009 e, desde então, a publicação vem sendo apresentada por meio de dois documentos: o Relatório de Conjuntura, que traz um balanço da situação e da gestão dos recursos hídricos com periodicidade quadrienal, e os Relatórios de Conjuntura – Informes, cujas atualizações são de periodicidade anual. O último ciclo deste relatório, que terminou em 2020, ressaltou o tema das crises hídricas sofridas pelo país em diferentes regiões e as ações de gestão elaboradas para minimizar os seus impactos nos diversos usos da água. Segundo este relatório da ANA (2020), em termos de quantidade utilizada, atualmente, a irrigação é o principal uso de água no país, a qual permite uma suplementação do regime de chuvas, de forma a viabilizar o cultivo em regiões com escassez mais acentuada de água, como o Semiárido; e o segundo maior uso da água, no Brasil, é o abastecimento urbano, sendo a maior parte das sedes urbanas atendidas predominantemente por mananciais superficiais.

De acordo com o conceito da Organização das Nações Unidas (ONU), a segurança hídrica existe quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para atender às necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias (ANA, 2020). Em vista disso, o conceito é desdobrado em quatro dimensões que balizam o planejamento do uso e da oferta de água:

- Dimensões humana e econômica: existência de infraestrutura que assegure acesso à água para o abastecimento humano e o desenvolvimento das atividades econômicas;
- Dimensão resiliência: capacidade do território em lidar com os eventos hidrológicos extremos;
- Dimensão ecossistêmica: adequada qualidade da água para o meio ambiente e demais usos.

É possível reverter um quadro de insegurança hídrica através de ações de planejamento, controle do uso da água, monitoramento, operação e manutenção de sistemas hídricos etc. (ANA, 2020). Em um cenário de crise, as ações voltadas para promover a segurança hídrica podem ser agrupadas em:

- Medidas emergenciais: caracterizadas pela solução imediata do problema, sendo muitas vezes custosas e pouco efetivas a longo prazo;
- Medidas médio a longo prazo: baseadas em um planejamento de modo a prevenir e/ou mitigar os impactos futuros oriundos de novas crises.

2.4 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

As barragens e reservatórios artificiais são intervenções hídricas com o objetivo de armazenar água para diversos usos, como abastecimento público, irrigação, geração de energia elétrica, aquicultura, acumulação de resíduos industriais, acumulação de rejeitos oriundos da mineração, entre outros. Na região Nordeste do Brasil, por sua vez, cerca de 90% do total de reservatórios é destinado para o abastecimento humano (ANA, 2020).

Nas últimas duas décadas, como destacam Mello e Piasentim (2011) e Oliveira (2018), aumentou-se o investimento em infraestrutura viária e hídrica, e, conseqüentemente, veem-se diversas barragens e reservatórios espalhados pelas regiões do Brasil. Dessa maneira, a distribuição de água para as famílias tornou-se mais acessível em relação a décadas anteriores. Apesar de o acesso a água continuar sendo uma grande problemática para a maior parte das pessoas durante as secas, os reservatórios são imprescindíveis para suprir as necessidades da população nestes períodos escassos. Entretanto, a cada ano aumenta-se a severidade da seca, devido à baixa precipitação. A sequência de um longo período de chuvas abaixo da média, ocorrida entre os anos de 2012 e 2016, no Nordeste do Brasil, resultou em níveis perigosamente baixos nos reservatórios (De Nys; Engle; Magalhães, 2016).

De Nys, Engle e Magalhães (2016) ainda argumentam que a seca se associa com o fato de os recursos hídricos serem insuficientes quando se trata em atender as demandas diante desses episódios prolongados de baixa precipitação ou vazões reduzidas. Geralmente isso acontece quando há um desequilíbrio entre a evolução da demanda e a oferta estabelecida devido a problemas de planejamento e/ou operação da infraestrutura do sistema. Diante disso, a gestão da seca deve integrar: o planejamento geral dos sistemas de água com ações que garantam o equilíbrio entre a disponibilidade e a demanda em horizontes futuros; regras de

operação dos sistemas hídricos em condições normais e regras para cenários de seca; estratégias de gestão e cenários operacionais para mitigar impactos em condições de seca.

Operar um reservatório significa determinar a quantidade de água a ser liberada ou armazenada para seus devidos fins e usos. Armazena-se parte das vazões afluentes de forma a atender as demandas hídricas nesse local, diminuindo a variabilidade temporal da oferta de água em um determinado exutório. Para dimensionar e verificar os volumes necessários do reservatório utilizam-se modelos de simulação, os quais representam o comportamento do sistema hídrico associando-os a um determinado risco de operação. As simulações de reservatórios baseiam-se no modelo do balanço de massa hídrica, que reproduz o desempenho hidrológico do reservatório para determinadas regras operacionais (Andreolli, 2013).

Um ponto em comum entre as diferentes regras operacionais existentes é o uso do volume do reservatório ou a vazão defluente que se pretende atingir em determinados períodos como variável de decisão. Essas regras visam otimizar determinados objetivos atendendo as restrições e demandas do sistema. Uma das regras de operação mais utilizadas compreende a divisão do volume útil do reservatório em diferentes zonas, cuja distribuição pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal. Essas regras, chamadas de curvas-guia, indicam os níveis d'água ideais do reservatório visando os objetivos estabelecidos (De Nys; Engle; Magalhães, 2016).

Representam-se essas curvas através de seguimentos de retas (parametrização), cujas coordenadas dos extremos são as variáveis de decisão. Quando definidas, as curvas-guia são utilizadas por um modelo de simulação na operação de um reservatório ou de um sistema de reservatórios. Finalmente, acopla-se um modelo de otimização ao modelo de simulação para produzir regras de operação otimizadas (Bravo *et al.*, 2008).

Portanto, através das simulações, é possível avaliar o risco de não atendimento das novas demandas diante das condições de contorno impostas pelo reservatório. Para utilizar este método, necessita-se de informações hidrológicas tais como a série de vazões afluentes, que são fundamentais, mas muitas vezes não estão disponíveis ou são muito curtas, implicando na necessidade de gerar uma série sintética de vazões. Entre os métodos viáveis para obter-se as séries de vazões estão: proporção entre áreas, que estima as vazões que chegam ao exutório onde se encontra a barragem a partir da proporção entre as áreas das sub-bacias de um posto fluviométrico com dados e da barragem; e modelos hidrológicos chuva-vazão (Andreolli, 2013).

Como destacam Mansouri *et al.* (2023), em regiões áridas e semiáridas, onde o fluxo de entrada dos reservatórios enfrenta grandes flutuações, tem-se uma maior relevância do

emprego de modelos de operação de sistemas hídricos, visando maximizar o percentual de atendimento das demandas. Nesse contexto, há diversos estudos que buscam a otimização da operação de reservatórios em regiões semiáridas como Gomes, Maia e Medeiros (2021), Oliveira (2021) e Yassin *et al.* (2019). Para os autores, os modelos foram capazes de capturar a variabilidade em relação ao armazenamento e escoamento dos reservatórios, do mesmo modo que contribuíram com a reflexão sobre segurança hídrica em regiões de escassez.

Além desses, outros estudos utilizaram uma abordagem combinada de modelos de otimização-simulação para derivar regras de operação de reservatórios em regiões áridas e semiáridas. Farias, Santos e Celeste (2011), utilizaram um modelo baseado em Otimização Estocástica Implícita (ISO) e Rede Neural Artificial (RNA) para derivar regras operacionais diárias em um sistema de reservatórios, Coremas-Mãe d'água, localizado no semiárido da Paraíba. Van Oel, Krol e Hoekstra (2012) realizaram um estudo no reservatório de Orós na bacia do rio Jaguaribe, Semiárido do estado do Ceará, com o intuito de identificar a influência de estratégias de operação de reservatórios na distribuição do uso da água em caso de diminuição de chuvas.

Goodarzi, Ziaei e Shokri (2013) determinaram regras de operação mensal para o reservatório de Doroudzan, inserido na região semiárida do Irã, através de técnicas de otimização. Outro estudo realizado na região semiárida do Irã foi o de Bolouri-Yazdeli *et al.* (2014), o qual comparou-se o desempenho de várias regras operacionais aplicadas ao reservatório de Karoom-IV, cujo objetivo é suprir a demanda total a jusante desse sistema.

A técnica de parametrização, simulação e otimização também pode ser utilizada para definir a operação ótima de um reservatório com múltiplos usos, onde múltiplas curvas-guia podem ser parametrizadas para definir a operação do reservatório. Na China, vem sendo desenvolvidos diversos estudos sobre curvas-guia de usos múltiplos do reservatório, bem como curvas-guia para transferência de água entre reservatórios doadores e receptores (Peng *et al.*, 2015; Ming *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019; Xu; Chen, 2020). Vale destacar que o modelo de operação de reservatórios utilizado neste trabalho é o *Campus Agreste Reservoir Operation Model* (CAROS).

2.5 MODELO CAMPUS AGRESTE RESERVOIR OPERATION MODEL (CAROS)

O CAROS é um modelo de operação de reservatórios desenvolvido no Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Este modelo tem sido aplicado em diversas bacias hidrográficas, de modo a definir regras de operação para

os sistemas hídricos em estudo, avaliar as vazões regularizadas e o volume defluente de cada uma e caracterizar os cenários de suas disponibilidades hídricas.

A operação de reservatórios na gestão de recursos hídricos é um tema que merece destaque. Considerando essa problemática, Ramos (2017) buscou contribuir com a gestão de sistemas hídricos do Agreste pernambucano, por meio do desenvolvimento de um modelo que possibilitasse apoiar a decisão dos gestores públicos, através de uma operação racional de reservatórios. Nessa mesma linha de pesquisa, Fortunato (2019) buscou otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos com vistas a robustecer o enfrentamento dos períodos de estiagem recorrentes, mediante estratégias de operação para reservatórios de usos múltiplos em bacias hidrográficas do Agreste pernambucano. Vale mencionar que foram empregadas técnicas de simulação e otimização, visando melhorar a quantificação das retiradas de água desses sistemas hídricos, com o intuito de maximizar o aproveitamento das águas armazenadas.

Já no que se refere ao Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, Aguiar (2019) avaliou a oferta hídrica que o projeto poderá assegurar aos principais reservatórios que irão abastecer as cidades contempladas. As simulações da disponibilidade hídrica nas bacias receptoras foram realizadas com o modelo de operação do sistema de reservatórios para otimizar o aproveitamento das fontes locais. Estes trabalhos foram os percussores no uso do modelo de operação de reservatórios, atualmente denominado CAROS.

Gomes (2019) simulou o comportamento de reservatórios através de uma versão anterior do modelo de operação de reservatórios abordado neste item para avaliação da eficiência do controle de cheias e modelagem hidrológica. Cirilo *et al.* (2021a) utilizaram um modelo de operação na gestão de sistemas de abastecimento de água a partir de transferências interbacias (IBT). A pesquisa mostrou que apenas a operação mais eficiente dos reservatórios da região Agreste de Pernambuco não será suficiente para suprir as demandas e a água dos projetos IBT é fundamental. Por sua vez, Souza *et al.* (2023) aplicaram o mesmo modelo para propor uma gestão integrada de sistemas múltiplos de abastecimento de água.

O balanço hídrico deste modelo, conforme Fortunato (2019), Gomes (2019) e Cirilo *et al.* (2021), é realizado através de adaptação do método clássico de Puls, que computa todas as variáveis envolvidas no balanço hídrico com um intervalo de tempo diário, conforme indicado na Equação 1. A cada novo dia, foi realizado um balanço hídrico diário separado em seis intervalos de 4 horas de duração. Essa discretização sub-diária se deve ao baixo tempo de concentração das bacias estudadas, inferior a um dia. Particularmente o cálculo das vazões

vertidas fica, assim, prejudicado com $\Delta t = 1$ dia. Não havendo dados de entrada de vazão e precipitação sub-diários, o modelo CAROS realiza interpolações lineares nos volumes afluente, precipitado, evaporado e captado a cada 4 horas.

$$V_{t+\Delta t} = V_t + I_t - V_{demand} - E_t \cdot A_t + P_t \cdot A_t - VS_t \quad (1)$$

Onde:

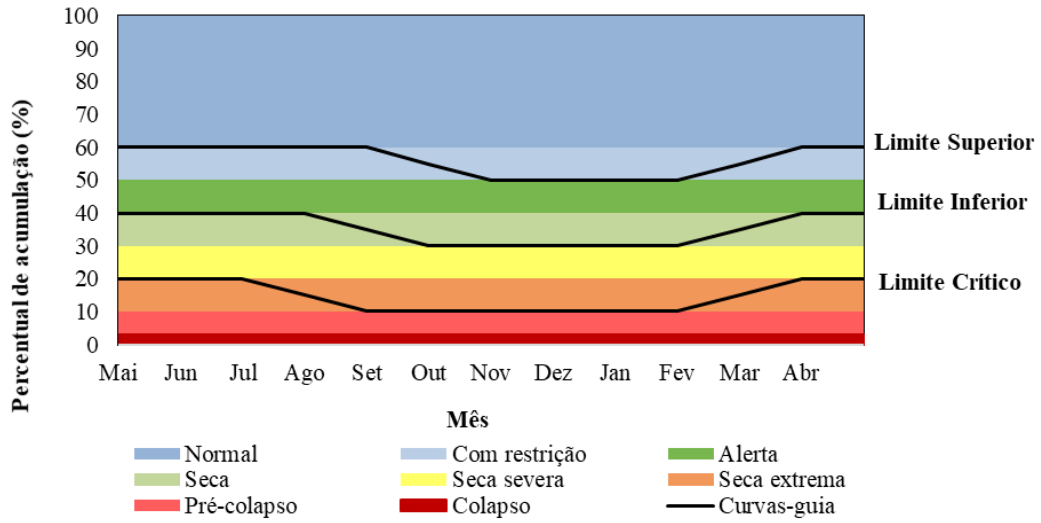
- $V_{t+\Delta t}$ = Volume no tempo $t+1$;
- V_t = Volume no início do intervalo de tempo t ;
- I_t = Volume afluente ao reservatório no intervalo de tempo t ;
- V_{demand} = Volume retirado de água;
- E_t = Lâmina de evaporação no intervalo de tempo t ;
- A_t = Área da superfície da água do reservatório no início do intervalo de tempo t ;
- P_t = Precipitação na superfície do reservatório;
- VS_t = Volume vertido no tempo t .

A definição da regra de operação dos reservatórios é o primeiro passo da alocação da água estocada. Esta tem por objetivo a definição da vazão a ser liberada para se atender a uma demanda, em função do estado atual do reservatório ou do estado do sistema de reservatórios, caso ele seja operado de forma integrada a outros. Para que um modelo possa ser utilizado na análise de operação dos reservatórios, é necessário que se disponha de relações cota-área-volume atualizadas, séries históricas ou cenários de vazão afluente, precipitação e evaporação. Os elementos técnicos caracterizam a infraestrutura do sistema através da disponibilização de dados sobre os dispositivos de descarga e a capacidade dos sistemas de captação de água.

O modelo CAROS adota o conceito de zoneamento da capacidade do reservatório para estabelecer as regras de operação. Três curvas (Figura 1) indicam os limites superior, inferior e inferior extremo de armazenamento de água. A política operacional é então definida no status de armazenamento no início de cada período.

Para cada reservatório, as variáveis de decisão a otimizar são: 1) vazão máxima a ser retirada; 2) percentual dos volumes máximo e mínimo que definem as regras de operação; 3) níveis de redução aplicados sobre a vazão máxima. A série histórica das afluições naturais pode ser obtida no banco de dados hidrológicos da ANA. As taxas de evaporação podem ser calculadas por meio de formulações clássicas ou obtidas a partir dos dados de estações climatológicas como os da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 1 – Faixas de variação da criticidade do reservatório



Fonte: Cirilo *et al.* (2021)

As regras de operação apresentadas na Figura 1 estabelecem, para cada curva-guia, dois níveis de restrição separados por um período de transição. Em cada caso, a maior ou menor duração depende do nível de acúmulo de água no reservatório: quanto mais crítico, maior o tempo com restrição severa. As regras consideram o ano hidrológico, começando no início da estação das chuvas. Três conjuntos de informações são necessários para construir um modelo de otimização simples para cada reservatório i (Equação 2):

$$\text{Max } Z_i = QW_{med}^i \quad (2)$$

Onde Z_i é a função a ser otimizada e QW_{med}^i é a média das vazões captáveis, calculadas em todos os dias da simulação/otimização. Sujeito aos fatores a seguir (Equações 3 a 9):

$$Q_{trans} \leq QW_t^i \leq 0 \quad (3)$$

$$S_i^t \geq S_{i,min} \quad (4)$$

$$V_{col} \leq V_{3,min} \leq V_{3,max} \leq V_{2,min} \leq V_{2,max} \leq V_{1,min} \leq V_{1,max} \leq 1 \quad (5)$$

$$\frac{V_{k,max}}{V_{k,min}} \geq \delta, \quad k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$f_{i,k} \geq 0, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (7)$$

$$f_{i,k} \leq 1, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (8)$$

$$ND_{i,k} \leq ND_{i,k,max} \quad k = 1, 2 \quad (9)$$

Onde:

- Q_{trans} = Capacidade de extração e transporte de água a partir do reservatório;
- QW_t^i = Vazão retirada a qualquer momento;
- S_i^t = Volume de armazenamento no reservatório no tempo t ;
- $S_{i,min}$ = Volume mínimo do reservatório i , a partir do qual cessa a captação (sistema em colapso);
- V_{col} = Fração da capacidade do reservatório que define a condição de colapso;
- $V_{k,min}$ = Volume mínimo para a curva de operação k ;
- $V_{k,max}$ = Volume máximo para a curva de operação k ;
- δ = Razão mínima entre os volumes máximo e mínimo das curvas k ;
- $f_{i,k}$ = Fatores de redução aplicados à vazão máxima que pode ser extraída do reservatório i , dependendo da porcentagem de acumulação;
- $ND_{i,1}$ e $ND_{i,2}$ representam, respectivamente, o número de dias em que os reservatórios podem operar em regime de seca extrema e pré-colapso, conforme os limites estabelecidos na Equação 9.

As restrições impõem limites à descarga retirada a qualquer momento QW_t^i , respeitando a capacidade de transporte Q_{trans} (Equação 3). A Equação 4 limita a operação do sistema a um armazenamento mínimo: abaixo deste nível, o reservatório é considerado em colapso. A Equação 5 limita as porcentagens que representam as três curvas-guias (V_{col} refere-se à porcentagem do volume que indica o colapso). A Equação 6 impõe uma distância entre as curvas considerando uma razão δ . As Equações 7 e 8 impõem limites para os redutores de vazão retirada relacionados a cada curva-guia, incluindo $f_{i,7}$, que corresponde à situação em que o reservatório está na zona 4, mas acima de V_{col} . Esses redutores são aplicados à descarga máxima retirada $Q_{i,max}$, que é uma das variáveis de decisão. As outras variáveis de decisão são $V_{k,max}$, $V_{k,min}$, $f_{i,k}$, resultando em 14 variáveis de decisão a otimizar em cada reservatório.

No modelo CAROS, o usuário deve fornecer como dados de entrada:

- Áreas de drenagem até a barragem e ao posto fluviométrico de referência, se for o caso;
- Capacidade do reservatório;
- Cotas do vertedouro e do coroamento;
- Extensão do vertedouro;

- Coeficiente de descarga do vertedouro C . A vazão vertida é calculada pela Equação 10, que pode ser modificada caso haja informação para tal. H é a carga hidráulica sobre o vertedouro em qualquer tempo;

$$Q = C \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (10)$$

- Série com 12 dados mensais da evaporação de referência no local do reservatório, obtida das normais climatológicas;
- Coeficiente de correção da evaporação;
- Série de precipitações na região do reservatório, no mesmo período das vazões afluentes;
- Série de vazões afluentes ao reservatório ou a um posto fluviométrico considerado. No segundo caso as vazões serão consideradas proporcionais à relação entre a área de drenagem no local da barragem e a do posto. No primeiro caso essa relação deve ser considerada igual a 1;
- Fração indicadora do colapso do reservatório em relação à sua capacidade (por exemplo, 0,03 indicando que se for atingido o mínimo de 3% da capacidade o manancial se encontra em colapso);
- Quociente mínimo de afastamento entre as curvas-guia δ ;
- Vazão máxima possível de transporte/captação a partir do reservatório a qualquer tempo;
- Duração, em meses, do patamar de extração de vazões mais altas nas curvas-guia 1, 2 e 3. É razoável estimar tempos menores na medida em que o volume de água no reservatório é menor;
- Mês que indica o fim do período seco (por exemplo, 3 para março);
- Número de meses para transição entre o patamar de vazões mais altas e mais baixas em cada curva-guia (*default* = 1);
- Fração de volume de água presente no reservatório no primeiro dia da simulação (por exemplo, 0,3);
- Coeficientes de ajuste de equação polinomial de 4ª ordem para as curvas volume-área e volume-cota do reservatório (para esta última, admite-se a separação em duas equações para melhor ajuste, considerando um volume de referência como limite de separação entre ambas; se o ajuste com uma única equação proporcionar ajuste satisfatório, repedir os coeficientes para as duas faixas). Recomenda-se extrapolar os

dados obtidos considerando ponto(s) além dos limites tabelados, mantendo a tendência das curvas, para evitar que a deflexão da equação ajustada ocorra na faixa de operação do reservatório, pois isso provoca erros no processo iterativo.

A otimização é realizada com um dos algoritmos presentes no suplemento Solver do Microsoft Excel para modelos não-lineares: algoritmo GRG ou *Evolutionary*.

2.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem é utilizada para representar algum objeto ou sistema numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, sendo uma ferramenta importante para analisar as características e investigar as mudanças nos sistemas ambientais. Através da modelagem hidrológica é possível simular diferentes cenários, compreender e representar o funcionamento das bacias hidrográficas. Para isso, utilizam-se os modelos hidrológicos, que são essenciais para prever e quantificar os fenômenos físicos que ocorrem na natureza, diante da impossibilidade de quantificação direta de tais fenômenos. Logo, trata-se de instrumentos essenciais para preencher lacunas de informações necessárias no planejamento e gestão de recursos hídricos (Grossi, 2003; Marinho Filho *et al.*, 2012; Almeida; Serra, 2017).

Normalmente, as séries pluviométricas são mais longas do que as fluviométricas. Além disso, as séries de vazões deixaram de ser homogêneas ou estacionárias na medida em que as bacias foram sendo modificadas pela construção de obras hidráulicas e alterações no uso do solo. Diante desse cenário, surgiram os modelos hidrológicos, para obtenção de séries mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos (Tucci, 2005). Desde então, os modelos hidrológicos têm sido utilizados para simular as séries históricas de vazão a partir da precipitação ocorrida ou prevista e da evaporação, com crescente demanda em aplicações nas bacias hidrográficas, cuja rede de monitoramento fluviométrico é incipiente ou até mesmo inexistente (Saraiva; Fernandes; Naghettini, 2011; Virões, 2018).

Nesse contexto, a modelagem se torna uma ferramenta importante e eficiente para a gestão dos recursos hídricos, auxiliando no monitoramento e gestão das águas das bacias hidrográficas. As análises dos resultados obtidos pelos modelos são fundamentais para conhecerem-se os processos hidrológicos pertencentes aos cursos d'água e para preservar este recurso, visando a manutenção da qualidade de vida das populações (Silva; Rosa, 2017).

A representação precisa do processo chuva-escoamento é o principal objetivo, e ao mesmo tempo um desafio, para os hidrólogos. Sendo assim, têm sido desenvolvidos diversos modelos hidrológicos, variando em complexidade, resolução espacial, representação de

processos e outras características. Dois tipos de modelos são bastante utilizados na maioria das aplicações: modelos conceituais concentrados e modelos de base física (Nasonova; Gusev; Kovalev, 2011). Podem-se citar alguns exemplos de modelos hidrológicos conceituais que são bem conhecidos na comunidade hidrológica e têm sido aplicados em todo o mundo: SWB (Schaake *et al.*, 1996), GR4J (Perrin; Michel; Andréassian, 2003) e HBV (Bergström; Lindström, 2015). O *software* HEC-HMS (Feldman, 2000) pode ser descrito como uma suíte de modelagem, que agrega muitos procedimentos no aplicativo, à escolha do usuário que pode escolher aqueles que melhor se adequam à modelagem em questão. TOPMODEL (Beven *et al.*, 1984; Beven *et al.*, 1995; Zanon, 2011), SWAT (Arnold *et al.*, 1998) e SHE (Abbott *et al.*, 1986a, 1986b) são alguns modelos hidrológicos de base física conhecidos.

Vários pesquisadores afirmam que é preferível simular o fluxo de água através do uso de modelos conceituais, especialmente em áreas com escassez de dados, devido ao fato de serem menos exigentes em termos de dados de entrada e serem mais fáceis de operar (Andréassian, 2001; Hansen *et al.*, 2007; Perrin; Michel; De Vos; Rientjes; Gupta, 2010; Li *et al.*, 2013). Nos modelos conceituais, representam-se os processos hidrológicos por relações matemáticas simplificadas. Em geral, eles consistem em um sistema de reservatórios interligados que representam os elementos físicos dentro da bacia hidrográfica, que são recarregados e esgotados por processos componentes apropriados do ciclo hidrológico (Cirilo *et al.*, 2020).

Em regiões semiáridas a modelagem hidrológica é fundamental para contabilizar os recursos hídricos e equalizar sua oferta e sua demanda, dada a frequente ocorrência de escassez hídrica. Ainda é desafiador encontrar bons resultados de simulações chuva-vazão para essas regiões, devido à ausência de dados. Por outro lado, a maioria dos modelos hidrológicos tem representado bem o fluxo em regiões úmidas (Huang *et al.*, 2016). Em meio a essa dificuldade, diversos estudos utilizam modelos desenvolvidos para aplicação geral, sem especificidades propriamente ditas para regiões semiáridas.

Wang, Zhang e Baddoo (2016) utilizaram o modelo hidrológico HEC-HMS na bacia do Hailiutu, semiárido noroeste da China, calibrado de 1978 a 1992. O modelo subestimou sistematicamente os fluxos no período de inverno e primavera, bem como alguns fluxos no período de verão. Kan *et al.* (2017) realizaram um estudo em nove bacias hidrográficas chinesas, nas quais três se localizavam em regiões úmidas, três, em regiões semiáridas, e três, em regiões áridas. Os resultados confirmaram a complexidade das bacias mais secas para a previsão de cheias. O modelo GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) foi aplicado a centenas de bacias hidrográficas em várias regiões do mundo, incluindo algumas semiáridas,

apresentando um bom desempenho na simulação de vazões diárias em grande parte destas (Perrin; Michel; Andréassian, 2003; Perrin; Michel, 2004; Oudin *et al.*, 2008; Andréassian; Traore *et al.*, 2014; Karki *et al.*, 2023).

Com o intuito de auxiliar os gestores e tomadores de decisão a adotar estratégias de manejo do solo e dos recursos hídricos, Fniguire *et al.* (2022) utilizaram o modelo CEQUEAU e Moumen *et al.* (2020) utilizaram o modelo SWAT para simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em clima semiárido no Marrocos. Com essa mesma finalidade, Bouguerra e Mansour (2023) e Allali *et al.* (2022) aplicaram, respectivamente, os modelos GR4J e HEC-HMS nas bacias de Beni Bahdel e Wadi Ouahrane, região semiárida da Argélia, noroeste da África. Para os autores a modelagem hidrológica foi adequada em termos de precisão para simulação de chuva-vazão.

No semiárido brasileiro, pode-se citar o trabalho de Feliz e Paz (2016), que aplicaram o modelo MGB-IPH no semiárido do estado da Paraíba, na bacia do Piancó, o qual apresentou dificuldades em representar as vazões mais baixas. Outra experiência foi realizada por Cabral, Sakuragi e Silveira (2017), que calibraram satisfatoriamente o modelo hidrológico HEC-HMS em uma região entre a Zona da Mata e o Agreste, na bacia do rio São Miguel, no estado de Alagoas. Segundo os autores, o modelo subestimou a magnitude do pico de fluxo e do volume, mas representou adequadamente o tempo de pico de fluxo. Virões e Cirilo (2019) aplicaram o modelo concentrado MODHAC a diversas bacias do Semiárido brasileiro, registrando dificuldades na representação das vazões baixas.

Nesse mesmo âmbito, Rocha, Pereira e Lima Neto (2021) utilizaram uma modelagem hidrológico-hidráulica para avaliar o processo de transformação chuva-vazão em uma bacia complexa no estado do Ceará, que apresentou desvio médio aproximado de 10% em relação à vazão produzida em estudos anteriores utilizando o modelo MODHAC. Já no estado da Paraíba, Silva e Vieira (2017), utilizaram um modelo chuva-vazão para complementar uma série de vazões e realizar uma simulação integrada de reservatórios, com um cenário futuro onde foram adotados valores das demandas projetadas para o ano de 2032. Os autores mostraram que, no cenário futuro, os reservatórios em poucos momentos chegaram ao seu volume máximo, não conseguindo atender ao requerimento operacional do volume meta.

Uma vez que este trabalho visa estimar vazões em bacias desprovidas de dados fluviométricos, o modelo a ser utilizado deve ser o mais simples possível no que se refere aos dados de entrada, já que à medida que a complexidade do modelo aumenta, maior a quantidade de dados necessária. Nesse contexto, há a necessidade de se trabalhar com

modelos hidrológicos parcimoniosos, ou seja, com reduzido número de parâmetros a serem estimados, para prever vazões em bacias não monitoradas.

Tais modelos exigem calibrações com séries pluviométricas e fluviométricas de longa duração e de boa qualidade. Diante da impossibilidade de se obter essas séries de dados para estabelecer os parâmetros de calibração, busca-se a regionalização dos parâmetros do modelo hidrológico obtidos em uma bacia, cujo estudo está estabelecido, para simular a disponibilidade em outra bacia similar, onde não existam séries hidrológicas disponíveis. Utiliza-se o termo regionalização para designar a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área de comportamento hidrológico similar (Virões, 2018).

2.7 MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)

O CAWM (*Campus Agreste Watershed Model*) é um modelo hidrológico chuva-vazão concentrado, desenvolvido no Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da UFPE. Este modelo foi apresentado por Cirilo *et al.* (2020) e está em constante aprimoramento. Com seu número reduzido de parâmetros para calibrar e a agregação das características físicas da bacia hidrográfica nas simulações, o CAWM tem sido aplicado e aprimorado em diversos estudos recentes como Gomes (2019), com intuito de avaliar o comportamento de reservatórios da bacia do rio Capibaribe no controle de cheias e por Ferraz (2019), de modo similar, na bacia do rio Sirinhaém. As autoras salientam que as cidades das bacias estudadas não estão suficientemente protegidas das inundações e consideram a possibilidade de aumento da capacidade dos reservatórios como uma solução viável. Perante o exposto, verifica-se que o modelo tem um significativo potencial para utilização em bacias hidrográficas de clima semelhante, ainda mais em bacias onde os dados hidrológicos são insuficientes ou ausentes.

Outros trabalhos mostram a aplicabilidade desse modelo no que se refere ao planejamento dos recursos hídricos e desenvolvimento de regiões semiáridas, é o caso de Vasconcelos (2020), Feitoza (2020) e Cirilo *et al.* (2020), que trazem uma gama de resultados satisfatórios obtidos a partir da aplicação do CAWM a bacias com características diversas, consolidando e aprimorando a implementação do modelo. Já Gomes, Verçosa e Cirilo (2021) avaliaram a resposta hidrológica da bacia do rio Capibaribe a eventos extremos e seu impacto na cidade de Recife, Pernambuco.

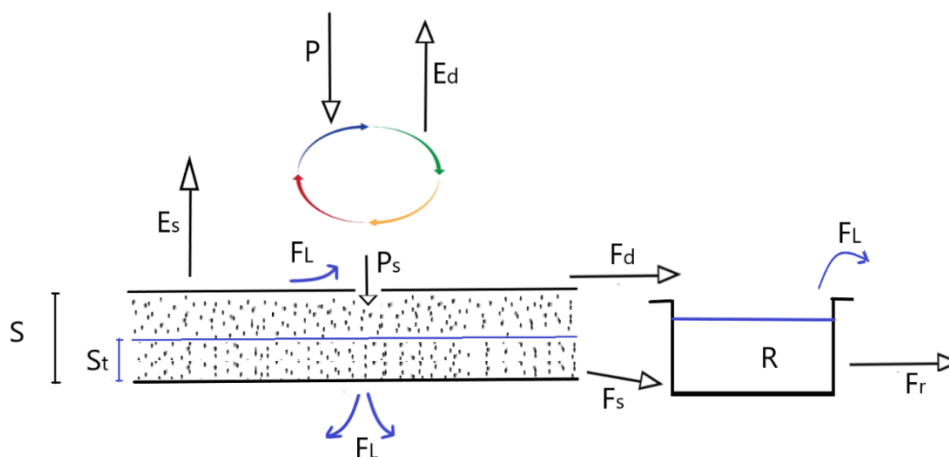
Por fim, Nobre (2023), aplicou o CAWM para simulação do aporte de vazões em reservatórios do estado do Ceará. Para a autora, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, confirmando a aplicabilidade desse modelo para bacias de regiões áridas e semiáridas com poucos dados disponíveis.

Atualmente, o CAWM possui dois módulos com diferentes formulações matemáticas: a primeira se destina a simular o escoamento sobre solos rasos com baixa capacidade de acumulação, típicos de embasamento cristalino, regiões como a maior parte do semiárido brasileiro. A outra formulação se destina a aplicações para regiões úmidas com diferenças relacionadas à presença de recarga de aquífero e escoamento subterrâneo, contemplando os processos de fluxo nas bacias hidrográficas de rios perenes, em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem.

Na versão para regiões semiáridas, o modelo simplifica o processo físico de movimento de água no solo, priorizando a quantificação de escoamento direto. Sua principal característica é a simplicidade e o número reduzido de parâmetros para calibrar, estes sempre que possível de significado físico. Essa abordagem permite ao CAWM adaptar-se a bacias com dados escassos e menor tempo de processamento para geração de resultados. Além disso, sabe-se que muitas localidades de regiões semiáridas são desprovidas de infraestruturas que permitam a captação satisfatória de dados hidráulico-hidrológicos, o que acentua a aplicação de um modelo que detém as características do CAWM.

