



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VERA NÚBIA CARVALHO DE FARIAS

**MODELAGEM E PREVISÃO DE CHEIAS RÁPIDAS A PARTIR DE CHUVAS  
ESTIMADAS POR RADAR METEOROLÓGICO**

Recife - PE

2025

VERA NÚBIA CARVALHO DE FARIAS

**MODELAGEM E PREVISÃO DE CHEIAS RÁPIDAS A PARTIR DE CHUVAS  
ESTIMADAS POR RADAR METEOROLÓGICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:** Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

**Orientador:** José Almir Cirilo

**Coorientador:** Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Recife - PE

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Farias, Vera Núbia Carvalho de.

Modelagem e previsão de cheias rápidas a partir de chuvas estimadas por radar meteorológico / Vera Núbia Carvalho de Farias. - Recife, 2025.

136f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: José Almir Cirilo.

Coorientação: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.

Inclui referências e apêndices.

1. Modelagem hidrológica; 2. Inundações rápidas; 3. Radar; 4. Modelo HEC-HMS; 5. Modelo CAWM. I. Cirilo, José Almir. II. Fragoso Júnior, Carlos Ruberto. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**VERA NÚBIA CARVALHO DE FARIAS**

**MODELAGEM E PREVISÃO DE CHEIAS RÁPIDAS A PARTIR DE  
CHUVAS ESTIMADAS POR RADAR METEOROLÓGICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 29/05/2025

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo, UFPE

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior, UFAL

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Luciene Dias de Melo (examinadora externa)  
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Silvanete Severino da Silva (examinadora externa)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (examinador interno)  
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Para Maria Clara, Louise e Nicolas, meus filhos amados, com quem cocrio uma jornada de descobertas, desafios e conquistas.  
Com vocês, aprendo, evoluo e me torno alguém melhor a cada dia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS.

Ao meu orientador, professor José Almir Cirilo, pela generosa confiança em minha capacidade para conduzir esta pesquisa. Seu conhecimento, visão e força de vontade são fontes constantes de inspiração.

Ao Instituto Federal de Alagoas, pelo tempo concedido e pelas condições propícias à realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos, que, por meio de seus professores e da grade curricular, contribuiu significativamente para o meu amadurecimento científico.

À professora Luciene Melo, coordenadora do Radar de Alagoas, pelo espaço disponibilizado para a obtenção e o processamento dos dados, e, sobretudo, pela parceria, incentivo, conselhos e apoio constantes ao longo desta jornada.

Aos membros da banca examinadora, professores Alfredo Ribeiro, Artur Coutinho, Jaime Cabral, Luciene Melo e Silvanete Silva, cujas valiosas contribuições e observações enriqueceram este trabalho.

Ao meu marido, Arnaldo Jr., por todo o amor, paciência, apoio e pelas inúmeras trocas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus pais, José Barbosa e Vera Lúcia, por sempre me permitirem crescer em liberdade, e aos meus irmãos, Veranilda, Veranessa e Cledson, pela torcida incondicional.

Um agradecimento especial e de coração ao irmão Clebson, cuja parceria e apoio foram fundamentais em toda trajetória desta pesquisa.

À querida Geiza, cuja parceria foi fundamental ao longo desta caminhada, especialmente nos momentos mais desafiadores, que não foram poucos, durante esses anos de dedicação e perseverança.

Por fim, registro minha mais profunda gratidão a Vinícius Costa, da APAC, e a Mariana Campos, assim como a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta trajetória acadêmica. agradeço ao amigo que ganhei nessa jornada, cuja amizade levarei comigo para além dos muros da universidade: Armando Dias. Também sou imensamente grata às amigas queridas que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e companheirismo ao longo de todo esse percurso.

*Eu te louvarei, Senhor, com todo o meu coração;  
contarei todas as tuas maravilhas.*

— Salmo 9:1

## RESUMO

As cheias rápidas estão entre os desastres naturais mais recorrentes e letais em escala global devido à sua alta frequência, severidade e ao curto tempo de resposta após a ocorrência de precipitações intensas. A modelagem e a previsão desses eventos ainda representam um desafio, especialmente em bacias hidrográficas montanhosas, caracterizadas pela complexidade do relevo e pela escassez de estações pluviométricas. Nesse contexto, o uso de estimativas de precipitação obtidas por radar meteorológico surge como uma alternativa estratégica para suprir a limitação de dados observacionais em superfície, ao mesmo tempo que aprimora a representação espacial da chuva. Este estudo, portanto, tem como objetivo investigar o uso dessas estimativas como entrada na modelagem hidrológica, a fim de avaliar seu potencial no aprimoramento da representação da vazão e, conseqüentemente, na melhoria da previsão de cheias rápidas. A metodologia envolveu a modelagem de eventos de cheia na bacia hidrográfica do rio Mundaú, localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco, utilizando dois modelos com diferentes estruturas conceituais: o Campus Agreste Watershed Model (CAWM-V), com configuração concentrada, e o Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), com configuração semi-distribuída. Simulações adicionais foram realizadas com dados de pluviômetros automáticos, buscando verificar se as estimativas fornecidas pelo radar oferecem vantagens significativas em relação às medições convencionais realizadas em superfície. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio das métricas NSE,  $R^2$ , PBIAS e RSR. Na etapa de calibração, os modelos alimentados com precipitação estimada por radar apresentaram valores de NSE superiores a 0,8, enquanto com precipitação observada na estação, os valores variaram entre 0,68 e 0,78. Já na fase de validação, os modelos com dados de radar alcançaram valores de NSE entre 0,62 e 0,76, ao passo que, com dados de estação, o NSE ficou abaixo de 0,57. Os resultados indicam que os modelos alimentados com estimativas de precipitação por radar apresentaram desempenho significativamente superior em comparação aos que utilizaram dados convencionais. Esse desempenho reforça o potencial do radar para aplicações em previsão de enchentes e em sistemas de alerta antecipado.

**Palavras-chaves:** Modelagem hidrológica. Inundações rápidas. Radar. Modelo HEC-HMS. Modelo CAWM.

## ABSTRACT

Flash floods are among the most recurrent and lethal natural disasters worldwide due to their high frequency, severity, and short response time following intense precipitation events. The modeling and forecasting of these events remain challenging, particularly in mountainous watersheds characterized by complex relief and a scarcity of rain gauge stations. In this context, the use of precipitation estimates derived from weather radar emerges as a strategic alternative to compensate for the lack of surface observational data while improving the spatial representation of rainfall. This study, therefore, aims to investigate using such estimates as input in hydrological modeling to evaluate their potential for enhancing streamflow representation and, consequently, improving flash flood forecasting. The methodology involved modeling flood events in the Mundaú river basin, located between the states of Alagoas and Pernambuco, using two models with different conceptual structures: the Campus Agreste Watershed Model (CAWM-V), with a concentrated configuration, and the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), with a semi-distributed configuration. Additional simulations were conducted using data from automatic rain gauges aiming to verify whether radar-derived estimates offer significant advantages over conventional surface measurements. The results were evaluated using NSE,  $R^2$ , PBIAS, and RSR metrics. During the calibration phase, the models provided with radar-estimated precipitation showed NSE values above 0.8, while those using gauge-observed precipitation ranged between 0.68 and 0.78. In the validation phase, the models driven by radar data achieved NSE values between 0.62 and 0.76, whereas the station data models recorded NSE values below 0.57. These results indicate that the radar-based precipitation estimate models performed significantly better than those relying on conventional data. This performance highlights the potential of radar-derived inputs for applications in flood forecasting and early warning systems.

**Keywords:** Hydrological modeling. Flash floods. Radar. HEC-HMS model. CAWM model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de enchente e inundação . . . . .	23
Figura 2 – Esquema simplificado de um sistema de alerta de cheias . . . . .	26
Figura 3 – Retroespalhamento do sinal eletromagnético emitido pelo radar ao interagir com gotas de chuva . . . . .	29
Figura 4 – a) Emissão de ondas eletromagnéticas por radares convencional e de dupla polarização; b) Aprimoramento da caracterização dos hidrometeoros com o uso do radar de dupla polarização . . . . .	33
Figura 5 – Esquema de funcionamento do radar meteorológico: varredura volumétrica, ângulo de elevação e geração dos produtos PPI e CAPPI . . . . .	37
Figura 6 – Precipitação (refletividade - SRI) estimada sobre o estado de Alagoas . . . . .	38
Figura 7 – Detecção de chuva pelo radar e registro de pluviômetro . . . . .	41
Figura 8 – Detecção de chuva pelo radar e registro de pluviômetro . . . . .	41
Figura 9 – Esquema ilustrativo das variáveis e processos do modelo CAWM V . . . . .	45
Figura 10 – Processos da geração de escoamento em escala local . . . . .	50
Figura 11 – Inundação da cidade de São José da Laje – AL . . . . .	57
Figura 12 – Danos à infraestrutura devido à enchente do rio Mundaú em Murici – AL . . . . .	57
Figura 13 – Localização geográfica da bacia do rio Mundaú . . . . .	58
Figura 14 – Perfil do rio Mundaú entre a nascente e a foz . . . . .	59
Figura 15 – Isoietas de precipitação média anual da bacia do rio Mundaú . . . . .	61
Figura 16 – Hipsometria da bacia do rio Mundaú . . . . .	62
Figura 17 – Declividade da bacia do rio Mundaú . . . . .	63
Figura 18 – Solos da bacia hidrográfica do rio Mundaú . . . . .	64
Figura 19 – Uso e cobertura da bacia hidrográfica do rio Mundaú . . . . .	65
Figura 20 – Estrutura geral do trabalho . . . . .	66
Figura 21 – Localização dos radares meteorológicos SIRMAL e APAC . . . . .	68
Figura 22 – Distribuição espacial dos pontos de grade das estações virtuais para extração de dados de precipitação estimada por radar meteorológico . . . . .	71
Figura 23 – Distribuição espacial das estações telemétricas utilizadas no estudo . . . . .	72
Figura 24 – Mapas globais de CN - (a) solo seco, (b) solo com umidade média e (c) solo úmido . . . . .	76

Figura 25 – Mapa CN para a bacia do rio Mundaú . . . . .	77
Figura 26 – Etapas da modelagem no CAWM-V . . . . .	78
Figura 27 – Etapas de Simulação no HEC-HMS . . . . .	81
Figura 28 – Representação esquemática do modelo de bacia construído . . . . .	83
Figura 29 – Esquema conceitual do método contínuo SMA . . . . .	87
Figura 30 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 1 (2015) - Calibração . . . . .	95
Figura 31 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração . . . . .	95
Figura 32 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o evento 3 (2020) - Validação . . . . .	97
Figura 33 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia para o evento 4 (2022) - Validação . . . . .	98
Figura 34 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o evento 1 (2015) - Calibração . . . . .	100
Figura 35 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração . . . . .	100
Figura 36 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 3 (2020) - Validação . . . . .	102
Figura 37 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 4 (2022) - Validação . . . . .	102
Figura 38 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 1 (2015) - Calibração . . . . .	106
Figura 39 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração . . . . .	107
Figura 40 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 3 (2020) - Validação . . . . .	108
Figura 41 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 4 (2022) - Validação . . . . .	109
Figura 42 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 1 (2015) - Calibração . . . . .	111
Figura 43 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração . . . . .	111

Figura 44 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 3 (2017) - Validação . . . . .	113
Figura 45 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 4 (2022) - Validação . . . . .	113
Figura 46 – Hidrogramas simulados por diferentes combinações de modelo e fonte de precipitação . . . . .	115
Figura 47 – Evento 4: Hidrogramas simulados por diferentes combinações de modelo e fonte de precipitação. . . . .	116
Figura 48 – Comparação das métricas de desempenho da modelagem hidrológica por evento: Calibração (2015 e 2017) e Validação (2020 e 2022) . . . . .	117
Figura 49 – Mapas de calor com a classificação qualitativa das métricas de desempenho dos modelos CAWM e HEC-HMS, com dados de precipitação por radar e por pluviômetro: (a) calibração e (b) validação . . . . .	118
Figura 50 – Comparação visual dos hidrogramas simulados com o modelo CAWM - V utilizando dados de radar e pluviômetro nas etapas de calibração e validação	134
Figura 51 – Comparação visual dos hidrogramas simulados com o modelo CAWM utilizando dados de radar e pluviômetro nas etapas de calibração e validação .	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações empíricas entre o fator refletividade e a intensidade de precipitação	31
Tabela 2 – Relações $Z - R$ para Regiões do Brasil	32
Tabela 3 – Características físicas da bacia do rio Mundaú considerando a área de drenagem a partir do exutório adotado neste estudo	59
Tabela 4 – Eventos de cheias selecionados para o estudo	67
Tabela 5 – Características técnicas do radar meteorológico banda S	69
Tabela 6 – Informações das estações telemétricas utilizadas no estudo	73
Tabela 7 – Descrição técnica do posto fluviométrico Fazenda Boa Fortuna – AL	74
Tabela 8 – Parâmetros do CAWM	80
Tabela 9 – Métodos e parâmetros adotados na modelagem com o HEC-HMS	84
Tabela 10 – Armazenamento de água por interceptação em função do tipo de vegetação	85
Tabela 11 – Armazenamento padrão em depressões	86
Tabela 12 – Valores das métricas estatísticas para avaliação do desempenho dos modelos	92
Tabela 13 – Parâmetros físicos da bacia necessários para o cálculo do parâmetro $K$	94
Tabela 14 – Valores finais dos parâmetros após etapa de calibração	94
Tabela 15 – Indicadores estatísticos do modelo CAWM a partir de precipitação de radar	96
Tabela 16 – Indicadores estatísticos do Modelo CAWM a partir precipitação de radar	99
Tabela 17 – Indicadores estatísticos do CAWM a partir de precipitação de pluviômetro	101
Tabela 18 – Indicadores estatísticos do modelo CAWM a precipitação de pluviômetro	104
Tabela 19 – Parâmetros calibrados do método SMA / HEC-HMS	105
Tabela 20 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de radar	108
Tabela 21 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de radar	110
Tabela 22 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de pluviômetro	112
Tabela 23 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de pluviômetro	114
Tabela 24 – Resumo estatístico de desempenho na calibração e validação de modelos hidrológicos com diferentes produtos de precipitação	136