O modelo requer dois conjuntos de entrada: um representando as características hidrológicas e o outro, os dados associados às características físicas da bacia. Os dados hidrológicos consistem em séries temporais de precipitação, evapotranspiração e dados de vazão usados para calibrar o modelo. As informações físicas podem ser adquiridas a partir de mapeamento de solo, imagens aéreas e de satélite, modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de elevação (MDE), como o SRTM e o PE3D. O CAWM para regiões semiáridas consiste em dois reservatórios, um de recepção (R) e outro subterrâneo (S), localizado nas calhas dos rios. Seu esquema está representado na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do modelo CAWM para regiões semiáridas



Fonte: Cirilo *et al.* (2020)

O balanço precipitação-evapotranspiração potencial é feito, em primeira instância, comparando-se seus valores. Se houver precipitação suficiente, a evapotranspiração potencial (E) é descontada de imediato. O excesso é a precipitação efetiva (P_n), como mostrado na Equação 11. Caso contrário, toda a precipitação é consumida como evapotranspiração direta (E_d) e a parcela não atendida (E_n) pode ser total ou parcialmente extraída do reservatório do solo se houver água suficiente para isso (Equação 12). O balanço é descrito pelas seguintes expressões:

$$\text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \quad (11)$$

$$\text{Se } P \leq E, \text{ então } E_d = P \text{ e } E_n = E - E_d \quad (12)$$

A precipitação efetiva é dividida entre três componentes. A primeira se refere à recarga do solo (P_s), baseada no conceito apresentado por Edjatno e Michel (1989), conforme a Equação 13.

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t}{S}\right)^2 \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)\right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (13)$$

Onde S_t é a quantidade de água acumulada no solo a cada tempo e S é a sua capacidade máxima de retenção.

Outra componente é a evapotranspiração suplementar (E_s), limitada à evapotranspiração não atendida (E_n), desde que haja água suficiente. Sua magnitude depende de um valor atribuído a um parâmetro α , como indicado na Equação 14. Este parâmetro foi introduzido devido às incertezas presentes na estimativa da evapotranspiração, inclusive pelo fato de que as condições de solo, cobertura vegetal e clima são variáveis no território da bacia.

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot S_t}{S}}\right) \cdot E_n \quad (14)$$

A componente que resta, desde que positiva, representa o escoamento direto na superfície do terreno (F_d), segundo a Equação 15.

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (15)$$

Do reservatório de água no solo ocorre o fluxo subsuperficial (F_s) que percola até aumentar o volume de água na calha fluvial (R), como mostra a Equação 16.

$$F_s = K_s \cdot S_t \quad (16)$$

Onde K_s é um parâmetro a ser calibrado e representa a permeabilidade do solo. F_s indica a percolação no sentido da calha fluvial.

O volume de água retido na calha fluvial é incrementado pelos fluxos F_s e F_d . O escoamento na calha fluvial (F_r) é admitido como uma função não linear do volume armazenado R , sendo b uma constante determinada a seguir e K um parâmetro que depende de características da bacia (Equação 17).

$$F_r = K \cdot R^b \quad (17)$$

Considerando que o volume do reservatório da calha fluvial V_{sup} pode ser representado pela capacidade do conjunto de rios que compõem a bacia com extensão total L_T e área de seção equivalente A_e , tem-se a Equação 18.

$$V_{sup} = A_e \cdot L_T \quad (18)$$

Como nos modelos hidrológicos os volumes são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica (em km²), a acumulação R é dada pela Equação 19.

$$R = \frac{V_{sup}}{C \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{C \cdot A_b} \quad (19)$$

Sendo a constante $C = 1000$ utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas.

Considerando o escoamento na calha equacionado pela Fórmula de Manning com as simplificações de seção retangular de largura equivalente B_e , trecho de extensão L_T e declividade S_0 , assim como raio hidráulico aproximadamente igual à lâmina escoada (y), tem-se a Equação 20.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot R_h^{2/3} \cdot S_0^{1/2} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} \cdot S_0^{1/2} \quad (20)$$

Onde $A_e = B_e \cdot y$ e $R_h \approx y$.

Considerando $V = A_e \cdot L_T$ o volume de água acumulado na calha fluvial em um trecho de extensão L_T e área equivalente A_e , tem-se, substituindo-se na Equação 20, a Equação 21.

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n \cdot L_T^{5/3} \cdot B_e^{2/3}} \cdot V^{5/3} = K^* \cdot V^{5/3} \quad (21)$$

Por similaridade, a Equação 21 sugere $b = 5/3$ quando se compara com a Equação 17. A relação entre a vazão (m^3/s) e a lâmina escoada (mm) é dada pela Equação 22.

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (22)$$

Onde Δt é o passo de tempo, em segundos.

Combinando a Equação 22 com o último termo da Equação 20, tem-se a Equação 23.

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} \cdot S_0^{1/2} \quad (23)$$

Explicitando a área equivalente da Equação 19 e substituindo na Equação 23, chega-se às Equações 24 e 25.

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \quad (24)$$

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \cdot \frac{S_0^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (25)$$

Como $F_r = K \cdot R^b$, sendo $b = 5/3$, tem-se a Equação 26.

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (26)$$

A relação não linear $F_r = K \cdot R^b$, indicada na Equação 17, é utilizada no CAWM para representar o escoamento na calha fluvial, diferente da concepção usual de reservatório linear. A dedução desenvolvida sinaliza para expressão que pode permitir o cálculo do parâmetro K e considerar $b = 5/3$, embora sejam muitas as explicações realizadas no desenvolvimento matemático. O valor $b = 5/3$ tem se ajustado bem à simulação para dezenas de bacias hidrográficas. Os resultados de cálculo do parâmetro K têm sido avaliados para diferentes bacias, com simulações em passo de tempo diário.

As perdas de água no sistema podem ser devidas a diversas causas: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essa perda é extraída do escoamento superficial direto. Utiliza-se, para o cálculo das perdas, a expressão da Equação 27.

$$F_L = K_L \cdot R^p \quad (27)$$

O expoente p tem sido testado nas diversas simulações desenvolvidas variando de 0,8 a 1,2. Na maior parte dos casos o valor 1 mostra-se mais adequado, sendo o “*default*” do modelo. O parâmetro de perdas, K_L , pode ser calculado a partir da primeira simulação (Equação 28), considerando os valores do balanço global gerado. Esse é um dos aprimoramentos introduzidos nesta versão do CAWM, já que, na versão anterior, K_L era um parâmetro a calibrar.

$$K_L = \frac{V_{Prec} - V_{Qobs} - V_{Evap}}{V_{Prec} - V_{Evap}} \quad (28)$$

O parâmetro S é estimado como sendo igual a capacidade de retenção de água no solo, calculada a partir do *Curve Number* (CN) da bacia, como mostrado na Equação 29.

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (29)$$

Para o cálculo do CN foram utilizados mapeamentos de solos da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e imagens de satélite classificadas do uso e ocupação do solo nas bacias (Santos *et al.*, 2018).

Assim, com o aprimoramento do CAWM referente ao parâmetro K_L , o modelo na versão para regiões semiáridas compreende somente um parâmetro a calibrar, o K_s , que representa a permeabilidade do solo. O coeficiente de escoamento superficial K , conforme pode-se observar na Equação 26, depende de algumas estimativas e de variáveis cujos valores são obtidos do MDT. Portanto, seus valores são condicionados à resolução espacial do modelo do terreno. Buscando-se eliminar essa dependência, foram calculados valores de K para cerca de 250 bacias hidrográficas com áreas variando de 100 a 800 mil km² e ajustadas equações K versus área, obtendo-se as seguintes relações (Equações 30 a 32):

$$K = 0,3745 \cdot A^{-0,489} + 0,0146 \quad \text{se } A \leq 1500 \text{ km}^2 \quad (30)$$

$$K = 8,93523 \cdot A^{-0,73033} \quad \text{se } 1500 \leq A \leq 60000 \text{ km}^2 \quad (31)$$

$$K = 0,0028 \quad \text{se } A \geq 60000 \text{ km}^2 \quad (32)$$

Como o passo de tempo do modelo CAWM na versão aqui discutida é de um dia, é preciso considerar o efeito do *lagtime* para as bacias onde tal efeito ocorra. O modelo calcula, por escolha do usuário, as precipitações médias temporalmente redistribuídas por meio das

ordenadas do *Clark's synthetic Time-Area Histogram* – TAH, a partir do “lagtime” definido pelo usuário. Outra opção, apresentada por Cirilo *et al.* (2020), consiste na geração de isócronas em que as precipitações são redistribuídas antes do cálculo das médias que alimentam o modelo. O *default* do CAWM é a utilização das ordenadas do TAH definidas por Clark.

A versão para regiões úmidas procura contemplar os processos de fluxo nas bacias hidrográficas de rios perenes, em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem. Para isso, a principal mudança em relação à versão anterior é a inserção de um reservatório subterrâneo que passa a ser alimentado quando o reservatório do solo atinge a saturação (Figura 3). Daí em diante, inicia-se um fluxo de percolação profunda P_g para alimentar o reservatório de águas subterrâneas, acrescentando a lâmina acumulada G . Dele sai o fluxo F_g que alimenta o rio, complementando as parcelas F_d e F_s (Equação 33).

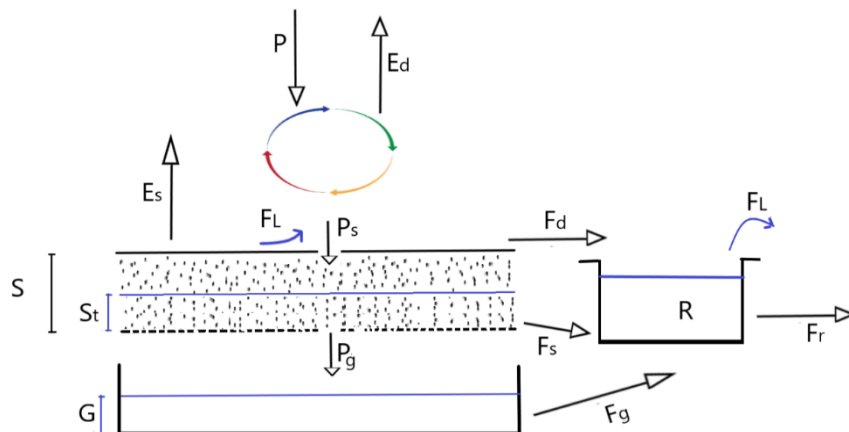
$$F_g = K_g \cdot G \quad (33)$$

Sendo K_g um parâmetro de transferência de água no solo a calibrar, similar a K_s . Para permitir a alimentação do reservatório subterrâneo, a fórmula de cálculo da percolação P_s foi modificada para a Equação 34:

$$P_s = P_n \cdot \left(1 - \frac{S_t}{\beta \cdot S}\right) \quad (34)$$

Sempre que S_t atinge o valor de S ($S_t \leq \beta \cdot S$), o excedente passa a compor a percolação profunda P_g . O modelo CAWM para regiões, portanto, tem dois parâmetros a calibrar.

Figura 3 – Representação esquemática do modelo CAWM para regiões úmidas



Fonte: Ferraz (2019)

O *software* do CAWM utilizado neste estudo foi desenvolvido por programação em macros do MS Excel, para simulação contínua com passo de tempo diário. A função objetivo busca a maximização do indicador de performance NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency coeficiente, ao mesmo tempo que minimiza o somatório dos erros absolutos entre vazão calculada e vazão observada (Equação 35).

$$F = \frac{n = NSE \cdot 10^6}{\sum abs(Q_{obs} - Q_{calc})} \quad (35)$$

Para analisar o desempenho das simulações no CAWM, são utilizados os seguintes indicadores de critério de ajuste: *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*, também em suas versões raiz (NSE_{raiz}) e logarítmica (NSE_{log}), percentual de tendência bias ($Pbias$), raiz do erro quadrático médio (RMSE), razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações (RSR), indicados nas Equações 36 a 41.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs,med})^2} \quad (36)$$

$$NSE_{raiz} = 1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{calc}})^2}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs,med}})^2} \quad (37)$$

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{calc}))^2}{\sum (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{obs,med}))^2} \quad (38)$$

$$Pbias = \frac{\sum (Q_{calc} - Q_{obs}) \cdot 100}{\sum (Q_{obs})} \quad (39)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2} \quad (40)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}}{\sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{obs,med})^2}} \quad (41)$$

Onde Q_{obs} é a vazão observada, Q_{calc} é a vazão calculada pelo modelo e $Q_{obs,med}$ é a vazão média observada.

A maioria dos autores utiliza o *NSE* como um dos principais indicadores de desempenho na modelagem hidrológica, embora haja o entendimento de que não deva ser o único (Schaepli; Gupta, 2007; Cirilo *et al.*, 2020). Diversos autores como Pushpalatha *et al.* (2012) e Traore *et al.* (2014) usam essas e outras variações de *NSE* como indicadores de performance. Segundo Traore *et al.* (2014), valores mais altos de *NSE* indicam melhores ajustes para as vazões mais elevadas, NSE_{raiz} representa de forma mais adequada as vazões

intermediárias e NSE_{log} , as vazões baixas. Pushpalatha *et al.* (2012) concluíram que o indicador mais apropriado para toda a série é NSE_{raiz} . Concordando com essa afirmação, Patil e Stieglitz (2014) propuseram esse indicador como função objetivo (F_{obj}) a ser maximizada no processo de calibração dos parâmetros de modelos chuva-vazão.

2.8 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

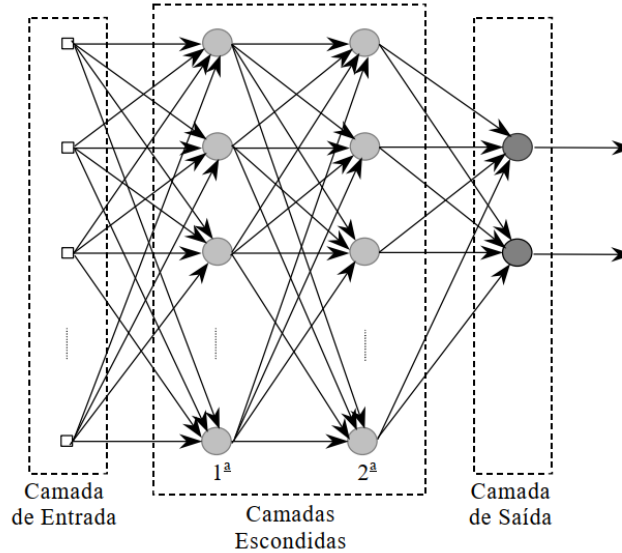
É comum que séries temporais de dados apresentem falhas, ou seja, períodos em que faltam dados ou estes não são válidos. Isso pode acontecer por diversas razões, como por exemplo, interrupções ocasionais de estações automáticas, mau funcionamento dos instrumentos de medição, reorganização das redes de estações, falta de energia, etc. Pode-se lidar com esse tipo de dificuldade simplesmente excluindo-se os períodos com dados faltantes ou ignorando-se o problema, se a quantidade de falhas não for muito grande. Porém, adotar esse tipo de abordagem desconsidera informações que podem ser relevantes para a análise dos dados (Ferreira; Tapajós; Conde, 2016).

Nesse contexto, têm sido desenvolvidas técnicas para tratar do problema de dados faltantes, dentre elas, citam-se as Redes Neurais Artificiais (RNA). De acordo com Tokar e Markus (2000), esse método consiste em um sistema de processamento de informações composto por vários elementos, chamados neurônios – pois são análogos aos neurônios biológicos – e interconexões (ou pesos) entre esses elementos, os quais imitam a força sináptica em um sistema nervoso biológico. Em uma arquitetura de RNA, os neurônios são organizados em camadas. Cada neurônio em uma camada opera em paralelismo lógico. A informação é transmitida de uma camada para a outra em operações seriais. Uma rede pode ter uma ou várias camadas. A estrutura básica de uma rede geralmente consiste em três camadas: a camada de entrada, onde os dados são introduzidos na rede; a(s) camada(s) ocultas(s), onde os dados são processados; e a camada de saída, onde são produzidos os resultados para determinadas entradas. Apresenta-se na Figura 4 a arquitetura típica da rede neural *Perceptron Feedforward Multicamadas* – MLP (*Multi Layer Perceptron*), o modelo de RNA mais utilizado atualmente, também adotado neste trabalho.

A característica mais distintiva de uma RNA é sua capacidade de aprender a partir de exemplos. A aprendizagem (ou treinamento) é definida como o autoajuste dos pesos da rede em resposta a mudanças no ambiente de informação. Quando um conjunto de entradas é apresentado, uma rede ajusta seus pesos para aproximar a saída alvo (saída observada ou medida) com base em um determinado algoritmo. O aprendizado em RNAs consiste em três

elementos: pesos entre os neurônios que definem a importância relativa das entradas; uma função de transferência que controla a geração da saída de um neurônio; e leis de aprendizado que descrevem como os ajustes dos pesos são feitos durante o treinamento.

Figura 4 – Arquitetura da rede neural Perceptron Multicamadas com duas camadas escondidas



Fonte: Santos (2001)

Durante o aprendizado, um neurônio recebe entradas da camada de entrada ou anterior, pondera cada entrada com um valor pré-atribuído e combina essas entradas ponderadas. A rede é comparada a um limite ou passada por uma função de transferência para determinar o nível de ativação. Se a ativação de um neurônio for forte o suficiente, ele produz uma saída que é enviada como entrada para outros neurônios na camada sucessiva (Tokar; Markus, 2000). O funcionamento do neurônio é definido pela Equação 42:

$$Y' = f \left(b_i + \sum W_{i,j} \cdot X_j \right) \quad (42)$$

Onde Y' é o valor da resposta do neurônio; f é a função de ativação, que depende da função somadora disposta dentro dos parênteses; b_i é a tendência ou bias do valor de saída; $W_{i,j}$ são os pesos sinápticos; X_j são os valores das entradas que são processadas no neurônio.

Brubacher, Oliveira e Guasselli (2020) argumentam que a utilização de séries temporais de dados contínuos e sem falhas é uma condição fundamental para a execução de uma análise consistente e confiável em estudos de previsão hídrica, modelagem, variações e tendências climáticas. Desse modo, como destacam Althoff, Rodrigues e Bazame (2021), as redes neurais tendem a receber maior atenção em diversos estudos hidrológicos devido à sua

capacidade de capturar relacionamentos não lineares e fornecer melhor precisão na previsão de resultados, com consideração mínima dos processos físicos envolvidos.

Diante disso, considerando a literatura referente ao tema, percebe-se que as RNAs tem sido frequentemente aplicadas na modelagem de processos hidrológicos, uma vez que produzem resultados satisfatórios – sem a remoção de períodos com dados ausentes – e importantes para a tomada de decisão, sendo utilizadas para: (i) simular o escoamento em um modelo chuva-vazão (Jimeno-Sáez *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2018; Mohseni; Muskula, 2023); (ii) estimar dados de precipitação ausentes (Canchala-Nastar *et al.*, 2019; Bellido-Jimenez; Gualda; García-Marín, 2021; Papailiou *et al.*, 2022); (iii) prever chuvas em diferentes regiões (Kashiwaoa *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2018; Elshaboury *et al.*, 2021); (iv) previsão de evapotranspiração em diversos climas (Granata; Nunno, 2021); (v) analisar o comportamento operacional de reservatórios (Dalcin *et al.*, 2021), entre outras aplicações.

2.9 GEOTECNOLOGIAS EM ESTUDOS E PROJETOS DE RECURSOS HÍDRICOS

Para garantir resultados de qualidade no ajuste e verificação de um modelo hidrológico, a quantidade e a representatividade das informações são fundamentais. A aplicabilidade desses modelos está diretamente relacionada com a qualidade dos dados envolvidos na simulação, o que torna as técnicas de geoprocessamento imprescindíveis para uma boa modelagem, já que estas auxiliam na aquisição, manuseio e integração de informações, bem como na geração de dados de saída (Lou, 2010; Mendes; Cirilo, 2013).

O geoprocessamento e o sensoriamento remoto vêm sendo amplamente utilizados por pesquisadores para estimar as respostas hidrológicas das bacias hidrográficas. Diante da necessidade de uma grande quantidade de dados de entrada para compor os modelos hidrológicos, as técnicas de geoprocessamento têm sido importantes aliadas, proporcionando a obtenção de um grande volume de dados georreferenciados de forma rápida e confiável, além de diminuir eventuais erros advindos de cálculos manuais (Pompermayer, 2013).

Nesse contexto, utiliza-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG), que é um conjunto de sistemas de *softwares* e *hardwares* capazes de produzir, armazenar, processar, analisar e representar inúmeras informações sobre o espaço geográfico. Como afirma Grossi (2003), com a utilização de SIG é possível desenvolver metodologias mais versáteis através da análise e manipulação de dados de forma automática, eliminando-se as ações subjetivas, apresentando os resultados sob a forma de mapas. No ambiente SIG, emprega-se a integração e análise de dados provindos de diversas fontes, como imagens digitais de satélites, mapas

digitais de usos e tipos de solo, topográficos, hidrologias, vegetação, floras e faunas, cartas climatológicas, censos socioeconômicos, entre outros (Liu, 2015).

Podem-se citar alguns SIG utilizados atualmente: o Spring, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE; o ArcGIS, criado pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*); o IDRISI (agora denominado de TerrSet), concebido pela *Clark University*. Por sua vez, o *software* utilizado neste trabalho foi o QGIS, que é um SIG de código aberto projetado pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGEO). Ele pode ser acessado em Windows, Linux, Android, Mac OSX e Unix. Existem diversas versões, as quais estão disponíveis publicamente para serem baixadas. As versões utilizadas neste trabalho foram a 2.18.9 e a 3.28.5 (QGIS, 2021).

Sabe-se que o relevo é um fator condicionante dos mecanismos geradores de escoamento, pois desempenha um papel determinante na movimentação da água numa superfície. Diante disso, o uso dos SIGs permite a obtenção de informações que alimentam as análises hidrológicas, como a área de contribuição de uma bacia, o comprimento da rede de rios, dados topográficos, declividades, entre outros, através da manipulação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) ou Modelos Digitais do Terreno (MDT) (Gama, 2011; Pompermayer, 2013; Felizardo, 2016). Os MDE e MDT representam a topografia do terreno, uma vez que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel (Valeriano, 2008). As bases de dados utilizadas neste trabalho foram o SRTM e o PE3D.

2.9.1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Diante da necessidade de obtenção de uma base altimétrica confiável, surgiu o projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), em fevereiro de 2000, estabelecido pela cooperação de diversas instituições, dentre estas a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Essa cooperação realizou uma missão a bordo da nave *Endeavour*, no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, com o intuito de produzir um banco de dados digitais para todo o planeta, necessários para elaboração de um MDE.

Os dados foram produzidos para a região do planeta posicionada entre os paralelos 56°S e 60°N, correspondente a 80% das áreas emersas da Terra. O método utilizado para coleta dos dados foi o conhecido como interferometria SAR, que é um sistema de imageamento radar *Shuttle* com espaçamento de 60 metros. Os dados são distribuídos em formato *raster* pelo EROS Data Center, controlado pelo *United States Geological Survey* (USGS). A base de dados disponibilizada publicamente é a SRTM-90, com pontos cotados a

cada 90 m entre si de todas as regiões imageadas, exceto os Estados Unidos, que possui resolução de 30 metros e não foi disponibilizada ao público (Cirilo *et al.*, 2014; USGS, 2021). Sobre o SRTM-90, o INPE realizou um trabalho de interpolação e preenchimento de falhas, dando origem ao TOPODATA, uma base de dados espaciais de todo o território brasileiro com pontos cotados a cada 30 metros (Valeriano, 2008).

2.9.2 Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D)

As enchentes que ocorreram entre 2010 e 2011 nos municípios da Mata Sul do estado de Pernambuco motivaram a criação do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), produto obtido através da varredura a laser de todo o terreno pernambucano, a qual consiste no levantamento da altura de pontos sobre uma superfície através da emissão de raios laser. É como construir uma maquete digital que representa as variações de altitude do terreno e do que se encontra sobre este, como edificações e árvores.

O mapeamento, que foi realizado pela Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), teve início em 2014, primeiramente para as regiões alagadas (bacias do rio Una, Mundaú e Sirinhaém) e posteriormente para o restante do estado. Os produtos obtidos foram os MDE e MDT, com escalas de 1:5000 (erro vertical inferior a 25 cm) e 1:1000 (erro vertical inferior a 10 cm), e as ortofotos com escalas 1:5000 (pixel da imagem de 50 cm) e 1:1000 (pixel da imagem de 12 cm) (Cirilo *et al.*, 2014; Pernambuco, 2016).

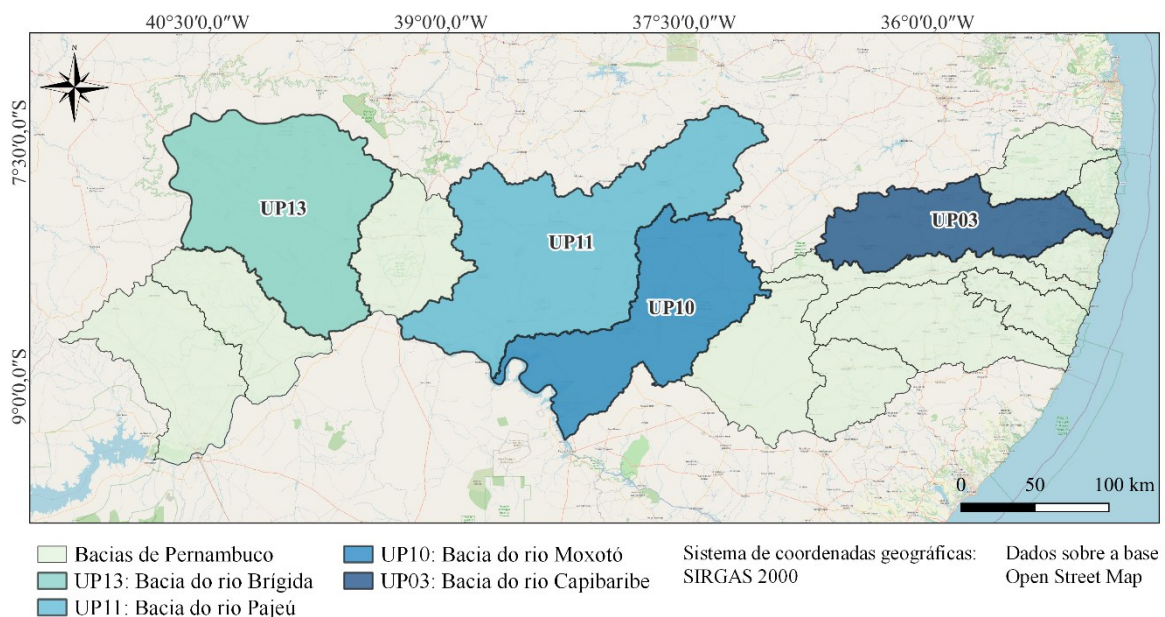
Diante do nível de detalhes e tamanho dos arquivos resultantes, tais produtos foram disponibilizados para o público em formato de quadrículas, para facilitar o acesso e a manipulação de dados das regiões de interesse. Além disso, recentemente, a APAC desenvolveu um produto que uniu estas quadrículas, de forma que o PE3D fosse apresentado em um só arquivo *raster*, possibilitando uma maior praticidade no manuseio e processamento de dados em análises macro. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos utilizando essa base de dados de alta resolução espacial (Amaral *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2020; Cirilo *et al.*, 2021b; Melo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área abordada neste estudo compreende predominantemente a região semiárida do estado de Pernambuco, localizado no Nordeste do Brasil. O Estado possui 9.058.155 habitantes, de acordo com o censo 2022, e uma área territorial de 98.067,88 km², que é dividida em cinco mesorregiões: Agreste, Mata, Metropolitana do Recife, São Francisco e Sertão (IBGE, 2023). O semiárido pernambucano, situado no Sertão, São Francisco e parte do Agreste, segundo a APAC (2013), representa cerca de 70% da área total do Estado e caracteriza-se por precipitações sazonais e por baixos índices pluviométricos anuais, com valores oscilando entre 500 e 800 mm. Durante o período seco, que dura em torno de oito meses, a região semiárida passa por um período de deficiência hídrica, que não é totalmente compensado pelas precipitações da quadra chuvosa, que acontece entre os meses de janeiro e abril (Souza *et al.*, 2015; Cerqueira; Santos; Aquino, 2019; Almeida *et al.*, 2020). A vegetação nativa dessa região, conforme a Embrapa (2017) é a Caatinga. Esta vegetação não apresenta características uniformes, onde sua variabilidade está associada a aspectos ambientais. As bacias hidrográficas tratadas neste trabalho (Mapa5) são as bacias dos rios Brígida (UP13), Pajeú (UP11), Moxotó (UP11) e Capibaribe (UP03).

Mapa 5 – Bacias dos rios Brígida, Pajeú, Moxotó e Capibaribe



Fonte: A Autora (2023)

3.1.1 Bacia do rio Capibaribe

A bacia do rio Capibaribe (UP03), que nasce na divisa dos municípios de Jataúba e Poção, está localizada na porção norte-oriental do estado de Pernambuco, entre 07° 41' 10" e 08° 19' 30" de latitude Sul, e 34° 51' 00" e 36° 41' 58" de longitude Oeste. Apresenta uma área de 7.454,88 km², que corresponde a 7,58% da área do estado, abrangendo 42 municípios pernambucanos (Lima *et al.*, 2018). O rio Capibaribe apresenta, segundo Silva e Silva (2014), um regime fluvial intermitente no seu alto e médio curso, apenas a partir do município de Limoeiro, em seu baixo curso, torna-se perene. Ao longo de sua bacia hidrográfica existem cinco barragens que atenuam as enchentes, são elas: Poço Fundo (Santa Cruz do Capibaribe), Jucazinho (Surubim), Carpina (a jusante de Limoeiro), Goitá (bacia do rio Goitá) e Tapacurá (bacia do rio Tapacurá).

3.1.2 Bacia do rio Pajeú

Como destacam Alves e Menezes (2021) e Almeida *et al.* (2020), a bacia do rio Pajeú (UP11) é a maior bacia hidrográfica do estado de Pernambuco, abrange 16,97% da área total do estado, com 16.685,63 km². Localizada no Sertão pernambucano entre 07° 16' 20" e 08° 56' 01" de latitude Sul e 36° 59' 00" e 38° 57' 45" de longitude Oeste, segundo a APAC (2013), a bacia compreende 27 municípios, dos quais 7 possuem suas sedes inseridas na bacia: Carnaíba; Carnaubeira da Penha; Floresta; Iguaraci; Itacuruba; Mirandiba; e São José do Belmonte. O rio Pajeú, de regime fluvial intermitente, nasce no município de Brejinho e possui extensão de aproximadamente 353 km, até desaguar no lago de Itaparica, no rio São Francisco. Vale salientar que, de acordo com Rocha e Barros Junior (2020), no Rio Pajeú existem 30 reservatórios com capacidade acima de 1 milhão de m³ de água, sendo a barragem de Serrinha II a que possui maior potencial de armazenamento com 311 milhões de m³.

3.1.3 Bacia do rio Brígida

A bacia do rio Brígida (UP13), que nasce no município de Exu, está localizada no oeste do Estado de Pernambuco entre as coordenadas 7° 18' 57" e 8° 36' 30" de latitude Sul e 39° 17' 16" e 40° 43' 30" de longitude Oeste, sendo parte da mesorregião do Sertão Pernambucano (Lopes *et al.*, 2010). De acordo com a APAC (2013), ocupa uma área de 13.495,73 km², área que abrange quinze municípios, onde 6 estão totalmente inseridos na bacia: Araripina; Bodocó; Granito; Ipubi; Ouricuri; e Trindade. Na bacia do rio Brígida, conforme Araújo (2019), há uma elevada intermitência da disponibilidade hídrica. Dessa

maneira, é necessário armazenar os recursos hídricos em reservatórios. Cada um dos reservatórios da bacia do rio Brígida apresenta capacidade de armazenamento superior a 1 milhão de m³.

3.1.4 Bacia do rio Moxotó

A bacia do Rio Moxotó (UP10) situa-se quase que totalmente na porção central do estado de Pernambuco e na parte oeste do estado de Alagoas, totalizando uma área de 9.752,71 km², da qual 8.778,05 km² estão em Pernambuco e 974,66 km² em Alagoas (APAC, 2013). A bacia se localiza entre 07° 52' 21" e 09° 19' 03" de latitude Sul e 36° 57' 49" e 38° 14' 41" de longitude Oeste e está inserida nas microrregiões do Sertão do Moxotó (predominantemente), do Vale do Ipanema e de Itaparica. Esse trecho abrange áreas de 12 municípios, dos quais Inajá e Sertânia (município onde nasce o rio Moxotó) estão totalmente inseridos na bacia.

3.1.5 Estações fluviométricas e barragens selecionadas para o estudo

As estações fluviométricas abordadas estão detalhadas na Tabela 2 e dispostas no Mapa 6. Considerou-se séries temporais com um histórico mínimo de 20 anos de dados, distribuídas ao longo do território pernambucano em regiões com variações nas características físicas e climáticas do estado.

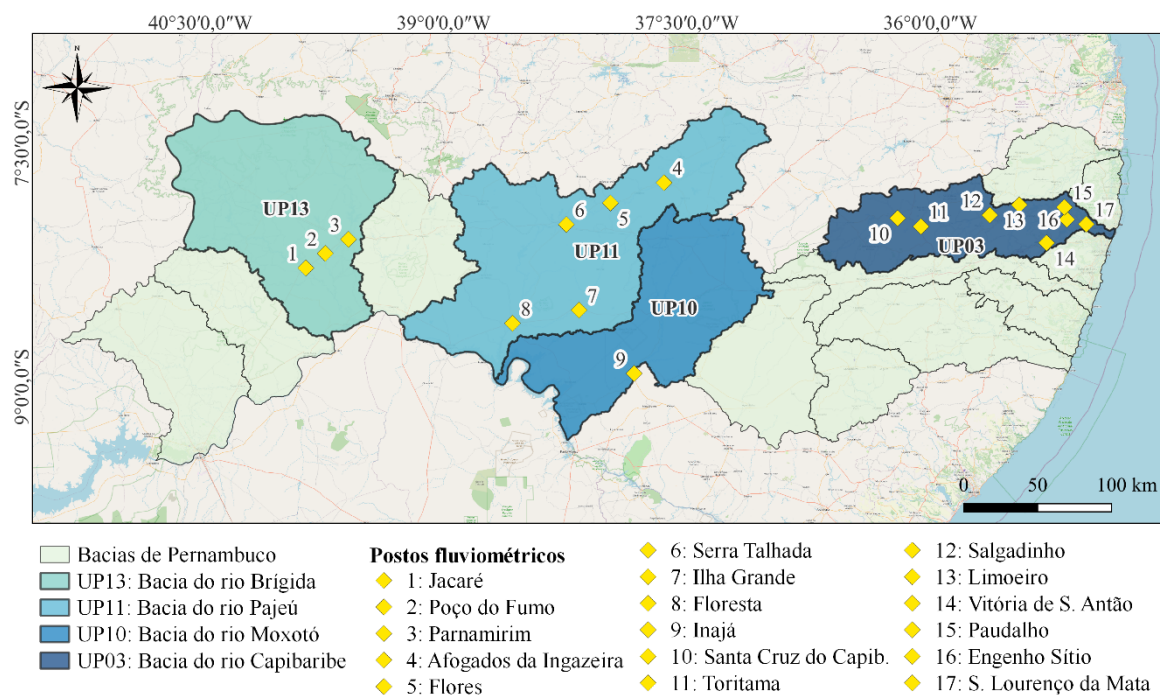
Tabela 2 – Estações fluviométricas abordadas no estudo

Bacia	Código	Nome da estação	Município	Latitude	Longitude
C*	39155000	1: Engenho Sítio	Paudalho	7°58'12,00"S	35°09'33,84"W
	39145000	2: Limoeiro	Limoeiro	7°52'44,04"S	35°27'06,84"W
	39150000	3: Paudalho	Paudalho	7°52'44,04"S	35°27'06,84"W
	39140000	4: Salgadinho	Salgadinho	7°56'34,08"S	35°38'03,12"W
	39100000	5: Santa Cruz do Capibaribe	Santa Cruz do Capibaribe	7°57'42,84"S	36°12'07,92"W
	39187800	6: São Lourenço da Mata	São Lourenço da Mata	7°59'54,96"S	35°02'21,12"W
	39130000	7: Toritama	Toritama	8°00'46,08"S	36°03'28,08"W
	39170000	8: Vitória de Santo Antão	Vitória de Santo Antão	8°06'48,96"S	35°17'02,04"W
P*	48820000	9: Afogados da Ingazeira	Afogados da Ingazeira	7°44'35,16"S	37°38'31,92"W
	48830000	10: Flores	Flores	7°52'05,88"S	37°58'22,08"W
	48860000	11: Floresta	Floresta	8°36'32,04"S	38°34'36,12"W
	48880000	12: Ilha Grande	Floresta	8°31'39,00"S	38°09'59,04"W
	48840000	13: Serra Talhada	Serra Talhada	8°00'02,16"S	38°14'40,92"W
B*	48460000	14: Jacaré	Parnamirim	8°16'05,16"S	39°51'02,88"W
	48400000	15: Parnamirim	Parnamirim	8°05'31,92"S	39°35'17,16"W
	48430000	16: Poço do Fumo	Parnamirim	8°10'42,96"S	39°43'51,96"W
M*	49160000	17: Inajá	Inajá	8°55'04,08"S	37°49'36,84"W

*C = Capibaribe; P = Pajeú; B = Brígida; M = Moxotó.

Fonte: A Autora (2022)

Mapa 6 – Estações fluviométricas selecionadas



Fonte: A Autora (2023)

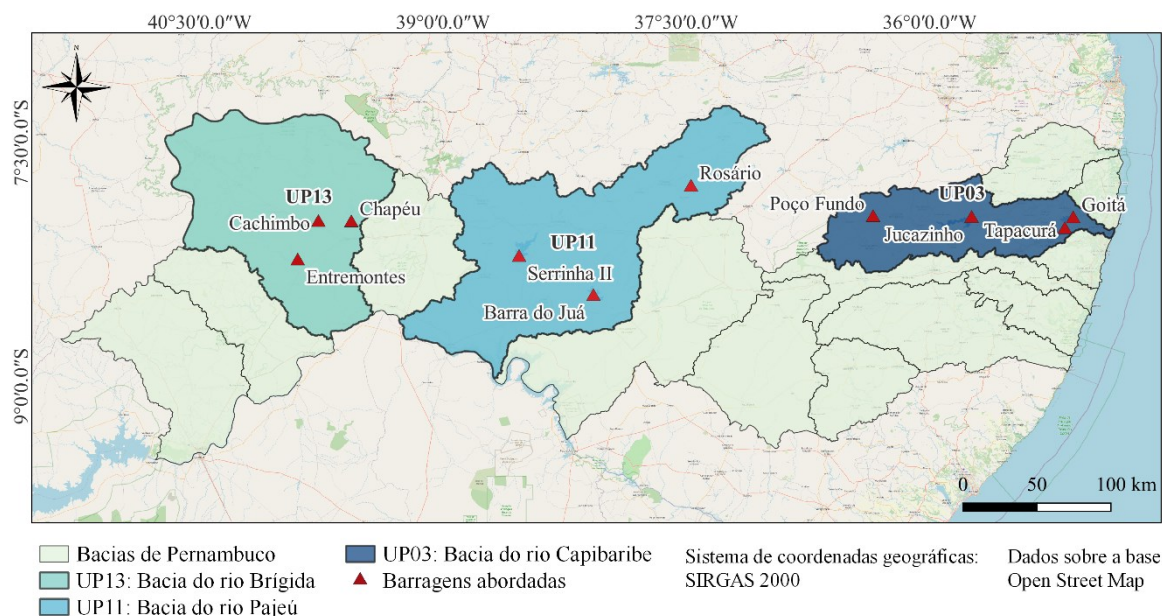
Os reservatórios incluídos neste estudo são apresentados e detalhados na Tabela 3 e no Mapa 7. Esta seleção foi feita considerando-se a relevância de tais reservatórios nestas bacias, com um volume superior a 30 milhões de m³, à exceção de Poço Fundo, como também a semelhança na caracterização física e climática das sub-bacias das estações propostas.

Tabela 3 – Barragens abordadas na operação de reservatórios

Bacia	Barragem	Município	Latitude	Longitude
Capibaribe	Goitá	Paudalho	7°58'09,62"S	35°06'56,17"W
	Jucazinho	Surubim	7°58'01,01"S	35°44'31,74"W
	Poço Fundo	Santa Cruz do Capibaribe	7°57'42,79"S	36°20'58,39"W
	Tapacurá	São Lourenço da Mata	8°02'10,14"S	35°10'03,19"W
Pajeú	Barra do Juá	Floresta	8°26'53,62"S	38°04'26,32"W
	Rosário	Iguaraci	7°46'29,79"S	37°28'20,14"W
	Serrinha II	Serra Talhada	8°12'27,29"S	38°31'56,11"W
Brígida	Cachimbo	Parnamirim	7°59'32,11"S	39°46'11,29"W
	Chapéu	Parnamirim	7°59'38,47"S	39°34'00,61"W
	Entremontes	Parnamirim	8°13'44,34"S	39°53'50,56"W

Fonte: A Autora (2022)

Mapa 7 – Barragens selecionadas para o estudo



Fonte: A Autora (2023)

Na Tabela 4 são descritos os usos principais e complementares de cada barragem, bem como o tipo de material das quais são construídas e o seu ano de construção.

Tabela 4 – Usos principais e complementares das barragens

Bacia	Barragem	Uso principal	Uso complementar	Material	Ano de construção
Capibaribe	Goitá	Regularização de vazão	-	Concreto convencional	1978
	Jucazinho	Abastecimento humano	Irrigação	Concreto compactado a rolo	1998
	Poço Fundo	Abastecimento humano	Irrigação	Terra	1987
	Tapacurá	Abastecimento humano	Defesa contra inundações	Concreto ciclópico	1973
Pajeú	Barra do Juá	Irrigação	-	Terra	1982
	Rosário	Abastecimento humano	Irrigação	Terra	1985
	Serrinha II	Regularização de vazão	Irrigação	Terra	1996
Brígida	Cachimbo	Combate às secas	Irrigação	Terra	1991
	Chapéu	Abastecimento humano	-	Terra	1986
	Entremontes	Irrigação	-	Terra	1982

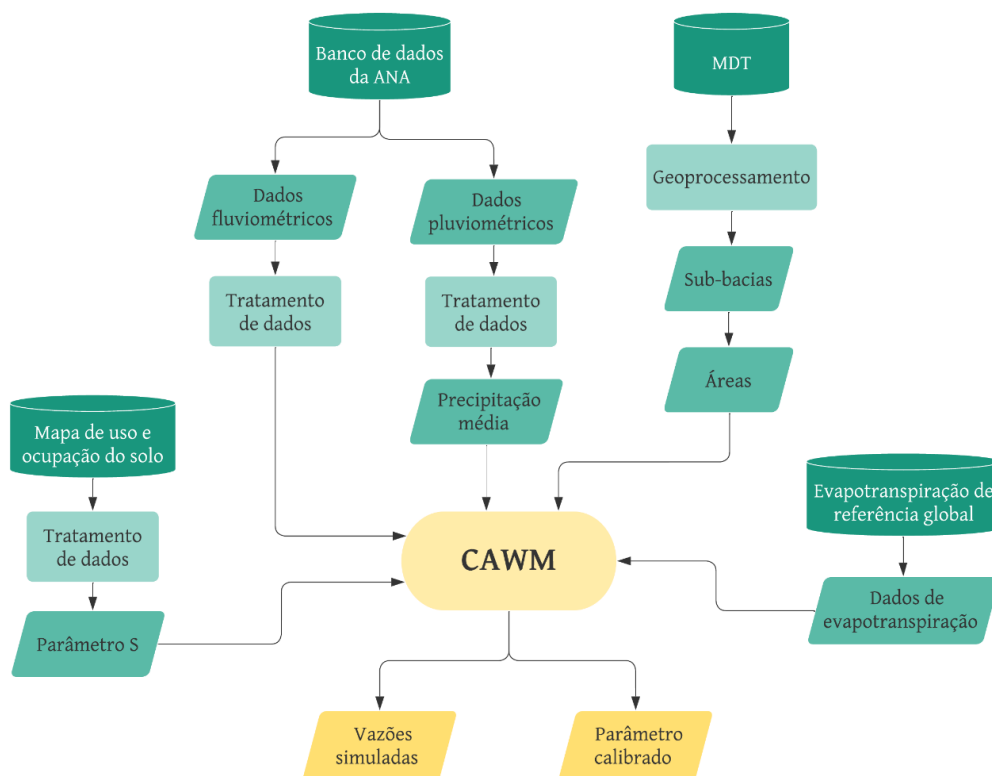
Fonte: A Autora (2022), adaptado de SNISB (2022)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu em avaliar o desempenho da versão aprimorada do modelo CAWM a partir de aplicações em diversas sub-bacias presentes predominantemente no Semiárido pernambucano. Agregado a isso, utilizou-se o método das Redes Neurais Artificiais para preenchimento e expansão das séries temporais na bacia do rio Capibaribe, com vista a verificar a implicação dos dados consistidos nos resultados da modelagem hidrológica. Como aplicação prática, determinou-se a vazão regularizada de diversas barragens utilizando-se o modelo CAROS com as séries fluviométricas simuladas no CAWM e as vazões obtidas por proporção de áreas a partir de uma estação próxima, ou seja, vazões de um posto multiplicadas por um fator de proporção definido como a relação entre as áreas das sub-bacias da barragem e do posto. Em casos de desatualização ou inexistência dos dados de cota-área-volume disponibilizadas pela APAC, empregou-se o Modelo Digital de Elevação do PE3D para atualizar tais dados.

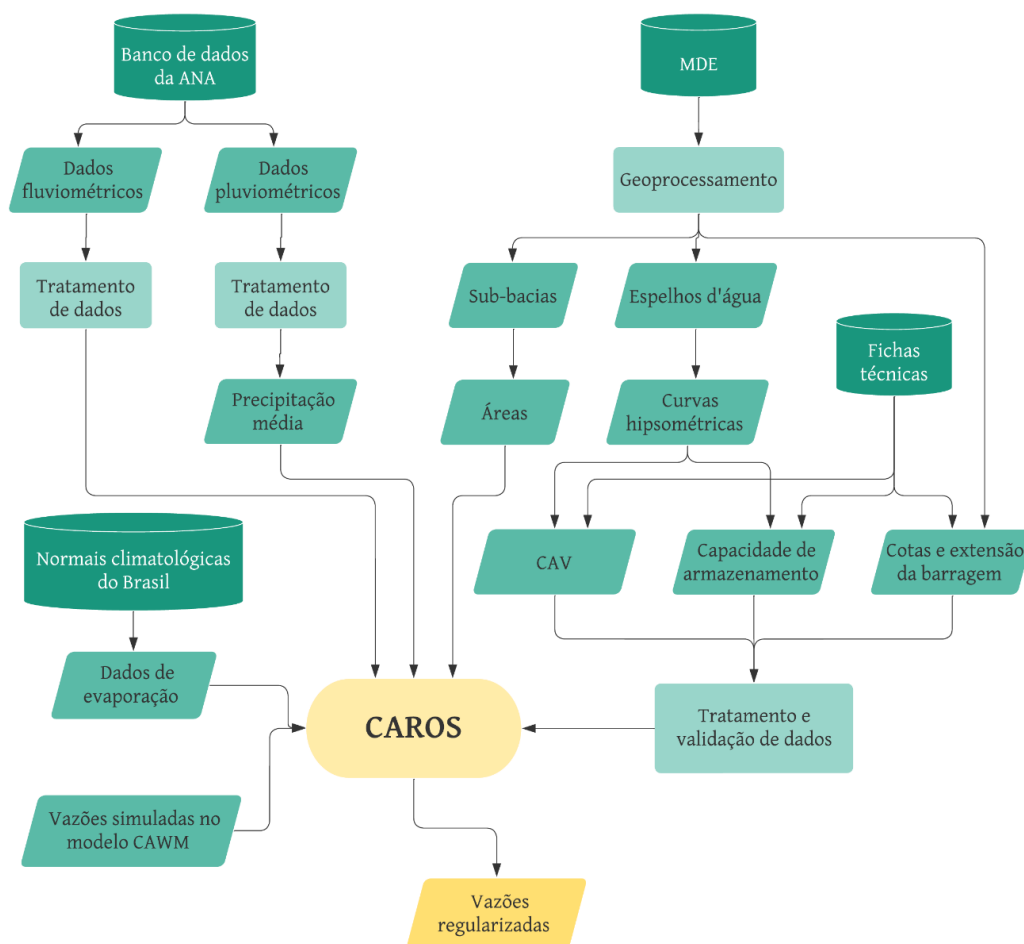
A seguir, apresentam-se os fluxogramas do modelo CAWM (Fluxograma 1) e do modelo CAROS (Fluxograma 2), ambos desenvolvidos no Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da UFPE. O processo de obtenção e tratamento de dados são descritos nos próximos tópicos.

Fluxograma 1 – Fluxograma do modelo CAWM



Fonte: A Autora (2023)

Fluxograma 2 – Fluxograma do modelo CAROS



Fonte: A Autora (2023)

De posse dos dados de entrada, calibrou-se o CAWM para as 17 estações propostas analisando-se os cenários 1 a 4 para o Capibaribe, e os cenários 1 e 3, quando possível, para as outras três bacias: (1) vazões brutas; (2) vazões consistidas pelas RNA (c.); (3) vazões com o período reduzido (r.), retirando-se a influência de barragens relevantes; (4) vazões consistidas sem influência das barragens (c. r.). O desempenho do modelo nos eventos calibrados foi avaliado a partir dos coeficientes estatísticos NSE , $NSE_{sqr t}$, NSE_{log} e $Pbias$, posteriormente detalhados.

Obtidos os parâmetros do modelo, selecionaram-se os postos que alcançaram os melhores resultados, próximos e com características semelhantes de cada barragem para, a partir destas calibrações, simularem-se os dados nos reservatórios em questão. Com isso, aplicaram-se as séries sintéticas de vazão geradas no CAWM na determinação das vazões regularizadas de barragens presentes nas bacias dos rios Capibaribe, Pajeú e Brígida. Para os dados de entrada referentes às curvas cota-área-volume, consideraram-se as fichas técnicas da APAC ou os valores definidos a partir do PE3D, de acordo com a necessidade.

3.3 DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS

Os dados de entrada necessários em cada modelo aplicado nesse estudo são descritos na Tabela 5. A obtenção e tratamento desses dados são apresentados nos itens que se seguem.

Tabela 5 – Dados de entrada dos modelos CAWM e CAROS

CAWM	Dados diários de vazões do exutório da sub-bacia (m ³ /s)
	Dados diários de precipitação média da sub-bacia (mm)
	Dados diários de evapotranspiração (mm)
	Área da sub-bacia (km ²)
	Capacidade de armazenamento do solo (mm)
	Duração do período de calibração
	Tempo de concentração (dias)
CAROS	Dados diários de vazões do exutório da sub-bacia (m ³ /s)
	Dados diários de precipitação média da sub-bacia (mm)
	Dados mensais de evaporação (mm)
	Área da sub-bacia da barragem (km ²)
	Área da sub-bacia do posto fluviométrico (km ²)*
	Capacidade do reservatório (m ³)
	Cota de coroamento (m)
	Cota do vertedouro (m)
	Extensão do vertedouro (m)
	Coefficiente de descarga do vertedouro
	Coefficiente de correção da evaporação
	Fração indicadora do colapso do reservatório em relação à sua capacidade
	Vazão máxima possível de transporte/captação (m ³ /s)
	Fração de volume de água no reservatório no primeiro dia da simulação
	Curvas cota-área-volume do reservatório
	Coefficientes de ajuste de equação polinomial de 4ª ordem para as CAV
*Necessário somente para o método de proporção de áreas. Caso a série de vazões seja do CAWM, repetir área da sub-bacia da barragem.	

Fonte: A Autora (2022).

3.3.1 Dados fluviométricos

As séries fluviométricas foram baixadas através do *plugin Hidroweb Downloader* (LHC), disponível nos complementos do QGIS. No LHC, é disponibilizado um inventário com dados de chuva e de vazão atualizados provenientes da ANA. Um *shapefile* com a região de contorno de interesse é inserido para delimitar os postos dos quais serão baixadas as séries.

3.3.2 Geração de sub-bacias

Utilizaram-se técnicas de geoprocessamento para obterem-se os contornos das sub-bacias e suas respectivas áreas. A base de dados espaciais utilizada para realizar os procedimentos descritos aqui foi o Modelo Digital do Terreno (MDT) obtido a partir do

produto SRTM. O processamento dos dados foi feito no QGIS, variando-se entre as versões 2.18.9 e 3.28.5, de acordo com a necessidade. Dentro deste *software*, utilizou-se a ferramenta GRASS para efetuarem-se os passos a seguir (Tabela 6).

De posse do produto referente à sub-bacia delimitada, em formato vetorial (*shapefile*), calculou-se sua área a partir da tabela de atributos do QGIS e utilizou-se a ferramenta de recorte para obter-se a rede de rios limitada pela sub-bacia. Com o aprimoramento do coeficiente de escoamento superficial K , abordado no tópico 2.7, buscando eliminar a dependência da resolução espacial do modelo do terreno, dispensou-se a utilização das características físicas necessárias para o seu cálculo. Portanto, a rede de rios encontrada foi empregada meramente na representação da drenagem das bacias.

Tabela 6 – Passos para geração de sub-bacias

Passo	Ferramenta	Descrição	Entrada	Saída	Observação
1	<i>r.fill.dir</i>	Preenche as depressões do MDE	MDE da bacia	<i>Depressionless DEM</i> (MDE sem depressões)	-
2	<i>r.watershed</i>	Gera arquivos matriciais da rede de drenagem e da direção da drenagem, entre outros	<i>Depressionless DEM</i>	<i>Stream segments</i> (rede de drenagem) e <i>Drainage direction</i> (direção da drenagem)	Neste caso, utilizou-se o valor 500 para a densidade da rede de rios
3	<i>r.to.vect</i>	Vetoriza arquivos matriciais (também chamados <i>raster</i>)	<i>Stream Segments</i>	Rede de rios vetorizada	Marcou-se a opção de suavização da geometria
4	<i>r.water.outlet</i>	Delimita a sub-bacia a partir do ponto onde se localiza seu exutório	<i>Drainage direction</i> e coordenada do exutório (posto fluviométrico ou barragem, neste caso)	<i>Basin</i> (sub-bacia)	Atentar-se para o pixel em que se marca o ponto do exutório, a linha do rio deve passar por este
5	<i>r.to.vect</i>	Vetoriza arquivos matriciais (também chamados <i>raster</i>)	<i>Basin</i>	Sub-bacia vetorizada	Marcou-se a opção de suavização da geometria

Fonte: A Autora (2022).

3.3.3 Dados pluviométricos e cálculo da chuva média pelo método IDW

As séries pluviométricas também foram obtidas através do *plugin Hidroweb Downloader*, explanado no tópico 3.3.1. A seleção dos postos se deu a partir do contorno da sub-bacia de interesse com um buffer de 0,5°, ou seja, considerando-se as estações fora da delimitação e próximas o suficiente para influenciar na chuva média do local.

Visto que os modelos hidrológicos empregados neste trabalho são concentrados, necessita-se calcular a chuva média da região. Nesse caso, calculou-se a chuva média de cada sub-bacia abordada no estudo, tanto referentes aos exutórios localizados nos postos fluviométricos quanto nas barragens. Para isso, utilizou-se o método da ponderação pelo inverso da distância IDW (*Inverse Distance Weighting*), o qual estima um valor para um local não amostrado como uma média dos valores dos dados dentro de uma vizinhança. O IDW é um método de interpolação determinística baseado em uma combinação linear ponderada de um conjunto dos pontos de amostragem. A média é ponderada entre o ponto escolhido para interpolação e seu vizinho, levando em conta que a influência causada pelos vizinhos diminui de acordo com a distância e seus valores teóricos nunca extrapolam os valores obtidos (Rodrigues; Rodrigues; Monte, 2012).

Para este estudo, a equipe de desenvolvimento do CAWM elaborou uma planilha em Excel, automatizada por uma macro, para realização do cálculo da chuva média pelo método IDW. Os dados de entrada necessários são: postos pluviométricos com dados de chuva; diretório da pasta onde estes postos se localizam; centroide do contorno da sub-bacia em questão (obtido no QGIS com o *plugin realcentroid* e com a calculadora de campo da tabela de atributos). Apresenta-se na Figura A1, presente no Apêndice A, a interface dessa planilha.

3.3.4 Expansão de séries de vazões e preenchimento de falhas

Selecionou-se a bacia do rio Capibaribe, como estudo de caso, para realizar o tratamento de dados fluviométricos por meio das RNA. Apresentam-se na Tabela 7 as estações selecionadas para realizar o processo de preenchimento de falhas e extensão das séries históricas de vazão.

Tabela 7 – Períodos das séries fluviométricas brutas e consistidas para o Capibaribe

Código	Nome da estação	Séries do banco de dados	Séries consistidas
39155000	Engenho Sítio	01/04/1967 a 31/10/1999	01/08/1966 a 28/02/2023
39145000	Limoeiro	01/02/1973 a 28/02/2023	01/08/1966 a 28/02/2023
39150000	Paudalho	01/08/1966 a 31/01/2023	01/08/1966 a 28/02/2023
39140000	Salgadinho	01/08/1966 a 28/02/2023	01/08/1966 a 28/02/2023
39100000	Santa Cruz do Capibaribe	01/04/1986 a 31/01/2023	01/08/1966 a 28/02/2023
39187800	São Lourenço da Mata II	01/01/1990 a 30/09/2022	01/08/1966 a 28/02/2023
39130000	Toritama	01/01/1973 a 31/01/2023	01/08/1966 a 28/02/2023
39170000	Vitória de Santo Antão	08/04/1967 a 31/12/2022	01/08/1966 a 28/02/2023

Fonte: A Autora (2022)

O modelo de aplicação desse método foi desenvolvido e aprimorado pelo orientador deste trabalho. A estrutura das RNA utilizada consiste em três camadas: a de entrada, a

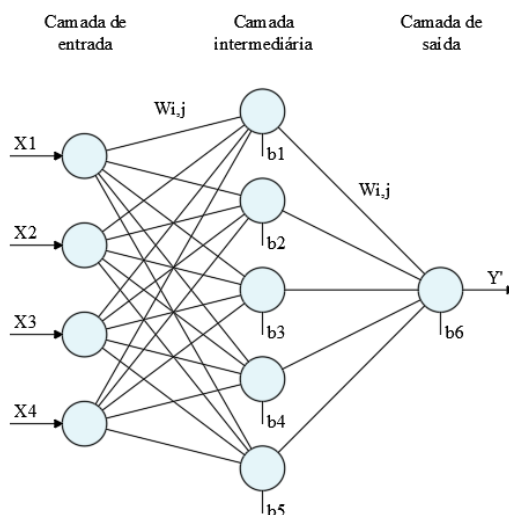
intermediária e a de saída. A camada de entrada possui quatro neurônios (X_1 , X_2 , X_3 e X_4), que constituem os dados de chuva e de vazão, distribuídos como mostra a Tabela 8. A seleção e distribuição desses dados passou por uma fase de testes, considerando-se a proximidade entre os postos e a relevância e influência de uns com os outros, até atingir essa formatação final, a qual proporcionou os melhores resultados. No presente estudo, aplicou-se o método na formatação já estabelecida considerando dados mais recentes de chuva e de vazão. A Figura 5 mostra a arquitetura da RNA desenvolvida neste estudo.

Tabela 8 – Neurônios da camada de entrada das redes neurais artificiais do Capibaribe

Código	Estação	X1	X2	X3	X4
39155000	Engenho Sítio	Chuva Engenho Sítio	Chuva Engenho Sítio defasada de um dia	Vazão Vitória de Santo Antão	Vazão Paudalho
39145000	Limoeiro	Chuva Limoeiro	Chuva Limoeiro defasada de um dia	Vazão Toritama defasada de um dia	Vazão Toritama
39150000	Paudalho	Chuva Paudalho	Chuva Paudalho defasada de um dia	Vazão Limoeiro defasada de um dia	Vazão Limoeiro
39140000	Salgadinho	Chuva Salgadinho	Chuva Salgadinho defasada de um dia	Vazão Toritama	Vazão Limoeiro
39100000	Santa Cruz	Chuva Santa Cruz	Chuva Santa Cruz defasada de um dia	Chuva Santa Cruz defasada de um dia	Vazão Toritama
39187800	São Lourenço da Mata II	Chuva São Lourenço	Chuva São Lourenço defasada de um dia	Vazão Paudalho defasada de um dia	Vazão Paudalho
39130000	Toritama	Chuva Toritama	Chuva Toritama defasada de um dia	Chuva Toritama defasada de um dia	Vazão Limoeiro
39170000	Vitória de Santo Antão	Chuva Vitória de S.A.	Chuva Vitória de S.A. defasada de um dia	Vazão Paudalho defasada de um dia	Vazão Paudalho

Fonte: A Autora (2022)

Figura 5 – Arquitetura da rede neural para estações fluviométricas do Capibaribe



Fonte: A Autora (2023)

A resposta ou saída de um neurônio é calculada através de uma função de ativação cujo valor é definido com base numa soma ponderada das entradas ao neurônio. A função de ativação utilizada neste modelo de RNA foi a função sigmoide (Equação 43), uma das funções de transferência mais utilizadas. Por este motivo, os dados de entrada foram normalizados (ou seja, divididos pelo valor máximo da série), uma vez que a função sigmoide fornece resultados no intervalo (0, 1).

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (43)$$

Efetuada o processo, a série de dados calculada (Y') foi convertida para a escala original, multiplicando-se pelo valor máximo de vazão correspondente. Tendo em vista a dificuldade em zerar a equação estabelecida, foi adicionada uma constante de translação chamada de vazão de corte. Com isso, os valores de Y' menores que a vazão de corte (Q_{corte}) foram substituídos por zero, e os maiores que esta constante permaneceram os mesmos, formando-se, assim, a série de vazões calculadas (Q_{calc}). A série de dados consistida ($Q_{consist}$) foi definida a partir dos valores de Q_{calc} , nos locais com falhas, e da manutenção dos valores das vazões observadas (Q_{obs}), nos locais sem falhas.

O objetivo deste modelo de RNA foi obter os pesos $W_{i,j}$ que minimizassem o somatório do quadrado dos erros referentes às diferenças entre as vazões calculadas e observadas dos locais sem falhas. Sendo assim, em termos do processamento do solver no *software* Excel, a Equação 44 compõe a função objetivo (relativa aos locais sem falhas), tendo como variáveis de decisão e restrições os elementos apresentados na Tabela 9.

$$F_{obj} = \sum (Q_{calc} - Q_{obs})^2 \quad (44)$$

Ao rodar o solver, são encontrados os pesos sinápticos, a tendência bias e a vazão de corte que proporcionem o valor mínimo para a função objetivo. Para isso, consideram-se algumas restrições, como por exemplo: a vazão de corte ter um valor maior ou igual a zero; a média das vazões consistidas ($Q_{med,consist}$) ter uma determinada variação com relação à média dos valores de vazões observadas ($Q_{med,obs}$), razão apresentada na Equação 45; a porcentagem de dias em que $Q_{consist}$ é menor do que 1,5 vezes $Q_{min,consist}$ ter uma determinada variação com relação aos dias de vazões observadas na mesma condição, proporção esta que é chamada de tempo de mínimas (Equação 46). Tais restrições foram adicionadas após uma fase de testes durante o processamento das RNA, de forma a alcançar uma solução viável.

Além das restrições comentadas, tem-se a variação de valores que os pesos ($W_{i,j}$) e a tendência bias (b_i) pode assumir, a qual foi adotada como sendo o intervalo (-500, 500), definido como tal após a fase de testes. Por fim, o valor mínimo de resposta do neurônio (Y'_{min}) deve ser positivo, ou seja, maior ou igual a zero.

Tabela 9 – Variáveis de decisão e restrições do solver para o modelo de RNA do Capibaribe

Variáveis de decisão	$W_{i,j}; b_i; Q_{corte}$
Restrições	$Q_{corte} \geq 0$
	$-500 \leq W_{i,j} \leq 500$, com i variando de 1 a 5 e j variando de 1 a 4
	$-500 \leq b_i \leq 500$, com i variando de 1 a 6
	$-500 \leq W_{i,j} \leq 500$, com i variando de 6 a 10 e j = 1
	$0,6 \leq Razão Q_{med} \leq 1,3$, onde
	$Razão Q_{med} = \frac{Q_{med,consist}}{Q_{med,obs}}$ (45)
	$0,5 \leq Tempo de mínimas \leq 1,2$, onde
	$Tempo de mínimas = \frac{\% \text{ dias em que } Q_{consist} < 1,5 Q_{min,consist}}{\% \text{ dias em que } Q_{consist} < 1,5 Q_{min,obs}}$ (46)
	$Y'_{min} \geq 0$

Fonte: A Autora (2022)

Salienta-se que os pesos $W_{i,j}$ são dispostos como matrizes na planilha Excel, onde os índices i e j representam as linhas e as colunas, respectivamente. A primeira matriz, de dimensão 5x4, é utilizada na função somadora da camada de entrada para a camada intermediária, bem como a tendência bias b_i com i variando de 1 a 5. A segunda matriz (5x1) e b_6 são utilizados na função somadora da camada intermediária para a camada de saída.

Para uma melhor visualização, no Apêndice A encontra-se a Figura A2, que apresenta, como exemplo, a interface da planilha utilizada para desenvolver o método das RNA para as estações da bacia do rio Capibaribe propostas neste item.

3.3.5 Dados de evapotranspiração e de evaporação

A evapotranspiração mensal, empregada no CAWM, foi retirada do conjunto de dados fornecidos na versão 3 da Base de Dados de Índice Global de Aridez e Evapotranspiração Mensal (Global-AI_PET_v3), abordada por Trabucco e Zomer (2019). Esse *raster* global contém valores de alta resolução (30 segundos de arco ou aproximadamente 1 km no equador) referentes ao período de 1970-2000, e é disponibilizado pelo GeoPortal CGIAR-CSI. Como

produto final para entrada no modelo, realizou-se a média dos valores da base de dados *raster* de cada mês extraídos do recorte de cada sub-bacia analisada, a partir da ferramenta *Raster Layer Statistics*.

Os valores de evaporação total mensal, usadas no CAROS, foram retirados das Normais Climatológicas do Brasil, oferecidas pelo INMET (2023), Instituto Nacional de Meteorologia (Tabela 10).

Tabela 10 – Estações de evaporação mensal selecionadas

Sub-bacia	Estação
Goitá	Recife
Jucazinho	Surubim
Poço Fundo	Surubim
Tapacurá	Recife
Barra do Juá	Triunfo
Rosário	Triunfo
Serrinha II	Triunfo
Cachimbo	Ouricuri
Chapéu	Ouricuri
Entremontes	Ouricuri

Fonte: A Autora (2022)

No presente trabalho, selecionaram-se os dados no período de 1981-2010. Em cada sub-bacia selecionou-se as estações nas suas proximidades, com características similares. Observa-se que esses valores disponibilizados pelo INMET são mensais, então foi necessário converter para valores diários, dividindo-se pelo número de dias de cada mês correspondente.