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
BHRM	Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CAWM	Campus Agreste Watershed Model
CEMADEN	Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
COMET	Cooperative Program for Operational Meteorology, Education, and Training
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
DPSRI	Surface Rainfall Intensity with Dual Polarization
EM	Energia Eletromagnética
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GR4J	Génie Rural à 4 paramètres Journalier
GCN	Número de Curva Hidrológica Global
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital de Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEB	Nordeste Brasileiro
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRCS	Natural Resources Conservation Service
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
OEA	Organização dos Estados Americanos
PAC	Accumulated Precipitation
PBIAS	Percent Bias
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PRT	Point Total Precipitation
REALPE	Rede Pernambuco-Alagoas de Alerta de Cheias
RIH	Rainfall Intensity Histogram
RMSE	Root Mean Square Error
RPM	Runoff Prediction Model
SRI	Surface Rainfall Intensity
RSA	Sub-basin Accumulation
SCS	Soil Conservation Service
SIRMAL	Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas
SF	Sistema Frontal
SMA	Soil Moisture Accounting
SMART	Stormwater Management and Road Tunnel
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USACE	US Army Corps of Engineers
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
VIL	Vertically Integrated Liquid
WMO	World Meteorological Organization
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	HIPÓTESE DE PESQUISA	21
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	21
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>21</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>21</b>
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	22
1.4	ESTRUTURA DA TESE	22
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1	ENCHENTES E INUNDAÇÕES	23
2.2	SISTEMAS ALERTA DE ENCHENTES E INUNDAÇÕES	25
2.3	APLICAÇÃO DE RADAR METEOROLÓGICO NA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES	27
2.4	FUNDAMENTOS GERAIS DO RADAR METEOROLÓGICO	29
<b>2.4.1</b>	<b>Estimativa de Chuva por Radar Meteorológico</b>	<b>30</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Radar Dupla Polarização</b>	<b>31</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Principais produtos do radar dupla polarização</b>	<b>35</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Radar meteorológico versus pluviômetro</b>	<b>38</b>
2.5	MODELAGEM HIDROLÓGICA	42
<b>2.5.1</b>	<b>Modelo Hidrológico CAWM</b>	<b>44</b>
<i>2.5.1.1</i>	<i>Estudos relacionados ao CAWM</i>	<i>48</i>
<b>2.5.2</b>	<b>Modelo Hidrológico HEC-HMS</b>	<b>50</b>
<i>2.5.2.1</i>	<i>Estudos relacionados ao HEC-HMS</i>	<i>52</i>
<b>3</b>	<b>REGIÃO DE ESTUDO: A BACIA DO RIO MUNDAÚ</b>	<b>55</b>
3.1	HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES	55
3.2	LOCALIZAÇÃO	58
3.3	DINÂMICA CLIMÁTICA	60
3.4	RELEVO	61
3.5	SOLOS	63
3.6	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	64
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>66</b>

4.1	SELEÇÃO DOS EVENTOS DE CHEIAS . . . . .	67
4.2	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS . . . . .	67
4.2.1	<b>Precipitação estimada por radar meteorológico</b> . . . . .	<b>68</b>
4.2.2	<b>Precipitação de estações pluviométricas</b> . . . . .	<b>71</b>
4.2.3	<b>Dados de evapotranspiração</b> . . . . .	<b>73</b>
4.2.4	<b>Dados de vazão</b> . . . . .	<b>73</b>
4.2.5	<b>Representação do terreno</b> . . . . .	<b>74</b>
4.2.6	<b>Cálculo da Curva Número (CN)</b> . . . . .	<b>75</b>
4.2.7	<b>Capacidade máxima de armazenamento de água no solo</b> . . . . .	<b>77</b>
4.3	APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO CAWM - V . . . . .	78
4.3.1	<b>Adaptações do modelo CAWM-V</b> . . . . .	<b>79</b>
4.3.2	<b>Parâmetros Calibráveis</b> . . . . .	<b>80</b>
4.4	APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS . . . . .	81
4.4.1	<b>Pré-processamento</b> . . . . .	<b>82</b>
4.4.2	<b>Métodos e Parâmetros para Modelagem Hidrológica</b> . . . . .	<b>83</b>
4.4.2.1	<i>Interceptação da Vegetação - Simple Canopy</i> . . . . .	84
4.4.2.2	<i>Armazenamento em depressões superficiais – Simple Surface</i> . . . . .	85
4.4.2.3	<i>Parâmetros de perdas – Soil Moisture Accounting (SMA)</i> . . . . .	86
4.4.2.4	<i>Método de transformação chuva-vazão – SCS Unit Hydrograph</i> . . . . .	88
4.4.2.5	<i>Vazão de base – Linear Reservoir</i> . . . . .	89
4.4.2.6	<i>Propagação da vazão na bacia – Muskingum-Cunge</i> . . . . .	90
4.5	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS MODELOS . . . . .	91
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	<b>93</b>
5.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO CAWM - V . . . . .	93
5.1.1	<b>Calibração e validação - simulação com precipitação estimada por radar</b> . . . . .	<b>95</b>
5.1.2	<b>Calibração e validação - simulação com precipitação de pluviômetro</b> . . . . .	<b>99</b>
5.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO HEC-HMS . . . . .	104
5.2.1	<b>Calibração e validação - simulação com precipitação estimada por radar</b> . . . . .	<b>106</b>
5.2.2	<b>Calibração e validação - simulação com precipitação de pluviômetro</b> . . . . .	<b>110</b>
5.2.3	<b>Comparação do desempenho de modelos hidrológicos com precipitação de radar e de pluviômetro</b> . . . . .	<b>114</b>

<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>120</b>
6.1	CONCLUSÕES . . . . .	120
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	121
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE A – RESUMO GRÁFICO DOS HIDROGRAMAS SIMULADOS PELO MODELO CAWM - V . . . . .</b>	<b>134</b>
	<b>APÊNDICE B – RESUMO GRÁFICO DOS HIDROGRAMAS SIMULADOS PELO MODELO HEC-HMS . . . . .</b>	<b>135</b>
	<b>APÊNDICE C – RESUMO ESTATÍSTICO DE DESEMPENHO NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS . . . . .</b>	<b>136</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As inundações rápidas, conhecidas como "*flash floods*", figuram entre os desastres hidrológicos mais frequentes e destrutivos, causados por chuvas intensas. Globalmente responsáveis por cerca de 85% dos eventos de inundação, esses episódios causam impactos profundos nas cadeias sociais, nas economias locais e nos ambientes naturais. Seus efeitos vão além da destruição imediata, interromperem serviços essenciais e comprometem seriamente as perspectivas de desenvolvimento global, com potencial de reverter anos de avanços na redução da pobreza e no desenvolvimento socioeconômico (RENTSCHLER; SALHAB; JAFINO, 2022).

Entre 2000 e 2024, o número de desastres relacionados a inundações aumentou expressivos 134% em comparação com as duas décadas anteriores. Além do crescimento em frequência, esses eventos destacam-se como os mais onerosos entre os desastres hídricos, acarretando perdas globais médias de aproximadamente US\$ 388,4 bilhões por ano (UNDRR, 2025).

Em sintonia com essa tendência global de eventos hidrológicos extremos, o Brasil também tem enfrentado enchentes cada vez mais frequentes e severas. Entre 2014 e 2023, foram registrados 314 episódios de enchentes de grande magnitude no país, resultando em 1.709 mortes e causando prejuízos materiais estimados em R\$ 204 bilhões (EM-DAT, 2024).

Nos últimos anos, em especial 2022, 2023 e 2024, o Brasil foi palco de eventos extremos de inundação. Em fevereiro de 2022, na Região Serrana do Rio de Janeiro, um episódio de inundação brusca resultou em 231 vítimas fatais e cerca de R\$ 1 bilhão em danos. Ainda em 2022, a região Nordeste foi afetada por enchentes que atingiram diversos estados, incluindo Pernambuco e Alagoas, que compreendem a bacia hidrográfica deste estudo. Em Alagoas, o desastre resultou em mais de 10 mil desabrigados e 3 mil desalojados, com decretação de estado de emergência em pelo menos 33 municípios. Pernambuco foi o estado mais atingido, com aproximadamente 120 mil pessoas impactadas e 133 óbitos registrados (SEASS, 2023).

Em 2023, o Brasil atingiu um número recorde de registros associados a eventos hidrológicos, principalmente transbordamentos de rios. O estado mais afetado pelas chuvas intensas foi o Vale do Taquari no Rio Grande do Sul, onde as enchentes deflagradas resultaram em mais de 50 mortes. Mais recentemente, em maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul enfrentou novamente chuvas extremas que provocaram inundações em 478 dos 497 municípios, afetando aproximadamente 2,4 milhões de pessoas, resultando em 183 mortes e danos estimados em R\$ 88,9 bilhões (DEFESA CIVIL, 2024).

Esses fenômenos geralmente resultam de uma variedade de fatores, como a coexistência favorável de circunstâncias meteorológicas e hidrológicas, sendo intensificados pelas práticas humanas, como a retirada da cobertura vegetal e o tipo de uso da terra. Isso torna eventos hidrometeorológicos complexos e de difícil previsão. Portanto, preparar-se para eles requer conhecimentos em hidrologia e meteorologia, aliados ao conhecimento das condições locais (WMO, 2021).

Com base nessa complexidade, diversas pesquisas têm se dedicado à compreensão desses fenômenos, adotando múltiplas abordagens metodológicas. A identificação da ocorrência de inundações repentinas, visando à estimativa de risco e à implementação de medidas de mitigação eficazes, requer previsões com alta resolução espacial e em tempo hábil para o envio de alertas. O ponto de partida para uma previsão eficaz de inundações repentinas é a obtenção de estimativas de precipitação igualmente precisas. Em seguida, é necessário representar os processos hidrológicos e hidráulicos da bacia hidrográfica, os quais determinam como o escoamento chuva-vazão se desenvolve e se acumula ao longo do sistema (BACELAR, 2017).

Os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, em geral, podem auxiliar no entendimento dos processos que envolvem a realidade de uma bacia hidrográfica. Tais modelos são capazes de simular, de forma simplificada e suficientemente precisa, os eventos de cheias e as manchas de inundação. No entanto, a qualidade das variáveis-resposta de interesse em uma determinada bacia pode apresentar limitações, seja em função da qualidade dos dados de entrada, seja em decorrência da escolha do modelo hidrológico.

No contexto da modelagem chuva-vazão, grande parte dos estudos tem se concentrado predominantemente no uso de técnicas tradicionais de coleta de dados de precipitação, como os telepluviógrafos. Embora esses dispositivos apresentem vantagens notáveis, incluindo a capacidade de monitorar a quantidade e a intensidade da chuva em tempo real, seu uso também acarreta algumas limitações.

Uma delas reside no fato de que as medições obtidas por esses instrumentos são pontuais, abrangendo apenas uma pequena área no entorno do dispositivo. Isso, por si só, já restringe a capacidade de captar a variabilidade espacial das precipitações em toda a bacia hidrográfica. Além disso, a eficácia da interpolação da chuva em áreas não diretamente monitoradas é prejudicada, principalmente devido à densidade e à distribuição espacial das estações, que muitas vezes são insuficientes para representar com precisão os padrões de precipitação ao longo da bacia.

Dessa forma, a reconstrução espacial da chuva que ocorreu na bacia torna-se desafiadora

e sujeita a erros, o que, por sua vez, afeta a confiabilidade dos modelos de previsão de inundações. Portanto, embora os telepluviômetros sejam uma ferramenta útil, aprimorar a resolução espacial e a cobertura de dados de precipitação é essencial para obter uma representação mais precisa das condições meteorológicas e hidrológicas em uma bacia, resultando em previsões de inundações mais confiáveis e eficazes.

Diante dessas limitações, diversos estudos recentes têm integrado estimativas de precipitação obtidas por meio de radares meteorológicos na modelagem chuva-vazão, visando aprimorar a previsão de inundações. [Fagundes et al. \(2020\)](#) ressaltam que os produtos provenientes de radares meteorológicos desempenham um papel importante ao complementar, e até mesmo suprir, a falta de informações convencionais. Na mesma direção, [Jain et al. \(2018\)](#) apontam diversas vantagens no uso de radar, destacando a capacidade dessa ferramenta em proporcionar uma compreensão mais abrangente das condições meteorológicas, bem como em prever eventos de precipitação intensa, tanto a curto quanto a médio prazo. De forma complementar, [Ayzel, Heistermann e Winterrath \(2019\)](#) destacam a importância das estimativas de precipitação obtidas por radar, sobretudo quando integradas a uma rede de telepluviômetros, na previsão de inundações rápidas. Isso se deve à natureza desse tipo específico de inundação, que requer uma previsão imediata da chuva, conhecida como (*nowcasting*), para que o envio e o recebimento de alertas sejam eficazes.

Embora as pesquisas que abordam o cheias rápidas em conjunto com o uso de radar meteorológico não sejam recentes, foi apenas a partir dos anos 2000 que se observou um crescimento mais expressivo nas publicações sobre o tema. Apesar do avanço da produção científica nas últimas décadas, ainda são relativamente escassos os estudos que aplicam estimativas de precipitação obtidas por radar meteorológico à modelagem chuva-vazão. Segundo [Cho \(2020\)](#), essa escassez pode estar relacionada, em parte, às dificuldades envolvidas no processamento e na obtenção dos dados de precipitação fornecidos por esse tipo de instrumento, mesmo diante das diversas vantagens associadas ao seu uso.

Sendo assim, dada a relevância do tema, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias que possibilitem a aplicação de modelos hidrológicos voltados à simulação e previsão de inundações rápidas com o uso de diferentes fontes de dados. Nesse contexto, compreender o papel da precipitação estimada por radar meteorológico na melhoria da previsibilidade desses eventos representa um aspecto relevante, sobretudo em bacias montanhosas, cuja resposta hidrológica a eventos intensos é quase imediata, como ocorre na bacia do rio Mundaú, área de estudo desta pesquisa. Ao investigar essa relação, este trabalho busca contribuir para o avanço

da modelagem de cheias rápidas e para o aprimoramento de estratégias de monitoramento e alerta em regiões vulneráveis.

## 1.1 HIPÓTESE DE PESQUISA

A presente investigação parte da hipótese de que as estimativas de precipitação obtidas por radar meteorológico constituem uma alternativa eficaz para a alimentação de modelos hidrológicos voltados à previsão de enchentes, especialmente em bacias hidrográficas com relevo acentuado.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e aplicar uma metodologia para a previsão de cheias rápidas, utilizando estimativas de precipitação por radar meteorológico como entrada na modelagem hidrológica, a fim de avaliar de seu potencial para aprimorar a representação da vazão e, conseqüentemente, melhorar a previsão desses eventos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Implementar, calibrar e avaliar os modelos hidrológicos utilizando dados de precipitação provenientes de radar meteorológico e pluviômetros;
- b) Comparar o desempenho dos modelos hidrológicos quando alimentados por diferentes fontes de dados de precipitação;
- c) Verificar a viabilidade do uso de estimativas de precipitação por radar meteorológico como fonte principal para a modelagem hidrológica de cheias rápidas; e
- d) Avaliar as vantagens e limitações da modelagem hidrológica concentrada em comparação com a modelagem semi-distribuída.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Considerando a importância do tema, esta tese busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre a aplicabilidade das estimativas de precipitação geradas pelos radares meteorológicos da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e do Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas (SIRMAL) no aprimoramento das previsões de enchentes. Além disso, pretende fornecer subsídios para o fortalecimento do Projeto Rede Pernambuco-Alagoas de prevenção e alerta de cheias (REALPE), alinhando-se ao objetivo maior de aprimorar estratégias e medidas de resposta a eventos de inundações nos estados de Alagoas e Pernambuco, bem como ampliar o uso dessas ferramentas pelos órgãos tomadores de decisão, facilitando a gestão e a mitigação dos riscos associados às enchentes.

### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em seis capítulos, além dos apêndices e referências, abordando desde a fundamentação teórica até a análise dos resultados obtidos.

O **Capítulo 1** contextualiza o tema e a relevância do estudo, apresentou a hipótese da pesquisa, estabelece os objetivos propostos e destaca as contribuições esperadas do trabalho.

No **Capítulo 2**, é desenvolvido o referencial teórico, abordando os conceitos fundamentais sobre inundações, sistemas de alerta, princípios do radar meteorológico e suas aplicações na modelagem chuva-vazão, além de discutir os principais desafios associados à estimativa de precipitação por radar e sua integração com modelos hidrológicos.

O **Capítulo 3** caracteriza a região de estudo, enfatizando os aspectos fisiográficos da bacia, o histórico de inundações e as condições que favorecem a ocorrência desses eventos extremos.

O **Capítulo 4** descreve os tipos de dados, suas fontes e processamento. Em seguida, apresenta a metodologia adotada para a modelagem hidrológica realizada por meio dos modelos CAWM e HEC-HMS, ressaltando os procedimentos adotados para a calibração e validação.

O **Capítulo 5** expõe os resultados e discussões, apresentando a avaliação do desempenho das modelagens hidrológicas baseadas em diferentes fontes de precipitação.

Por fim, o **Capítulo 6** apresenta as considerações finais, sintetizando as principais conclusões da pesquisa e propondo perspectivas para estudos futuros, com foco na melhoria da previsibilidade de inundações rápidas por meio da integração de dados de radar meteorológico na modelagem hidrológica.

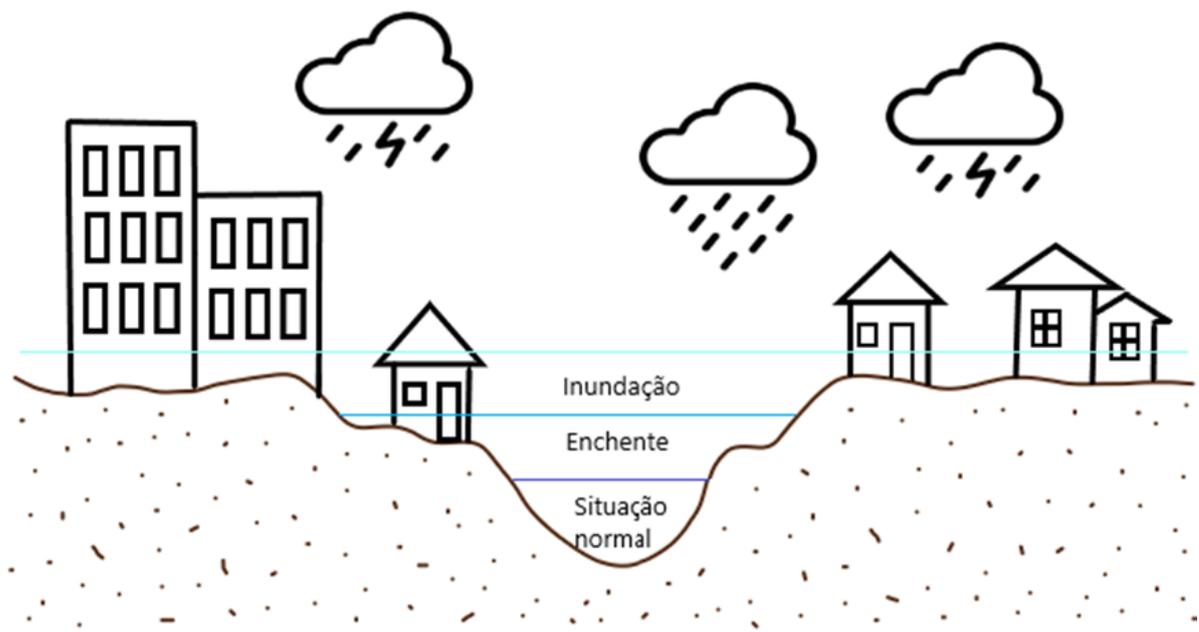
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES

As enchentes e inundações são fenômenos hidrológicos naturais que ocorrem periodicamente nos cursos d'água, sendo frequentemente desencadeadas por chuvas curtas de elevada intensidade ou por chuvas moderadas de longa duração (AMARAL; RIBEIRO, 2009; MENDES, 2017). Embora muitas vezes sejam tratados como sinônimos, existem diferenças consideráveis entre os termos. Conforme destacado por Souza e Rocha (2022), é importante escolher adequadamente o conceito a ser utilizado em uma determinada situação, uma vez que cada um deles se refere a eventos distintos.

Enchente ou cheia corresponde ao aumento da vazão em uma seção transversal de um rio, com potencial capacidade de suscitar inundação (SOUZA; ROCHA, 2022). A inundação, por sua vez, consiste na submersão de áreas fora dos limites normais de um curso d'água, em zonas que normalmente não se encontram submersas (CEMADEN, 2016; RAMOS, 2013). A Figura 1 ilustra a diferença entre as situações de enchente e inundação fluvial.

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de enchente e inundação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Geralmente, fatores meteorológicos são a causa mais relevante para desencadear inundações fluviais. De acordo com Bout e Jetten (2018), a dinâmica de uma inundação está intimamente relacionada à dinâmica do evento de chuva. Por exemplo, as inundações graduais ou lentas

(*slow rising*) ocorrem quando a água se eleva de forma lenta e previsível, principalmente em rios com grandes bacias hidrográficas. Essas inundações são desencadeadas por períodos de precipitação que se prolongam durante semanas a meses e apresentam uma sazonalidade (periodicidade).

Por outro lado, as inundações rápidas (*flash floods*), ocorrem quando circunstâncias meteorológicas e hidrológicas favoráveis se combinam. Transcorrem em bacias hidrográficas de relevos acidentados com escoamento de alta turbulência, caracterizados por um fluxo caótico com rápida ascensão e carregando sedimentos, árvores e até estruturas, o que as tornam mais perigosas (FREE, 2013; KUNDZEWICZ et al., 2014). Esse tipo de inundação tende evoluir em uma escala de tempo muito curta, geralmente entre 4 a 6 horas após um evento pluviométrico intenso, atingem rapidamente a população, o que dificulta a mitigação dos efeitos (KHAJEHEI et al., 2020)

De maneira geral, a susceptibilidade de uma bacia hidrográfica a eventos de inundações é influenciada por diversos fatores, que vão além das condições climáticas. Essa vulnerabilidade resulta tanto de condicionantes naturais quanto de alterações induzidas pela ação humana.

Entre os fatores naturais, destacam-se as características fisiográficas da bacia (declividade, propriedades dos canais e altitude), a cobertura vegetal (que retarda o pico de vazão e atua como reservatório), a capacidade de drenagem (infiltração, escoamento superficial e subterrâneo) e as propriedades do solo (estrutura, permeabilidade, saturação, entre outros) antes do evento (AMARAL; RIBEIRO, 2009; KUNDZEWICZ et al., 2014; TUCCI, 2004). Esses elementos modulam o potencial de escoamento e influenciam diretamente a velocidade de resposta hidrológica da bacia.

Por outro lado, entre os fatores antrópicos que contribuem para a intensificação das inundações, Amaral e Ribeiro (2009) destacam o uso e a ocupação irregular em planícies e margens de rios, o desmatamento, a desertificação e modificações significativas na rede hidrográfica, como retificação e canalização de cursos d'água, além da impermeabilização do solo. Essas transformações alteram o ciclo hidrológico, reduzindo a infiltração e intensificando os processos de escoamento superficial, o que potencializa a ocorrência de inundações.

A intensificação desses eventos está frequentemente associada a danos físicos, prejuízos materiais e, em muitos casos, à perda de vidas humanas. No caso específico das inundações rápidas, conforme evidenciado por Yulihastin et al. (2021), trata-se do tipo de desastre natural com a maior incidência de fatalidades em escala global, em razão de sua natureza súbita e do curto tempo de resposta disponível para ações de mitigação.

Diante desse cenário, os impactos das inundações podem ser atenuados por meio da adoção de medidas estruturais e não estruturais. As primeiras englobam a construção de obras de proteção, como diques e reservatórios de amortecimento, bem como a regularização de cursos d'água. Já as medidas não estruturais incluem o planejamento do uso e ocupação do solo, o mapeamento e zoneamento de áreas de risco, e o desenvolvimento de instrumentos legais e administrativos — como o Plano Diretor, legislações específicas e o Código de Obras. Tais estratégias, aplicadas de forma integrada, contribuem para a redução da vulnerabilidade das populações expostas, conforme destacado por [Mendes \(2017\)](#).

Além das ações físicas e de planejamento territorial, destaca-se o desenvolvimento de técnicas preditivas como uma estratégia fundamental dentro das medidas não estruturais de mitigação. Segundo [Ribeiro Neto, Batista e Coutinho \(2016\)](#), a redução dos impactos e perdas decorrentes de eventos extremos de cheias depende da capacidade de prever essas ocorrências com antecedência suficiente para subsidiar a tomada de decisões.

Entre essas técnicas, incluem-se os modelos hidrológicos, os satélites, os radares meteorológicos, a previsão meteorológica de curtíssimo prazo (*nowcasting*), os modelos numéricos de tempo, as redes de sensores para o monitoramento contínuo da precipitação e dos níveis dos rios, além da aplicação de abordagens baseadas em Inteligência Artificial ([YUAN et al., 2021](#)).

Nesse contexto, os sistemas de previsão e alerta de cheias têm integrado essas diversas ferramentas e vêm sendo amplamente reconhecidos como uma das medidas mais eficazes para reduzir os danos à população e ao patrimônio, ao permitir a antecipação de ações antes da ocorrência dos eventos de inundação ([KHAJEHEI et al., 2020](#); [LIMA NETO, 2019](#); [MELLER; BRAVO, 2012](#); [SANTOS, 2016](#)).

## 2.2 SISTEMAS ALERTA DE ENCHENTES E INUNDAÇÕES

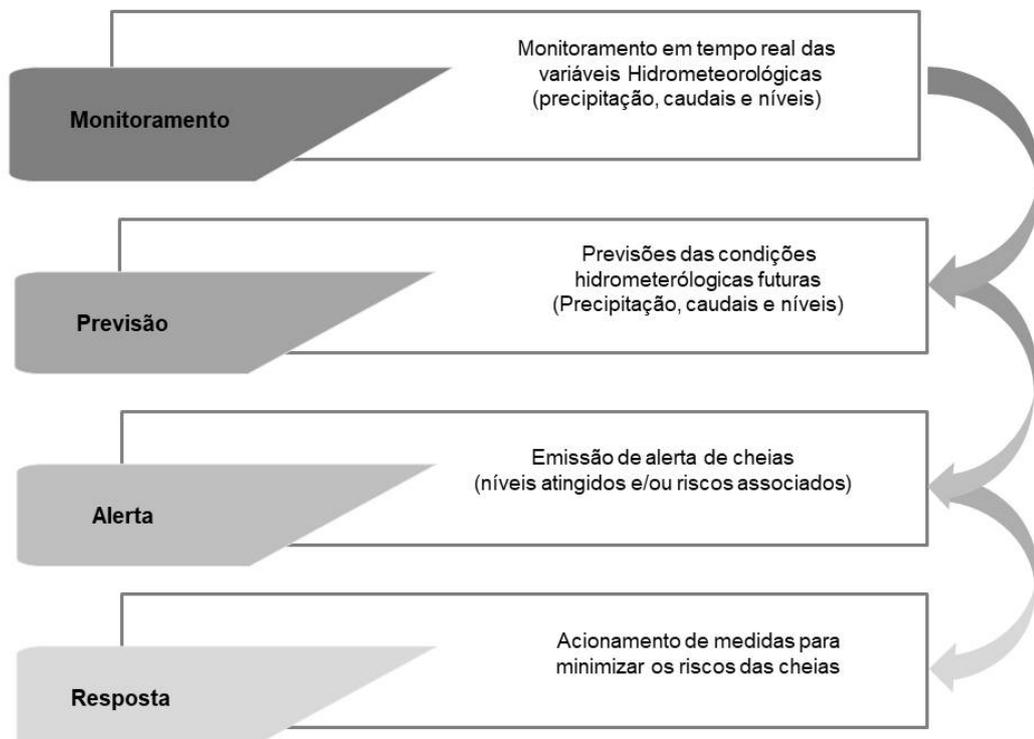
A previsão de desastres naturais e a adoção de medidas preventivas são essenciais para reduzir seus impactos sobre a sociedade. Entre os diversos tipos de desastres, as chuvas intensas e inundações requerem previsões precisas e ações preventivas eficazes para atenuar seus efeitos.

Uma previsão confiável da ocorrência e magnitude de uma inundação é fundamental para adotar uma abordagem proativa na minimização de seus impactos, que, em muitos casos, podem ser devastadores ([CLOKE; PAPPENBERGER, 2009](#)). Essa antecipação é viabilizada por meio da análise de dados hidrometeorológicos, como precipitação e os níveis de vazão, e potencializada pela aplicação desses dados em modelos hidrológicos ([RAO et al., 2011](#)).

Nesse contexto, os sistemas de alerta a inundações desempenham um papel essencial ao incorporar dados meteorológicos e hidrológicos, fundamentais para antecipar com relativa precisão as condições futuras dos rios, sobretudo em áreas vulneráveis (JIMENEZ, 2016). Esses sistemas constituem um mecanismo estratégico para o alerta e a coordenação de ações emergenciais, contribuindo principalmente para redução de perdas de humanas e mitigação dos impactos materiais (SANTOS, 2016).

Além de sua importância operacional, a eficácia dos sistemas de alerta precoce depende do cumprimento de requisitos fundamentais. Conforme as diretrizes da WMO (2010), a criação desses sistemas exige: compromisso político na implementação estratégias integradas, consideração da dimensão humana no processo de alerta e de cooperação internacional e regional. Assim, a cadeia de alerta compreende elementos essenciais, como a identificação e monitoramento das ameaças, a previsão das condições futuras, disseminação do alerta, e capacidade de resposta da sociedade. A Figura 2 representa essa estrutura, evidenciando a interconexão entre os principais elementos do sistema de alerta.

Figura 2 – Esquema simplificado de um sistema de alerta de cheias



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A fase de monitoramento é fundamental para coletar, armazenar e disseminar dados meteorológicos e hidrológicos. O monitoramento automático da chuva é realizado por meio de estações, satélite e radar meteorológico, enquanto o monitoramento hidrológico é feito por

meio de sensores instalados acima do leito dos rios. Essas informações são empregadas na fase de previsão, que utiliza os dados para elaborar os hidrogramas na seção de interesse.

Quanto à fase de previsão de enchentes, as abordagens mais consolidadas se baseiam em modelos hidrológicos chuva-vazão (MELLER; BRAVO, 2012). Conforme afirmam Adamovic et al. (2016), a modelagem hidrológica é uma ferramenta valiosa para estudar esses fenômenos e aprofundar nosso entendimento sobre os principais processos que regem a formação e propagação das cheias.

Na fase de alerta, as autoridades políticas são responsáveis pela disseminação das informações, acompanhadas da entrega de detalhes sobre o potencial impacto de um desastre na população e na infraestrutura. Esta etapa abrange a comunicação direta do alerta à população em risco e oferece recomendações relevantes para a adoção imediata de medidas preventivas (JIMENEZ, 2016).

A última fase é a resposta, na qual as comunidades e as autoridades tomam medidas com base nas informações de alerta. Isso pode incluir evacuações de áreas de risco, a mobilização de recursos de resgates e assistências às pessoas afetadas. A resposta visa minimizar os danos causados pelas inundações e a proteger vidas, bens e propriedades das comunidades afetadas (GARRETT, 2011).

Essas quatro fases, quando bem coordenadas e executadas, formam um sistema eficaz de alerta de inundação, promovendo ações proativas de mitigação, especialmente em áreas de riscos, e preparando as comunidades para reagirem de maneira apropriada diante de ameaças de inundações.