3.3.6 Parâmetro de capacidade de armazenamento do solo

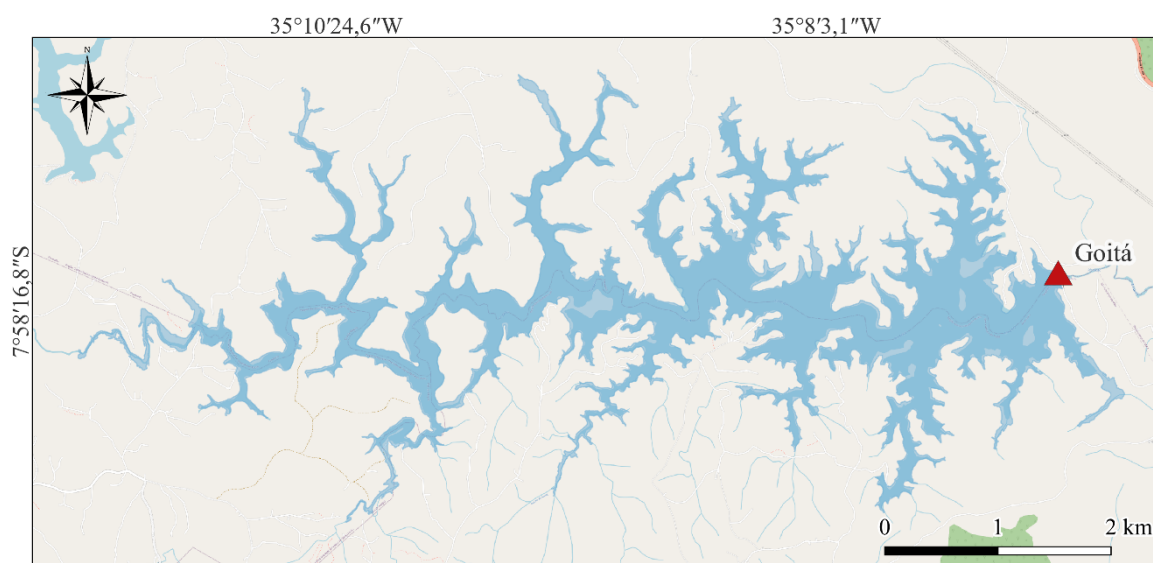
O parâmetro de capacidade de armazenamento do solo (S) é um dos parâmetros fixos do modelo CAWM. Conforme comentado, o parâmetro S é estimado como sendo igual a capacidade de retenção de água no solo, a qual é calculada a partir do *Curve Number* (CN) da bacia. Para calcular o CN, utilizaram-se mapeamentos de solos da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) disponibilizados em formato *shapefile*. Assim, com o uso das ferramentas de recorte do QGIS, definiram-se os produtos *shapefile* para cada sub-bacia, os quais contêm os valores de CN para cada uso do solo dentro da delimitação da sub-bacia. Na tabela de atributos, calculou-se a área correspondente a cada uso do solo. Para o cálculo do CN médio, foi feita uma média ponderada com os valores de CN e das suas áreas correspondentes. Com isso, pôde-se calcular o parâmetro S de cada sub-bacia através da Equação 29.

3.3.7 Atualização de curvas cota-área-volume dos reservatórios

Uma das principais ferramentas para o monitoramento de reservatórios são as curvas Cota x Área x Volume (CAV), que fornecem a área e o volume do reservatório de acordo com o nível da superfície da água. Para o Estado de Pernambuco, a APAC disponibiliza fichas técnicas de diversas barragens, as quais contêm informações sobre o barramento e as curvas CAV de cada reservatório. Com vista a atualizar, complementar e/ou validar as informações existentes, utilizaram-se técnicas de geoprocessamento, tendo como base de dados o MDT e o MDE, com resolução de 1 metro, provenientes do PE3D, bem como as ortofotos dos locais correspondentes.

De forma resumida, os dados presentes nas fichas apresentados de forma coerente foram mantidos, de acordo com a análise do perfil do barramento a partir da ferramenta *Profile Tool*. Para complementar a CAV existente com dados até a cota de coroamento, de acordo com a necessidade, utilizaram-se as equações das linhas de tendência ajustadas às curvas, como também os dados de área e de volume obtidos com a ferramenta *Raster Surface Volume*. Neste último caso, considerou-se as áreas das seções e volumes acima do espelho d'água existente no dia do levantamento de dados do produto PE3D e abaixo da cota determinada dentro do recorte do MDE no formato da bacia hidráulica referente a cota de coroamento (Figura 6).

Figura 6 – Espelho d'água do reservatório Goitá na cota de coroamento



Fonte: A Autora (2023)

Os volumes encontrados foram somados ao volume presente na barragem, seja pelo valor existente na ficha técnica ou pela estimativa a partir do volume de um cone (Equação 47), quando não disponível.

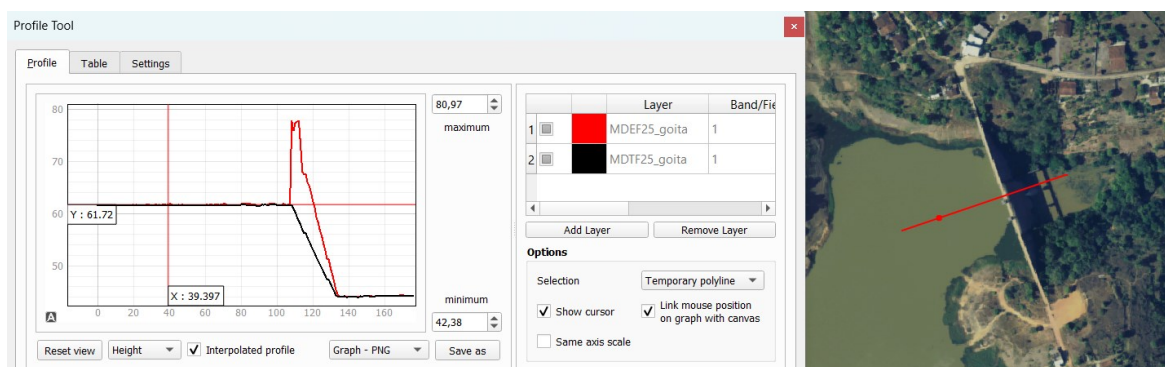
$$V_{cone} = \frac{A_{esp} \cdot (Z_{esp} - Z_{jus})}{3} \quad (47)$$

Onde A_{esp} corresponde à área do espelho d'água presente no dia do levantamento, Z_{esp} é a cota do espelho d'água e Z_{jus} representa a menor cota imediatamente à jusante da barragem.

Os valores de cota citados acima foram encontrados no QGIS com o uso das ortofotos, do MDE e da ferramenta *Profile Tool*. Com essa ferramenta é possível visualizar o perfil de um elemento, traçando-se uma linha através dele, que é representado por um gráfico dinâmico, no qual o cursor do *mouse* se movimenta de modo a representar as coordenadas dos pontos em que ele passa. A Figura 7 demonstra, como exemplo, o perfil gerado para encontrarem-se as cotas da barragem Goitá. À direita tem-se um zoom da ortofoto no barramento e o traçado representado pela linha vermelha. À esquerda, na interface do *Profile Tool*, observa-se o perfil do barramento, em vermelho, obtido a partir do MDE. Também se tem, para comparação, o perfil gerado com o MDT, o qual não possui informações de cota relativas aos elementos presentes no terreno, como barragens, edificações, entre outros, mas que, nesse caso, representou de forma consistente o nível do espelho d'água. Neste exemplo, o cursor do mouse está em um ponto à montante da barragem, na cota de aproximadamente 62 m, referente ao espelho d'água presente no dia do levantamento.

Com relação às barragens Jucazinho e Poço Fundo, utilizaram-se as CAV geradas para um trabalho desenvolvido entre a COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) e a FADE/UPFE (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco) (Cirilo *et al.*, 2021b).

Figura 7 – Uso da ferramenta Profile Tool na barragem Goitá



Fonte: A Autora (2023)

3.3.8 Características físicas das barragens

Alguns dos dados de entrada do modelo CAROS são a cota de coroamento, a cota do vertedouro e a extensão do vertedouro. Neste trabalho, utilizou-se a ferramenta *Profile Tool* para encontrar a cota de coroamento de cada barragem e confirmar a consistência com as informações contidas na APAC. Nos casos em que as fichas não possuíam os valores de extensão do vertedouro, utilizou-se a régua no QGIS para encontrar estes valores através das ortofotos do PE3D, que possuem uma alta resolução.

3.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO CAWM E SIMULAÇÃO DE VAZÕES

A versão do CAWM utilizada neste trabalho apresenta-se no *software* Excel onde as tarefas são automatizadas por uma macro, possibilitando um manuseio mais prático do modelo. A planilha contém uma aba principal na qual são inseridos os dados de entrada (características físicas da bacia e dados hidrológicos), bem como se apresentam algumas informações, como parâmetros do modelo, elementos do balanço hídrico e indicadores de eficiência. As séries diárias de precipitação, vazão e evapotranspiração são inseridas em arquivos texto, e salvas numa mesma pasta, cujo diretório é informado dentro da planilha. Esta mesma aba contém quatro botões: (1) limpar dados de simulação e planilha(s); (2) criação da(s) planilha(s) do CAWM; (3) ajustar períodos de calibração e verificação; (4) calibração. A interface da aba principal do CAWM encontra-se nas Figuras A3 a A6 do Apêndice A.

Na calibração, realizaram-se vários testes observando-se o comportamento dos coeficientes estatísticos de eficiência do modelo. Na verificação, considerou-se o período de, pelo menos, 30% da série de dados mais atuais, variando a cada 10%, e a partir de 60%, a cada 5%, até no período máximo de 85%. A cada nova calibração os dados foram limpos e criou-se uma nova aba com os períodos testes definidos. Ao encontrar o período de calibração que proporcionou o melhor ajuste, definiram-se os parâmetros do modelo para cada sub-bacia. Com isso, tais parâmetros foram transferidos para as planilhas de simulação correspondentes às sub-bacias das barragens. Após a inserção dos dados de cada uma, selecionou-se a opção de “simulação” e determinaram-se as vazões simuladas em cada reservatório. Os períodos de calibração e de validação utilizados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Períodos de calibração e validação das estações abordadas

Estação fluviométrica	Período de calibração	Período de validação	Estação fluviométrica	Período de calibração	Período de validação
BACIA DO RIO CAPIBARIBE			BACIA DO RIO CAPIBARIBE		
Engenho Sítio	01/04/67 a 12/01/85	31/01/85 a 31/12/1992	Toritama	01/01/73 a 24/09/80	25/09/80 a 31/01/2023
Engenho Sítio (c.)	01/04/73 a 11/04/85	12/04/85 a 31/12/1992	Toritama (c.)	01/01/73 a 06/07/80	07/07/80 a 31/01/2023
Limoeiro	01/02/73 a 05/07/80	06/07/80 a 28/02/2023	Toritama (r.)	01/01/73 a 09/03/77	10/03/77 a 31/12/1987
Limoeiro (c.)	01/02/73 a 06/08/80	07/08/80 a 28/02/2023	Toritama (c. r.)	01/01/73 a 02/07/80	03/07/80 a 31/12/1987
Limoeiro (r.)	01/02/73 a 02/11/80	03/11/80 a 31/12/1998	BACIA DO RIO PAJEÚ		
Limoeiro (c. r.)	01/02/73 a 21/12/76	22/12/76 a 31/12/1998	Afogados	01/01/85 a 03/03/02	04/03/02 a 31/07/2011
Paudalho	01/08/66 a 05/07/83	06/07/83 a 31/01/2023	Flores	01/01/73 a 04/07/82	05/07/82 a 28/02/2023
Paudalho (c.)	01/08/66 a 14/07/83	15/07/83 a 31/01/2023	Flores (r.)	01/01/73 a 03/02/76	04/02/76 a 31/12/1985
Paudalho (r.)	01/08/66 a 16/10/72	17/10/72 a 31/12/1978	Floresta	01/04/72 a 11/11/79	12/11/79 a 28/02/2023
Paudalho (c. r.)	01/08/66 a 13/01/74	14/01/74 a 31/12/1978	Floresta (r.)	01/04/72 a 17/08/79	18/08/79 a 31/12/1996
Salgadinho	01/08/66 a 07/02/09	08/02/09 a 28/02/2023	Ilha Grande	01/03/73 a 19/04/00	20/04/00 a 31/01/2023
Salgadinho (c.)	01/08/66 a 25/01/75	26/01/75 a 28/02/2023	Ilha Grande (r.)	01/03/73 a 19/11/78	20/11/78 a 31/05/1982
Salgadinho (r.)	01/08/66 a 13/11/84	14/11/84 a 31/12/1998	Serra Talhada	01/04/72 a 11/11/79	12/11/79 a 28/02/2023
Salgadinho (c. r.)	01/08/66 a 08/09/74	09/09/74 a 31/12/1998	Serra Talhada (r.)	01/04/72 a 18/12/74	19/12/74 a 31/12/1985
Santa Cruz	01/04/86 a 06/11/06	07/11/06 a 31/01/2023	BACIA DO RIO BRÍGIDA		
Santa Cruz (c.)	01/04/86 a 08/05/08	09/05/08 a 31/01/2023	Jacaré	01/06/84 a 24/11/00	25/11/00 a 31/10/2022
S. L. da Mata II	01/01/90 a 13/01/03	14/01/03 a 30/09/2022	Parnamirim	01/06/84 a 01/04/96	02/04/96 a 31/12/2013
S. L. da Mata II (c.)	01/01/90 a 06/02/03	07/02/03 a 30/09/2022	Poço do Fumo	01/01/85 a 03/10/02	04/10/02 a 30/11/2008
Vitória de S.A.	08/04/67 a 25/10/85	26/10/85 a 31/12/2022	Poço do Fumo (r.)	01/01/85 a 01/01/89	02/01/89 a 30/04/1991
Vitória de S.A. (c.)	08/04/67 a 14/03/81	15/03/81 a 31/12/2022	BACIA DO RIO MOXOTÓ		
			Inajá	01/01/77 a 01/07/86	02/07/86 a 28/02/2023

Fonte: A Autora (2023)

Para a avaliação do desempenho do modelo, consideraram-se os coeficientes estatísticos NSE (representando o comportamento das vazões altas) e suas derivações NSE_{sqrtQ} (representando as vazões médias) e o NSE_{logQ} (representando as vazões baixas), como também o $Pbias$ (representando a diferença de volume relativo entre os valores observados e calculados). Na literatura, Motovilov *et al.* (1999) classificaram como muito bons os valores de NSE acima de 0,75 e satisfatórios os valores entre 0,36 e 0,75, tanto para vazões diárias como mensais. Essas referências podem ser consideradas também para as derivações do coeficiente NSE . Moriasi *et al.* (2007) recomendam as faixas de valores para o coeficiente $Pbias$ apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Indicadores de desempenho

Classificação	PBIAS
Muito boa	$< \pm 10$
Boa	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Satisfatória	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$
Insatisfatória	$PBIAS > \pm 25$

Fonte: Moriasi *et al.* (2007)

3.5 UTILIZAÇÃO DO MODELO CAROS

O modelo de operação de reservatórios CAROS também é disposto no *software* Excel e automatizado por uma macro. Na aba principal (Figuras A7 a A10 – Apêndice A) são inseridos os dados de entrada supracitados, sendo os dados de chuva e vazão dispostos em arquivos texto. Nesta mesma aba, existem três botões: (1) retirada variável; (2) retirada constante; (3) excluir planilhas de simulação.

Ao clicar em retirada constante, é gerada uma nova aba (Figura A9 – Apêndice A) com três opções de garantia: 90%, 95% e 100%. A vazão constante que pode ser liberada por uma barragem é atrelada a uma garantia de fornecimento, nesse caso, denominadas $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e $Q_{100\%}$. A vazão denominada $Q_{95\%}$, por exemplo, equivale a vazão que está presente no rio durante, pelo menos, 95% do tempo, ou seja, durante 95% do tempo existe, no rio, uma vazão igual ou maior do que a $Q_{95\%}$.

No caso da retirada variável (Figura A10 – Apêndice A), é gerada uma matriz de %Q regularizada por mês e por % de volume, bem como a vazão regularizada média referente ao período de dados utilizados.

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu na determinação das vazões regularizadas $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e $Q_{100\%}$.

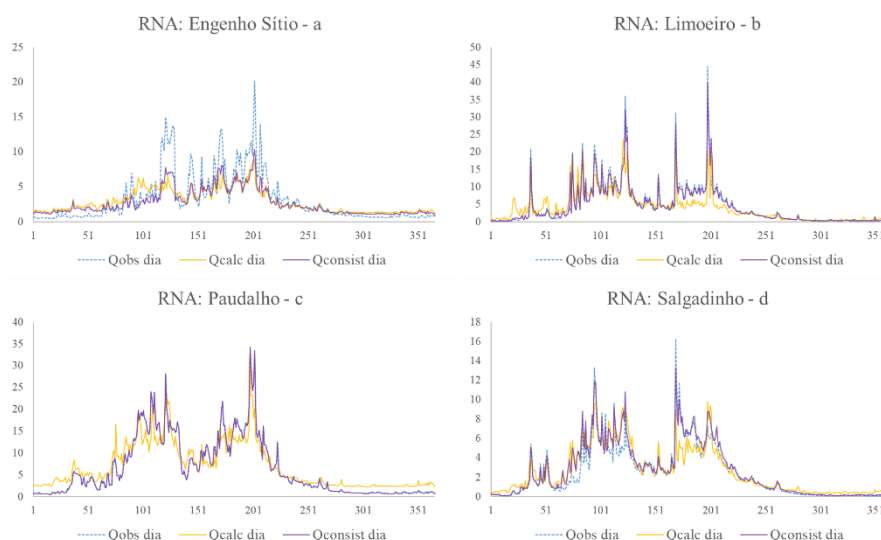
4 RESULTADOS

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

O comportamento do modelo pôde ser avaliado a partir da representação gráfica da variação do fluxo hídrico ao longo de um período de um ano durante vários anos em um curso d'água, utilizando os dias julianos como escala horizontal. Os dias julianos, que constituem um sistema de contagem contínua de dias, iniciando a partir do primeiro dia do ano, oferecem uma análise temporal refinada das oscilações sazonais do fluxo, evidenciando os picos de vazão durante períodos chuvosos e os momentos de baixa vazão em épocas secas. Assim, as curvas configuram-se na representação da vazão média de cada dia do ano, considerando-se todos os anos da série histórica em questão.

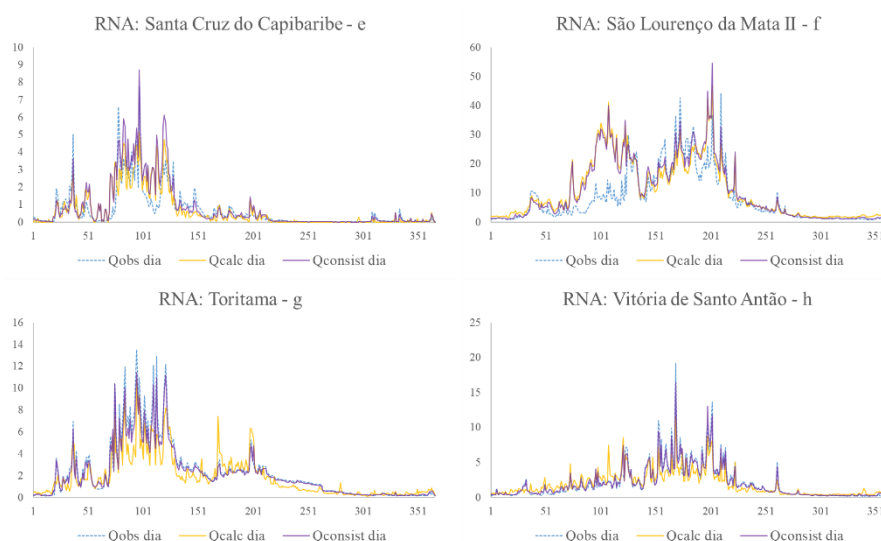
Apresentam-se, nos Gráficos 3 e 4, os hidrogramas referentes aos postos fluviométricos em questão: Limoeiro, Paudalho, Salgadinho, Santa Cruz do Capibaribe, São Lourenço da Mata II, Toritama, Vitória de Santo Antão e Engenho Sítio, presentes na bacia do rio Capibaribe. Em azul estão representadas as vazões observadas, e em laranja, as vazões calculadas pelo método das Redes Neurais Artificiais. O resultado final deste método gerou uma série de dados que levou em conta a vazão calculada exclusivamente durante os períodos de escassez, ou seja, na análise de cada dia da série, na medida em que havia vazão bruta disponível, tal valor se mantinha inalterado, e quando o dado era inexistente, adicionava-se a vazão calculada.

Gráfico 3 – Variação da vazão média calculada pelas RNA em estações do Capibaribe (parte 1)



Fonte: A Autora (2023)

Gráfico 4 – Variação da vazão média calculada pelas RNA em estações do Capibaribe (parte 2)



Fonte: A Autora (2023)

Uma avaliação mais minuciosa foi realizada a partir dos indicadores de desempenho (Tabela 13). Na análise das oito sub-bacias, adotando-se os critérios adotados por Motovilov *et al.* (1999), o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} , representando as vazões altas, médias e baixas, nesta mesma ordem, classificaram o ajuste como satisfatório em 50%, 63% e 75% dos eventos, respectivamente. Salienta-se que as séries analisadas são referentes às vazões brutas e às calculadas pelas RNA. Com relação ao coeficiente $Pbias$, apresentado por Moriasi *et al.* (2007), observa-se o comportamento da série calculada no que diz respeito à subestimativa ou superestimativa do volume relativo ao da série observada, onde o menor volume relativo é representado pelo valor mais próximo de zero.

Tabela 13 – Indicadores de desempenho dos resultados das RNA

	NSE	NSE_{sqrtQ}	NSE_{logQ}	Pbias
Engenho Sítio	-0,08	0,29	0,54	164,80
Limoeiro	0,55	0,57	0,55	-0,25
Paudalho	0,56	0,54	0,44	7,70
Salgadinho	0,15	0,40	0,30	36,47
Santa Cruz do Capibaribe	-1,16	0,24	0,19	62,06
São Lourenço da Mata II	-1,07	0,03	0,46	126,34
Toritama	0,58	0,56	0,40	-2,85
Vitória de Santo Antão	0,48	0,49	0,45	11,36

Fonte: A Autora (2023)

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO CHUVA-VAZÃO CAWM

Apresentam-se na Tabela 14 as características físicas das sub-bacias em questão, necessárias para a modelagem hidrológica. Tais resultados puderam ser obtidos a partir do geoprocessamento de dados descrito nos tópicos 3.3.2 e 3.3.6.

Tabela 14 – Características físicas das sub-bacias

Postos fluviométricos				Barragens		
Bacia	Sub-bacia	Área (km ²)	Parâmetro S (mm)	Sub-bacia	Área (km ²)	Parâmetro S (mm)
Capibaribe	Engenho Sítio	375,60	143	Goitá	400,92	142
	Limoeiro	5592,84	130	Jucazinho	4174,92	63
	Paudalho	6145,44	79	Poço Fundo	900,68	65
	Salgadinho	4904,19	62	Tapacurá	383,06	119
	Santa Cruz do Capibaribe	1555,60	80			
	São Lourenço da Mata	7236,07	77			
	Toritama	2432,83	80			
	Vitória de Santo Antão	263,93	121			
Pajeú	Afogados da Ingazeira	3485,66	65	Barra do Juá	1950,46	66
	Flores	4914,23	64	Rosário	916,21	64
	Floresta	12089,80	70	Serrinha II	9837,72	70
	Ilha Grande	2262,05	67			
	Serra Talhada	5825,48	65			
Brígida	Jacaré	5159,70	178	Cachimbo	422,81	55
	Parnamirim	2962,59	79	Chapéu	2831,24	80
	Poço do Fumo	3516,07	177	Entremontes	5051,25	182
Moxotó	Inajá	8224,58	93			

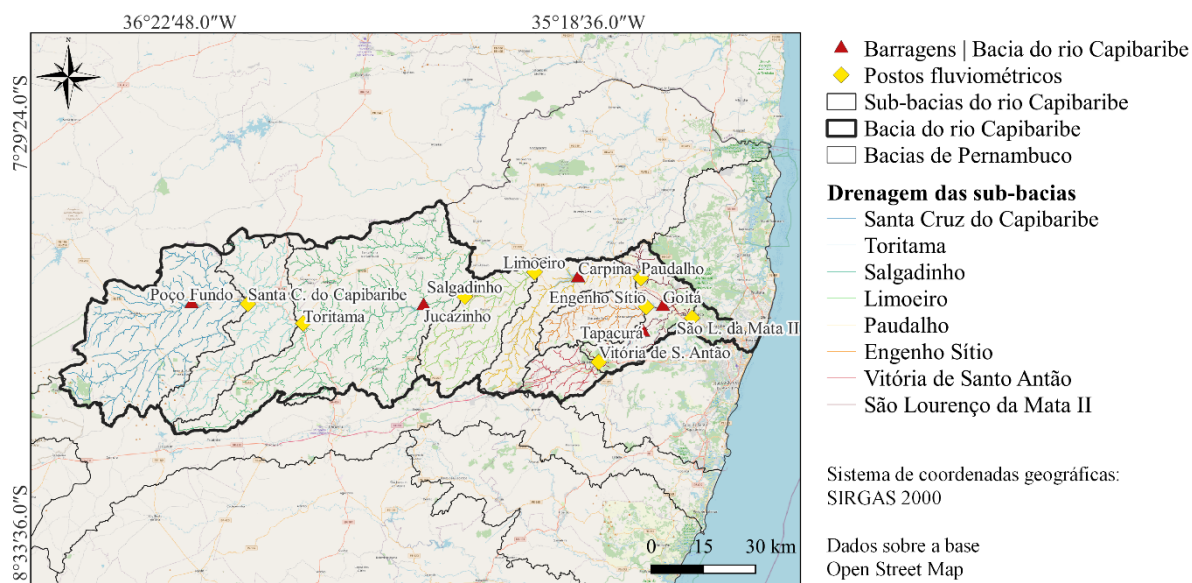
Fonte: A Autora (2023)

4.2.1 Calibração do CAWM em estações na bacia do rio Capibaribe

As estações fluviométricas abordadas no estudo e presentes na bacia do rio Capibaribe, bem como suas sub-bacias e drenagens correspondentes, encontradas a partir do geoprocessamento de dados, estão dispostas no Mapa 8, sendo elas: Santa Cruz do Capibaribe, Toritama, Salgadinho, Limoeiro, Paudalho, Engenho Sítio, Vitória de Santo Antão e São Lourenço da Mata II. Apontam-se as barragens relevantes que exercem influência no comportamento das séries temporais de vazão: Poço Fundo, Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá.

Para esta bacia hidrográfica, consideraram-se quatro cenários de dados fluviométricos para a calibração do modelo CAWM: (i) vazões brutas; (ii) vazões consistidas pelas RNA (c.); (iii) vazões com o período reduzido (r.), retirando-se a influência das barragens relevantes; (iv) vazões consistidas sem influência das barragens (r. c.). A Tabela 14 dispõe dos períodos de calibração e validação utilizados.

Mapa 8 – Localização dos postos fluviométricos e barragens de influência | Bacia do rio Capibaribe



Fonte: A Autora (2023)

A Tabela 15 reúne os resultados das calibrações, onde apresentam-se o coeficiente de conversão da evapotranspiração – K_p , o coeficiente do expoente das perdas na calha – p (Equação 27), o coeficiente da função de evapotranspiração – α (Equação 14), parâmetro de percolação – K_s (Equação 16) e os coeficientes estatísticos de eficiência do modelo NSE , NSE_{sqrtQ} , NSE_{logQ} e $Pbias$, que representam, respectivamente, as vazões altas, as vazões médias, as vazões baixas e a diferença de volume relativo entre os dados brutos e calculados. O valor de K_p variou de acordo com o comportamento dos dados diante da evapotranspiração (1 ou 0.6). Como calibração refinada, otimizaram-se os valores de p e α obedecendo aos intervalos: $0,8 \leq p \leq 1,2$ e $0 \leq \alpha \leq 10$.

Na análise dos 24 eventos calibrados, adotando-se os critérios apresentados por Motovilov *et al.* (1999), o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} classificaram o ajuste como pelo menos satisfatório em 83%, 92% e 46% deles, respectivamente. Destes o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} classificaram o ajuste como muito bom em 4%, 17% e 4%, respectivamente. Na avaliação dos 8 cenários sem influência de barragens, o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} classificaram a modelagem como pelo menos satisfatória em 100%, 100% e 88% dos eventos, sendo 13% e 50% considerados muito bons para o NSE e o NSE_{sqrtQ} , respectivamente. Levando em conta a classificação apresentada por Moriasi *et al.* (2007) para o $Pbias$, o desempenho foi considerado pelo menos satisfatório em 50% dos cenários, avaliando-se tanto o total dos cenários quanto aqueles sem influência de barragens.

Tabela 15 – Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM | Bacia do rio Capibaribe

Estação fluviométrica	Kp	p	α	Ks	NSE		NSEsqrt		NSElog		Pbias (%)	
					Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Engenho Sítio	1,0	0,8036	0,3838	0,00130	0,22	0,43	0,54	0,66	0,81	0,76	-21,87	-2,27
Engenho Sítio (c.)	1,0	1,0552	0,1293	0,00553	0,22	0,39	0,50	0,64	0,72	0,74	-9,17	-12,23
Limoeiro	1,0	0,8332	0,4407	0,00294	0,79	0,46	0,81	0,43	0,69	0,36	-5,95	54,13
Limoeiro (c.)	1,0	0,8247	0,3482	0,00358	0,79	0,44	0,81	0,41	0,69	0,35	-4,34	58,29
Limoeiro (r.)	1,0	0,8313	0,4009	0,00306	0,79	0,61	0,81	0,71	0,71	0,54	-2,29	2,59
Limoeiro (c. r.)	1,0	0,8209	0,4647	0,00270	0,84	0,63	0,77	0,75	0,64	0,59	-7,61	-1,74
Paudalho	0,6	0,9647	4,3385	0,00108	0,62	0,24	0,53	0,45	0,15	0,11	13,28	2,85
Paudalho (c.)	1,0	0,9872	10	1	0,63	0,13	0,54	0,44	0,50	0,33	5,39	8,04
Paudalho (r.)	1,0	0,9468	0,3375	0,00311	0,60	0,50	0,64	0,46	0,68	0,63	4,31	28,09
Paudalho (c. r.)	1,0	0,9600	0,0099	0,00183	0,64	0,73	0,64	0,52	0,63	0,61	3,39	29,48
Salgadinho	0,6	0,9929	10	0	0,43	0,40	0,69	0,49	-2,02	-0,92	-23,77	8,37
Salgadinho (c.)	0,6	0,9004	10	0,01188	0,53	0,48	0,55	0,66	-2,43	-1,73	3,81	-10,83
Salgadinho (r.)	0,6	0,9860	10	0,00498	-0,07	0,59	0,40	0,65	0,31	0,56	-6,53	-36,58
Salgadinho (c. r.)	0,6	0,9853	10	0,00494	0,53	0,57	0,56	0,78	-2,28	-4,82	4,23	-33,95
Santa Cruz	1,0	0,9450	1,4524	0,01200	0,42	0,46	0,49	0,67	-2,07	-1,98	-16,09	-34,73
Santa Cruz (c.)	1,0	1,0468	10,0000	0	0,45	0,43	0,52	0,64	-17,60	-12,44	-10,79	-31,04
S. L. da Mata II	1,0	1,1047	1,2850	0	0,39	0,30	0,59	0,25	0,16	0,24	-3,93	39,38
S. L. da Mata II (c.)	1,0	1,1023	1,2624	0	0,39	0,30	0,60	0,25	0,16	0,22	-4,14	39,71
Toritama	0,6	0,9014	10	0,00648	0,76	0,40	0,85	0,43	-0,47	-1,85	0,59	43,93
Toritama (c.)	0,6	0,8724	10	0,01343	0,76	0,39	0,83	0,40	-1,02	-3,37	3,62	47,64
Toritama (r.)	0,6	0,9102	10	0,00613	0,68	0,76	0,80	0,86	0,46	0,54	-6,82	2,93
Toritama (c. r.)	1,0	0,8000	1,0802	0,00582	0,76	0,74	0,84	0,87	0,08	0,42	-7,64	-2,24
Vitória de S.A.	0,6	0,8000	10	0,00185	0,64	0,62	0,71	0,61	0,32	0,15	-1,17	-6,59
Vitória de S.A. (c.)	1,0	0,8671	0,1704	0,00294	0,60	0,62	0,66	0,64	0,53	0,58	12,39	3,24

Fonte: A Autora (2023)

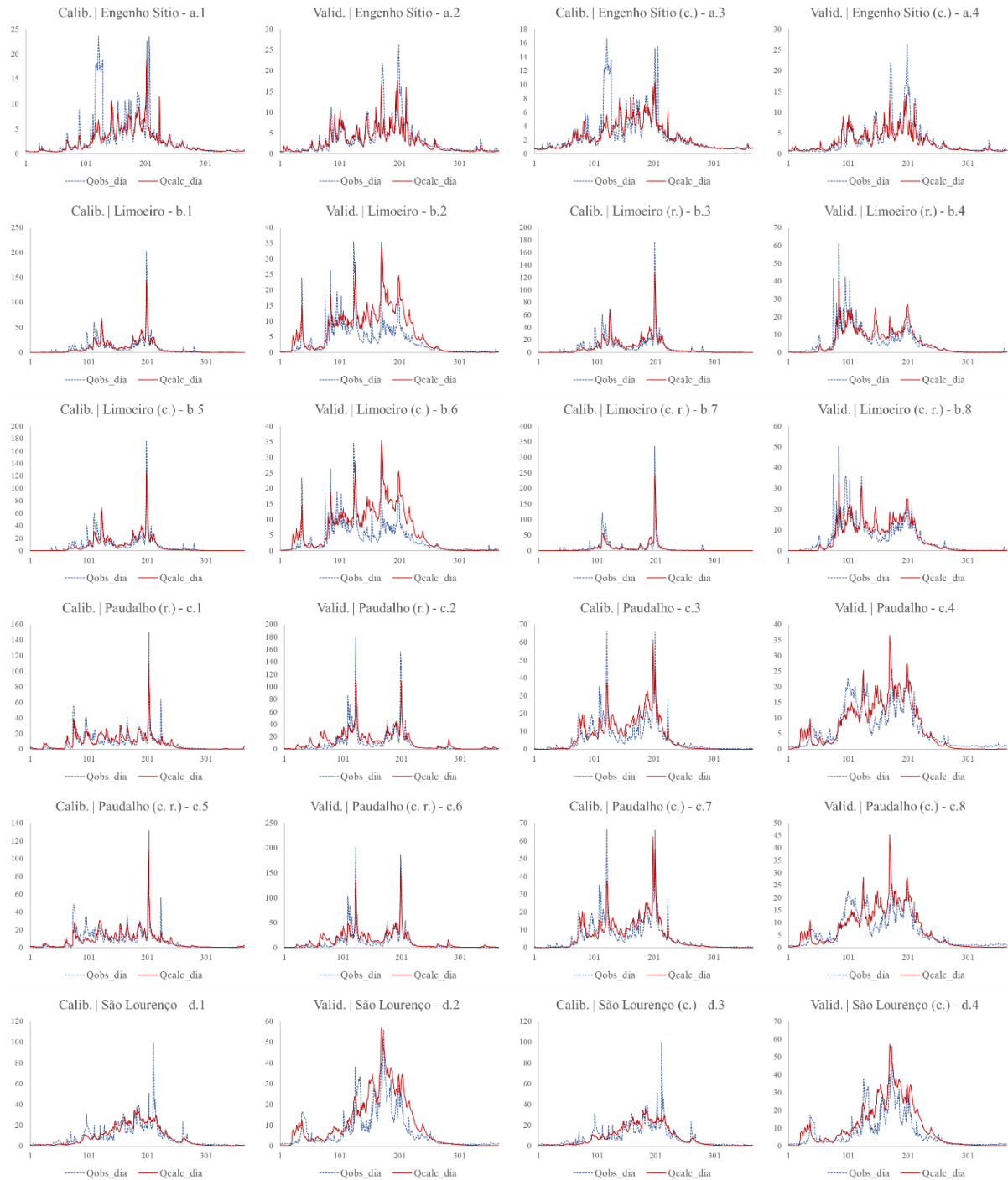
Além da avaliação dos resultados das calibrações no CAWM pelos indicadores de desempenho, também se interpretou o comportamento do modelo a partir da representação gráfica da variação da vazão média ao longo de todos os dias do ano, considerando-se todos os anos da série em questão, como explanado no tópico 4.1.