### 2.3 APLICAÇÃO DE RADAR METEOROLÓGICO NA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES

A chuva é, indiscutivelmente, a variável meteorológica de entrada mais importante para a modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas, de modo que a confiabilidade das vazões simuladas depende principalmente da qualidade dos dados de precipitação espacialmente distribuídos e do desempenho dos modelos hidrológicos (WU et al., 2022). No entanto, devido à sua alta variabilidade espaço-temporal, a precipitação é uma das variáveis atmosféricas mais desafiadoras de medir e estimar (FALCK et al., 2016).

A medição da precipitação por métodos tradicionais, como o uso de pluviômetros, enfrenta desafios significativos. A instalação e manutenção de uma rede densa de estações de observação *in situ* são frequentemente inviabilizadas por fatores como dificuldades de acesso

em áreas de topografia complexa e restrições na escolha dos locais de instalação devido a questões de segurança, incluindo riscos de vandalismo. Esses obstáculos operacionais limitam a representatividade espacial das medições e comprometem a continuidade dos dados.

Dessa forma, com o avanço das técnicas de sensoriamento remoto e da análise computacional, as abordagens tradicionais passam a ser complementadas por métodos mais avançados, que possibilitam a obtenção de informações quantitativas e qualitativas mais precisas sobre os riscos de enchentes (RAO et al., 2011). No contexto do radar meteorológico, esses instrumentos fornecem uma fonte robusta de dados espaciais e temporais, superando as limitações dos métodos convencionais (SKOLNIK, 2008). Essa abordagem permite uma cobertura mais ampla das áreas de interesse, aprimorando a previsão e a resposta a eventos extremos de precipitação, além de minimizar os desafios associados à dependência exclusiva de estações meteorológicas.

Adicionalmente, os radares meteorológicos também realizam a previsão de curtíssimo prazo de precipitação. O uso operacional do *nowcasting* nos radares teve início na década de 70, quando Zawadzki (1973) desenvolveu um dispositivo óptico para medir as propriedades estatísticas espaço-temporais dos campos de precipitação inferidos por radar. Posteriormente, Austin e Bellon (1974b) avaliaram um sistema automatizado de padrões para a previsão de precipitação instantânea com até três horas de antecedência. Em suas conclusões, destacaram que a eficácia dos métodos varia conforme a natureza e a extensão da precipitação. Além disso, observaram que essa abordagem se mostrou mais confiável para previsões com até uma hora de antecedência em diferentes condições meteorológicas.

As vantagens do radar, aliadas ao gradual aumento do acesso aos seus dados nos últimos anos, têm se mostrado valiosas na previsão de inundações. Na literatura, diversos estudos, como os de Austin e Bellon (1974a), Gomes (2018), Zhang et al. (2022), Wu et al. (2022), Santos et al. (2023), corroboram a aceitabilidade e a confiabilidade dos dados de radar em aplicações hidrológicas. Essas pesquisas demonstram que a utilização do radar meteorológico é particularmente vantajosa na previsão de inundações bruscas, especialmente quando integrada a uma rede de telepluviômetros.

No Brasil, a utilização de dados de precipitação estimados por radar meteorológico vem aumentando à medida que cresce a demanda por sistemas de prevenção a desastres naturais. (BACELAR, 2017). Com a vigência da Lei 12.608, o governo federal investiu na expansão da rede de radares em território nacional, visando ampliar a cobertura em municípios mapeados como áreas risco para desastres.

Atualmente, a Sala de Situação de Monitoramento do Centro Nacional de Monitoramento

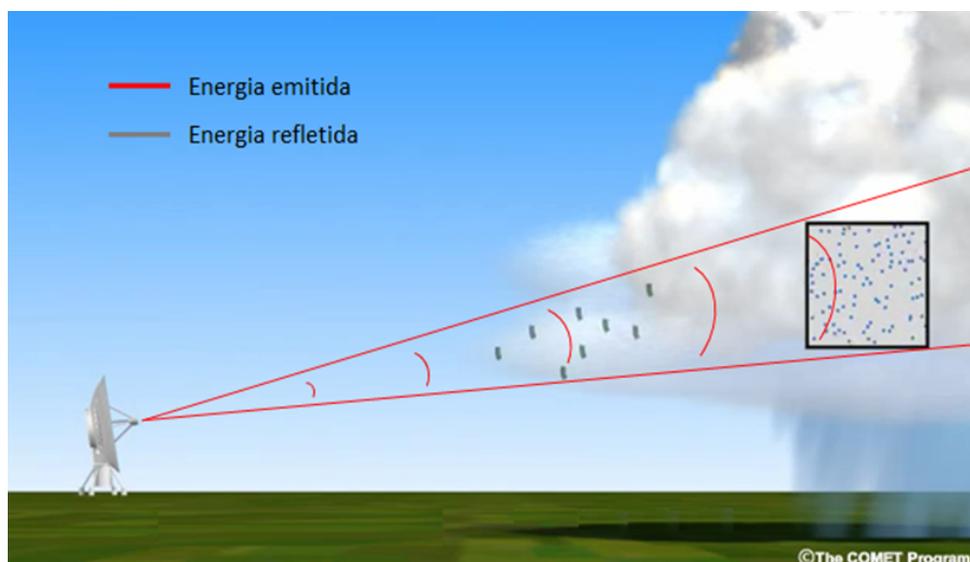
e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) utiliza dados de natureza meteorológica, provenientes do total de 27 radares, em parceria com diversas instituições públicas. O monitoramento abrange 821 municípios de forma contínua, 24 horas por dia, sete dias por semana. Com a expansão da cobertura dos radares meteorológicos, novos conjuntos de dados tornam-se disponíveis para análise, ampliando as possibilidades de pesquisas científicas e aprimoramento da compreensão dos processos meteorológicos e hidrológicos. Esse avanço contribui significativamente para a melhoria das previsões de inundações.

## 2.4 FUNDAMENTOS GERAIS DO RADAR METEOROLÓGICO

O funcionamento do radar baseia-se nos princípios fundamentais da transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas. Trata-se de um sistema ativo que emite pulsos de energia eletromagnética (EM) em intervalos regulares, direcionados por meio de um feixe de pequena abertura, transmitido por uma antena rotativa (CALVETTI; BENETI; MEDEIROS, 2017).

Quando os pulsos eletromagnéticos emitidos pelo radar encontram objetos na atmosfera, como hidrometeoros (gotas de chuva, cristais de gelo, granizo e flocos de neve) e alvos não meteorológicos (insetos, material particulado suspenso e aeronaves), ocorre uma interação que resulta no retroespalhamento de parte da energia emitida. Essa energia refletida retorna ao radar, onde é registrada e analisada. Esse sinal recebido é denominado refletividade e é influenciado por parâmetros físicos do alvo, como tamanho, forma, orientação e composição. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática desse processo.

Figura 3 – Retroespalhamento do sinal eletromagnético emitido pelo radar ao interagir com gotas de chuva



Fonte: Adaptada de COMET Program (2017).

Como mencionado anteriormente, o radar não mede diretamente a taxa de precipitação, mas a estima indiretamente a partir da energia retroespalhada (refletividade) por partículas de água suspensas na atmosfera dentro de um volume amostrado (SKOLNIK, 2008). A energia refletida de volta ao radar é processada por algoritmos computacionais que analisam sua intensidade e distribuição espacial, além de fornecer informações sobre a velocidade e a direção do deslocamento.

#### 2.4.1 Estimativa de Chuva por Radar Meteorológico

Os princípios físicos do processo de medição de precipitação por radar meteorológico derivam da relação entre a refletividade das partículas de água e a distribuição dos tamanhos de gotas de chuva, medidas por disdrômetros. Essa relação é amplamente conhecida como relação  $Z - R$ , e os pioneiros neste estudo foram Marshall e Palmer (1948), que desenvolveram a Equação (1):

$$Z = aR^b, \quad (1)$$

onde,  $Z$  representa a refletividade em dBZ medida pelo radar meteorológico,  $R$  denota a taxa de precipitação (mm/h) e  $a$  e  $b$  são constantes numéricas da relação  $Z - R$ .

Os valores calculados de  $a$  e  $b$  variam consideravelmente, dependendo da origem, tipo de chuva (convectiva, frente fria, brisa), da estação do ano (verão e inverno), distribuição de tamanho de gotas, localização geográfica (trópicos, médias latitudes), tipo de nuvem e condições meteorológicas (MIGUEL; RENNÓ, 2020).

A relação  $Z - R$  de Marshall e Palmer (1948) é a mais tradicional e amplamente utilizada em diversas aplicações, proporcionando, em geral, bons resultados para chuvas finas e contínuas. Contudo, aprimoramentos na estimativa da precipitação podem ser alcançados pelo sistema de radar ao empregar diferentes relações  $Z - R$  calibradas com dados observados (QUEIROZ, 2021). Nesse sentido, pesquisadores de diversas partes do mundo têm se dedicado à análise dos comportamentos ou relações entre a refletividade do radar e a intensidade da chuva em diferentes latitudes e diferentes tipos de precipitação (IHADUA, 2016). A Tabela 1 apresenta algumas relações  $Z - R$  experimentais presentes na literatura.

Tabela 1 – Relações empíricas entre o fator refletividade e a intensidade de precipitação

Relação $Z - R$	Aplicação	Referência
$Z = 200R^{1.6}$	Chuva Estratiforme	Marshall e Palmer (1948)
$Z = 31R^{1.75}$	Chuva Orográfica	Blanchard (1953)
$Z = 500R^{1.5}$	Chuva Convectiva	Joss et al. (1970)
$Z = 140R^{1.5}$	Chuveiro e garoa	Joss et al. (1970)

Fonte: Adaptada de Queiroz (2021).

No Brasil, [Calheiros e Zawadzki \(1987\)](#) foram pioneiros nos estudos dedicados à determinação de relações  $Z - R$ . Utilizando o método de soma de probabilidades, ajustaram a relação  $Z - R$  para a região de Bauru, com base no conjunto de dados coletados pelo radar banda C, durante eventos de chuva convectiva.

[Tenório, Moraes e Kwon \(2010\)](#), além de distinguirem os eventos de chuva com base no critério de 10 mm/h, adotaram um critério que considera uma duração mínima de 20 minutos e chuva acumulada de pelo menos 10 mm para obter as relações  $Z - R$  na costa leste do Nordeste do Brasil (NEB), utilizando dados de precipitação obtidos com um Disdrômetro RD-69.

Dando continuidade aos estudos sobre o desenvolvimento de relações  $Z - R$  para costa leste do NEB, [Moraes \(2011\)](#) analisou a distribuição dos tamanhos de gotas de chuva ocorridas entre 2003 e 2006, considerando precipitações de origem continental e marinha que atingiram a costa leste de Alagoas. Esses dois tipos de chuvas foram categorizados como convectivas ( $R > 10$  mm/h) e chuvas estratiformes ( $R \leq 10$  mm/h), sendo determinados os coeficientes  $a$  e  $b$  para as relações  $Z - R$  dos diferentes tipos de chuva por meio do método de regressão linear simples.

[Tayob \(2014\)](#) realizou um estudo com o objetivo de estabelecer uma relação  $Z - R$  para o litoral Alagoano, utilizando o Disdrômetro OTT Parsivel<sup>2</sup>. Através da aplicação de análises de regressão linear, obteve a equação geral referente a um conjunto de dados que compreendeu parte do mês de outubro de 2013, estendendo-se até maio de 2014. A Tabela 2 apresenta algumas relações  $Z - R$  específicas para diferentes tipos de precipitação e regiões do Brasil.

#### 2.4.2 Radar Dupla Polarização

Os radares mais modernos incorporam tecnologias avançadas, como a dupla polarização e radares Doppler. Essas tecnologias aprimoram significativamente a capacidade de observação e

Tabela 2 – Relações  $Z - R$  para Regiões do Brasil

<b>Relação Z-R</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Referência</b>
$Z = 325R^{1.36}$	Geral Baurú	Calheiros e e Zawadzki (1987)
$Z = 167,8R^{1.26}$	Chuva estratiforme	Tenório, Moraes e Kwon (2010)
$Z = 64,46R^{1.69}$	Chuva convectiva	Tenório, Moraes e Kwon (2010)
$Z = 176,5R^{1.29}$	Geral NEB	Tenório, Moraes e Kwon (2010)
$Z = 284,74R^{1.27}$	Chuva continental	Moraes (2011)
$Z = 188,35R^{1.25}$	Chuva marítima	Moraes (2011)
$Z = 123,3R^{1.27}$	Litoral de Alagoas	Tayob (2014))

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

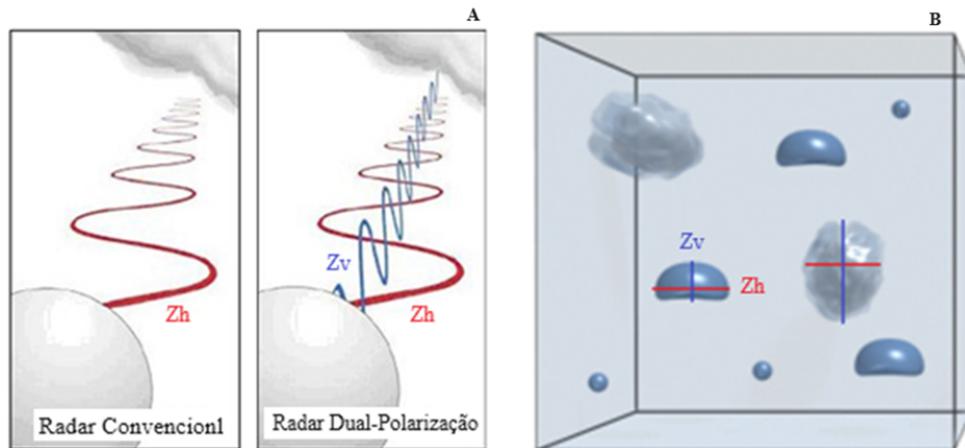
análise de eventos meteorológicos. Entre os benefícios mais notáveis, destaca-se a capacidade de identificar diversos tipos de espalhadores atmosféricos, que incluem desde hidrometeoros, elementos biológicos, fumaças e objetos voadores não identificados (KUMJIAN, 2013).

A aplicação da polarização dupla não apenas possibilita medidas quantitativas mais precisas de chuva, mas também aprimora a classificação e ecos. Essa precisão estendida resulta em uma detecção mais eficaz de fenômenos meteorológicos extremos, como tornados e granizo durante tempestades (OFCM, 2005). A dupla polarização aprimora a identificação e monitoramento desses eventos, contribuindo para alertas mais precisos e eficientes.

Diferentemente dos radares convencionais, que transmitem radiação polarizada em apenas uma orientação por vez (vertical ou horizontal), os radares de polarização simples captam a refletividade ( $Z$ ) dos alvos atmosféricos exclusivamente nessa única direção, nunca em ambas simultaneamente. Já os radares de dupla polarização emitem e recebem sinais eletromagnéticos em ambas as orientações (horizontal e vertical), permitindo uma caracterização mais detalhada dos alvos atmosféricos e aprimorando a estimativa de precipitação (SILVA et al., 2017).

A Figura 4 (a) ilustra as diferenças entre radares convencionais e de dupla polarização, destacando o processo de emissão e recepção das ondas eletromagnéticas. Já a Figura 4 (b) evidencia como a técnica de polarização dupla aprimora a caracterização dos hidrometeoros, ampliando tanto a quantidade quanto a qualidade das informações capturadas. Esse avanço possibilita uma identificação mais detalhada dos alvos atmosféricos, resultando em estimativas mais precisas da precipitação.