Verificam-se, nos Gráficos 5 e 6 os quatro cenários discutidos no início deste item. Através dos hidrogramas, é possível constatar a diferença significativa que a influência das barragens provoca nos dados de vazão, e, conseqüentemente, nos ajustes das curvas. Podem-se citar: a barragem de Poço Fundo influenciando nos dados de Santa Cruz do Capibaribe e de Toritama; Jucazinho interferindo nas vazões de Salgadinho e Limoeiro; Carpina influenciando os resultados de Paudalho; e Carpina, Goitá e Tapacurá interferindo nos resultados de São Lourenço da Mata II.

Ainda com relação à bacia do rio Capibaribe, as vazões consistidas pelo método das RNA causaram diferenças consideráveis em casos pontuais, constatados pelos indicadores de desempenho. Paudalho (r.), por exemplo, teve uma melhora expressiva no *NSE* (de 0,50 para 0,73) e *NSE_{sqrtQ}* (de 0,46 para 0,52), enquanto Vitória de Santo Antão melhorou significativamente o *NSE_{logQ}* (de 0,15 para 0,58). Na maior parte das sub-bacias, os

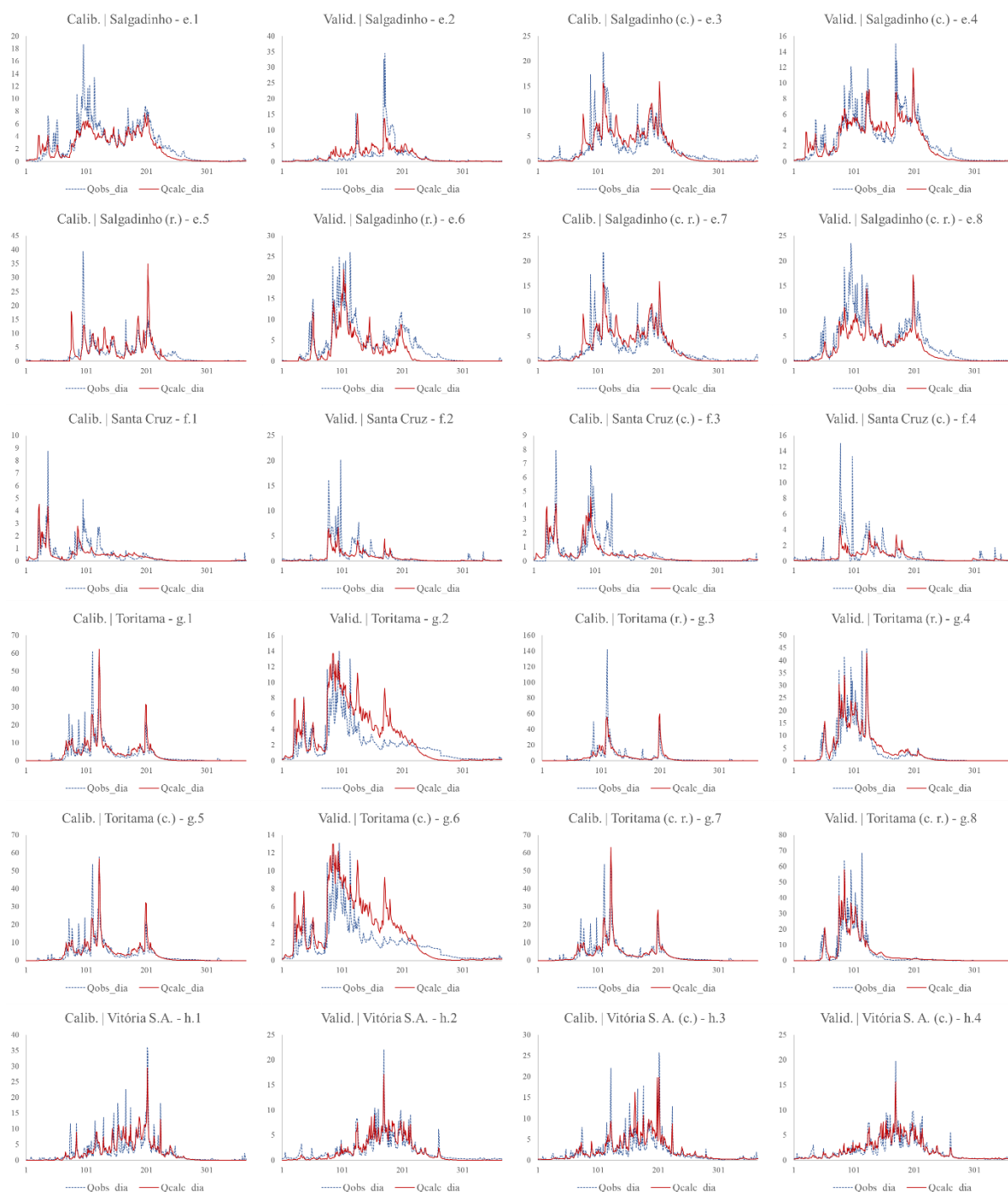
resultados entre os cenários com dados brutos e dados consistidos se assemelhou, provavelmente pela ausência ou pouca quantidade de falhas nos períodos citados. Para esta bacia, apontam-se os melhores ajustes para os dados dos postos fluviométricos de Limoeiro (c. r.), Toritama (r.) e Vitória de Santo Antão.

Gráfico 5 – Variação da vazão média nas sub-bacias do Capibaribe (parte 1)



Fonte: A Autora (2023)

Gráfico 6 – Variação da vazão média nas sub-bacias do Capibaribe (parte 2)



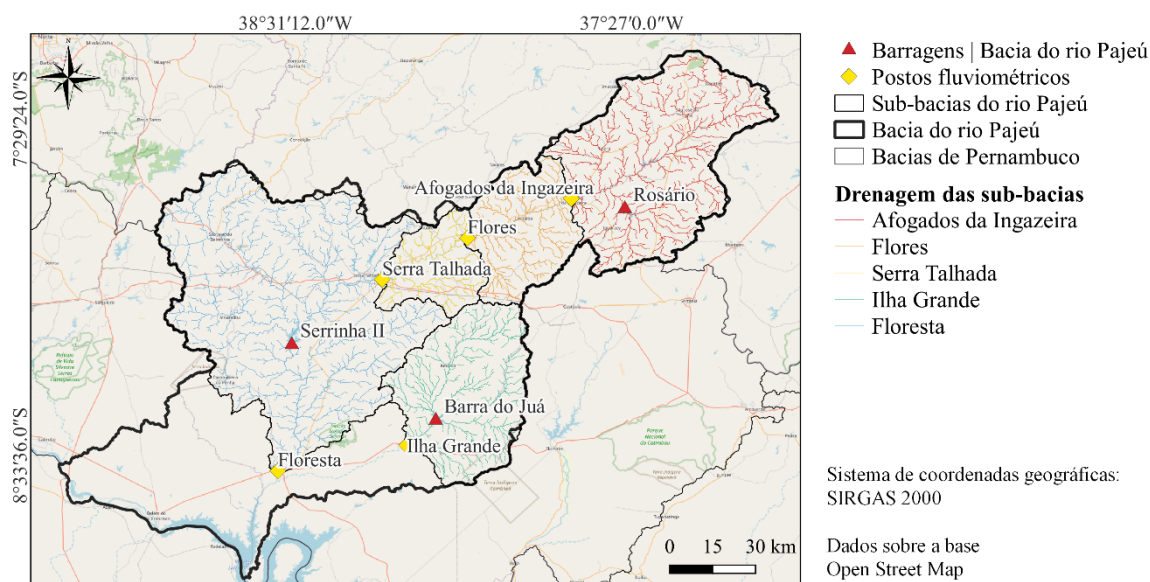
Fonte: A Autora (2023)

4.2.2 Calibração do CAWM em estações na bacia do rio Pajeú

Na bacia do rio Pajeú, calibraram-se as estações de Afogados da Ingazeira, Flores, Serra Talhada, Ilha Grande e Floresta. As sub-bacias e drenagens destes postos, definidas a partir do geoprocessamento de dados, são apresentados no Mapa 9. Observam-se as barragens Rosário, Serrinha II e Barra do Juá como sendo de grande influência nas séries fluviométricas.

Nesta bacia, consideraram-se dois cenários (i) e (ii) para a calibração dos postos no modelo CAWM.

Mapa 9 – Localização dos postos fluviométricos e barragens de influência | Bacia do rio Pajeú



Fonte: A Autora (2023)

Na Tabela 16 são apresentados os parâmetros determinados e coeficientes estatísticos que representam a eficiência do modelo CAWM.

Tabela 16 – Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM | Bacia do rio Pajeú

Estação fluviométrica	Kp	p	α	Ks	NSE		NSEsqrt		NSElog		Pbias (%)	
					Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Afogados	1,0	0,9845	10	0	0,55	0,10	0,47	0,36	0,10	0,14	31,09	77,04
Flores	1,0	1,0318	10	0	0,70	0,09	0,85	0,37	0,46	0,23	2,77	101,41
Flores (r.)	1,0	0,9830	10	0	0,69	0,79	0,86	0,87	-0,21	0,77	-0,93	-0,59
Floresta	1,0	0,9881	10	0	0,60	0,49	0,76	0,54	0,59	0,54	-5,31	30,82
Floresta (r.)	1,0	0,9952	10	0	0,60	0,60	0,75	0,79	0,60	0,77	-3,81	-7,67
Ilha Grande	0,6	0,9504	10	0	0,39	0,28	0,14	0,07	-0,14	-0,70	24,11	7,68
Ilha Grande (r.)	1,0	0,8000	1,3237	0	0,65	0,69	0,75	0,71	0,46	0,49	14,68	12,73
Serra Talhada	1,0	1,1777	10	0	0,59	0,37	0,73	0,55	0,50	0,51	-12,23	18,85
Serra Talhada (r.)	1,0	1,0713	10	0	0,63	0,57	0,84	0,74	0,69	0,34	-4,69	-21,07

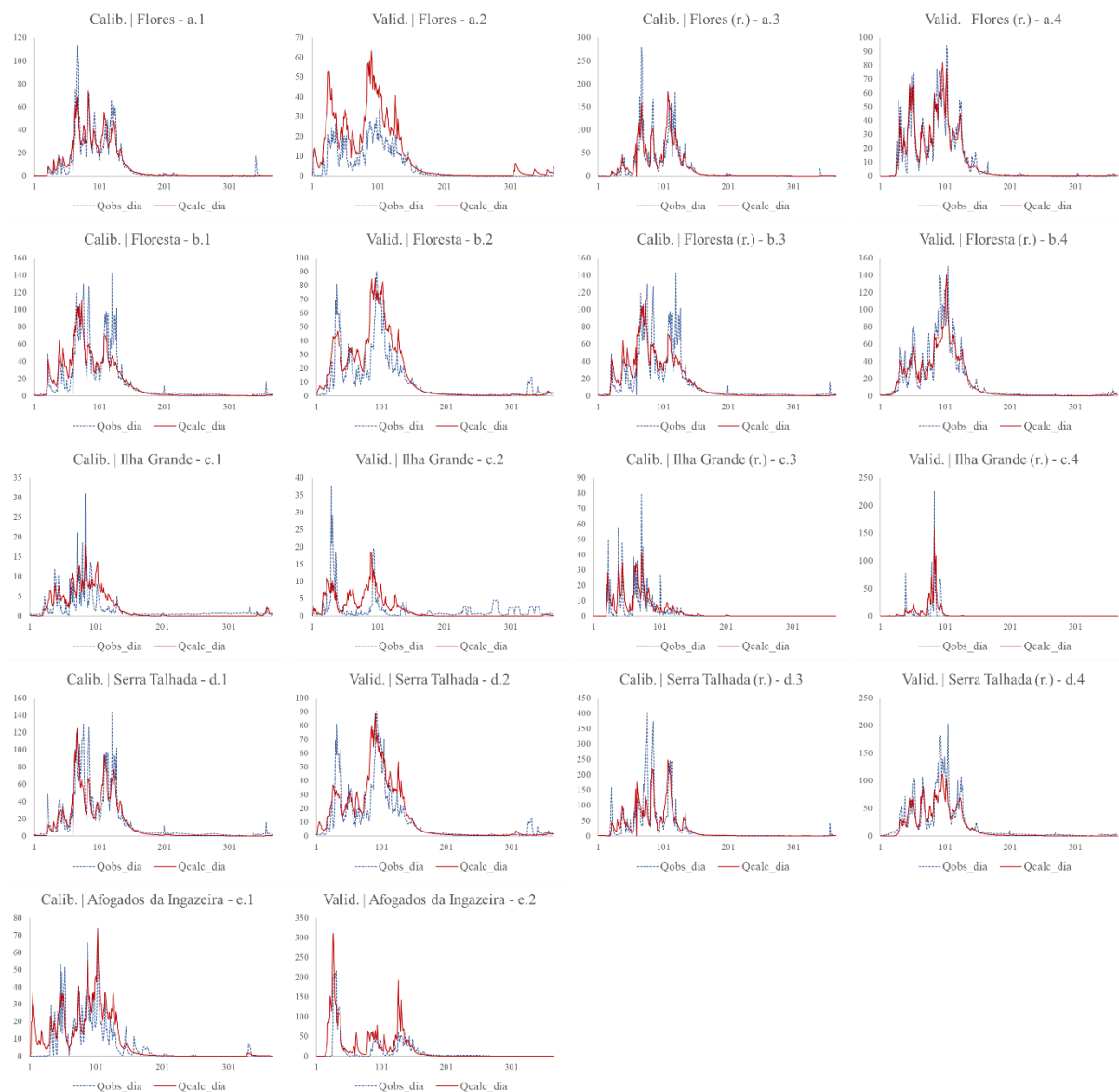
Fonte: A Autora (2023)

Na análise dos 9 eventos calibrados, o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} classificaram o ajuste como pelo menos satisfatório em 67%, 89% e 56% destes, respectivamente, adotando-se os critérios apresentados por Motovilov *et al.* (1999). Destes o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} classificaram o ajuste como muito bom em 11%, 22% e 22%, respectivamente. Na avaliação dos 4 cenários sem influência de barragens, o NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{logQ} classificaram a modelagem como pelo menos satisfatória em 100%, 100% e 75% dos eventos,

sendo 25%, 50% e 50% considerados muito bons para o NSE e o NSE_{sqrtQ} , respectivamente. Analisando-se o coeficiente $Pbias$, de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007), o desempenho foi considerado pelo menos satisfatório em 67% do total de eventos e em 100% dos cenários sem influência de barragens.

No Gráfico 7 apresentam-se os hidrogramas das sub-bacias do Pajeú. Os melhores ajustes ocorreram em Flores (r.), sem a influência da barragem Rosário, e em Floresta (r.), sem a presença da barragem Serrinha II no período de dados. Apontam-se, para os outros postos: Afogados e Serra Talhada influenciados pelo reservatório Rosário e a barragem Barra do Juá interferindo nos dados de Ilha Grande.

Gráfico 7 – Variação da vazão média nas sub-bacias do Pajeú

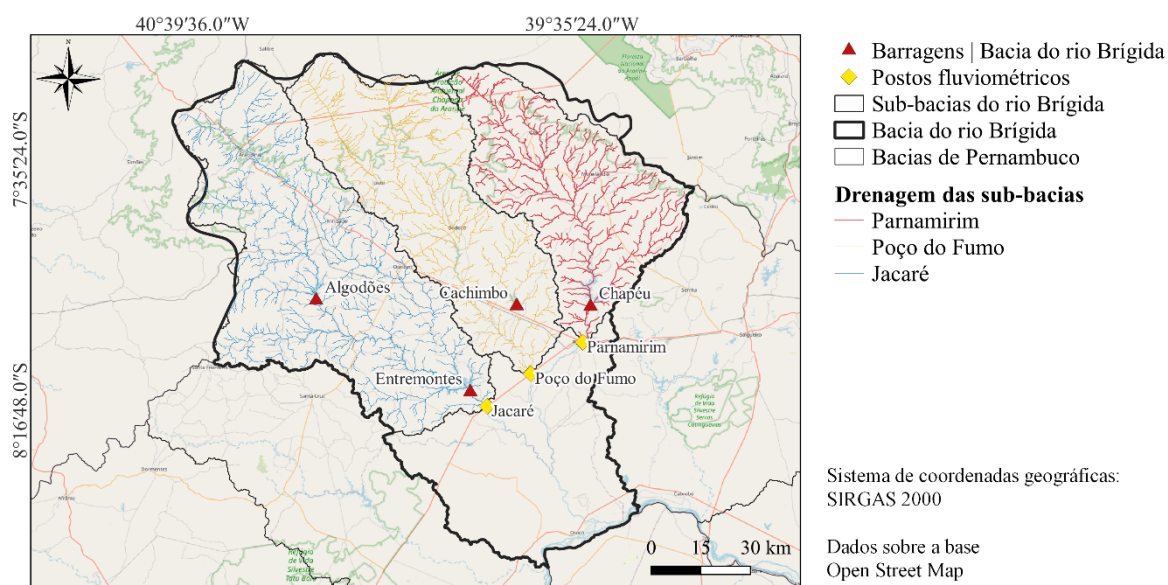


Fonte: A Autora (2023)

4.2.3 Calibração do CAWM em estações na bacia do rio Brígida

Os postos fluviométricos calibrados para a bacia do rio Brígida são mostrados no Mapa 10, bem como as sub-bacias e drenagens correspondentes. Nota-se a presença das barragens Algodões, Entremontes, Cachimbo e Chapéu interferindo nos dados de vazão dos postos à jusante.

Mapa 10 – Localização dos postos fluviométricos e barragens de influência | Bacia do rio Brígida



Fonte: A Autora (2023)

Para as estações presentes nesta bacia, consideraram-se os cenários (i) e (ii) somente para Poço do Fumo, já que as séries de Jacaré e Parnamirim são influenciadas pelas barragens durante todo o período. Os parâmetros determinados e coeficientes estatísticos que representam a eficiência do modelo CAWM são dispostos na Tabela 17. No Gráfico 8 são apresentados os hidrogramas das sub-bacias do rio Brígida.

Tabela 17 – Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM | Bacia do rio Brígida

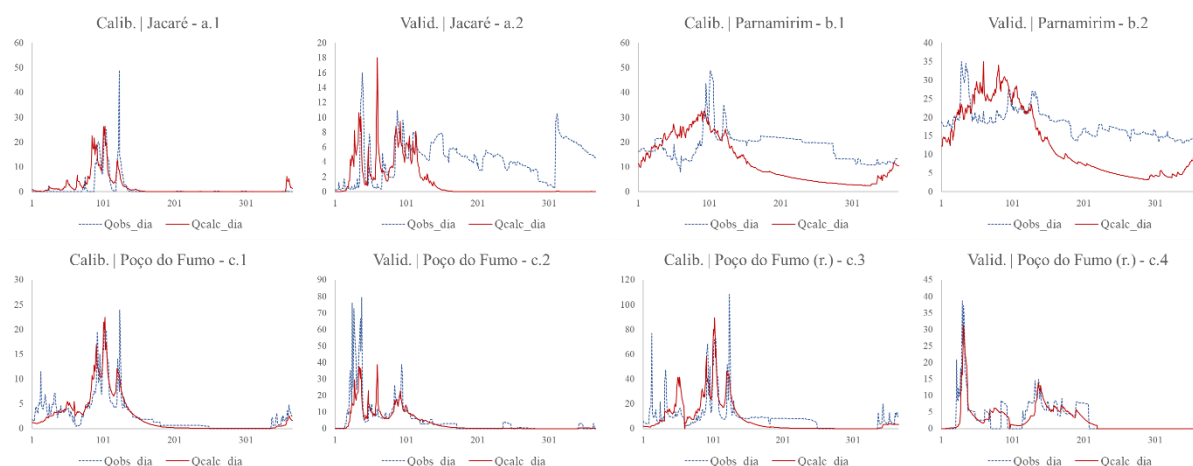
Estação fluviométrica	Kp	p	α	Ks	NSE		NSEsqrt		NSElog		Pbias (%)	
					Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Jacaré	0,6	0,9543	10	0,00233	0,46	-0,06	0,35	0,17	0,10	0,32	38,33	-58,74
Parnamirim	0,6	1,1657	0	0,01200	-0,41	-0,28	-0,28	-0,03	-0,27	0,06	-34,57	-30,44
Poço do Fumo	1	1,0192	10	0,00619	0,63	0,58	0,63	0,76	-2,65	-1,24	-4,04	-27,92
Poço do Fumo (r.)	1	1,0097	10	0,00923	0,65	0,52	0,55	0,59	-0,47	0,34	0,82	-12,39

Fonte: A Autora (2023)

Na análise dos 4 eventos calibrados, adotando-se os critérios apresentados por Motovilov *et al.* (1999), o NSE classificou o ajuste como pelo menos satisfatório em 50%

deles, e para o coeficiente NSE_{sqrtQ} , em 50%. Destes o NSE_{sqrtQ} classificou o ajuste como muito bom no cenário de Poço do Fumo. Avaliando-se o cenário de Poço do Fumo (r.), o NSE e o NSE_{sqrtQ} classificaram a modelagem como satisfatória. No que se refere ao coeficiente $Pbias$, levando em conta a classificação apresentada por Moriasi *et al.* (2007), em 25% do total de eventos, o desempenho foi considerado pelo menos satisfatório. Ao avaliar o cenário sem influência da barragem Cachimbo, o $Pbias$ classificou a modelagem como boa.

Gráfico 8 – Variação da vazão média nas sub-bacias do Brígida



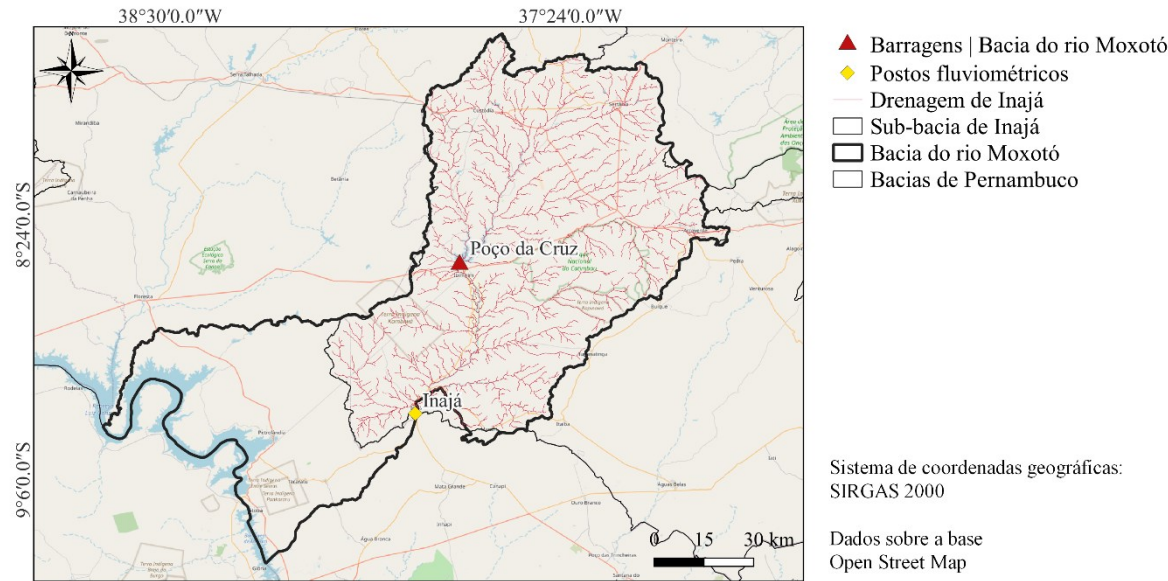
Fonte: A Autora (2023)

Na bacia do rio Brígida, os postos de Jacaré e Parnamirim foram fortemente influenciados pela presença das barragens de Algodões, Entremontes e Chapéu em todo o período de dados, provocando resultados insatisfatórios. A barragem Cachimbo influenciou significativamente nos coeficientes NSE_{logQ} (de -1,24 para 0,34) e $Pbias$ (de -27,92 para -12,39) em Poço do Fumo (r.), refletindo mais uma vez a melhoria dos resultados no cenário de período reduzido.

4.2.4 Calibração do CAWM em estação na bacia do rio Moxotó

Para a bacia do rio Moxotó, apresentam-se a sub-bacia e a drenagem do posto Inajá, bem como a localização da barragem Poço da Cruz, Mapa 11, que exerce forte influência no período total de dados fluviométricos. No caso de Inajá, considerou-se somente um cenário, pois a barragem Poço da Cruz influenciou o comportamento de toda a série fluviométrica. Na Tabela 18, encontram-se os períodos de calibração, de validação, os parâmetros e indicadores de desempenho do modelo.

Mapa 11 – Localização do posto fluviométrico e barragem de influência | Bacia do rio Moxotó



Fonte: A Autora (2023)

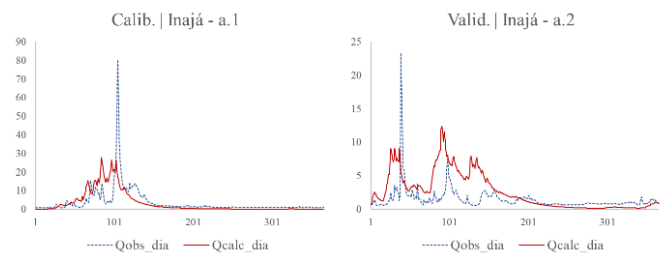
Tabela 18 – Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo CAWM | Bacia do rio Moxotó

Estação fluviométrica		Período de calibração					Período de verificação					
Inajá		01/01/77 a 01/07/86					02/07/86 a 28/02/2023					
Estação fluviométrica	Kp	p	α	Ks	NSE		NSEsqr		NSElog		Pbias (%)	
					Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Inajá	1	1,0483	10	0,00307	0,30	-0,21	0,35	-0,22	-0,43	-2,06	-12,42	81,11

Fonte: A Autora (2023)

Analisando-se os critérios apresentados por Motovilov *et al.* (1999) e Moriasi *et al.* (2007) o desempenho da modelagem foi considerado insatisfatório de acordo com os quatro coeficientes estatísticos. Esse resultado já era esperado, devido à forte influência da barragem Poço da Cruz, o maior reservatório do Estado de Pernambuco, no período total da série temporal de vazão. Observa-se no Gráfico 9 o comportamento da série nos períodos de calibração e de validação, reafirmando o resultado das estatísticas. Diante disso, descartou-se o uso dos resultados de Inajá para simulação de vazões nesta barragem e a determinação da sua vazão regularizada.

Gráfico 9 – Variação da vazão média na sub-bacia do Moxotó



Fonte: A Autora (2023)

4.2.5 Análise geral dos resultados do CAWM

Na análise dos 38 eventos calibrados e dos 13 cenários sem a influência de barragens, adotando-se os critérios apresentados por Motovilov *et al.* (1999) e Moriasi *et al.* (2007), os coeficientes NSE , o NSE_{sqrtQ} e o NSE_{sqrtQ} e $Pbias$ classificaram o ajuste de acordo com os valores apresentados nas Tabelas 19 e 20. Observa-se o quanto as barragens influenciaram nos ajustes das calibrações, melhorando significativamente os resultados.

Tabela 19 – Desempenho do modelo CAWM no total de cenários

Análise dos 38 cenários					
Motovilov <i>et al.</i> (1999)				Moriasi <i>et al.</i> (2007)	
	NSE	NSE _{sqrt}	NSE _{log}		Pbias
Muito boa	5%	18%	8%	Muito boa	34%
Satisfatória	68%	66%	34%	Boa	11%
				Satisfatória	5%
Pelo menos satisfatória	74%	84%	42%	Pelo menos satisfatória	50%

Fonte: A Autora (2023)

Tabela 20 – Desempenho do modelo CAWM nos cenários sem influência de barragens

Análise dos 13 cenários sem influência de barragens					
Motovilov <i>et al.</i> (1999)				Moriasi <i>et al.</i> (2007)	
	NSE	NSE _{sqrt}	NSE _{log}		Pbias
Muito boa	15%	46%	15%	Muito boa	46%
Satisfatória	85%	54%	62%	Boa	15%
				Satisfatória	8%
Pelo menos satisfatória	100%	100%	77%	Pelo menos satisfatória	69%

Fonte: A Autora (2023)

No que se refere à evolução do modelo CAWM, puderam ser observados diversos aprimoramentos com relação aos estudos anteriores citados no tópico 2.7, como: o método de obtenção de dados hidrológicos, que passou a ser baixado através de um plugin do QGIS; a metodologia de cálculo da chuva média, que passou do método de Thiessen para o método IDW; a atualização para uma planilha automatizada por uma macro; o aperfeiçoamento das equações de cálculo do balanço hídrico; e a representação gráfica dos resultados para a variação da vazão média ao invés dos trechos de maiores picos. Tais melhorias constituem-se em ricas contribuições para o desenvolvimento do modelo.

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS CAROS

As características físicas necessárias como dados de entrada para o modelo CAROS estão dispostas na Tabela 21. Todas as barragens foram analisadas com o uso do PE3D, utilizando-se técnicas de geoprocessamento, de forma a validar ou atualizar os dados existentes, quando necessário. As CAV utilizadas neste trabalho estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 21 – Características físicas das barragens em estudo

Barragem	Base de dados	Capacidade máxima (m ³)	Cota de coroamento (m)	Cota de vertedouro (m)	Extensão do vertedouro (m)
BACIA DO RIO CAPIBARIBE					
Goitá	APAC/PE3D	53.028.569	78	70	55
Jucazinho	APAC/COMPESA	203.228.418	299	292	170
Poço Fundo	APAC/COMPESA	10.640.439	478	473	75
Tapacurá	APAC	104.870.609	110	103	32 / 6
BACIA DO RIO PAJEÚ					
Barra do Juá	APAC	59.518.000	407	402	160
Rosário	PE3D	34.541.373	550	546	150
Serrinha II	APAC	311.080.000	400	395	550
BACIA DO RIO BRÍGIDA					
Cachimbo	APAC	31.207.006	411	407	130
Chapéu	APAC	188.000.000	413	407	95
Entremontes	APAC	339.333.700	394	389	360

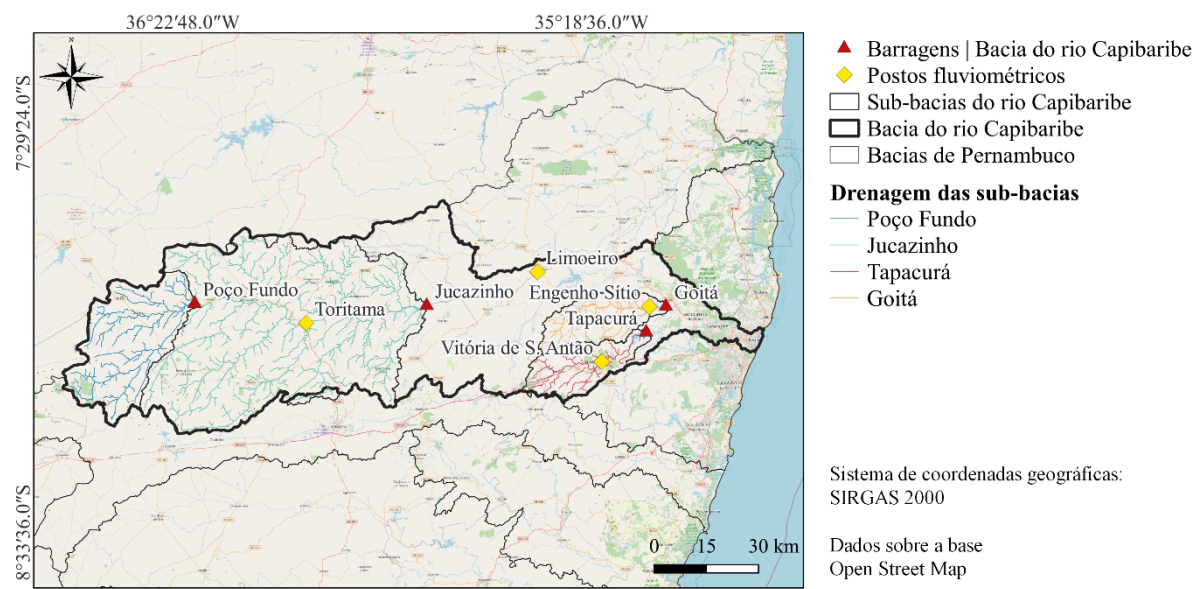
Fonte: A Autora (2023)

As extensões dos vertedouros de todas as barragens estavam coerentes de acordo com a análise do modelo digital de elevação do PE3D, portanto, foram mantidas. A capacidade de armazenamento de Goitá foi atualizada com o utilizando-se o processamento de dados do PE3D, bem como a CAV acima do espelho d'água existente no dia do levantamento. A CAV de Rosário foi totalmente atualizada utilizando-se o PE3D, devido a inconsistências nos dados de elevação, que variavam de 81 a 96 na ficha da APAC.