Figura 4 – a) Emissão de ondas eletromagnéticas por radares convencional e de dupla polarização; b) Aprimoramento da caracterização dos hidrometeoros com o uso do radar de dupla polarização



Fonte: Adaptada de NOAA (2012).

Além disso, devido às diversas combinações de orientações do sinal, os radares de dupla polarização vão além dos tradicionais 'momentos Doppler', como refletividade vertical ( $Z_v$ ), velocidade radial ( $V$ ) e largura espectral ( $W$ ). Esses radares geram um conjunto adicional de variáveis, denominadas 'variáveis polarimétricas', que incluem o fator de refletividade na polarização horizontal ( $Z_h$ ), a refletividade diferencial ( $Z_{DR}$ ), o deslocamento de fase ( $\Phi_{DP}$ ), o deslocamento de fase diferencial específica ( $K_{DP}$ ) e o coeficiente de correlação co-polar ( $\rho_{HV}$ ). Essas variáveis fornecem informações essenciais sobre a composição e as propriedades microfísicas das partículas na atmosfera, aprimorando a capacidade dos radares em distinguir diferentes tipos de precipitação e em avaliar a intensidade e a estrutura das tempestades.

**Largura espectral ( $W$ )** – representa o desvio padrão das medidas de velocidade obtidas. Em geral, está relacionada à turbulência no volume e sua unidade de medida é expressa em metros por segundo (m/s). Grandes valores de largura espectral podem sugerir convecção (FABRY, 2015).

**Velocidade radial ( $V$ )** – é a velocidade de aproximação ou afastamento dos alvos em relação ao radar na direção do feixe. Por convenção, valores negativos representam partículas se aproximando do radar e valores positivos, partículas se afastando do radar.

**Refletividade efetiva de onda vertical ( $Z_v$ )** – é a refletividade expressa em unidade de dBZ, é usada para calcular a intensidade da precipitação.

**Refletividade efetiva de onda horizontal ( $Z_h$ )** – é uma medida da eficiência do alvo de um radar em interceptar e retornar a energia do radar, que depende dos parâmetros físicos do alvo e do número e tamanho das gotas de chuva por unidade de volume.

**Refletividade diferencial ( $Z_{DR}$ )** – representa a diferença entre  $Z_h$  (refletividade emitida e captada na horizontal) e  $Z_v$  (refletividade emitida e captada na vertical). Este parâmetro é um bom indicador do formato das gotas, fornecendo uma medida do diâmetro médio das gotas. A  $Z_{DR}$  é amplamente empregada para distinguir entre diferentes tipos de precipitação, como chuva, granizo, neve, e até mesmo para identificar alvos não meteorológicos (KUMJIAN, 2013).

**Deslocamento de fase ( $PhiDP$ )** – é a diferença de fase devido à propagação entre os canais horizontal e vertical. Seja  $\Phi$  a fase em que o pulso foi emitido e recebido, o diferencial de fase ( $PhiDP$ ), medido em graus, representa a diferença entre as fases  $\Phi_{HH}$  e  $\Phi_{VV}$  para o trajeto completo do pulso. A variável  $PhiDP$  possui variações radiais, pois apresenta mudanças cumulativas na diferença de fase para a viagem completa do pulso. Assim,  $PhiDP$  não raramente é substituída pela sua derivada espacial, a  $KDP$  (FABRY, 2015).

**Deslocamento de fase diferencial específica ( $KDP$ )** – refere-se à derivada espacial da fase diferencial. O que significa uma análise da variação da fase entre os pulsos polarizados horizontal e vertical, em duas distâncias distintas. Essa variável é um estimador eficaz de chuva forte, indicando que quanto maior for o  $KDP$ , mais intensa é a chuva. O  $KDP$  não é influenciado pela atenuação, e valores acima de  $2^\circ/\text{km}$ , indicam uma quantidade significativa de água líquida (SILVA et al., 2017).

**Coefficiente de correlação co-polar ( $Rho_{HV}$ )** – corresponde ao coeficiente de correlação entre a energia refletida co-polar na horizontal e na vertical. Essa variável geralmente é empregada na identificação de hidrometeoros (KUMJIAN, 2013). Por exemplo, para água pura, gelo puro e chuva forte, o  $Rho_{HV}$  é bastante elevado, ultrapassando 0,95. Para partículas misturadas e camadas de fusão, o  $Rho_{HV}$  é inferior a 0,9, enquanto para insetos, entre outros, o  $Rho_{HV}$  é inferior a 0,85 (SELEX, 2016).

### 2.4.3 Principais produtos do radar dupla polarização

O radar meteorológico oferece diversos produtos essenciais para meteorologistas, hidrólogos e outros profissionais envolvidos na interpretação e previsão de condições atmosféricas. A criação desses produtos tem como base os dados processados de tarefas específicas.

A amplitude dos produtos gerados é significativa, resultante da combinação de diversos conjuntos de dados provenientes das tarefas do radar. Essa diversidade de produtos pode ser categorizada em diferentes grupos, como produtos padrão, produtos estendidos, produtos hidrológicos, produtos de cisalhamento; produtos de fenômenos e produtos de *nowcasting*.

No que se refere à categoria de produtos hidrológicos, o radar oferece oito produtos, a saber: Intensidade de Chuva na Superfície (*Surface Rainfall Intensity – SRI*), Intensidade de Chuva na Superfície com Dupla Polarização (*Dual-Polarization Surface Rainfall Intensity – DPSRI*), Precipitação Acumulada (*Precipitation Accumulation – PAC*), Total de Precipitação no Ponto (*Point Rainfall Total – PRT*), Total de Estações Virtuais - Radar (*Radar Virtual Gauge Total – RGRT*), Histograma de Intensidade de Chuva (*Rainfall Intensity Histogram – RIH*), Acúmulo de Sub-bacia (*Rainfall Sub-basin Accumulation – RSA*), Líquido Integrado Vertical (*Vertically Integrated Liquid – VIL*).

Os produtos hidrológicos SRI e DPSRI são úteis para a apresentação de dados pluviométricos, especialmente indicados para modelagem hidrológica. Ambos fornecem informações sobre a intensidade da chuva na superfície. A diferença entre eles é que algoritmo DPSRI utiliza o fator de refletividade de radar ( $Z$ ) e as variáveis polarimétricas  $ZDR$  [dB] e  $KDP$  [°/km], enquanto o algoritmo SRI emprega só a refletividade de radar ( $Z$ ) (SELEX, 2016).

Para calcular a intensidade de precipitação ( $R$ ), o algoritmo DPSRI inicia calculando a  $R(Z)$  a partir da relação  $Z - R$ , utilizada no sistema de operação de radar. No radar da APAC, a equação de Marshall e Palmer é utilizada, enquanto o radar SIRMAL, além de empregar a equação de Marshall e Palmer, utiliza as relações  $Z - R$  específicas para Alagoas, previamente listadas na Tabela 2. Posteriormente, para cada varredura (10 minutos), realiza-se a estimativa da precipitação com base em  $ZDR$  e  $KDP$ , conforme equações descritas a seguir:

$$R = \frac{R(Z)}{0,4 + 5,0|Z_{DR} - 1|^{1,3}}, \text{ para } R(Z) < 6 \text{ mm/h}, \quad (2)$$

$$R = \frac{R(K_{DP})}{0,4 + 3,5|Z_{DR} - 1|^{1,7}}, \text{ para } 6 < R(Z) < 50 \text{ mm/h}, \quad (3)$$

$$R = R(K_{DP}), \text{ para } R(Z) > 50 \text{ mm/h}, \quad (4)$$

onde,

$$R(Z) = \frac{1}{a^{1/b}} Z^{1/b} \iff Z = aR^b, \quad (5)$$

$$R(K_{DP}) = 44|K_{DP}|^{0,822}, \text{ para } K_{DP} > 0. \quad (6)$$

Nas últimas três décadas, estimativas de precipitação fundamentadas em variáveis polarimétricas tem sido objeto de estudo por diferentes pesquisadores. Nesse contexto, diversas abordagens que envolvem diferentes relações para taxas de precipitação ( $R$ ) foram desenvolvidas, empregando-se, comumente, combinações do tipo  $R(Z, ZDR)$ ,  $R(KDP)$ , ou  $R(KDP, ZDR)$  que apresentam vantagens significativas quando comparadas às relações baseadas apenas na refletividade ( $Z$ ), conforme observado por (CIFELLI et al., 2011).

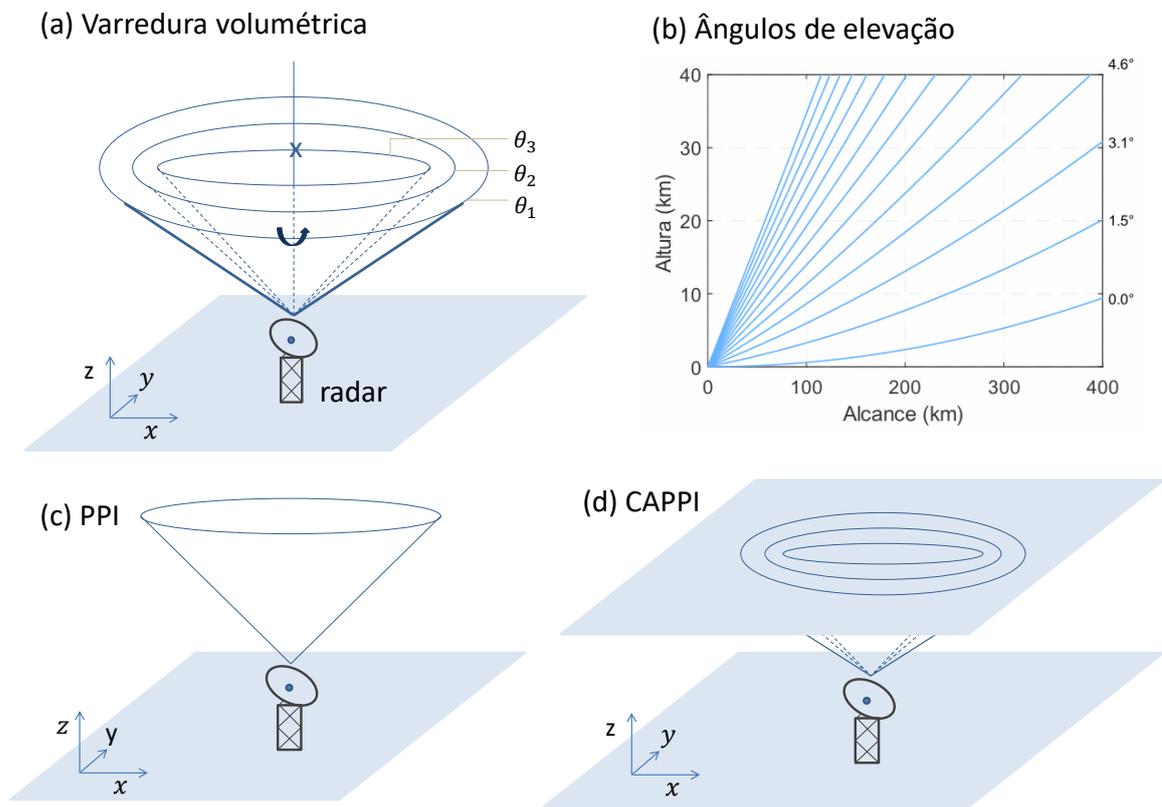
O radar meteorológico realiza a varredura da atmosfera por meio de volumes obtidos a partir de diferentes ângulos de elevação e altitudes. Ao completar uma rotação de  $360^\circ$ , a antena do radar modifica seu ângulo de elevação em relação ao horizonte, executando leituras sucessivas até alcançar cerca de 15 níveis distintos. Dessa forma, é possível “varrer” completamente a atmosfera, desde a superfície até o topo das nuvens, como ilustrado na Figura 5.

A cada ângulo de elevação, é gerado um anel de dados cuja altura média corresponde a uma faixa específica da atmosfera. Esses dados são projetados em um plano horizontal, resultando no produto conhecido como PPI, que fornece uma representação da distribuição horizontal da refletividade, especialmente útil nas menores elevações para a análise de estruturas próximas à superfície. A combinação de diversos PPIs, obtidos em diferentes ângulos de varredura, permite a interpolação para um mesmo nível vertical, originando o CAPPI (MAKI et al., 2021).

A visualização é uma ferramenta essencial para a análise de dados de radar meteorológico. Diversas técnicas têm sido propostas e amplamente utilizadas para representar os sinais de radar refletidos por alvos atmosféricos (SKOLNIK, 2001). Entre as exibições clássicas mais empregadas destacam-se o PPI e o CAPPI.

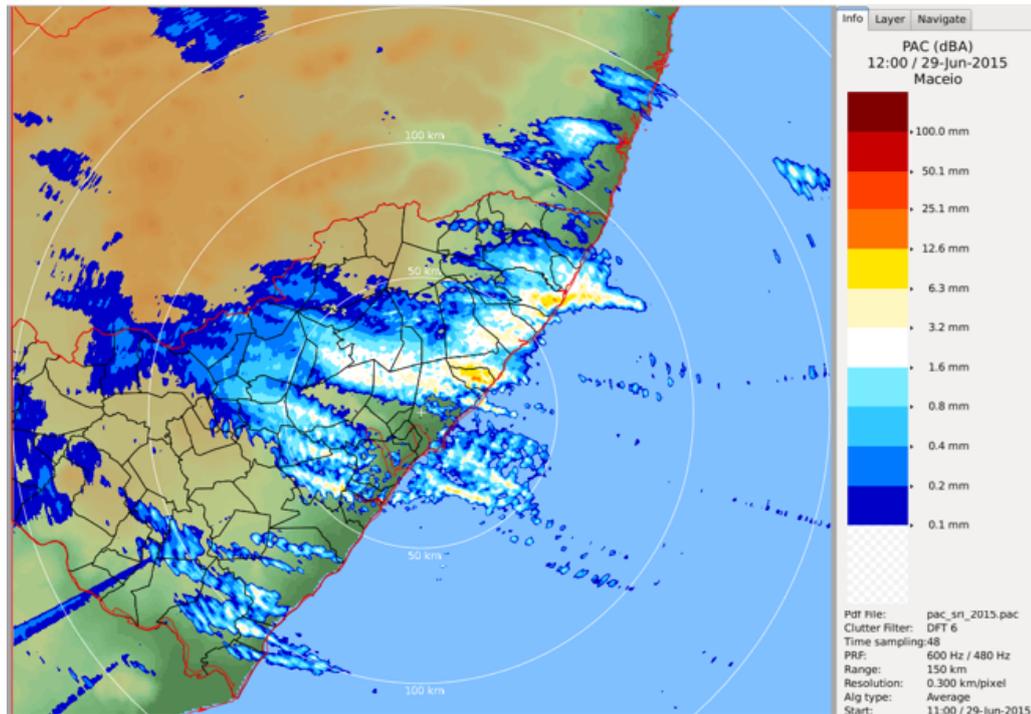
Com base nas leituras volumétricas realizadas pelo radar, a partir das varreduras organizadas em produtos como o PPI e o CAPPI, são derivados campos de precipitação, como o SRI e o DPSRI, que estimam a intensidade da chuva na superfície. O SRI utiliza, em geral, as informações das menores elevações, aplicando diretamente a relação  $ZR$ . Já o DPSRI incorpora correções adicionais, como a remoção de ruídos, compensações da altura do feixe e interpolações entre diferentes ângulos de varredura, resultando em estimativas mais precisas da precipitação. Neste trabalho, ambos os produtos são utilizados como entrada para a modelagem hidrológica. A Figura 6 apresenta um exemplo de estimativa de precipitação acumulada em uma hora (PAC), obtida a partir do produto SRI.

Figura 5 – Esquema de funcionamento do radar meteorológico: varredura volumétrica, ângulo de elevação e geração dos produtos PPI e CAPPI



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 6 – Precipitação (refletividade - SRI) estimada sobre o estado de Alagoas



Fonte: Radar SIRMAL (2025).

#### 2.4.4 Radar meteorológico *versus* pluviômetro

Atualmente, o instrumento mais amplamente utilizado para medição de precipitação na superfície terrestre é o pluviômetro. Esses equipamentos fornecem registros pontuais, representando apenas a área adjacente ao local de instalação. Além disso, a presença de erros de medição, descontinuidade dos dados e a distribuição espacialmente irregular dos pluviômetros podem comprometer a qualidade das informações obtidas (CAPOZZOLI; FUJITA; FREITAS, 2021). Esse cenário pode resultar em incertezas significativas no entendimento dos diferentes processos relativos aos mecanismos dinâmicos da precipitação e de sua variabilidade espaço-temporal (MIGUEL; RENNÓ, 2020).

A reconstrução da distribuição espacial da precipitação por meio de técnicas tradicionais como a espacialização de dados pontuais de pluviômetros ainda é uma questão desafiadora tanto na meteorologia quanto na hidrologia. Nesse contexto, há um crescente interesse na utilização de estimativas de precipitação baseadas em radar meteorológico, assim como na integração de múltiplas fontes de dados, combinando medições convencionais e sensoriamento remoto (PAULA, 2015).

Os radares meteorológicos se consolidaram como a principal ferramenta capaz de fornecer, em alta resolução e tempo real, a estimativa da distribuição da precipitação sobre uma determinada região (BACELAR, 2017). Entre suas vantagens, destacam-se a ampla cobertura espacial, que pode alcançar um raio de até 500 km, e a alta resolução temporal, pois, apesar de não realizarem medições contínuas, completam uma varredura a cada 5 a 10 minutos (MORRELL, 2018).

No entanto, apesar dessas vantagens, a aplicação dos radares meteorológicos na estimativa de precipitação enfrenta desafios associados a diversas fontes de incerteza. Entre os principais fatores limitantes estão a atenuação do sinal e as interferências causadas por ecos de terreno, que podem resultar em bloqueios parciais ou totais do feixe do radar, dependendo da localização da instalação (MORRELL, 2018; SOUZA; ROCHA, 2022).

Apesar das limitações associadas às estimativas de precipitação por radar, essa tecnologia tem sido amplamente reconhecida como uma ferramenta fundamental para aprimorar a representação da precipitação, especialmente em escala espacial, além de se mostrar uma abordagem eficaz para reduzir as deficiências dos instrumentos convencionais de medição de precipitação (FAGUNDES et al., 2020).

Jain et al. (2018) destacam que uma das principais vantagens das estimativas de precipitação por radar é sua elevada resolução espacial, tornando-as uma fonte de dados adequada para alimentar modelos hidrológicos. Segundo Ayzel, Heistermann e Winterrath (2019), essa tecnologia é particularmente útil na previsão de eventos extremos, como enchentes e inundações em áreas urbanas, desempenhando um papel fundamental em sistemas de alerta precoce e gestão de desastres.

Apesar das vantagens da utilização das estimativas de precipitação por radar na previsão de enchentes, sua aplicação ainda enfrenta desafios técnicos, especialmente devido à complexidade do processamento desses dados (RAMLY et al., 2020). Essas dificuldades impactam diretamente a exploração dessas estimativas em aplicações hidrológicas em larga escala (SIVASUBRAMANIAM; SHARMA; ALFREDSEN, 2019). Como consequência, seu uso ainda é limitado, dificultando sua adoção em abordagens operacionais mais amplas. No entanto, apesar dessas restrições, a literatura apresenta, ainda que de forma tímida, trabalhos que aplicaram dados de radar na modelagem hidrológica, explorando seu potencial para a simulação do escoamento em bacias hidrográficas.

Nesse contexto, Cabral, Sakuragi e Silveira (2017) realizaram uma análise das incertezas e erros associados à estimativa de precipitação a partir de dados de radar meteorológico,

integrando essas informações à modelagem hidrológica. Ao comparar os dados de chuva estimada por radar com os registros pluviométricos, identificaram uma subestimativa média de 60%. Para mitigar esse viés, aplicaram uma correção nos dados antes de utilizá-los no modelo hidrológico.

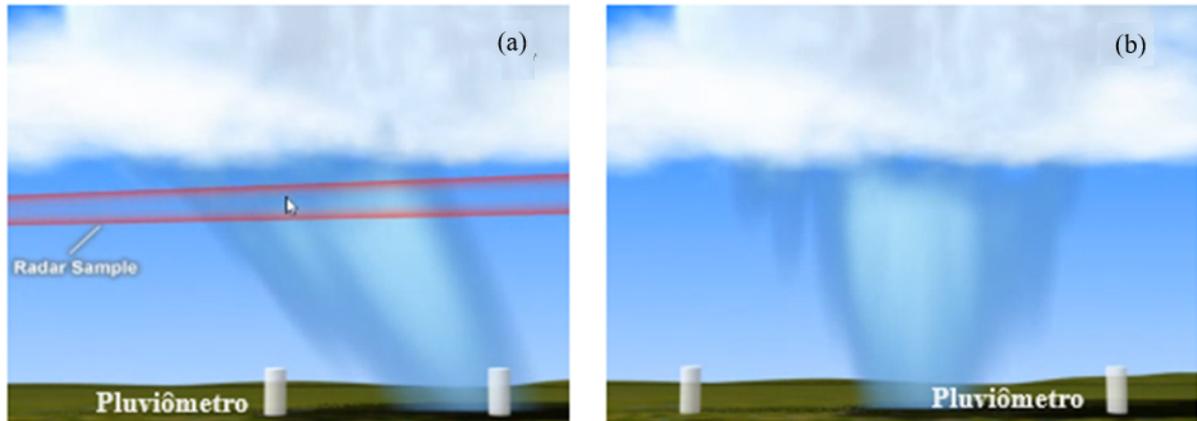
Queiroz (2018) também aplicou estimativas de precipitação por radar na modelagem de enchentes, precedendo sua utilização por uma análise comparativa entre os valores estimados por radar e os registrados por pluviômetros. Os resultados dessa análise evidenciaram uma subestimativa sistemática nas estimativas de radar em relação às medições pluviométricas. Para mitigar essa discrepância, foram testadas duas metodologias de correção: um fator de ajuste constante de 1,6 e um fator variável, dependente da distância entre o radar e o posto pluviométrico. Ambas as abordagens demonstraram potencial para aprimorar a precisão das estimativas de precipitação, possibilitando sua aplicação na modelagem hidrológica.

A importância de uma análise criteriosa na comparação entre as estimativas de precipitação por radar e os registros pluviométricos é destacada por Gomes (2018), que resalta as diferenças metodológicas entre esses instrumentos e suas implicações na qualidade das estimativas. Um aspecto frequentemente observado é a defasagem temporal entre as medições, especialmente durante variações abruptas na intensidade da precipitação. Como o radar realiza varreduras intermitentes, pode não captar adequadamente mudanças rápidas na chuva, resultando em discrepâncias significativas. No entanto, a integração dessas fontes de dados tende a ser mais eficaz quando se consideram períodos prolongados de precipitação, especialmente em eventos contínuos e espacialmente homogêneos.

A comparação entre as estimativas de precipitação obtidas por radar meteorológico e os registros pluviométricos é complexa. Inicialmente, deve-se compreender que esses dispositivos operam com princípios distintos de medição e apresentam limitações próprias, o que demanda uma análise criteriosa ao interpretar seus dados. Além disso, a cobertura do radar pode variar significativamente entre diferentes regiões e eventos meteorológicos. Mesmo os pluviômetros, que realizam medições diretas no solo, estão sujeitos a erros e não possuem resolução suficiente para capturar a variabilidade espacial e os padrões da precipitação (MCKEE; BINNS, 2016).

A Figura 7 exemplifica algumas situações que podem ocasionar grandes disparidades entre radar e pluviômetro.

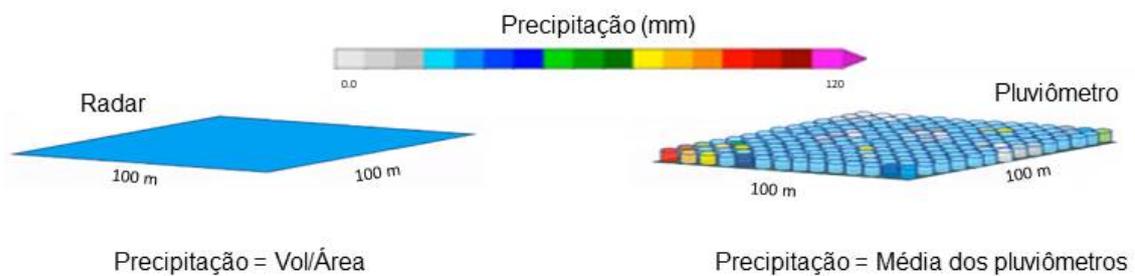
Figura 7 – Detecção de chuva pelo radar e registro de pluviômetro



Fonte: Adaptada de COMET Program (2017).

Devido às diferenças fundamentais nos métodos de medição e nos propósitos de cada instrumento, a comparação direta entre os valores estimados por radar e os registrados por pluviômetros pode não ser a abordagem mais adequada. Para uma comparação mais consistente entre radar e pluviômetro, seria necessário calcular a média dos valores dos pluviômetros distribuídos uniformemente na mesma área de detecção do radar, conforme a exemplificado na Figura 8.

Figura 8 – Detecção de chuva pelo radar e registro de pluviômetro



Fonte: Adaptada de COMET Program (2017).

Em síntese, uma comparação ideal entre radar e pluviômetro requer uma compreensão meticulosa das divergências entre esses dispositivos, considerando suas limitações específicas para uma interpretação precisa dos dados de precipitação. Além disso, os radares oferecem diversos produtos para a estimativa de chuva, tornando essencial a seleção do produto mais adequado à aplicação desejada.

## 2.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A ocorrência e a frequência de eventos de cheias e inundações não podem ser diretamente controladas. No entanto, medidas preventivas e mitigadoras devem se tornar progressivamente mais eficazes e acessíveis, visando reduzir os danos materiais e minimizar o impacto sobre a população afetada. Nesse contexto desafiador, a modelagem hidrológica tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o estudo desses fenômenos, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos processos que influenciam a geração e propagação de cheias (ADAMOVIC et al., 2016). Além disso, a modelagem hidrológica desempenha um papel fundamental na previsão desses eventos, possibilitando a antecipação de cheias e a mitigação de seus impactos.

A evolução da modelagem hidrológica tem sido impulsionada pelos avanços tecnológicos e computacionais, tornando-se cada vez mais sofisticada e precisa. Inicialmente, eram empregados métodos gráficos e empíricos, baseados na observação direta dos níveis e vazões. No entanto, com o desenvolvimento de modelos matemáticos hidrológicos, especialmente a partir da década de 1950, essa abordagem foi transformada, permitindo representações mais precisas e detalhadas dos processos hidrológicos (TUCCI, 2005). Com isso, tornou-se possível simular, com maior precisão, a magnitude, duração e distribuição espacial das cheias (RAJULAPATI; MUJUMDAR, 2019; QUEIROZ, 2018). Além de ampliar a compreensão dos processos hidrológicos, os modelos hidrológicos tornaram-se ferramentas indispensáveis para a gestão de bacias hidrográficas, o monitoramento da qualidade da água e a operação de reservatórios (SILVEIRA; RODRIGUES; DORNELLES, 2025).

Atualmente, há uma ampla diversidade de modelos hidrológicos, que variam em complexidade, resolução espacial, representação dos processos físicos e outros critérios (CIRILO et al., 2020). Esses modelos podem ser classificados em diversas categorias, como estocásticos ou determinísticos; empíricos ou conceituais; discretos ou contínuos; concentrados ou distribuídos.

Compreender os diferentes tipos de modelos hidrológicos é essencial para selecionar o modelo mais adequado para uma aplicação específica. A escolha do modelo deve considerar fatores como a disponibilidade de dados, a escala temporal e espacial da bacia hidrográfica e os objetivos da modelagem. Além disso, a aplicação de modelos hidrológicos envolve desafios significativos, especialmente nos processos de parametrização, calibração e validação (LIMA, 2019).

Particularizando para os modelos hidrológicos chuva-vazão, esses são classificados como determinísticos, empíricos e conceituais (TUCCI, 2005), e têm como objetivo representar a etapa

terrestre do ciclo hidrológico, quantificando a precipitação que incide sobre a bacia através dos diversos processos físicos até a geração do escoamento em uma determinada seção do rio. Esses modelos são amplamente utilizados para antecipar as condições futuras da vazão nos rios, tendo a chuva observada e/ou prevista na bacia como principal dado de entrada (MELLER; BRAVO, 2012). Além disso, podem ser empregados para outras finalidades, como a extensão de série de vazão, o dimensionamento e a avaliação de impacto do uso da terra (TUCCI, 2005).

A modelagem hidrológica, por envolver simplificações, resulta em modelos sujeitos a incertezas, conforme discutido por Lima Neto (2019). Diante disso, é imprescindível o conhecimento das simplificações assumidas no processo de modelagem, a fim de garantir que as aplicações dos modelos possam ser confiáveis e úteis nas ações de tomada de decisão (WARMINK et al., 2015). As fontes dessas incertezas são diversas e geralmente dependem do evento a ser previsto e do método de previsão. Em linhas gerais, essas fontes de incertezas podem ser resumidas em: i) incerteza do parâmetro do modelo hidrológico; ii) erro estrutural na modelagem (aproximação da representação dos processos hidrológicos na bacia); iii) erros no input do modelo (chuva, temperatura, evapotranspiração, etc.); e iv) erros no output do modelo para calibração (série de vazões, níveis observados) (KUCZERA et al., 2010).

Nesse contexto, é importante destacar que o grau de incerteza também pode variar em função da escala temporal adotada na modelagem. Oliveira (2021) destaca em seu estudo que as incertezas dos modelos aumentam em função do intervalo de tempo adotado. Modelos com abordagem diária e sub-diária, por exemplo, apresentam maior nível de incerteza devido à tentativa de representar uma grande quantidade de processos físicos, como a abstração inicial da água precipitada e o aporte proveniente do fluxo de base da bacia. No intervalo de tempo mensal, essas incertezas tendem a ser compensadas dentro do período simulado, uma vez que entradas e saídas de naturezas distintas, mas de magnitudes semelhantes, se contrabalançam antes de um novo cômputo mensal do volume.

Entretanto, bacias hidrográficas com características físicas complexas, como declividade acentuada e pequena área de captação de chuva, tendem a responder rapidamente a eventos de precipitação intensa, o que pode resultar na geração de flash floods (TRIGO et al., 2016). Esses fenômenos ocorrem de forma súbita, frequentemente apresentando um pico hidrograma inferior a seis horas, conforme apontado por Azmeri e Isa (2018). Para lidar com esse tipo de evento, é essencial a implementação de uma modelagem hidrológica com abordagem subdiária de precipitação, uma vez que essa estratégia possibilita prever inundações em tempo hábil para emissão e recebimento de alertas (BACELAR, 2017).