4.3.1 Vazões regularizadas das barragens do Capibaribe

As barragens abordadas nesta bacia foram Poço Fundo, Jucazinho, Tapacurá e Goitá (Mapa 12). Os postos de referência utilizados para simular as vazões nestas barragens foram, respectivamente, Toritama (r.), Limoeiro (c. r.), Vitória de Santo Antão (c.) e Engenho Sítio, selecionados de acordo com a proximidade, disposição da sub-bacia, semelhança na caracterização física e apresentação de bons ajustes na calibração.

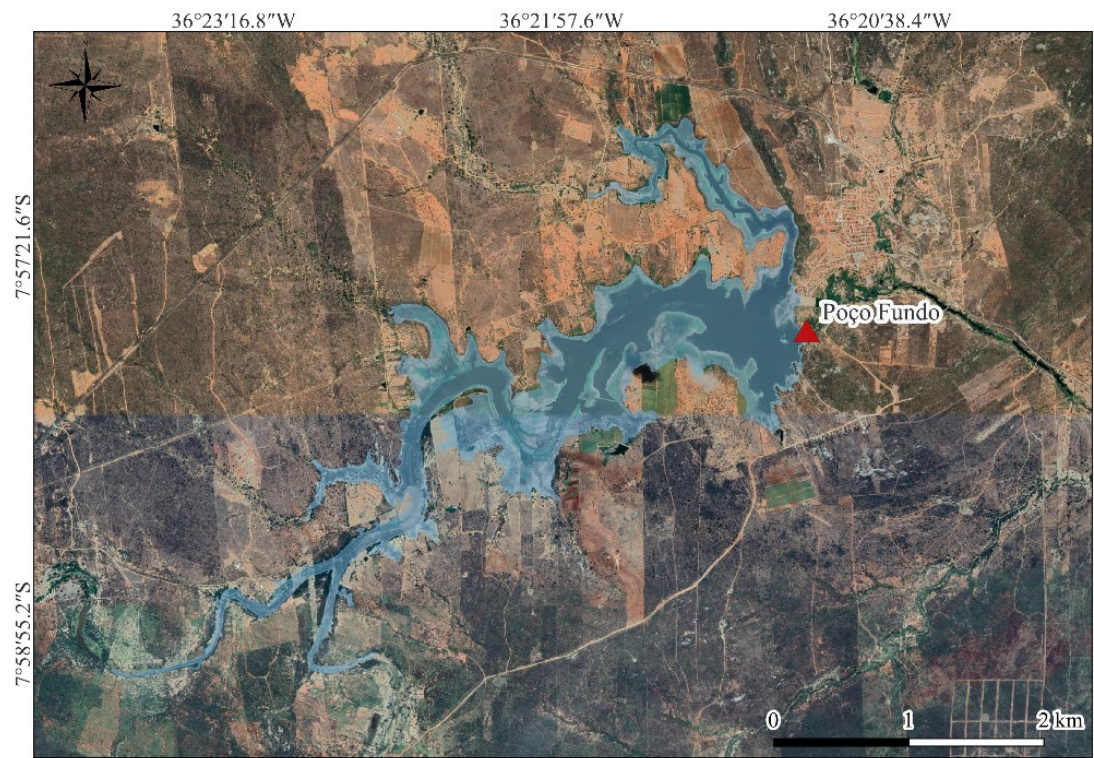
Mapa 12 – Localização das barragens e postos fluviométricos de referência | Bacia do rio Capibaribe



Fonte: A Autora (2023)

As áreas das bacias hidráulicas (Figuras 8 a 11) correspondentes são: Poço Fundo – 3,59 km²; Jucazinho – 13.68 km²; Tapacurá – 10,11 km²; Goitá – 6,62 km² (Figuras 33 a 36).

Figura 8 – Bacia hidráulica do reservatório Poço Fundo



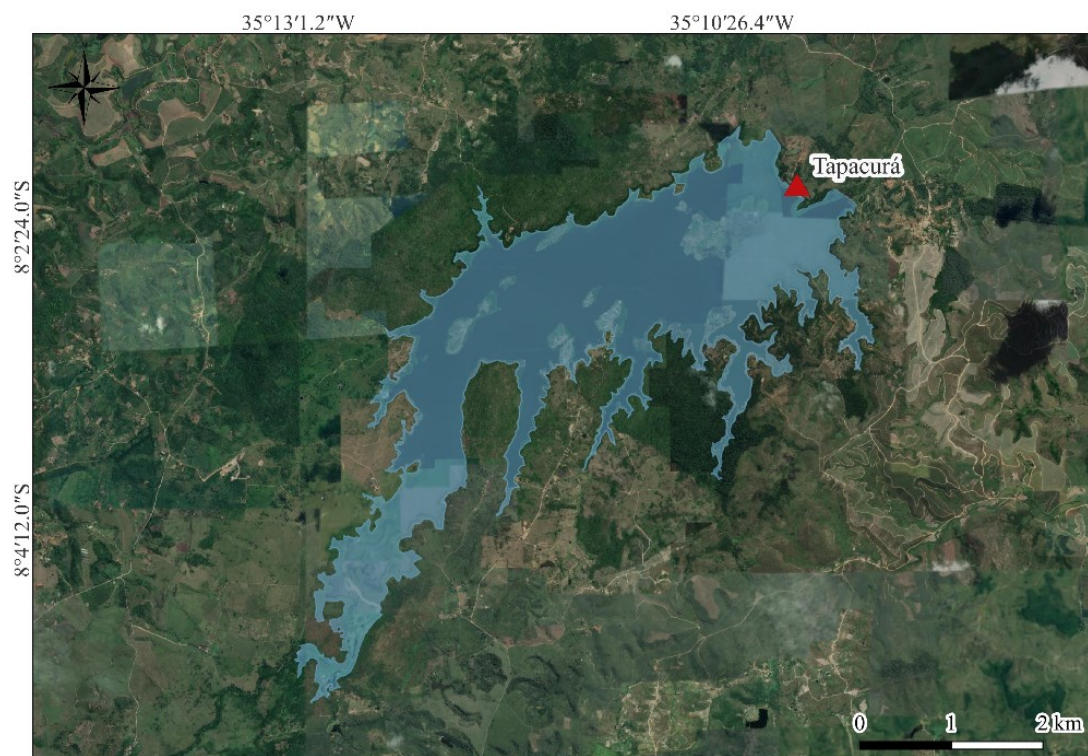
Fonte: A Autora (2023)

Figura 9 – Bacia hidráulica do reservatório Jucazinho



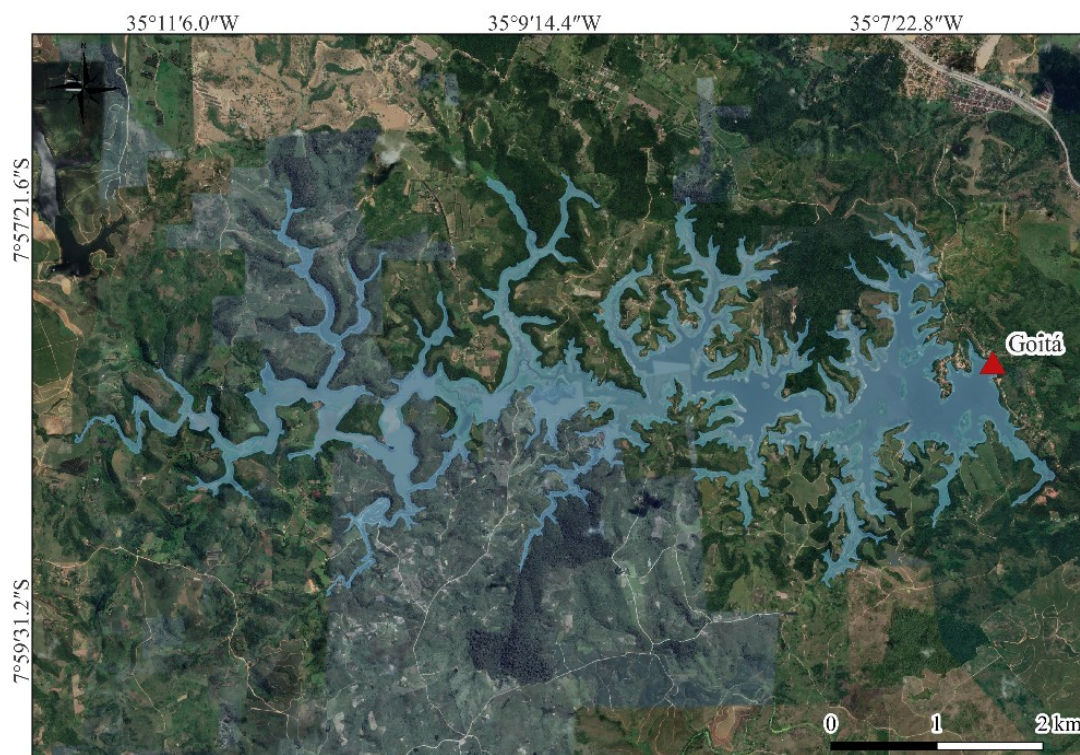
Fonte: A Autora (2023)

Figura 10 – Bacia hidráulica do reservatório Tapacurá



Fonte: A Autora (2023)

Figura 11 – Bacia hidráulica do reservatório Goitá



Fonte: A Autora (2023)

As vazões regularizadas para as quatro barragens abordadas no Capibaribe são mostradas na Tabela 22. Trabalhou-se com dois cenários para cada barragem: a simulação da operação do reservatório com a série fluviométrica obtida no CAWM e pela proporção de áreas de um posto próximo com características semelhantes. Neste último caso, utilizaram-se as séries expandidas pelo método das RNA. Avaliou-se que 27% dos casos apresentaram diferença relativa menor do que 50% entre a vazão regularizada obtida com dados do CAWM e com dados obtidos por proporção de áreas. Para o segundo cenário de Poço Fundo, o reservatório não conseguiu atender a vazão com garantia de 100%.

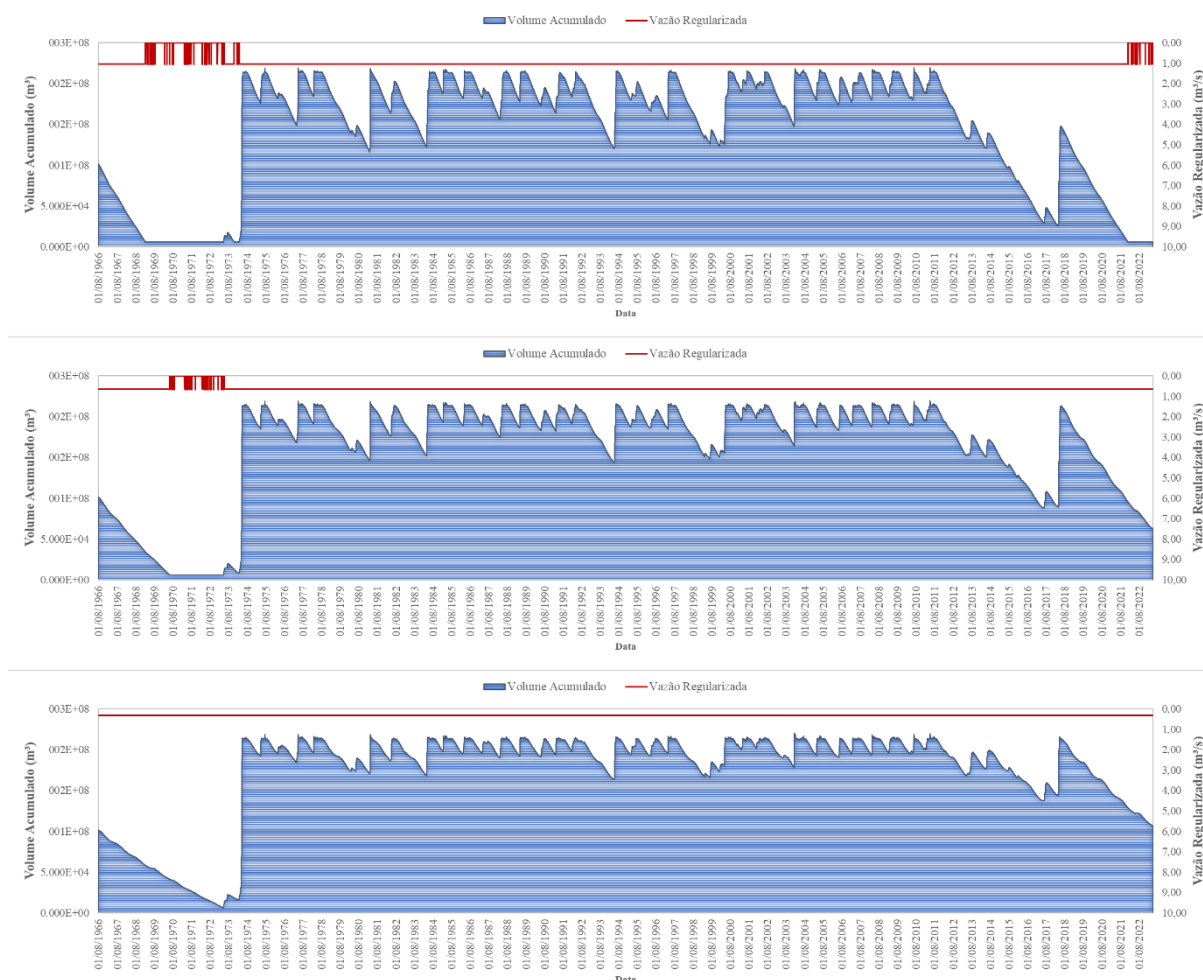
Tabela 22 – Vazões regularizada das barragens abordadas no Capibaribe

Barragem	Série fluviométrica	Q _{90%} (m ³ /s)	Q _{95%} (m ³ /s)	Q _{100%} (m ³ /s)
Goitá	CAWM	1,752	1,001	0,393
	Proporção de áreas: Engenho Sítio (c.)	2,392	1,433	0,421
Jucazinho	CAWM	1,047	0,650	0,316
	Proporção de áreas: Limoeiro (c.)	1,090	0,758	0,475
Poço Fundo	CAWM	0,143	0,074	0,010
	Proporção de áreas: Toritama (c.)	0,049	0,013	0,000
Tapacurá	CAWM	2,795	1,781	0,731
	Proporção de áreas: Vitória S.A. (c.)	2,076	1,390	0,655

Fonte: A Autora (2023)

Como exemplo, apresentam-se os gráficos gerados no modelo CAROS (Gráfico 10), para a barragem Juczinho, representando o volume acumulado e as vazões regularizadas com garantias de 90%, 95% e 100%.

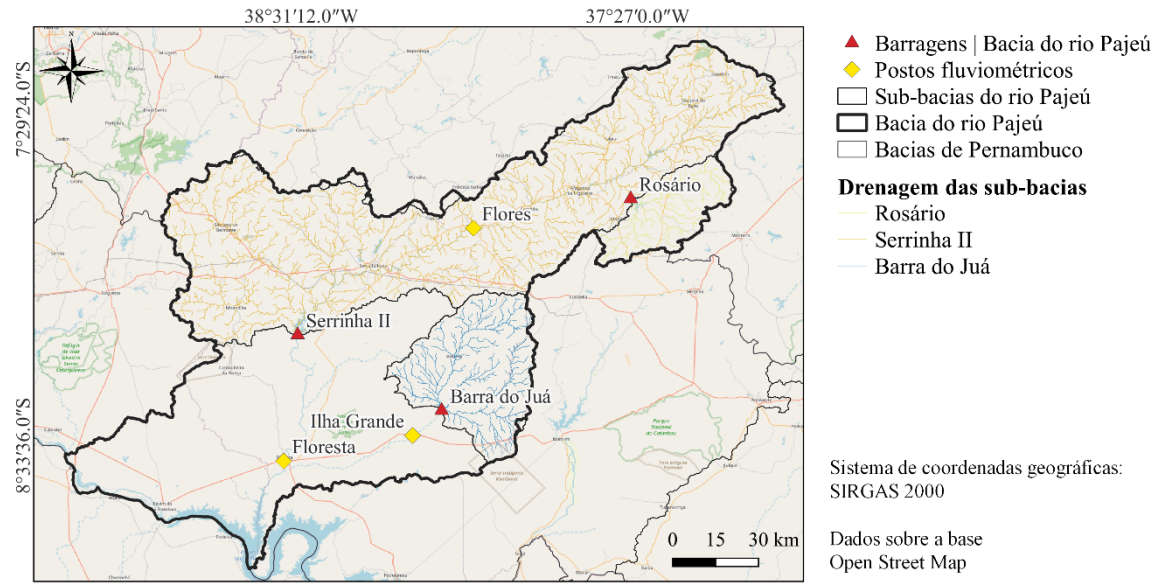
Gráfico 10 – Representação gráfica das vazões regularizadas da barragem Juczinho no modelo CAROS



4.3.2 Vazões regularizadas das barragens do Pajeú

Na bacia do rio Pajeú, as barragens selecionadas foram Rosário, Serrinha II e Barra do Juá (Mapa 13), seguindo os mesmos critérios apresentados no tópico anterior, sendo os postos de referência para simulação de vazões no CAWM, respectivamente, Ilha Grande (r.) e Floresta (r.), que apresentaram ajustes bons ajustes.

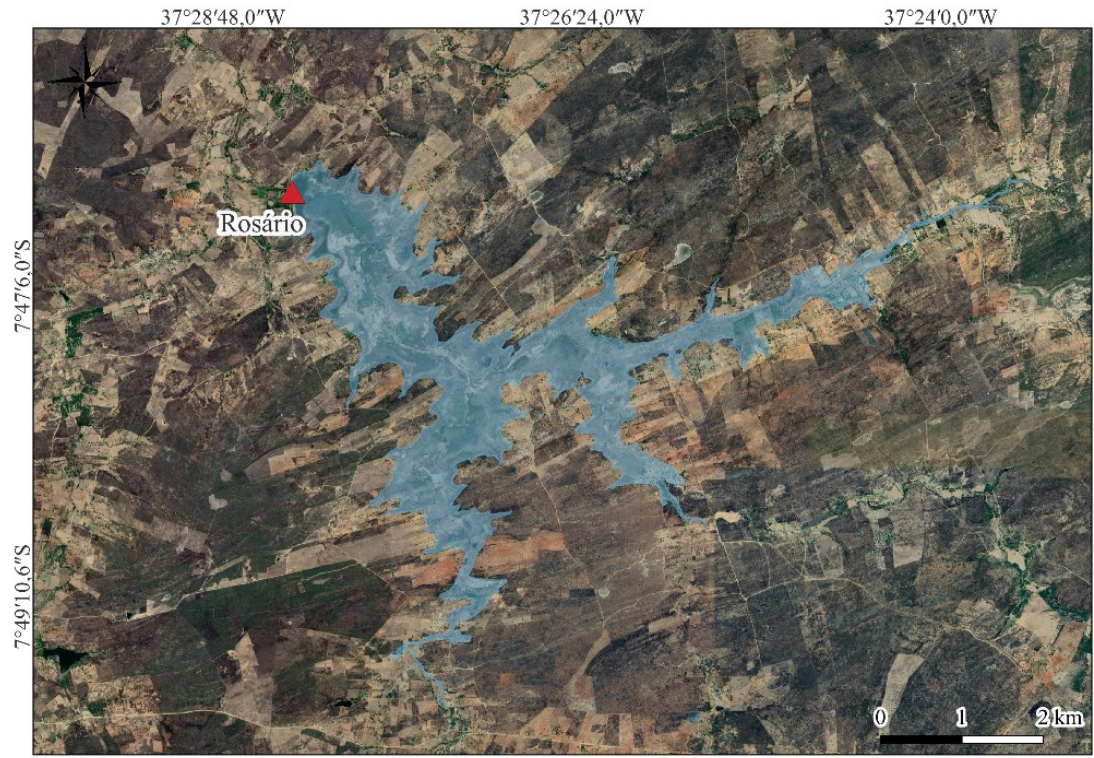
Mapa 13 – Localização das barragens e postos fluviométricos de referência | Bacia do rio Pajeú



Fonte: A Autora (2023)

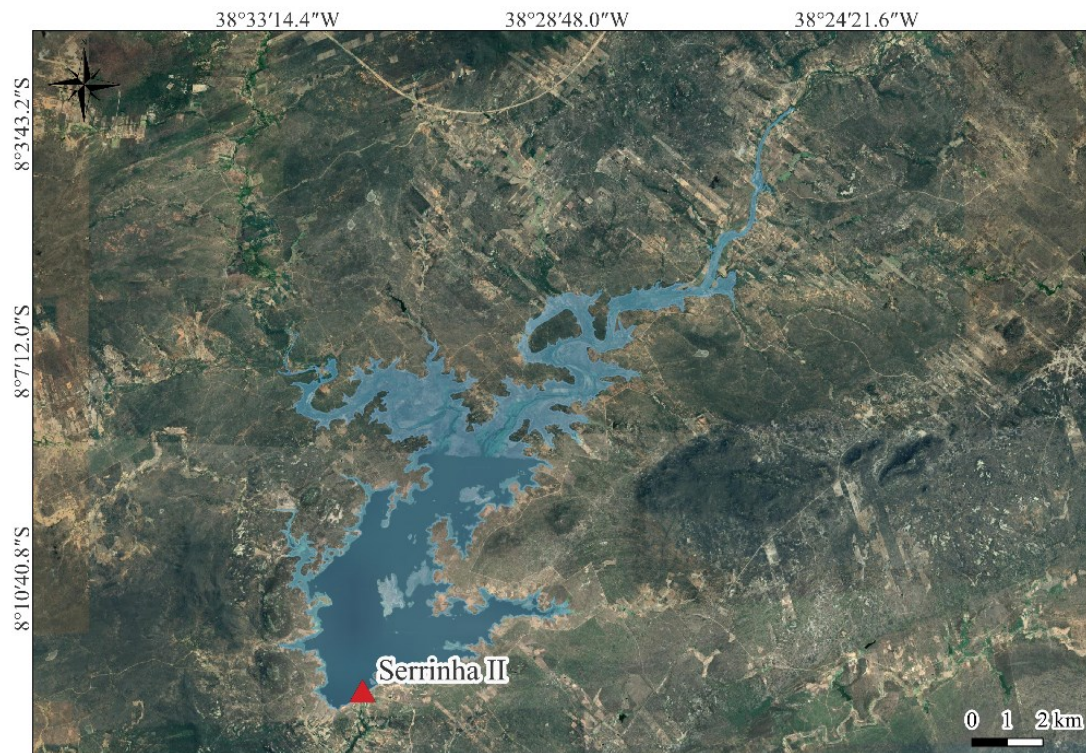
As áreas das bacias hidráulicas (Figuras 12 a 14) correspondentes são: Rosário – 8,68 km²; Serrinha II – 42,68 km² e Barra do Juá – 9,09 km² (Figuras 38 a 40).

Figura 12 – Bacia hidráulica do reservatório Rosário



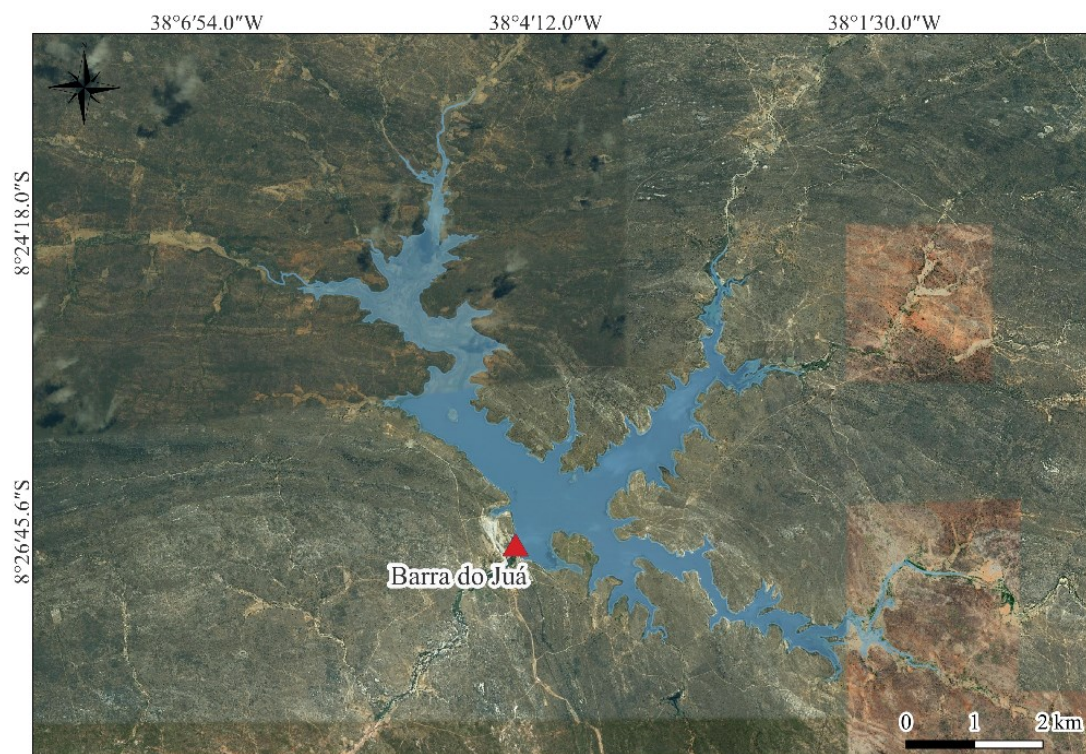
Fonte: A Autora (2023)

Figura 13 – Bacia hidráulica do reservatório Serrinha II



Fonte: A Autora (2023)

Figura 14 – Bacia hidráulica do reservatório Barra do Juá



Fonte: A Autora (2023)

Apresentam-se, na Tabela 23, as vazões regularizadas com garantias de 90%, 95% e 100% para as áreas de estudo da bacia do rio Pajeú. Observou-se que 20% dos casos apresentaram diferença relativa menor do que 50% entre a vazão regularizada obtida com dados do CAWM e com dados obtidos por proporção de áreas.

Tabela 23 – Vazões regularizada das barragens abordadas no Pajeú

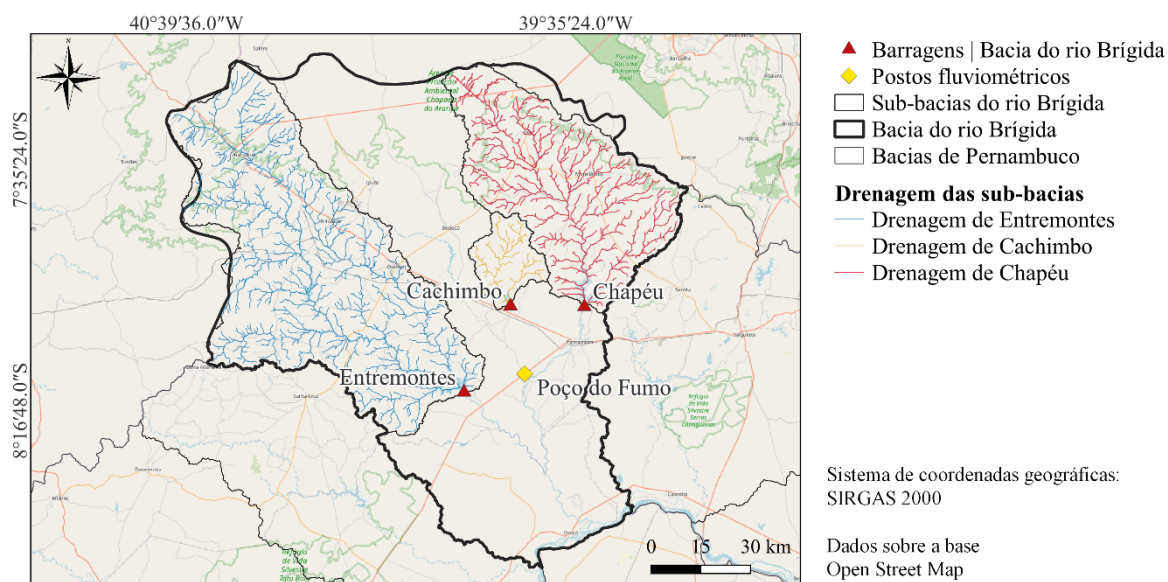
Barragem	Série fluviométrica	Q _{90%} (m ³ /s)	Q _{95%} (m ³ /s)	Q _{100%} (m ³ /s)
Barra do Juá	CAWM	0,638	0,391	0,157
	Proporção de áreas: Ilha Grande	0,526	0,296	0,100
Rosário	CAWM	0,486	0,294	0,145
	Proporção de áreas: Flores	0,196	0,126	0,053
Serrinha II	CAWM	4,827	3,165	1,445
	Proporção de áreas: Floresta	2,421	1,737	1,005

Fonte: A Autora (2023)

4.3.3 Vazões regularizadas das barragens do Brígida

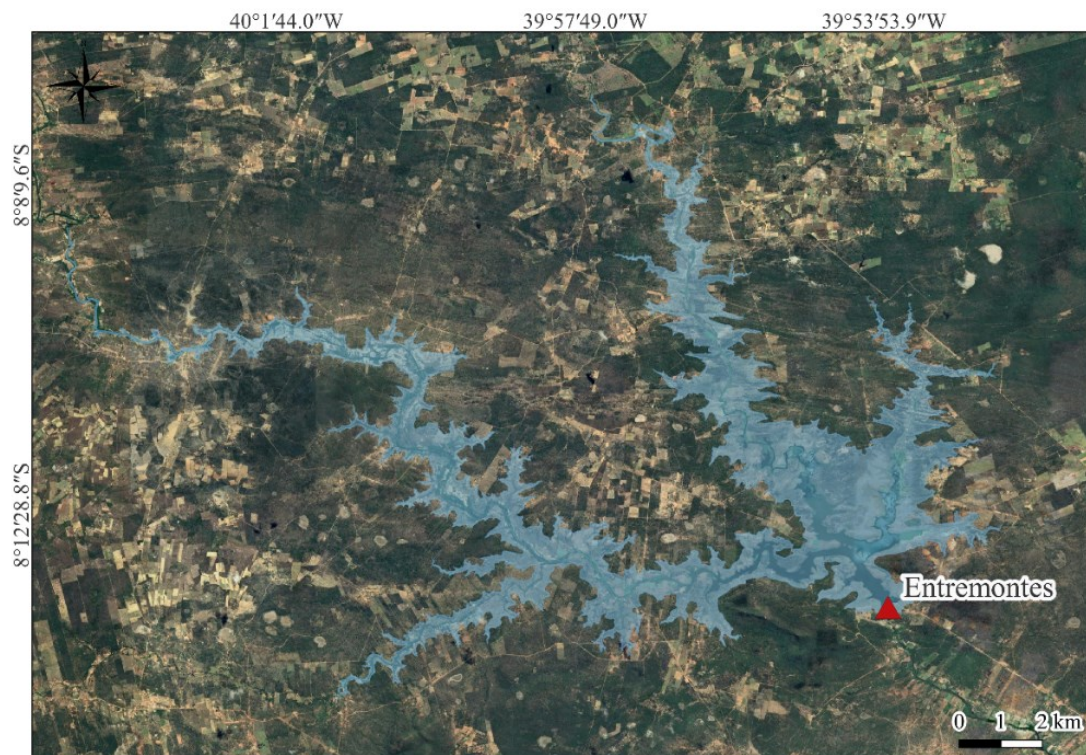
Para esta bacia, abordaram-se as barragens Entremontes, Cachimbo e Chapéu dispostas no Mapa 14. A estação calibrada utilizada para todas as barragens foi Poço do Fumo (r.), que teve resultados satisfatórios. As áreas das bacias hidráulicas (Figuras 15 a 17) correspondentes são: Entremontes – 42,59 km²; Cachimbo – 7,61 km² e Chapéu – 30,83 km².

Mapa 14 – Localização das barragens e postos fluviométricos de referência | Bacia do rio Brígida



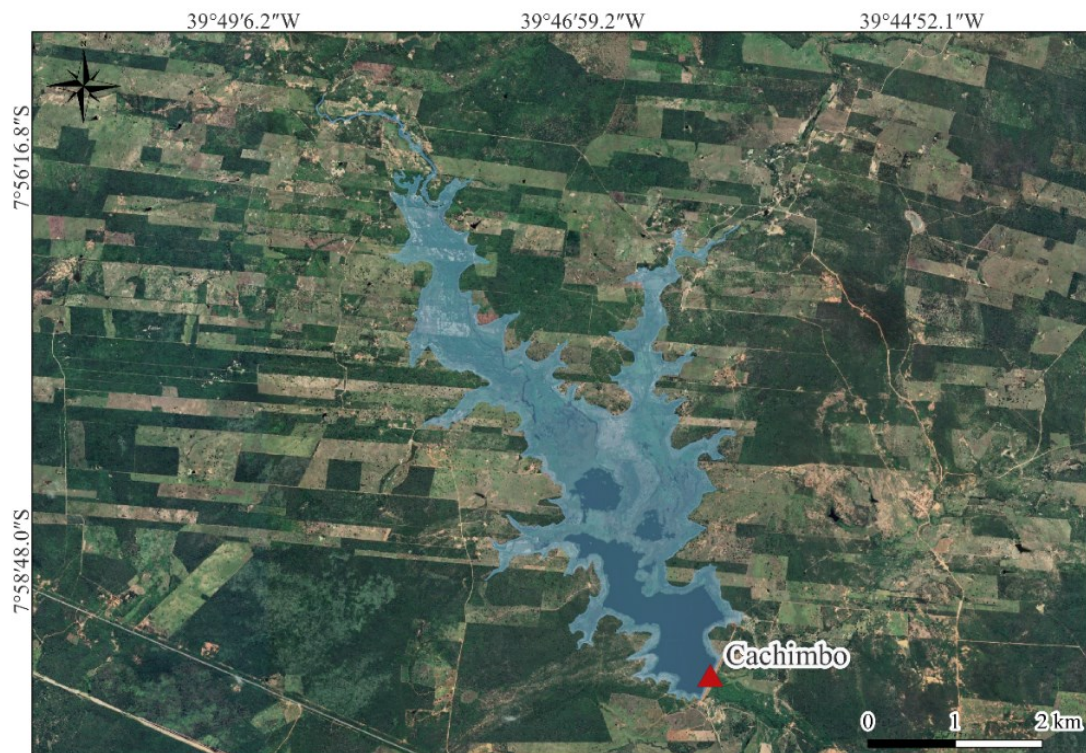
Fonte: A Autora (2023)

Figura 15 – Bacia hidráulica do reservatório Entremontes



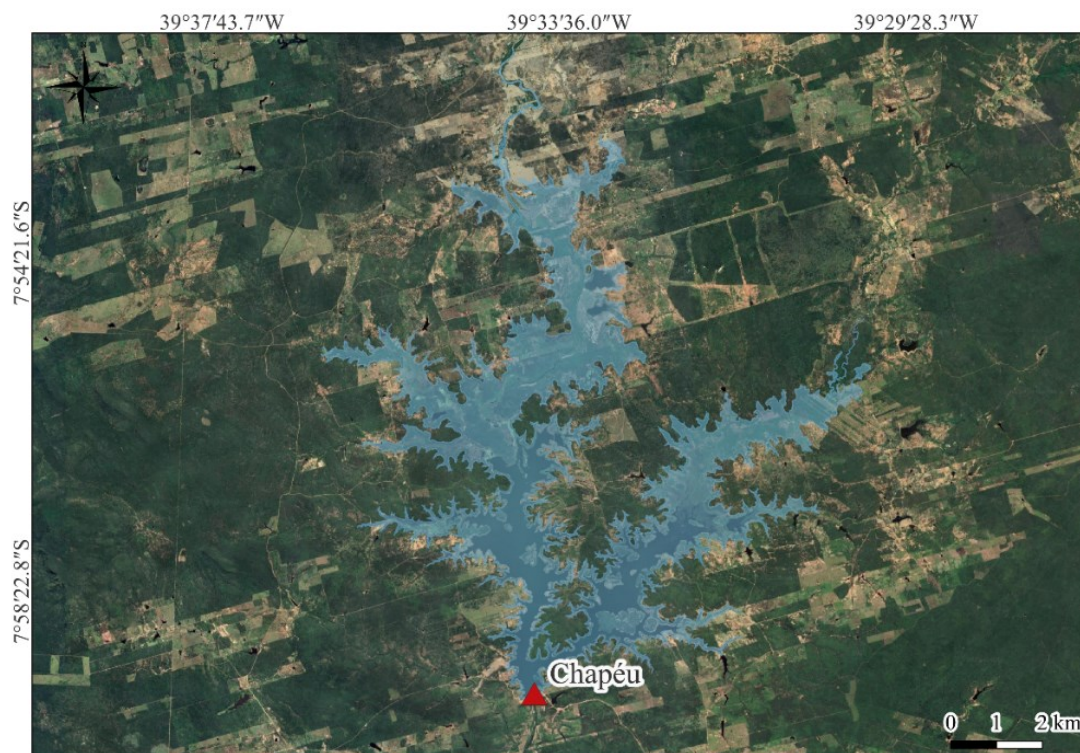
Fonte: A Autora (2023)

Figura 16 – Bacia hidráulica do reservatório Cachimbo



Fonte: A Autora (2023)

Figura 17 – Bacia hidráulica do reservatório Chapéu



Fonte: A Autora (2023)

As vazões regularizadas determinadas para os reservatórios da bacia do rio Brígida são dispostas na Tabela 24. Nesta bacia, o posto Poço do Fumo não foi bem representativo na barragem Cachimbo, interferindo na otimização da vazão para as garantias propostas. A diferença relativa entre os resultados obtidos com as vazões do CAWM e por proporção de áreas foi significativa, para estes casos.

Tabela 24 – Vazões regularizada das barragens abordadas no Brígida

Barragem	Série fluviométrica	Q _{90%} (m ³ /s)	Q _{95%} (m ³ /s)	Q _{100%} (m ³ /s)
Cachimbo	CAWM	0,138	0,048	0,000
	Proporção de áreas: Poço do Fumo	0,000	0,000	0,000
Chapéu	CAWM	2,356	1,756	0,461
	Proporção de áreas: Poço do Fumo	0,220	0,044	0,000
Entremontes	CAWM	1,293	0,614	0,075
	Proporção de áreas: Poço do Fumo	0,379	0,123	0,000

Fonte: A Autora (2023)

4.3.4 Análise geral dos resultados do CAROS

Dos 30 cenários apresentados para as barragens presentes nas bacias dos rios Capibaribe, Pajeú e Brígida, 47% apresentaram diferença relativa menor que 50% entre a vazão regularizada obtida com dados do CAWM e com dados obtidos por proporção de áreas.

No caso das barragens do Capibaribe, as séries expandidas e de falhas preenchidas demonstraram uma promissora melhoria na qualidade dos dados, influenciando positivamente a precisão das simulações.

As vazões sintéticas modeladas pelo CAWM provaram ser essenciais na performance dos resultados, especialmente em regiões com informações escassas ou inconsistentes, como as estações da bacia do rio Brígida. Além disso, a capacidade de expandir as séries temporais para abranger um período mais amplo de dados contribuiu para a obtenção de resultados mais coerentes.

5 CONCLUSÕES

A versão aprimorada do modelo CAWM, com seu foco na redução dos parâmetros a serem calibrados e na eliminação da dependência da resolução espacial do modelo do terreno, demonstrou um desempenho satisfatório para a maioria dos estudos de caso, conforme constatado pelos indicadores de desempenho recomendados.

Como era esperado, a presença de barragens afetou o desempenho do modelo. A aplicação de Redes Neurais Artificiais, na bacia do rio Capibaribe, para preencher lacunas e expandir séries de vazões observadas provou ser uma abordagem positiva, tanto durante a calibração e validação do modelo CAWM quanto na simulação da operação de reservatórios no modelo CAROS.

Além disso, o uso de vazões sintéticas simuladas pelo CAWM mostrou-se benéfico na aplicação do CAROS para determinar as vazões regularizadas em várias barragens localizadas em regiões com diferentes características físicas e climáticas em todo o território pernambucano. Esses resultados destacam a utilidade e a eficácia do modelo aprimorado CAWM em contextos complexos e variados, abrindo caminho para aplicações mais precisas e confiáveis na gestão de recursos hídricos em Pernambuco.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 87, n. 1-2, p. 45-59, 1986a. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9).
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 87, n. 1-2, p. 61-77, 1986b. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90115-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(86)90115-0).
- AGUIAR, V. C. de. **Simulação do sistema de reservatórios do projeto de integração do rio São Francisco diante de cenários de seca hidrológica**. 117 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- ALLALI, H.; ELMEDDAHI, Y.; MOUDJEBER, D.; MAHMOUDI, H.; GOOSEN, M. F. A. Utilizing hydrograph transform methods and a hydrologic modeling system in rainfall-runoff simulation of a semi-arid watershed in Algeria in north-west Africa. **Desalination and Water Treatment**, [S.L.], v. 255, p. 220-228, 2022. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2022.28344>.
- AMARAL, F. E. do; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A. Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 381-391, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020193734>.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**: informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – Brasília: ANA, 2020. 118 p.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro**: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Relatório Síntese / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – Brasília: ANA, 2017. 88 p.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Semiárido**. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3c8b249e-8ec3-4db1-b188-bab3c3c3240f>. Acesso em: 18 ago. 2021.
- ALMEIDA, C. C. da S.; PISCOYA, V. C.; BARRETO, T. N. A.; ROLIM NETO, F. C. Capacidade de infiltração em neossolo flúvico e cambissolo háplico no semiárido pernambucano. **Revista de Geografia**, v. 37, n. 2, p. 1-20, 2020. <http://dx.doi.org/10.51359/2238-6211.2020.240612>.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

ALMEIDA, S. V. G. de; OLIVEIRA, D. A. H. C. de; RÊGO, V. G. de S.; MEDEIROS, F. S. de; FARIAS, S. A. R.; LIMA, J. R. de. Diagnóstico ambiental em trechos do alto Rio Pajeú, Itapetim, Pernambuco: contribuições educativas ao desenvolvimento sustentável. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 15, n. 2, p. 168-176, 2020. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v15i2.6518>.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES L. N.; BAZAME, H. C. Uncertainty quantification for hydrological models based on neural networks: the dropout ensemble. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 35, n. 5, p. 1051–1067, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-01980-8>

ALVES, M. D. de O.; MENEZES, L. de S. Impactos ambientais no baixo curso do rio Pajeú, no trecho urbano de Floresta, Pernambuco. **Revista Cerrados**, v. 19, n. 01, p. 56-83, 2021. <http://dx.doi.org/10.46551/rc24482692202103>.

ANDRÉASSIAN, V; PERRIN, C; MICHEL, C. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. **Journal Of Hydrology**, v. 286, n. 1-4, p. 19-35, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.030>.

ANDREOLLI, I. Simulação de um Reservatório com Previsão de Vários Cenários de Demandas Hídricas em uma Bacia com Poucos Dados Hidrológicos. **Unisanta Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2013.

APAC. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012**. Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Recife: APAC, 2013. 116 p.: il.

ARAÚJO, H. L. **Espacialização da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Brígida no sertão pernambucano para suporte à gestão dos recursos hídricos**. 2019. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Recife.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.

BELLIDO-JIMÉNEZ, J. A.; GUALDA, J. E.; GARCÍA-MARÍN A. P. Assessing Machine Learning Models for Gap Filling Daily Rainfall Series in a Semiarid Region of Spain. **Atmosphere**, v. 12, n. 9, p. 1158-1183, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12091158>

BERGSTRÖM, S; LINDSTRÖM, G. Interpretation of runoff processes in hydrological modelling-experience from the HBV approach. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 16, p. 3535-3545, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10510>.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 69, n. 1-4, p. 119-143, 1984. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90159-8](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(84)90159-8)

BEVEN, K. J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. TOPMODEL. In: SINGH, Vijay P (ed.). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. Cap. 18. p. 627-668.

BÍBLIA de estudo. Almeida Revista e Atualizada. Barueri, SP: Sociedade Bíblica do Brasil, 1999.

BOLOURI-YAZDELI, Y.; BOZORG HADDAD, O.; FALLAH-MEHDIPOUR, E.; MARINÕ, M. A. Evaluation of Real-Time Operation Rules in Reservoir Systems Operation. **Water Resources Management**, v. 28, n. 3, p. 715, 2014. doi:10.1007/s11269-013-0510-1.

ANA, Agência Nacional de Águas. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (Org.). Atlas Nordeste. **Abastecimento Urbano de Água**: Alternativas de Oferta de Água para as Sedes Municipais da Região Nordeste do Brasil e Norte de Minas Gerais. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2006. 80 p.

BOUGUERRA, S. A.; MANSOUR, B. Rainfall-flow Modeling Using a Global Conceptual Model: case of the Beni Bahdel watershed (northwest of Algeria). **Journal Of Water Management Modeling**, [S.L.], p. 1-26, 2023. Computational Hydraulics International. <http://dx.doi.org/10.14796/jwmm.c500>.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Precisão de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 181-196, 2008.

BRAVO, J. M.; PEDROLLO, O. C.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A. R. da. Previsões de curto prazo de vazão afluente ao reservatório de furnas utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 77-88, 2008.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G. DE; GUASSELLI, L. A. Preenchimento de Falhas em Séries Temporais de Precipitação Diária no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 335-344, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352035>.

CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Revista Ambiente e Água**, v. 12, n. 1, p. 57-70, 2017.

CANCHALA-NASTAR, T.; CARVAJAL-ESCOBAR, Y.; ALFONSO-MORALES, W.; CERÓN, W. L.; CAICEDO, E. Estimation of missing data of monthly rainfall in southwestern Colombia using artificial neural networks. **Data in brief**, v. 26, p. 104517, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104517>

CERQUEIRA, K. F.; SANTOS, F. de A. dos; AQUINO, C. M. S. Análise das precipitações pluviométricas em trecho do médio curso da Bacia Hidrográfica do rio Poti (Piauí), a partir do Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 45, n. 1, p. 110-117, 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v45i1.51001>.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61–82, 2008. doi:10.1590/S0103-40142008000200005.

CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, n. 106, p. 45-58, 2015. doi: 10.11606/issn.2316-9036.v0i106p45-58.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>.

CIRILO, J. A. (coord.); BEZERRA, S. de T. M.; COUTINHO, A. P.; OLIVEIRA, A. A. A. de; TEJO, B. R. T.; FORTUNATO, C. F.; CAMPOS, M. L. C.; SOUZA, J. D. S. de; SILVA JÚNIOR, S. F. da. **Relatório do Produto 2: reavaliação da capacidade de acumulação de água dos reservatórios**. Caruaru, 2021. 149 p.: il.

CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; RAMOS, N. M. R.; FORTUNATO, C. F.; SOUZA, J. D. S. de; BEZERRA, S. de T. M. Management of water supply systems from interbasin transfers: case study in the brazilian semiarid region. **Urban Water Journal**, [S.L.], v. 18, n. 8, p. 660-671, 2021. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2021.1925703>.

CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, n. 15, p. 15-33, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>.

DALCIN, A.; PEDROLLO, O.; FINCK, J.; MARQUES, G. Análise do comportamento operacional de reservatórios com redes neurais artificiais: o caso de Luiz Gonzaga, Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 4-21, 2021. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/reg.v18e4>.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos-CGEE; Banco Mundial, 292 p, 2016.

DE VOS, N. J.; RIENTJES, T. H. M.; GUPTA, H. V. Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 20, p. 2840-2850, 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7698>.

EDIJATNO; MICHEL, C. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. **La Houille Blanche**, n. 2, p.113-122, 1989. doi: <https://doi.org/10.1051/lhb/1989007>.

EDIJATNO; NASCIMENTO, N. DE O.; YANG, X.; MAKHLOUF, Z.; MICHEL, C. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. **Hydrological Sciences Journal**, v. 44, n. 2, p. 263-277, 1999. <https://doi.org/10.1080/02626669909492221>.

ELSHABOURY, N.; ELSHOURBAGY, M.; AL-SAKKAF, A.; ABDELKADER, E. M. Rainfall forecasting in arid regions using an ensemble of artificial neural networks. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1900, n. 1, p. 12015-12026, 2021. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1900/1/012015>.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapeamento do uso e cobertura das terras do Semiárido pernambucano**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2017. 100 p.: il.

FARIAS, C. A. S. DE; SANTOS, C. A. G.; CELESTE, A. B. Daily reservoir operating rules by implicit stochastic optimization and artificial neural networks in a semi-arid land of Brazil. **Risk in water resources management**, v. 347, p. 191–197, 2011.

FARIAS, E. V. DE; CURI, W. F.; DINIZ, L. DA S. São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 47, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217170006>.

FEITOZA, M. A. B. **Aplicação de modelo de simulação hidrológica com regionalização de parâmetros para regiões semiáridas**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual**. USA: Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers. 2000. 158 p.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Hydrological processes representation in a semiarid catchment located in Paraíba state with distributed hydrological modelling. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016.

FELIZARDO, L. M. **Aplicação de Sistema de Informação Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma micro bacia urbana**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia – UNESP, Ilha Solteira, 2016.

FERRAZ, G. de F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

FERREIRA, J. A.; TAPAJÓS, R. P.; CONDE, G. A. B. **Redes neurais artificiais para o preenchimento de falhas em séries temporais meteorológicas**. Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2016.

FNIGUIRE, F.; LAFTOUHI, N. E.; AL-MAHFADI, A. S.; EL HIMER, H.; KHALIL, N.; SAIDI, M. E. Hydrological modelling using the distributed hydrological model CEQUEAU in a semi-arid mountainous area: a case study of Ourika watershed, Marrakech Atlas, Morocco. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, v. 7, p. 89-102, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41207-021-00287-y>

FORTUNATO, C. F. **Estratégias de operação de reservatórios em regiões semiáridas**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GAMA, W. M. **Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE)**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Recursos hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

GOMES, L. S.; MAIA, A. G.; MEDEIROS, J. D. F. de. Fuzzified hedging rules for a reservoir in the Brazilian semiarid region. **Environmental Challenges**, [S.L.], v. 4, p. 100125-100134, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2021.100125>.

GOMES, M. M. de A. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na bacia do Rio Capibaribe**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOMES, M. M. de A.; VERÇOSA, L. F. de M.; CIRILO, J. A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. **Natural Hazards**, [S. L.], v. 108, n. 3, p. 3121-3157, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-021-04817-3>.

GOODARZI, E.; ZIAEI, M.; SHOKRI, N. Reservoir operation management by optimization and stochastic simulation. **Journal of Water Supply: Research and Technology—Aqua**, v. 62, n. 3, p. 138-154, 2013.

GRANATA, F.; NUNNO, F. Forecasting evapotranspiration in different climates using ensembles of recurrent neural networks. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 255, p. 107040-107059, set. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107040>.

GROSSI, C. H. **Sistema de Informação Geográfica – Basins 3.0 na modelagem hidrológica da bacia experimental do rio Pardo, SP**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2013.12.001>.

HANSEN, J. R.; REFSGAARD, J. C.; HANSEN, S.; ERNSTSEN, V. Problems with heterogeneity in physically based agricultural catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 342, n. 1-2, p. 1-16, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.016>.

HUANG, P.; LI, Z.; CHEN, J.; LI, Q.; YAO, C. Event-based hydrological modeling for detecting dominant hydrological process and suitable model strategy for semi-arid catchments. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 292-303, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.001>.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e estados**: Pernambuco. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe.html>. Acesso em: 13 ago. 2023.

_____. **Divisão regional do Brasil: microrregiões e mesorregiões geográficas**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?edicao=16163&t=downloads>. Acesso em: 07 set. 2021.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 10 jun. 2023.

JIMENO-SÁEZ, P.; SENENT-APARICIO, J.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J.; PULIDO-VELAZQUEZ, D. A Comparison of SWAT and ANN Models for Daily Runoff Simulation in Different Climatic Zones of Peninsular Spain. **Water**, v. 10, n. 2, p. 192-211, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10020192>

KAN, G.; HE, X.; DING, L.; LI, J.; LIANG, K.; HONG, Y. Study on Applicability of Conceptual Hydrological Models for Flood Forecasting in Humid, Semi-Humid Semi-Arid and Arid Basins in China. **Water (Basel)**, v. 9, n. 10, 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/w9100719>.

KARKI, N.; SHAKYA, N. M.; PANDEY, V. P.; DEVKOTA, L. P.; PRADHAN, A. M. S.; LAMICHHANE, S. Comparative performance of regionalization methods for model parameterization in ungauged Himalayan watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 47, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101359>.

KASHIWAO, T.; NAKAYAMA, K.; ANDO, S.; IKEDA, K.; LEE, M.; BAHADORI, A. A neural network-based local rainfall prediction system using meteorological data on the Internet: a case study using data from the Japan meteorological agency. **Applied Soft Computing**, [S.L.], v. 56, p. 317-330, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2017.03.015>.

LEE, J.; KIM, C.; LEE, J.; KIM, N.; KIM, H. Application of Artificial Neural Networks to Rainfall Forecasting in the Geum River Basin, Korea. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 1448-1462, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/w10101448>.

LI, F.; ZHANG, Y.; XU, Z.; TENG, J.; LIU, C.; LIU, W.; MPELASOKA, F. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 188-201, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.052>.

LIMA, M. C. G. de; SÁ, S. M. F. de; SOUZA, W. M. de; SANTOS, T. E. M. dos. Impactos gerados e a gestão da bacia do rio Capibaribe-PE. **Journal Of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 075-085, 2018. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.3.1.2018.1658.075-085>.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2015.

LIU, K.; WANG, Z.; CHENG, L.; ZHANG, L.; DU, H. TAN, L. Optimal operation of interbasin water transfer multireservoir systems: an empirical analysis from China. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 238, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8242-z>.

LOPES, H. L.; CANDEIAS, A. L. B.; ACCIOLY, L. J. O.; SOBRAL, M. do C. M.; PACHECO, A. P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1210-1219, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662010001100011>.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MANSOURI, S.; FATHIAN, H.; SHAHBAZI, A. N.; LOUR, M. A.; ASAREH, A. Multi objective simulation–optimization operation of dam reservoir in low water regions based on hedging principles. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 14, p. 41581-41590, 2023. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-25089-9>.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: presente state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1-2, p. 103-115, 2014. doi: 10.1007/s10584-014-1310-1.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. **A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico**. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311058940_A_seca_de_2012-15_no_semiarido_do_Nordeste_do_Brasil_no_contexto_historico. Acesso em: 15 ago. 2021.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. DA S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, E. S. P. R.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R. F. V.; ENGLE, N. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. 1. ed. Brasília: Banco Mundial, 2015. 124 p.

MEDEIROS, S. DE S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. DE O.; PAZ, V. P. DA S. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 440 p.

MELLO, F. M. (coord.); PIASENTIN, C (ed.). **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI**: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.: il.; 29 cm

MELO, C. R. de; GUEDES, P. A.; AMORIM, S. F.; ALVES, F. H. B.; CIRILO, J. A. Combined analysis of landslide susceptibility and soil water dynamics in a metropolitan area, northeast Brazil. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 1-14, 2021. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2021.051420>

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Revista Ampliada, 2013.

MING, B.; LIU, P.; CHANG, J.; WANG, Y.; HUANG, Q. Deriving operating rules of pumped water storage using multiobjective optimization: case study of the Han to Wei interbasin water transfer project, China. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, 2017. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000828.

MOHSENI, U.; MUSKULA, S. B. Rainfall-Runoff Modeling Using Artificial Neural Network – A Case Study of Purna Sub-Catchment of Upper Tapi Basin, India. **Environ. Sci. Proc.**, v. 25, n. 1, p. 1-8. <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14232>

MONITOR DE SECAS. **Monitor de Secas**. 2021. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=8&ano=2021>. Acesso em: 02 ago. 2021.

- 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**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- MOTOVILOV, Y. G.; GOTTSCHALK, L.; ENGELAND, K.; RODHE, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98-99, p. 257-277, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00102-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1).
- MOUMEN, Z.; NABIH, S.; ELHASSNAOUI, I.; LAHRACH, A. Hydrologic Modeling Using SWAT: Test the Capacity of SWAT Model to Simulate the Hydrological Behavior of Watershed in Semi-Arid Climate. In **Decision Support Methods for Assessing Flood Risk and Vulnerability**. IGI Global: Hershey, PA, USA, 2020. p. 162–198.
- NASCIMENTO, N. DE O. **Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant**. 1995. Tese de doutorado – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Français.
- NASONOVA, O. N.; GUSEV, E. M.; KOVALEV, E. E. Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 1. Model calibration. **Water Resources**, v. 38, n. 2, p. 155-168, 2011. <http://dx.doi.org/10.1134/S0097807811020102>.
- NOBRE, B. V. B. **Modelagem hidrológica aplicada à avaliação da sinergia hídrica no reservatório Castanhão**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- OLIVEIRA, F. D. T. de. **Modelagem hidrológica com vistas à operação de reservatório de múltiplos usos no semiárido**. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- OLIVEIRA, G. A. de; RIBEIRO, A. A. da S.; CIRILO, J. A. Collaborative spatial information as an alternative data source for hydrodynamic model calibration: a Pernambuco state case study, Brazil. **Natural Hazards**, [S.L.], 2023. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-023-06073-z>
- LOUDIN, L.; ANDREASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; LE MOINE, N. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. **Water Resources Research**, v. 44, 2008. doi:10.1029/2007WR006240.
- PAPAILIOU, I.; SPYROPOULOS, F.; TRICHAKIS, I.; KARATZAS, G. P. Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression for Filling in Missing Daily Rainfall Data. **Water**, v. 14, n. 18, 2892-2905, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14182892>
- PATIL, S.; STIEGLITZ, M. Modeling daily streamflow at ungauged catchments: What information is necessary? **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 1159–1169, 2014. doi: 10.1002/hyp.9660.
- PENG, Y.; CHU, J.; PENG, A.; ZHOU, H. Optimization Operation Model Coupled with Improving Water-Transfer Rules and Hedging Rules for Inter-Basin Water Transfer-Supply

Systems. **Water Resources Management**, v. 29, n. 10, p. 3787-3806, 2015. doi 10.1007/s11269-015-1029-4.

PERNAMBUCO, Governo do Estado de Pernambuco. **Pernambuco Tridimensional**. 2016. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em: 05 ago. 2021.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. **Journal of Hydrology**, v. 242, n. 3-4, p. 275-301, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00393-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00393-0).

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).

POMPERMAYER, R. DO C. **Modelagem hidrológica Técnicas de geoprocessamento aplicadas ao modelo SCS – Soil Conservation Service – Curve Number**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PUSHPALATHA, R.; PERRIN, C.; LE MOINE, N.; ANDRÉASSIAN, V. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. **Journal of Hydrology**, v. 420-421, p. 171-182, 2012. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.055.

QGIS. **QGIS – A liderança do SIG de código aberto**. 2021. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html. Acesso em: 05 ago. 2021.

RAMOS, N. M. R. **Modelagem na gestão de sistemas hídricos integrados do semiárido brasileiro: Estudo de caso do Agreste Pernambucano**. 2017. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

REBOUÇAS, A. da C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.

RIBEIRO, A. A. da Silva; OLIVEIRA, G. A. de; CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; BATISTA, L. F. D. R.; MELO, V. B. Floodplain reconstitution based on data collected via smartphones: a methodological approach to hydrological risk mapping. **RBRH**, [S.L.], v. 25, p. 41-54, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190179>

ROCHA, A. K. P.; BARROS JUNIOR, G. Condições operacionais de barragens destinadas ao armazenamento de água no Vale do Rio Pajeú, Brasil. **Research, Society And Development**, v. 9, n. 10, p. 1-16, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8829>.

ROCHA, M. de J. D.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 451-459, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220190328>.

RODRIGUES, M. T.; RODRIGUES, B. T.; MONTE, B. E. O. Apreciação de métodos de interpolação em dados pluviométricos e sua distribuição espacial. **Revista Brasileira de**

Engenharia de Biosistemas, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2012. doi: <https://doi.org/10.18011/bioeng2012v6n1p01-07>.

SANTOS, C. C. dos. **Modelagem de bacias urbanas com redes neurais artificiais**. 2001. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Brazilian Soil Classification System**, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094001/brazilian-soil-classification-system>.

SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Simulação hidrológica mensal em bacias hidrográficas sem monitoramento fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 115-125, 2011. doi: 10.21168/rbrh.v16n1.p115-125.

SCHAAKE, J. C.; KOREN, V. I.; DUAN, Q.; MITCHELL, K.; CHEN, F. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. **Journal of Geophysical Research, D, Atmospheres**, v. 101, n. 3, p. 7461-7475, 1996. <http://dx.doi.org/10.1029/95JD02892>.

SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? **Hydrological Processes**, v. 21, n.15, p. 2075-2080, 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.6825>.

SILVA, A. P.; SILVA, C. M. Planejamento ambiental para bacias hidrográficas: convergências e desafios na bacia do rio Capibaribe, em Pernambuco-Brasil. **Holos**, v. 1, p. 20-40, 2014. <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2014.1734>.

SILVA, E. L. da; VIEIRA, A. S. Simulação integrada dos recursos hídricos nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo na Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 892-901, 2017. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v12i5.5443>.

SILVA, M. C. de O.; VASCONCELOS, R. S.; CIRILO, J. A. Risk Mapping of Water Supply and Sanitary Sewage Systems in a City in the Brazilian Semi-Arid Region Using GIS-MCDA. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 20, p. 3251-3272, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/w14203251>

SILVA, M. K. A. da; ROSA, R. Metodologia para simulação de vazão em bacias hidrográficas: o caso da sub-bacia hidrográfica Fazenda Letreiro – MG. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 27, n. 48, p. 44-72, 2017. doi: 10.5752/p.2318-2962.2017v27n48p44.

SNISB, SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS. **Consultar barragens**. 2022. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem>. Acesso em: 21 nov. 2022.

SOUZA, R. M. S.; SOUZA, E. S. de; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. de S. Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia**

Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 5, p. 449-455, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p449-455>.

SOUZA, J. D. S. de; CIRILO, J. A.; BEZERRA, S. de T. M.; OLIVEIRA, G. A. de; FREIRE, G. D.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P. Decision Support System for the Integrated Management of Multiple Supply Systems in the Brazilian Semiarid Region. **Water**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 223-240, 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/w15020223>.

SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do semiárido**. 2017. Disponível em: <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 28 jul. 2021.

_____. Delimitação do semiárido – 2021. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2023.

TEIXEIRA, F. J. C.; MACHADO, J. Secas no Brasil: a construção de outro modelo de gestão. **Parcerias Estratégicas Edição Especial**, Brasília, v. 20, n. 41, p. 89-106, 2015.

TOKAR, S.; MARKUS, M. Precipitation-runoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 5, n. 2, p. 156-161, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:2\(156\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(156)).

TRABUCO, A.; ZOMER, R. Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database v2. Figshare. **Dataset**. 2019. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v4>

TRAORE, V. B.; SAMBOU S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. **American Journal of Environmental Protection**, v. 3, n. 1, p. 36-44, 2014. doi: 10.11648/j.ajep.20140301.15.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

USGS, UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled**. 2021. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 10 ago. 2021.

VALERIANO, M. M. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia; São José dos Campos, 2008. 75 p.

VAN OEL, P. R.; KROL, M. S.; HOEKSTRA, A. Y. Application of multi-agent simulation to evaluate the influence of reservoir operation strategies on the distribution of water availability in the semi-arid Jaguaribe basin, Brazil. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 47-48, p. 173-181, 2012. doi:10.1016/j.pce.2011.07.051.

VASCONCELOS, H. X. T. **Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos com suporte de bases de dados de alta definição espacial: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado**. 74 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

VIRÃES, M. V. **Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do Nordeste brasileiro**. 293 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

WANG, M.; ZHANG, L.; BADDOO, T. D. Hydrological Modeling in a Semi-Arid Region Using HEC-HMS. **Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering**, v. 5, n. 3, p. 105-115, 2016. doi: 10.5963/JWRHE0503004.

WILHITE, D.A.; HAYES, M.J.; KNUTSON, C.L. **Drought preparedness planning: Building institutional capacity**. In: Wilhite, D. A (ed.), Drought and water crises: science, technology, and management issues. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. p. 93-135.

XU, W.; CHEN, C. Optimization of operation strategies for an interbasin water diversion system using an aggregation model and improved NSGA-II algorithm. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 5, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001462](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001462).

YASSIN, F.; RAZAVI, S.; ELSHAMY, M.; DAVISON, B.; SAPRIZA-AZURI, G.; WHEATER, H. Representation and improved parameterization of reservoir operation in hydrological and land-surface models. **Hydrology And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 23, n. 9, p. 3735-3764, 2019. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-23-3735-2019>.

ZANON, C. **Watershed Hydrologic Modeling to Assess Interbasin Groundwater Flow in a Tropical Rainforest**. 225 f. Thesis (Degree of Master of Science in Marine, Earth and Atmospheric Sciences), North Carolina State University, Raleigh, 2011.