A simulação e previsão de eventos extremos apresenta desafios significativos devido ao grande número de parâmetros envolvidos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica (LIMA NETO et al., 2020). No entanto, apesar dessas dificuldades, os modelos hidrológicos são uma ferramenta científica fundamental para o estudo de eventos de cheias e inundações, pois permitem aprofundar o conhecimento sobre os principais processos que governam a geração e propagação desses fenômenos (LI et al., 2015; ADAMOVIC et al., 2016; RAJULAPATI; MUJUMDAR, 2019).

### 2.5.1 Modelo Hidrológico CAWM

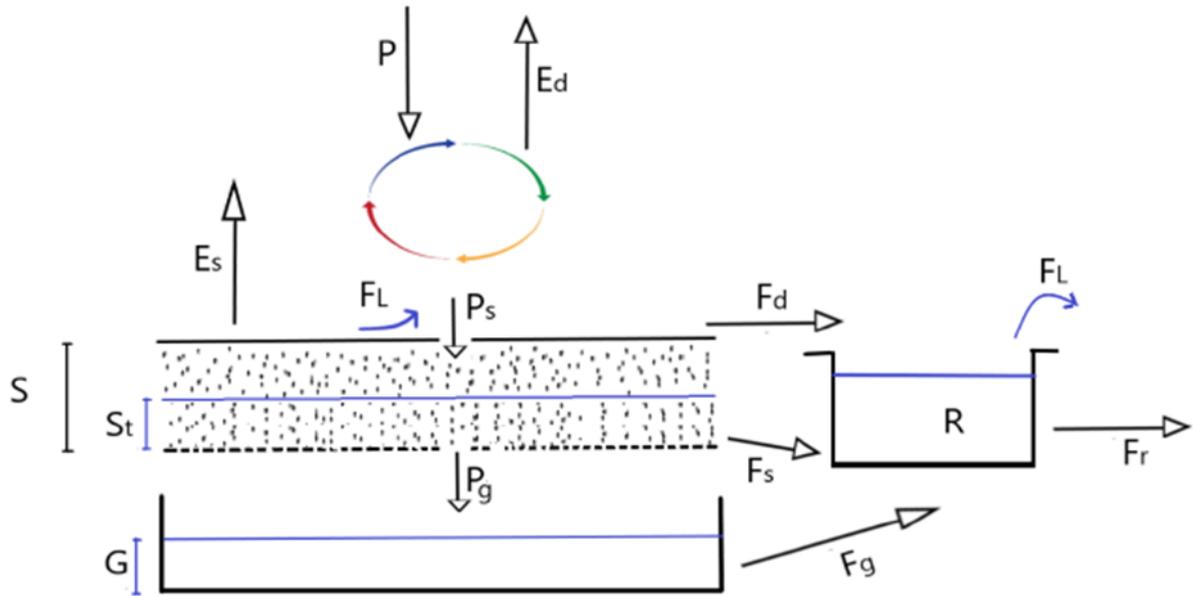
O *Campus Agreste Watershed Model* (CAWM), desenvolvido no Campus Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) por Cirilo et al. (2020) e Cirilo (2022), é um modelo conceitual de transformação chuva-vazão com uma abordagem concentrada. Esse modelo possui uma estrutura paramétrica simples, com poucos parâmetros calibráveis, e seu principal objetivo é a regionalização desses parâmetros, permitindo a transferência de valores entre bacias distintas que apresentem características físicas semelhantes.

O modelo utiliza dois conjuntos de dados de entrada: um que representa as características físicas da bacia e outro que abrange as características hidrológicas. As características físicas podem ser obtidas através do mapeamento do solo, imagens aéreas e de satélite, Modelo Digital de Terreno (MDT). Já as informações hidrológicas consistem em séries de chuva, evapotranspiração e vazão, utilizadas para calibração (FERRAZ, 2019).

Ao longo dos anos, o CAWM tem sido continuamente aprimorado para atender a diferentes necessidades e objetivos da modelagem hidrológica. As versões I a IV foram desenvolvidas para simular o escoamento em solos rasos e com baixa capacidade de armazenamento, características típicas de regiões semiáridas. A versão mais recente, CAWM-V, permite simulações de vazões em áreas úmidas e de maiores extensões (CIRILO et al., 2020).

Para adaptar o modelo às características de bacias de rios perenes em regiões úmidas, foram realizadas algumas modificações no CAWM. As versões I a IV do modelo contavam com dois reservatórios: um de solo ( $S$ ) e um de recepção ( $R$ ). Na versão atual, a principal mudança é a adição de um reservatório subterrâneo de acumulação ( $G$ ), que é alimentado após o solo alcançar a saturação. Os processos físicos representados no modelo CAWM V estão indicados na Figura 9.

Figura 9 – Esquema ilustrativo das variáveis e processos do modelo CAWM V



Fonte: Cirilo (2022).

Neste modelo, o balanço precipitação- evapotranspiração é realizado inicialmente comparando seus valores. Se houver precipitação suficiente, a evapotranspiração  $E$  é imediatamente descontada do cálculo. O excedente é a precipitação efetiva  $P_n$ . Caso contrário, toda precipitação é transformada em evapotranspiração  $E_d$  e a porção não atendida  $E_n$  pode ser total ou parcialmente extraída do reservatório de solo, se houver água suficiente para isso. O balanço é descrito pelas seguintes expressões:

$$\text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \quad (7)$$

$$\text{Se } P \leq E, \text{ então } P = E_d \text{ e } E_n = E - E_d \quad (8)$$

A precipitação efetiva é subdividida em três parcelas, sendo a primeira classificada com recarga do solo, calculada pela seguinte equação:

$$P_s = \frac{S \left( 1 - \left( \frac{S_t}{S} \right)^2 \right) \tanh \left( \tanh \frac{P_n}{S} \right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh \left( \tanh \frac{P_n}{S} \right)}, \quad (9)$$

onde,  $S_t$  é o valor máximo de água acumulado no solo ao longo de um tempo  $t$ , e  $S$  é a capacidade máxima de armazenamento, ou seja, o valor máximo dos valores de  $S_t$ . Essa equação é referente as versões anteriores do modelo. Após o acréscimo do reservatório subterrâneo ( $G$ ), na versão V, o cálculo da percolação  $P_s$  teve a sua fórmula alterada para a equação apresentada a seguir:

$$P_s = S \times \left(1 - \frac{S_t}{\beta \times S}\right) \quad (10)$$

Quando  $S_t$  alcança o valor de  $S$  (isto é,  $S_t \leq \beta \times S$ ), o excesso passa a integrar a percolação profunda  $S_g$ .

O segundo componente é a determinação da evapotranspiração complementar  $E_s$ , que é extraída das camadas mais superficiais do solo e limitada pelo valor de  $E_n$ . Sua magnitude depende do valor atribuído ao parâmetro  $\alpha$ , conforme pode ser visto na equação a seguir:

$$E_s = \left(1 - e^{-\left(\frac{\alpha \cdot S_t}{S}\right)}\right) \cdot E_n, \quad (11)$$

onde,  $\alpha$  é definido para especificar a magnitude da evapotranspiração complementar  $E_s$ .

Esse parâmetro foi introduzido para lidar com a incerteza inerente à estimativa de evapotranspiração. A modificação do parâmetro é realizada por meio de uma análise do balanço hídrico ao longo de um período extenso (um dos resultados do modelo), equilibrando as lâminas de precipitação, evapotranspiração e vazão, a fim de verificar se a evapotranspiração está subdimensionada ou superdimensionada. Se necessário, os valores podem ser ajustados entre 0 e um valor superior a 70, correspondendo, respectivamente, a nenhuma ou à máxima evapotranspiração complementar.

O componente restante representa o escoamento superficial direto para calha do rio  $F_d$  é calculado através da equação:

$$F_d = P_n - P_s - E_s, \quad (12)$$

Do reservatório da lâmina de água  $S_t$  armazenada no solo, ocorre o fluxo subsuperficial  $F_s$ , que percola em direção ao reservatório da calha dos rios  $R$ , obedecendo à seguinte equação:

$$F_s = K_s * S_t, \quad (13)$$

onde,  $K_s$  é o parâmetro a ser calibrado e representa a permeabilidade do solo, e  $F_s$ , representa a percolação através do reservatório  $R$ .

O volume de água retido na calha fluvial (reservatório  $R$  é incrementado pelos fluxos  $F_s$ , e  $F_d$ . Este reservatório não se limita a considerar os transbordamentos em caso de cheias. Deste reservatório sai o escoamento  $F_r$ , dado pela equação a seguir:

$$F_r = K * R^b \quad (14)$$

onde,  $b$  é uma constante para a qual o modelo adota o valor de referência de 5/3, estabelecido com base em diversos estudos realizados em centenas de bacias ao longo do processo de aprimoramento do modelo. Além dessa constante, o modelo requer a determinação do parâmetro  $K$ , que, nas versões anteriores, dependia das características físicas da bacia hidrográfica, as quais podem ser obtidas por meio de técnicas de geoprocessamento utilizando o MDT da área estudada.

Na versão V, para reduzir essa dependência, foram calculados valores de  $K$  para aproximadamente 250 bacias hidrográficas com áreas variando de 100 a 800 mil km<sup>2</sup>. Com base nesses dados, foram ajustadas equações que relacionam  $K$  com a área, resultando nas seguintes relações:

$$K = 0,3745 \cdot A^{-0,489} + 0,0146 \quad \text{se } A \leq 1500 \text{ km}^2 \quad (15)$$

$$K = 8,93523 \cdot A^{-0,73033} \quad \text{se } 1500 < A \leq 6000 \text{ km}^2 \quad (16)$$

$$K = 0,0028 \quad \text{se } A \geq 6000 \text{ km}^2 \quad (17)$$

As perdas de água no sistema podem ocorrer devido a diversas causas, como: volumes retidos em depressões do solo e na vegetação, que são gradualmente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, também sujeitos à evaporação; e infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essas perdas são extraídas do reservatório da calha fluvial  $R$  e do escoamento superficial direto, sendo calculadas pela seguinte equação:

$$F_L = K_L \cdot R^p, \quad (18)$$

onde,  $F_L$  indica as perdas de água que ocorrem nos sistemas, e  $K_L$  é o coeficiente de perda hídrica, de alta sensibilidade no modelo. O expoente  $p$  ajusta as perdas acentuadas na modelagem quando a rede de rios apresenta maior extravasamento.

O expoente  $p$  tem sido testado nas diversas simulações desenvolvidas variando de 0,9 a 1,2. Na maior parte dos casos o valor 1 tem sido testado e aprovado nas diversas simulações desenvolvidas, sendo o “default” do modelo. Em casos onde as perdas nas áreas inundadas forem mais significantes, o valor do expoente será maior que 1.

Outro aprimoramento introduzido na versão V envolve o parâmetro  $K_L$ , que anteriormente exigia calibração. Na versão atual, esse parâmetro é calculado internamente pelo modelo como um valor médio, obtido com base no balanço hídrico durante o processo de calibração, levando em consideração os valores do balanço global gerado.

$$K_L = \frac{V_{Prec} - V_{Qobs} - V_{Evap}}{V_{Prec} - V_{Evap}} \quad (19)$$

onde  $K_L$  representa o coeficiente de perdas na calha,  $V_{prec}$  é o volume de precipitação,  $V_{Qobs}$  corresponde ao volume escoado observado, e  $V_{Evap}$  refere-se ao volume evaporado.

Finalmente, o fluxo  $F_g$ , que indica o escoamento subterrâneo, é apresentado na equação a seguir:

$$F_g = K_g \times G \quad (20)$$

sendo  $K_g$  um parâmetro de transferência de água no solo a ser calibrado, similar a  $K_s$ , ambos passaram a ser tratados como equivalentes, uma vez que  $K_s$  está relacionado à percolação no reservatório profundo. Essa unificação foi adotada devido à baixa representatividade da diferenciação entre os dois, o que permitiu reduzir o número de parâmetros a serem calibrados (ARAÚJO, 2024).

Por fim, o parâmetro  $S$  é calculado com base na Curva Número médio CN da bacia, utilizando a equação proposta pelo Soil Conservation Service (SCS) para retenção de água no solo, conforme mostrado na equação a seguir:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (21)$$

Para cálculo de CN tem sido utilizados mapeamentos de solos da EMBRAPA, imagens de satélite e classificadas do uso e ocupação do solo nas bacias, com foco nos produtos desenvolvidos pela Embrapa.

### 2.5.1.1 Estudos relacionados ao CAWM

Em seu estudo, Ferraz (2019) aplicou o modelo hidrológico CAWM V em conjunto com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para avaliar o potencial de inundações nas cidades localizadas nas bacias hidrográficas do Una, Sirinhaém e Jaboatão. Foram considerados dois cenários: um cenário atual, sem controle, e um cenário hipotético com a construção de barra-

gens. As simulações indicaram uma redução da vazão de pico e da magnitude das inundações, destacando a possibilidade de uma oferta hídrica significativa para usos múltiplos na região com a construção das barragens. No entanto, observou-se que o percentual de redução das áreas inundáveis com a implementação das barragens foi baixo, sugerindo a necessidade de revisão da capacidade e da disposição das mesmas para que se consiga efetivamente reduzir as inundações.

Chaves et al. (2022) conduziram um estudo aplicando três modelos hidrológicos distintos nas principais sub-bacias do rio Parnaíba, com o objetivo de avaliar o desempenho de cada um e realizar uma análise comparativa das incertezas associadas a esses modelos. Foram utilizados os modelos hidrológicos CAWM, HEC-HMS e GR4J. de maneira geral, o modelo HEC-HMS enfrentou maiores dificuldades para simular o comportamento observado nas sub-bacias do Parnaíba. Nas sub-bacias situadas em áreas predominantemente semiáridas, como Canindé e Gurguéia, a variabilidade dos dados de precipitação e vazão dificultou o ajuste dos métodos de perdas. Apesar de alguns resultados insatisfatórios, os modelos CAWM, HEC-HMS e GR4J demonstraram-se úteis para compreender as dinâmicas em grandes bacias hidrográficas por meio da comparação entre dados simulados e observados. Esses modelos têm o potencial de fornecer informações valiosas para orientar o planejamento de recursos hídricos na região.

Quanto à aplicação do modelo CAWM em intervalos sub-diários, destaca-se uma pesquisa inicial conduzida por Campos et al. (2021). Nesse estudo, os autores adaptaram o CAWM para ser aplicado considerando informações de precipitação, evapotranspiração e vazão em intervalos sub-diários. O modelo foi aplicado nas bacia hidrográficas dos rios Mundaú e Una, no Nordeste Brasileiro, e seus resultados foram comparados com o modelo GR4H. A avaliação do desempenho dos modelos incluiu métricas estatísticas, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o viés percentual (PBIAS). Ambos os modelos apresentaram desempenho satisfatório, com o CAWM demonstrando eficácia nas simulações realizadas na bacia do rio Mundaú.