ZHOU, J.; PENG, T.; ZHANG, C.; SUN, N. Data Pre-Analysis and Ensemble of Various Artificial Neural Networks for Monthly Streamflow Forecasting. **Water**, v. 10, n. 5, 628-644, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10050628>

APÊNDICE A – INTERFACES DAS PLANILHAS UTILIZADAS

Figura A1 – Interface da aba principal do software para cálculo da chuva média pelo método IDW

The screenshot displays the Excel interface for the IDW method software. The ribbon at the top includes tabs for Arquivo, Página Inicial, Inserir, Layout da Página, Fórmulas, Dados, Revisão, Exibir, Desenvolvedor, and Ajuda. The main grid shows columns A through R. Columns A and B are labeled 'POSTOS' and '1' respectively. Columns C and D are labeled 'PESO IDW' and 'Data inicial' respectively. Columns E and F are labeled 'Data final' and 'MÁXIMO' respectively. Columns G through R contain data for the IDW calculation, including dates, 'fração Áreas', 'complemento', 'média corrigida', and 'vazões'. A box labeled 'CALCULE A MÉDIA' is present in the center. A 'diretório da pasta POSTOS' field is located in column M, row 5, with the path 'F:\Users\Sabrina\Desktop\MACRO_ORG\POSTOS'. A 'Centroide' row is highlighted in yellow, showing values -42.406819 and -6.830183. Instructions in Portuguese are provided at the bottom right, including '1 - O diretório da pasta POSTOS deve permanecer na célula M5, antes da execução;', '2 - A longitude e a latitude do centróide devem permanecer na célula L12 e M12, respectivamente, antes', '2 - A planilha deve estar no padrão americano', and 'PASSOS: 1 - RENOMEIE O ARQUIVO PARA NÃO PERDER O ORIGINAL, 2 - ATUALIZE O CAMINHO DO DIRETÓRIO NA CÉLULA M5, 3 - ATUALIZE AS COORDENADAS DO CENTRÓIDE EM L12 E M12, 4 - EXECUTE A MACRO NO BOTÃO 'CALCULE A MÉDIA''.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	POSTOS																	
2	1	1																
3	PESO IDW																	
4	Data inicial																	
5	Data final																	
6	MÁXIMO																	
7																		
8	1/1/1911					MÉDIA 1	fração Áreas	complemento	média corrigida	vazões								
9	1/2/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
10	1/3/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
11	1/4/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
12	1/5/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
13	1/6/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
14	1/7/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
15	1/8/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
16	1/9/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
17	1/10/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
18	1/11/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
19	1/12/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
20	1/13/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
21	1/14/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
22	1/15/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
23	1/16/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
24	1/17/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
25	1/18/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
26	1/19/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
27	1/20/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									
28	1/21/1911					#REF!	#REF!	#REF!	#REF!									

diretório da pasta POSTOS F:\Users\Sabrina\Desktop\MACRO_ORG\POSTOS

CALCULE A MÉDIA

Centroide -42.406819 -6.830183

importante:

1 - O diretório da pasta POSTOS deve permanecer na célula M5, antes da execução;

2 - A longitude e a latitude do centróide devem permanecer na célula L12 e M12, respectivamente, antes

2 - A planilha deve estar no padrão americano

PASSOS:

1 - RENOMEIE O ARQUIVO PARA NÃO PERDER O ORIGINAL

2 - ATUALIZE O CAMINHO DO DIRETÓRIO NA CÉLULA M5

3 - ATUALIZE AS COORDENADAS DO CENTRÓIDE EM L12 E M12

4 - EXECUTE A MACRO NO BOTÃO 'CALCULE A MÉDIA'

Figura A2 – Interface da aba principal do *software* para expansão de séries de vazão pelo método das RNA

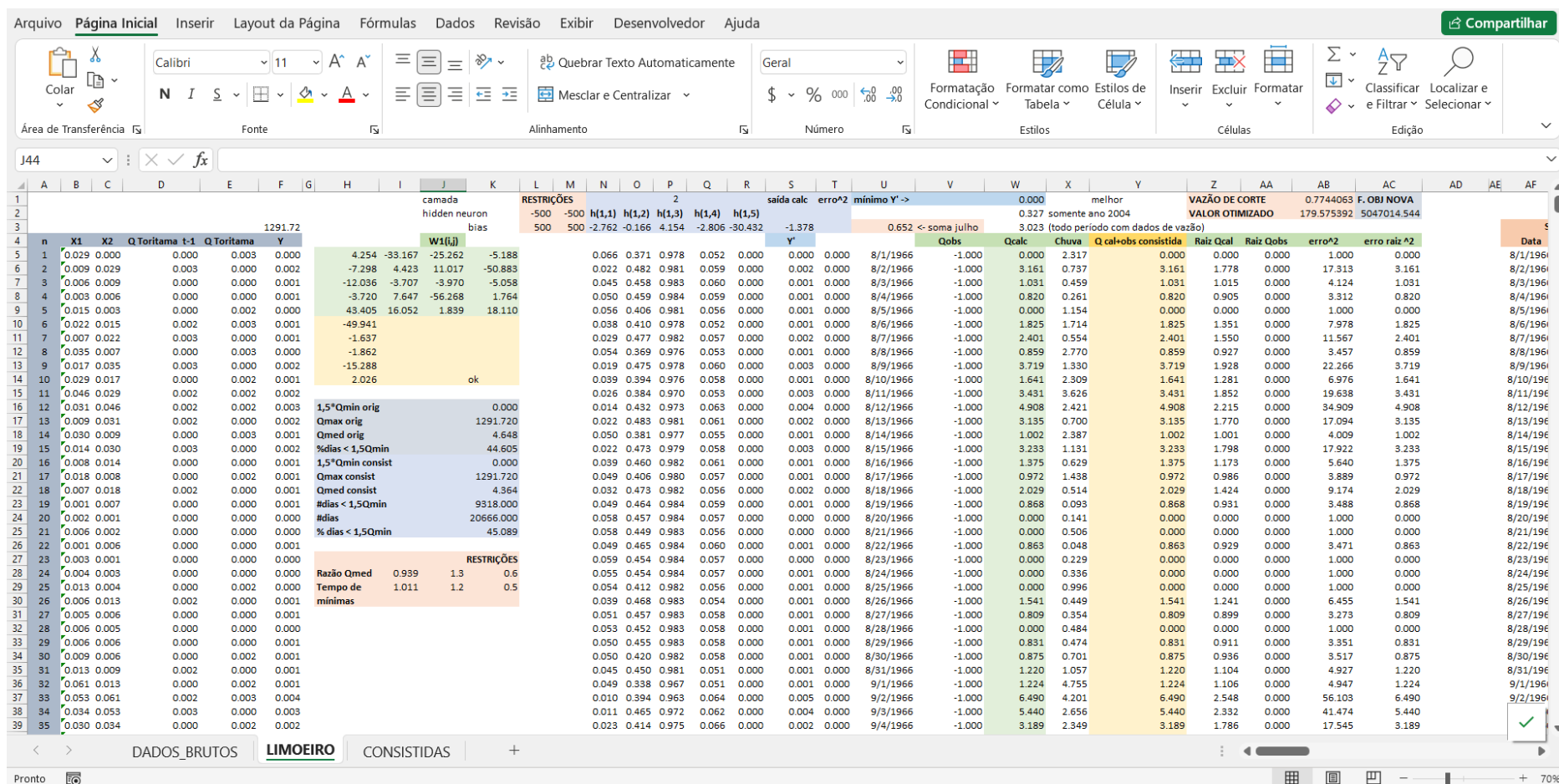


Figura A3 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAWM (parte 1)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Compartilhar

Calibri 11 A⁺ A⁻

Figura A4 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAWM (parte 2)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

Colar Calibri 11 A A Quebrar Texto Automaticamente Geral Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Células Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar Edição

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

M63

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	MODELO CHUVA-VAZÃO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)								
2									
3	Desenvolvido pelo prof. José Almir Cirilo (contato: almir.cirilo@gmail.com)								
4	Versão com aprimoramento computacional feito pelos doutorandos da UFPE Othon Oliveira, Felipe Alves e Vitor Melo. Dezenas de estudantes da UFPE merecem agradecimentos por suas contribuições nas aplicações do modelo.								
5	Citação: CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. RBRH, Porto Alegre, v. 25, p. 1-19, 2020.								
6	https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106								
7		LIMPAR DADOS DE SIMULAÇÃO E PLANILHA(S)	criação da(s) planilha(s) do CAWM	AJUSTAR PERÍODOS DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO	CALIBRAÇÃO				
8	Obs.: Modificar apenas as células com preenchimento amarelo.								
9	As células marcadas em verde devem ser ajustadas se necessário.								
42	TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS PARA OUTRA BACIA/SUB-BACIA								
43	Área da Bacia Principal (Km²)	Não							
44	LÂMINA Q OBS (mm) da Área da Bacia Principal								
45	Correlação x LÂMINA Q OBS (mm) da Área da Principal	#DIV/0!							
46									
47	PARÂMETROS PARA CÁLCULOS								
48	Intervalo de tempo - Δt (s)	86400							
49	Tipo de cálculo do parâmetro do escoamento na calha - K	Área da bacia							
50	Parâmetro do escoamento na calha (calculado) - K	0,02010630							
51	Coefficiente do expoente das perdas na calha (entre 1 e 2) - p	0,820945911							
52	Coefficiente da função de evapotranspiração - α (padrão 1,4)	0,464698098							
53	Capacidade de armazenamento percolação profunda - Gmax	0							
54	Parâmetro de perdas na calha - K_L	0,711645458							
55	Coefficiente do expoente do escoamento na calha ($\sim 5/3$) - b	1,666666667							
56	Capacidade de armazenamento no solo - S - SUBmax	130							
57									
58	INICIALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS								
59	Reserva no solo inicial	0							
60	Profundo corrigido inicial	0							
61	Reserva na calha do rio inicial	0							
62	Rios temporários (0) ou perenes (1)	0							
63									
64	VARIÁVEIS DE DECISÃO								
65	Parâmetro de percolação - Ks	0,0026993							
66	Parâmetro de recarga - β (referência = 2)								
67									

SetUp CAWM

Pronto 80%

Figura A5 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAWM (parte 3)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Compartilhar

Colar Calibri 11 A⁺ A⁻ Quebrar Texto Automaticamente Número Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

O91 fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	MODELO CHUVA-VAZÃO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)									
2										
3	Desenvolvido pelo prof. José Almir Cirilo (contato: almir.cirilo@gmail.com)									
4	Versão com aprimoramento computacional feito pelos doutorandos da UFPE Othon Oliveira, Felipe Alves e Vitor Melo. Dezenas de estudantes da UFPE merecem agradecimentos por suas contribuições nas aplicações do modelo.									
5	Citação: CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. RBRH, Porto Alegre, v. 25, p. 1-19, 2020.									
6	https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106									
7										
8	Obs.: Modificar apenas as células com preenchimento amarelo.	LIMPAR DADOS DE SIMULAÇÃO E PLANILHA(S)	criação DA(S) PLANILHA(S) DO CAWM	AJUSTAR PERÍODOS DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO	CALIBRAÇÃO					
9	As células marcadas em verde devem ser ajustadas se necessário.									
68	BALANÇO HÍDRICO DE LONGO PERÍODO									
69	EVAP POTENCIAL (mm)	PERÍODO TOTAL								
70	EVAP REAL MÁX (mm)	41238,51								
71	LÂMINA Q OBS (mm)	17160,08								
72	VOL PRECIP (mm)	916,93								
73	EVAP REAL (mm)	18077,01								
74	ESCOADO (mm)	14736,32								
75	SOLO INICIO (mm)	891,06								
76	SOLO FIM (mm)	0,00								
77	Armazenamento SUPERFICIAL INICIO (mm)	4,09								
78	Armazenamento SUPERFICIAL FINAL (mm)	0,00								
79	PERDAS (mm)	1,01								
80	BALANÇO (mm)	2444,56								
81		-0,02								
82	INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: GLOBAL									
83	Período completo: Data inicial	INICIAL								
84	Período completo: Data final	01/02/1973								
85	Vazão média observada (m³/s)	31/12/1998								
86	Vazão média calculada (m³/s)	6,27								
87	Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	6,09								
88	NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,71								
89	NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,75								
90	Percentual de tendência - Pbias	0,60								
91	Raiz do erro médio quadrático - RMSE	-2,82								
92	Erro médio absoluto - MAE	15,53								
93	Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	4,04								
94	Coefficiente de determinação - R²	0,54								
95		0,71								

SetUp CAWM +

Pronto 75%

Figura A6 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAWM (parte 4)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Compartilhar

Colar Calibri 11 A A Quebrar Texto Automaticamente Número Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

O91 fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	MODELO CHUVA-VAZÃO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)									
2										
3	Desenvolvido pelo prof. José Almir Cirilo (contato: almir.cirilo@gmail.com)									
4	Versão com aprimoramento computacional feito pelos doutorandos da UFPE Othon Oliveira, Felipe Alves e Vitor Melo. Dezenas de estudantes da UFPE merecem agradecimentos por suas contribuições nas aplicações do modelo.									
5	Citação: CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. RBRH, Porto Alegre, v. 25, p. 1-19, 2020.									
6	https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106									
7										
8	Obs.: Modificar apenas as células com preenchimento amarelo.	LIMPAR DADOS DE	criação da(s) planilha(s)	Ajustar períodos de	CALIBRAÇÃO					
9	As células marcadas em verde devem ser ajustadas se necessário.	SIMULAÇÃO E PLANILHA(S)	DO CAWM	CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO						
96	INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: CALIBRAÇÃO									
97	Data inicial	01/02/1973								
98	Data final	21/12/1976								
99	Vazão média observada (m³/s)	7,72								
100	Vazão média calculada (m³/s)	7,13								
101	Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,84								
102	NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,77								
103	NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,64								
104	Percentual de tendência - Pbias	-7,61								
105	Raiz do erro médio quadrático - RMSE	18,91								
106	Erro médio absoluto - MAE	4,54								
107	Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,40								
108	Coefficiente de determinação - R²	0,85								
109										
110	INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO: VERIFICAÇÃO									
111	Data inicial	22/12/1976								
112	Data final	31/12/1998								
113	Vazão média observada (m³/s)	6,02								
114	Vazão média calculada (m³/s)	5,91								
115	Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,63								
116	NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,75								
117	NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,59								
118	Percentual de tendência - Pbias	-1,74								
119	Raiz do erro médio quadrático - RMSE	14,85								
120	Erro médio absoluto - MAE	3,95								
121	Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,61								
122	Coefficiente de determinação - R²	0,63								
123										

SetUp CAWM +

Pronto 75%

Figura A7 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAROS (parte 1)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Compartilhar

Colar Calibri 11 A Quebrar Texto Automaticamente Geral Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

V24 fx

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T

1 CAROS: CAMPUS AGRESTE RESERVOIR OPERATION MODEL - UFPE. Desenvolvimento: Prof. José Almir Cirilo. Programação: Júlia Daniele Silva de Souza, M.Sc

2

3

4

5 Retirada Variável

6

7 Retirada Constante

8

9

10

11

12 **Dados do Reservatório**

13 Nome JUCAZINHO

14 Capacidade 2,03E+08 m³

15 Cota do coroamento 299,00 m

16 Cota da soleira vert 292,00 m

17 Extensão vert 170,00 m

18 Área posto flu 4174,92 km²

19 Área na barragem 4174,92 km²

20 Percentual de acum. Inicial 0,50

21 Coef descarga vertedouro 2,20

22

23 **Parâmetros de ajuste da Curva Cota-Área-Volume**

24 coef x4 coef x3 coef x2 coef x independ

25 volume-area ---> -1,22E-27 5,16E-19 -1,20E-10 7,47E-02 3,39E+05

26 volume-cota V<=Vref --> -8,70E-25 4,65E-18 -8,93E-12 9,57E-06 2,39E+02

27 volume-cota V>Vref --> -2,47E-32 1,93E-23 -5,42E-15 7,28E-07 2,47E+02

28 Vref = 2239663

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611

612

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

623

624

625

626

627

628

629

630

631

632

633

634

635

636

637

638

639

640

641

642

643

644

645

646

647

648

649

650

651

652

653

654

655

656

657

658

659

660

661

662

663

664

665

666

667

668

669

670

671

672

673

674

675

676

677

678

679

680

681

682

683

684

685

686

687

688

689

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

738

739

740

741

742

743

744

745

746

747

748

749

750

751

752

753

754

755

756

757

758

759

760

761

762

763

764

765

766

767

768

769

770

771

772

773

774

775

776

777

778

779

780

781

782

783

784

785

786

787

788

789

790

791

792

793

794

795

796

797

798

799

800

801

802

803

804

805

806

807

808

809

810

811

812

813

814

815

816

817

818

819

820

821

822

823

824

825

826

827

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

838

839

840

841

842

843

844

845

846

847

848

849

850

851

852

853

854

855

856

857

858

859

860

861

862

863

864

865

866

867

868

869

870

871

872

873

874

875

876

877

878

879

880

881

882

883

884

885

886

887

888

889

890

891

892

893

894

895

896

897

898

899

900

901

902

903

904

905

906

907

908

909

910

911

912

913

914

915

916

917

918

919

920

921

922

923

924

925

926

927

928

929

930

931

932

933

934

935

936

937

938

939

940

941

942

943

944

945

946

947

948

949

950

951

952

953

954

955

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

966

967

968

969

970

971

972

973

974

975

976

977

978

979

980

981

982

983

984

985

986

987

988

989

990

991

992

993

994

995

996

997

998

999

1000

1001

1002

1003

1004

1005

1006

1007

1008

1009

1010

1011

1012

1013

1014

1015

1016

1017

1018

1019

1020

1021

1022

1023

1024

1025

1026

1027

1028

1029

1030

1031

1032

1033

1034

1035

1036

1037

1038

1039

1040

1041

1042

1043

1044

1045

1046

1047

1048

1049

1050

1051

1052

1053

1054

1055

1056

1057

1058

1059

1060

1061

1062

1063

1064

1065

1066

1067

1068

1069

1070

1071

1072

1073

1074

1075

1076

1077

1078

1079

1080

1081

1082

1083

1084

1085

1086

1087

1088

1089

1090

1091

1092

1093

1094

1095

1096

1097

1098

1099

1100

1101

1102

1103

1104

1105

1106

1107

1108

1109

1110

1111

1112

1113

1114

1115

1116

1117

1118

1119

1120

1121

1122

1123

1124

1125

1126

1127

1128

1129

1130

1131

1132

1133

1134

1135

1136

1137

1138

1139

1140

1141

1142

1143

1144

1145

1146

1147

1148

1149

1150

1151

1152

1153

1154

1155

1156

1157

1158

1159

1160

1161

1162

1163

1164

1165

1166

1167

1168

1169

1170

1171

1172

1173

1174

1175

1176

1177

1178

1179

1180

1181

1182

1183

1184

1185

1186

1187

1188

1189

1190

1191

1192

1193

1194

1195

1196

1197

1198

1199

1200

1201

1202

1203

1204

1205

1206

1207

1208

1209

1210

1211

1212

1213

1214

1215

1216

1217

1218

1219

1220

1221

1222

1223

1224

1225

1226

1227

1228

1229

1230

1231

1232

1233

1234

1235

1236

1237

1238

1239

1240

1241

1242

1243

1244

1245

1246

1247

1248

1249

1250

1251

1252

1253

1254

1255

1256

1257

1258

1259

1260

1261

1262

1263

1264

1265

1266

1267

1268

1269

1270

1271

1272

1273

1274

1275

1276

1277

1278

Figura A8 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAROS (parte 2)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Compartilhar

Colar Calibri 11 A A Quebrar Texto Automaticamente Geral Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

AH48 fx

CAROS: CAMPUS AGRESTE RESERVOIR OPERATION MODEL - UFPE. Desenvolvimento: Prof. José Almir Cirilo. Programação: Júlia Daniele Silva de Souza, M.Sc

Retirada Variável **Retirada Constante** **Excluir planilhas de simulação**

Evaporação	
Mês	Evaporação (mm/dia)
1	5,80
2	6,01
3	5,51
4	4,60
5	3,63
6	2,77
7	2,72
8	3,46
9	4,87
10	6,14
11	6,80
12	6,82
Fator de correção da evaporação	1

Média diária mensal de evaporação, conforme dados de alguma estação próxima ao reservatório. Expressa pela Evaporação Total no mês dividida pela Quantidade de dias do mês.

Séries históricas

Data inicial: 01/08/1966
Data final: 30/04/2023

Caminho onde estão localizados os arquivos:
C:\CAROS

Arquivo com a série de dados de precipitação (mm/dia)	Plu_Jucazinho.txt
Arquivo com a série de dados de vazão observada (m³/s)	Flu_Jucazinho.txt

Arquivos .txt para entrada de dados de precipitação e de vazão afluente no formato dd/mm/aaaa;valor.

Menu Principal Constante_1 Constante_2 Constante_3 +

Pronto 70%

Figura A9 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAROS (parte 3)

Arquivo **Página Inicial** Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Compartilhar

Colar Times New Roman 12 A⁺ A⁻ Quebrar Texto Automaticamente Geral Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

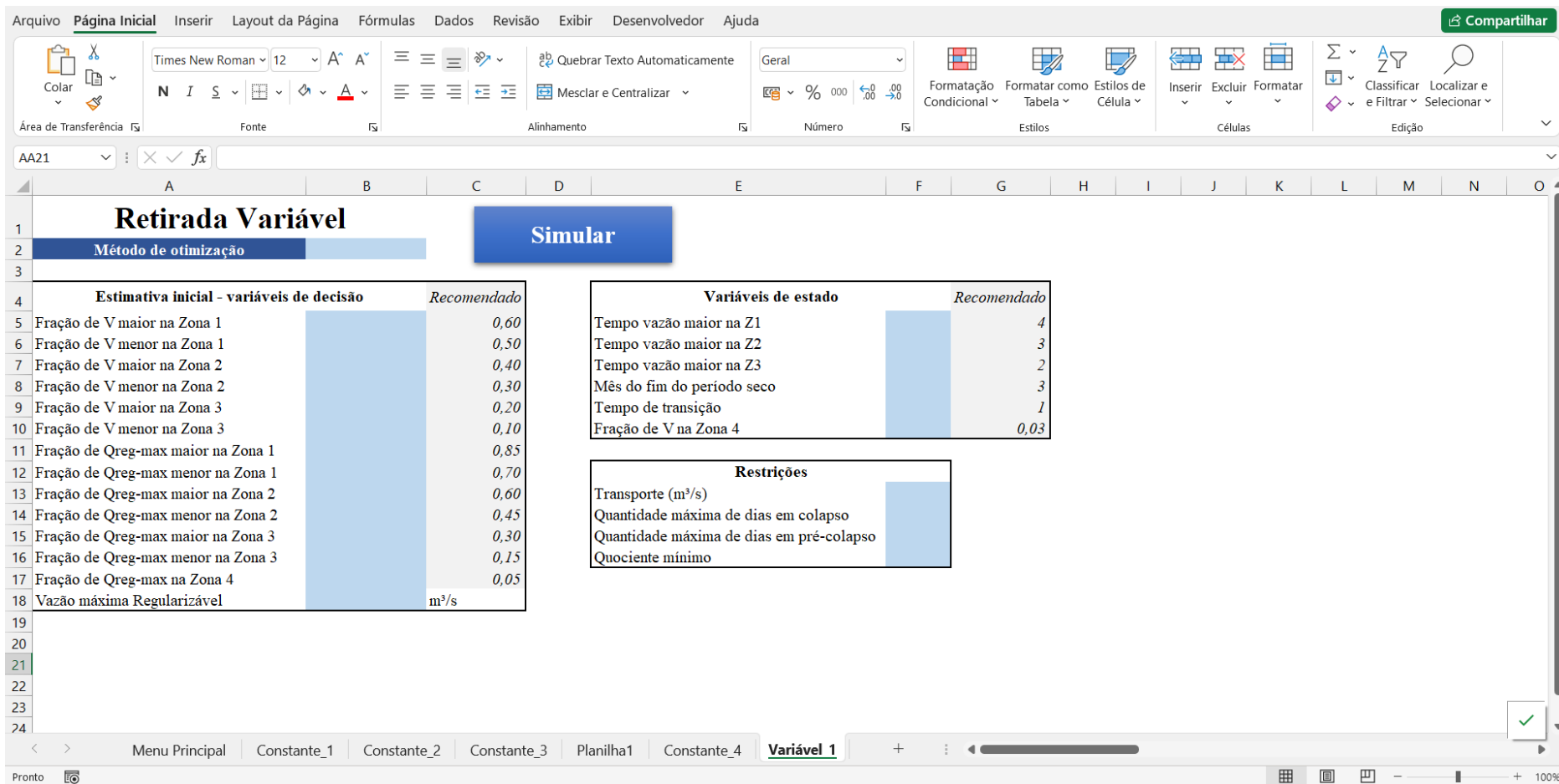
Y19 fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Retirada Constante																			
2	Garantia (%)																			
3																				
4	Método de otimização																			
5																				
6			<i>Garantia</i>																	
7			90%	95%	100%															
8	Estimativa inicial de Qreg (m³/s)																			
9																				
10	Vazão máxima de transporte (m³/s)																			
11																				
12	Fração V de colapso																			
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				

Simular

Menu Principal Constante_1 Constante_2 Constante_3 Planilha1 **Constante_4** Variável 1 + 100%

Figura A10 – Interface da aba principal do *software* do modelo CAROS (parte 4)



APÊNDICE B – DADOS DE COTA X ÁREA X VOLUME

Tabela B1 – Cota x Área x Volume de Poço Fundo

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
458	-	-
460	890	233
461	2.683	350
462	33.542	37.719
463	69.912	92.745
464	104.322	147.618
465	169.526	254.800
466	293.302	476.638
467	498.454	885.363
468	802.813	1.563.091
469	1.219.235	2.601.822
470	1.755.602	4.103.442
471	2.414.823	6.179.720
472	3.194.831	8.952.309
472,5	3.628.125	10.640.439
473	4.088.587	12.552.748
474	5.084.075	17.122.460
475	6.164.308	22.812.753

Tabela B2 – Cota x Área x Volume de Jucazinho

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
238	-	-
239	51.703	8.765
240	127.051	101.152
241	187.992	259.459
242	282.896	495.648
243	372.948	827.183
244	436.516	1.231.137
245	499.300	1.698.497
246	591.992	2.239.663
247	691.453	2.883.643
248	765.964	3.613.047
249	831.250	4.412.049
250	897.537	5.276.418
251	971.704	6.210.949
252	1.052.856	7.952.050
253	1.143.844	9.139.741
254	1.227.286	10.363.368
255	1.306.295	11.632.517
256	1.383.690	12.956.881
257	1.462.020	14.346.290
258	1.543.570	15.810.726
259	1.630.381	17.360.352
260	1.724.265	19.005.530
261	1.826.816	20.756.849
262	1.939.429	22.625.140
263	2.063.315	24.621.508

264	2.199.511	26.757.349
265	2.348.900	29.044.372
266	2.512.225	31.494.626
267	2.690.101	34.120.519
268	2.883.034	36.934.842
269	3.091.433	39.950.795
270	3.315.624	43.182.003
271	3.555.870	46.642.544
272	3.812.379	50.346.971
273	4.085.326	54.310.332
274	4.374.862	58.548.197
275	4.681.132	63.076.677
276	5.004.288	67.912.448
277	5.344.508	73.072.777
278	5.702.005	78.575.537
279	6.077.046	84.439.238
280	6.469.966	90.683.046
281	6.881.183	97.326.805
282	7.311.211	104.391.060
283	7.760.679	111.897.083
284	8.230.341	119.866.891
285	8.721.094	128.323.273
286	9.233.994	137.289.809
287	9.770.267	146.790.896
288	10.331.327	156.851.768
289	10.918.789	167.498.521
290	11.534.486	178.758.135
291	12.180.482	190.658.495
292	12.859.087	203.228.418
293	13.572.876	216.497.670
294	14.324.695	230.496.995
295	15.117.686	245.258.131
296	15.955.296	260.813.841
297	16.841.291	277.197.926
298	17.779.775	294.445.257
299	18.775.204	312.591.790
300	19.832.398	331.674.597

Tabela B3 – Cota x Área x Volume de Tapacurá

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
73	1.968	492
74	16.569	11.333
75	26.033	32.596
76	48.492	69.688
77	82.897	132.749
78	160.230	246.594
79	255.199	446.021
80	386.854	743.235
81	547.917	1.211.870
82	738.349	1.845.796
83	958.282	2.689.085
84	1.352.024	3.767.347

85	1.754.218	5.291.911
86	2.130.301	7.231.015
87	2.549.421	9.559.292
88	2.946.564	12.295.172
89	3.309.618	15.415.035
90	3.682.271	18.910.097
91	4.098.843	22.798.175
92	4.531.232	27.105.576
93	4.953.305	31.838.930
94	5.393.414	37.012.056
95	5.895.444	42.643.675
96	6.325.406	48.752.869
97	6.786.047	55.303.649
98	7.319.190	62.336.991
99	7.815.304	69.906.839
100	8.314.581	77.966.326
101	8.804.774	86.513.267
102	9.207.267	95.520.313
103	9.567.260	104.870.609
104	10.065.341	114.515.682
105	10.489.545	124.652.384
106	10.900.301	135.162.502
107	11.296.053	146.023.875
108	11.675.275	157.212.048
109	12.036.470	168.700.274
110	12.378.171	180.459.507

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B4 – Cota x Área x Volume de Goitá

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
46	30.000	15.000
47	65.000	62.500
48	110.000	150.000
49	170.000	290.000
50	250.000	500.000
51	335.000	792.500
52	440.000	1.180.000
53	580.000	1.690.000
54	740.000	2.350.000
55	920.000	3.180.000
56	1.150.000	4.215.000
57	1.410.000	5.495.000
58	1.690.000	7.045.000
59	2.010.000	8.895.000
60	2.350.000	11.075.000
61	2.891.886	13.218.921
62	3.259.656	14.417.139
63	3.751.580	17.962.790
64	4.112.216	21.894.470
65	4.468.554	26.186.777
66	4.821.516	30.831.211
67	5.195.000	35.838.713

68	5.566.890	41.221.333
69	5.911.420	46.964.087
70	6.206.611	53.028.569
71	6.473.493	59.363.595
72	6.843.982	66.013.912
73	7.240.741	73.058.065
74	7.699.158	80.520.816
75	8.204.238	88.474.801
76	8.763.602	96.955.008
77	9.370.887	106.023.268
78	9.989.467	115.706.245

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B5 – Cota x Área x Volume de Rosário

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
535	18.676	-
536	142.519	52.776
537	473.513	478.245
537,5	703.286	586.071
538	969.511	1.352.753
539	1.762.956	2.905.643
540	2.328.522	4.938.936
541	2.958.186	7.568.711
542	3.799.592	10.931.888
543	4.833.158	15.234.162
544	5.911.575	20.613.535
545	6.992.017	27.067.154
546	7.907.413	34.541.373
547	8.780.537	42.871.183
548	9.917.174	52.204.862
549	11.238.609	62.766.697
550	12.750.965	74.764.422

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B6 – Cota x Área x Volume de Serrinha II

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
371	44.606	32.303
372	151.815	130.514
373	296.784	224.300
374	501.637	754.025
375	920.000	1.464.844
376	1.328.900	2.589.294
377	2.137.500	4.322.494
378	2.856.550	6.819.519
379	3.632.000	10.063.794
380	4.767.200	14.263.394
381	6.195.850	19.744.919
382	7.802.300	26.743.994
383	9.525.950	35.408.119
384	11.338.650	45.840.419

385	13.586.150	58.302.819
386	15.049.400	72.620.594
387	17.018.500	88.654.544
388	19.375.550	106.850.000
389	21.597.500	127.340.000
390	23.966.650	150.120.000
391	25.996.350	175.100.000
392	29.017.250	202.610.000
393	32.431.600	233.330.000
394	39.412.550	269.250.000
395	44.227.600	311.080.000
396	50.863.600	358.620.000
397	55.372.900	411.740.000
400	71.600.000	600.000.000

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B7 – Cota x Área x Volume de Barra do Juá

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
388,18	-	-
389	81.000	40.000
389,5	143.000	91.000
390	245.000	197.000
390,5	375.000	340.000
391	526.000	572.000
391,3	627.000	747.000
392	913.000	1.279.000
393	1.507.000	2.467.000
393,5	1.900.000	3.287.000
394	2.298.000	4.350.000
394,5	2.700.000	5.575.000
395	3.149.000	7.059.000
396	4.108.000	10.659.000
396,5	4.584.000	12.794.000
397	5.125.000	15.242.000
398	6.345.000	20.929.000
399	7.780.000	27.934.000
400	9.542.000	36.526.000
401	11.648.000	47.047.000
402	13.961.000	59.518.000
403	16.818.199	73.942.202
404	20.183.471	90.808.360
405	24.164.859	110.265.739
406	28.861.852	132.550.704
407	34.382.914	157.909.078

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B8 – Cota x Área x Volume de Entremontes

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
364	-	-
365	35.000	17.500

366	87.000	78.500
367	98.000	221.000
368	440.000	540.000
369	668.000	1.094.000
370	1.108.000	1.982.000
371	1.679.000	3.375.500
372	2.621.000	5.525.500
373	3.764.000	8.716.500
374	4.688.000	12.941.000
375	6.112.000	18.341.000
376	7.922.000	28.358.000
377	9.785.000	34.210.000
378	11.854.000	45.029.000
379	14.385.000	58.148.500
380	16.527.000	73.604.500
381	18.755.000	91.245.500
382	20.906.000	111.575.500
383	25.032.000	135.044.000
384	28.480.000	161.800.000
385	31.832.000	191.956.000
386	35.291.000	225.517.500
387	38.938.000	262.632.000
388	42.755.000	303.478.500
388,8	46.220.177	339.333.700
389	46.833.000	348.297.500
390	51.295.000	397.386.500
391	56.127.400	450.576.000
392	60.992.300	507.976.000
393	66.074.700	569.602.000
394	71.376.500	635.485.000
395	76.899.500	705.655.000
396	82.645.500	780.142.000
397	88.616.300	858.976.000

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B9 – Cota x Área x Volume de Cachimbo

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
395	450	-
396	10.800	6.625
397	78.390	60.220
398	348.570	263.700
399	749.880	812.920
400	1.249.470	1.812.600
401	2.251.800	3.563.235
402	3.055.590	6.216.930
403	3.725.460	9.607.455
404	4.508.730	13.724.550
405	5.371.470	18.664.650
406	6.243.480	24.472.120
407	7.226.280	31.207.000
407,25	7.440.310	33.291.800
407,5	7.665.350	35.279.800

407,75	7.888.130	37.341.000
408	8.108.350	39.476.900
409	9.106.714	48.165.781
410	10.157.824	57.915.710

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.

Tabela B10 – Cota x Área x Volume de Chapéu

Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
391	1.000.000	2.000.000
392	2.500.000	4.000.000
393	3.800.000	8.000.000
394	5.200.000	14.000.000
395	6.500.000	18.000.000
396	8.000.000	20.000.000
397	9.625.000	26.000.000
398	11.000.000	28.000.000
399	12.500.000	40.000.000
400	14.500.000	48.000.000
401	15.000.000	70.000.000
402	17.500.000	92.000.000
403	19.750.000	110.000.000
404	22.000.000	130.000.000
405	23.500.000	144.000.000
406	24.500.000	182.000.000
406,5	26.135.370	188.000.000
407	27.500.000	208.000.000
408	28.500.000	238.000.000
409	30.040.885	266.201.944
410	31.171.231	294.713.834
411	31.940.822	321.743.267
412	32.263.254	346.310.885
413	32.044.512	367.334.595
413,4	31.782.978	374.489.838

Em azul, dados atualizados; em negrito, dados do vertedouro.