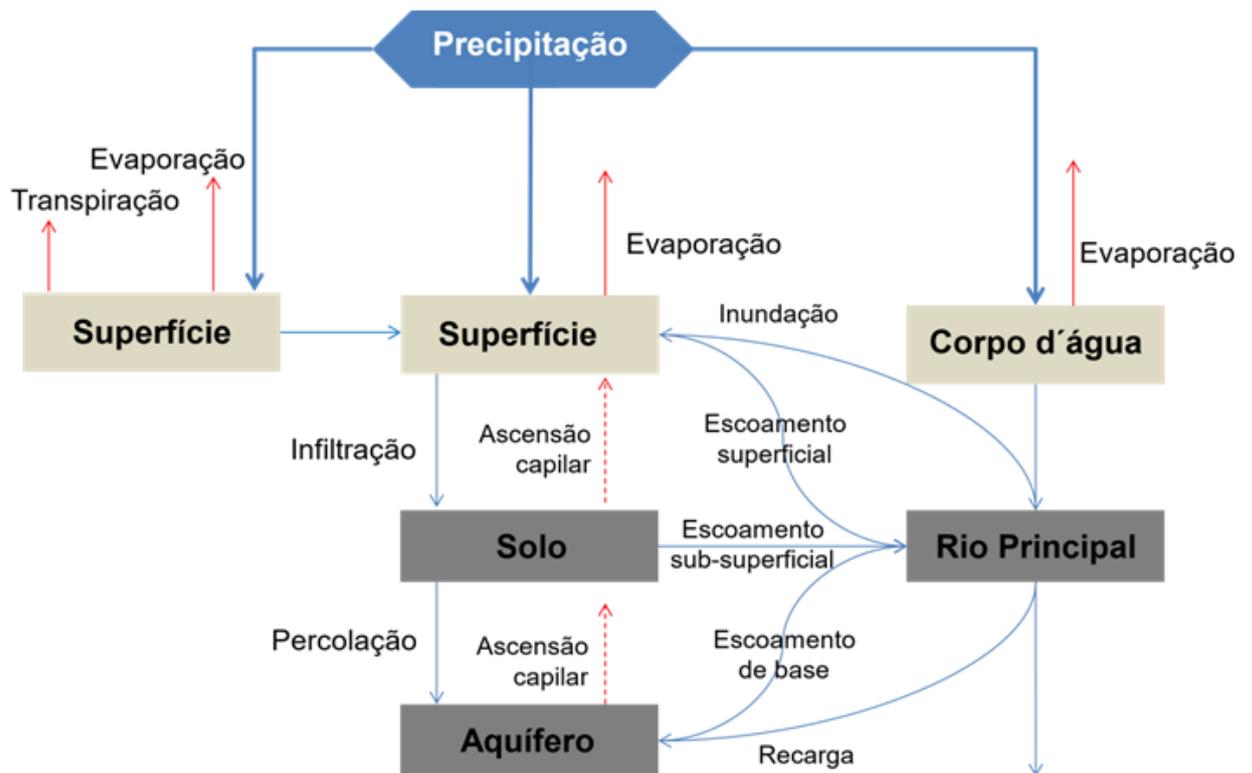
No contexto dos estudos conduzidos por Campos (2023), o modelo hidrológico CAWM foi adaptado para simulações de inundações repentinas com intervalos sub-horários, visando uma compreensão mais aprofundada dos padrões de comportamento relacionados a cheias e inundações em bacias hidrográficas suscetíveis a esses eventos. o modelo ajustado foi aplicado em quatro bacias hidrográficas localizadas nos estados de Pernambuco, Alagoas e Minas Gerais. Os resultados obtidos foram satisfatórios e promissores, destacando o potencial do modelo para análises mais detalhadas desses fenômenos hidrológicos.

## 2.5.2 Modelo Hidrológico HEC-HMS

O *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) é uma ferramenta computacional para modelagem hidrológica, desenvolvida pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE-HEC, 2010). Esse modelo foi projetado para representar os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas, permitindo a simulação de eventos de cheia e estiagem por meio de diferentes métodos e abordagens. O HEC-HMS é um modelo distribuído por sub-bacias, possibilitando a análise integrada do escoamento superficial, infiltração, propagação do fluxo e escoamento subterrâneo.

O HEC-HMS é capaz de realizar simulações de eventos de curta duração (escala de horas ou dias), bem como de simulação de longa duração, contemplando períodos de cheia e estiagem (escala de meses ou anos) (RIBEIRO NETO et al., 2015). Essa característica é viabilizada pelo uso de um conjunto de modelos, formulações e equações que podem ser selecionadas para representar cada componente do ciclo hidrológico (HEC, 2000). A Figura 10 demonstra um diagrama dos processos usados no HEC-HMS que ocorrem numa bacia hidrográfica.

Figura 10 – Processos da geração de escoamento em escala local



Fonte: Elaborada pela autora a partir do manual técnico HEC (2000).

O modelo HEC-HMS é composto, resumidamente, por quatro componentes essenciais: o Modelo de Bacia Hidrográfica, o Modelo Meteorológico, as Especificações de Controle e o Gerenciador de Dados. Para realizar a modelagem hidrológica com o HEC-HMS, é necessário, em primeiro lugar, inserir dados em cada um dos quatro componentes mencionados. Posteriormente, avança-se para a seleção de métodos destinados a calcular perdas, converter a precipitação em vazão, definir o escoamento de base e efetuar a propagação nos rios. Esse processo é conduzido com base em diversos parâmetros relacionados a tais métodos, incluindo a área das sub-bacias, o tempo de concentração, os fatores de perda por infiltração, a evapotranspiração e as perdas em sumidouros.

Sete métodos distintos estão disponíveis para simular as perdas por infiltração no HEC-HMS. Para simulações discretas, as opções incluem os métodos *Initial Constant*, *Curve Number (CN) SCS*, *Exponential*, *Green Ampt* e *Smith Parlange*. Já para simulações contínuas, são aplicáveis os métodos *Déficit e Constant*; e *Soil Moisture Accounting (SMA)*. Além disso, outros sete métodos podem ser utilizados para transformar o excesso de precipitação em escoamento superficial, incluindo opções de métodos de hidrograma unitário (HU) como *Clark*, *Snyder*, *SCS*, *ModClark*, *Kinematic Wave*. O usuário também tem a flexibilidade de inserir um HU específico ou ordenadas do gráfico da Curva S (HEC, 2021).

O HEC-HMS oferece cinco métodos para representar as contribuições do escoamento de base. Para modelar a vazão de base, é possível aplicar os métodos de Recessão Exponencial, Recessão Limitada, Constante Mensal, Reservatório Linear ou *Boussines Não Linear*. Além disso, há outros oito métodos destinados à propagação de hidrogramas na calha do rio (*Routing*). Esses métodos incluem o *Método de Atenuação (Lag)*, *Atenuação e Translação (Lag e K)*, *Muskingum*, *Muskingum-Cunge*, *Straddle Stagger*, *Puls Modificado*, *Normal Depth* e *Kinematic Wave* (HEC, 2021).

Em relação ao balanço meteorológico e à evapotranspiração, é viável considerar uma evaporação média anual ou mensal a ser subtraída no balanço hídrico. Alternativamente, podem ser aplicados outros métodos, como *Hamon*, *Hargreaves*, *Penman Monteith*, *Priestley Taylor*, ou inserir uma série histórica de evapotranspiração (HEC, 2021).

Através da simulação do comportamento hidrológico da bacia, o modelo gera hidrogramas e informações que podem ser usados para diversos fins: disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto do desenvolvimento da urbanização, dimensionamento de vertedouros de reservatórios, redução de danos de inundação, regime de planícies de inundação e sistemas de operação (USACE-HEC, 2010).

Existem quatro metodologias para analisar o histórico das precipitações no HEC-HMS: o método do hietograma especificado pelo o usuário, que deve ter sido previamente avaliado fora do programa, o método dos pesos dos postos pluviométricos com e sem registros, em que os pesos podem ser determinados pelos polígonos de Thiessen, o método do inverso do quadrado da distância entre os postos pluviométricos, que permite a utilização de postos com e sem registros (falhas). Por fim, o método de grade (*grid*) possibilita a inserção de dados distribuídos de precipitação, como os provenientes de radar meteorológico ou outras fontes com dados de chuva no formato grade de dados

### 2.5.2.1 Estudos relacionados ao HEC-HMS

O modelo HEC-HMS tem sido amplamente empregado em diferentes contextos hidrológicos. [Ribeiro Neto et al. \(2015\)](#) empregaram os modelos chuva-vazão HEC-HMS e hidrodinâmico HEC-RAS para reconstituir os eventos de cheia na bacia do rio Una. O objetivo foi simular os eventos de cheia, observando os principais fatores que influenciam na formação das enchentes e seu impacto na calibração dos modelos. A calibração contínua dos modelos mostrou-se inviável, sendo a melhor opção calibrar com base em dois eventos de cheia e validar com outros seis eventos similares. Os resultados mostraram que houve superestimação da profundidade calculada pelo modelo HEC-RAS, porém uma boa concordância com a área inundada.

Por sua vez, [Silva \(2015\)](#) propôs ampliar o conhecimento sobre o uso de modelos de simulação hidrológica em períodos de alta pluviosidade, integrando etapas meteorológicas, hidrológicas e hidrodinâmicas em uma estrutura computacional construída sobre o entendimento dos sistemas envolvidos. O objetivo era apoiar procedimentos emergenciais no enfrentamento de inundações. Modelos meteorológicos de mesoescala ETA, BRAMS e WRF foram empregados para fornecer dados de chuva ao modelo hidrológico HEC-HMS, que, por sua vez, gerou vazões para o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. A calibração e integração dos modelos foram realizadas considerando diversas experimentações em uma plataforma computacional contínua. O sistema de modelagem integrada demonstrou ser eficaz na simulação de eventos hidrometeorológicos, tornando-se uma poderosa ferramenta tanto para o suporte à tomada de decisão em situações de enchentes, quanto na pesquisa e desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para outras bacias.

Explorando o potencial das geotecnologias aplicadas à modelagem hidrológica, [Santos](#)

(2013) realizou uma integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS com a utilização de ferramentas de geoprocessamento. O estudo focou na simulação de cinco eventos de cheias na bacia do rio Mundaú, todos com vazão superior a 100 m<sup>3</sup>/s. Os resultados da calibração dos modelos foram considerados satisfatórios, refletindo a eficácia na representação precisa do pico de cheia nos eventos simulados, dada a considerável quantidade de variáveis ajustadas. A incorporação de tecnologias como LiDAR para obtenção de altimetria e ortoimagens contribuiu significativamente para a modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS. Por fim, os coeficientes de NSE se mantiveram dentro das faixas consideradas como "aceitável" e "adequado e bom".

Em estudo recente realizado na China, Ren e Cao (2023) utilizaram o modelo hidrológico HEC-HMS para prever parâmetros característicos das inundações na bacia do rio Xiushui, na China. Os coeficientes NSE de oito simulações de inundações variaram de 0,704 a 0,992, e a precisão da simulação atingiu a Categoria B, indicando que o modelo HEC-HMS apresentou resultados satisfatórios. Esses resultados levaram à conclusão de que o modelo pode efetivamente orientar a previsão avançada de inundações na área estudada.

De modo similar, Heba e Ahmed (2024) conduziram uma avaliação dos riscos de enchentes repentinas em áreas desertas, empregando os softwares HEC-HMS e HEC-RAS para a estimativa da vazão, velocidade e extensão da inundação. O estudo foi aplicado em duas bacias hidrográficas localizadas no sudeste do Cairo, Egito, onde foram identificados consideráveis níveis de risco de inundação, particularmente em zonas próximas à desembocadura do Rio Nilo. A metodologia adotada envolveu análises detalhadas de dados meteorológicos e morfológicos, integrando o método do número de curva do Serviço de Conservação do Solo (SCS) para estimar as perdas por precipitação e o hidrograma SCS para a modelagem do escoamento. Os resultados destacam a eficácia dessas abordagens na avaliação e previsão de riscos de inundação, com implicações relevantes para sua aplicação em áreas geograficamente similares.

A adoção de modelos como o HEC-HMS, aliada ao uso de dados de entrada com alta resolução temporal, tem proporcionado avanços significativos na previsão de cheias e no gerenciamento de riscos hidrológicos. Com base nessa abordagem, Lima Neto (2019) realizou uma modelagem hidrológica na bacia do rio Una utilizando o modelo HEC-HMS com intervalo de tempo sub-diário. Essa implementação permitiu identificar deficiências que não eram perceptíveis nas simulações realizadas com passo de tempo diário. No que se refere ao método de transformação da chuva efetiva em escoamento, o SCS Unit Hydrograph (SCS UH), empregado inicialmente, apresentou tendência de superestimar as vazões quando utilizado

---

com intervalos de tempo inferiores a um dia. Diante dessa limitação, a adoção do método Snyder Unit Hydrograph (Snyder UH) mostrou-se mais adequada, contornando o problema identificado.

Além da adoção de uma escala temporal mais refinada, o uso de técnicas capazes de captar com maior precisão a distribuição espacial da chuva tem contribuído significativamente para o aprimoramento da previsão de inundações. Nesse contexto, [Cabral, Sakuragi e Silveira \(2017\)](#) buscaram compreender o potencial do radar meteorológico como fonte de dados de precipitação para estimativas de vazão, realizando uma análise das incertezas e erros associados à modelagem hidrológica por meio do HEC-HMS. Embora o modelo tenha representado satisfatoriamente os eventos hidrológicos ao empregar dados de radar, observou-se uma subestimação na magnitude das vazões. Ainda assim, o modelo conseguiu capturar adequadamente a tendência das vazões, demonstrando-se uma ferramenta promissora para subsidiar ações de mitigação de eventos extremos na bacia estudada.

Na mesma direção, [Cho \(2020\)](#) empregou estimativas de precipitação obtidas por radar meteorológico para a simulação hidrológica nas bacias do Cedar Creek e South Fork, nos Estados Unidos, utilizando as ferramentas Arcpy e o modelo HEC-HMS. Um dos principais desafios enfrentados pelo autor foi a dificuldade na leitura dos dados do radar. Para superar esse obstáculo, foram desenvolvidas rotinas em Python. Três fases de simulação foram conduzidas, compreendendo a calibração, validação e teste de desempenho do modelo. Para avaliar os resultados da aplicação, foram utilizados o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSH) e o erro médio quadrático (RMSE).

Dando continuidade a essa abordagem, [Ramly et al. \(2020\)](#) desenvolveram um modelo hidrológico integrado da bacia urbana do Upper Klang Ampang, utilizando dados de precipitação de radar para estimar o valor de limite de volume de inundação para operação do Túnel de Gerenciamento de Águas Pluviais e Rodoviário (SMART) da cidade de Kuala Lumpur. A modelagem hidrológica e hidráulica foi realizada utilizando o HEC-HMS com a ferramenta HEC-GeoHMS para extrair informações dos parâmetros hidrológicos usando GIS como dados de entrada para o modelo da bacia. Além disso, um sistema de processamento de radar denominado RAINRATE AUTO V2 foi desenvolvido para processar eficientemente dados brutos do radar. Os resultados demonstram um desempenho promissor no uso de precipitação de radar, com uma porcentagem de erro aceitável nas simulações de descarga máxima. O sistema integrado avançado pode ser aplicado na gestão dos riscos de inundação em escala de bacia, estimando eficientemente eventos de inundação futuros.

### 3 REGIÃO DE ESTUDO: A BACIA DO RIO MUNDAÚ

#### 3.1 HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES

A bacia hidrográfica do rio Mundaú, objeto deste estudo, tem sido frequentemente afetada por eventos de inundação ao longo de sua história. Essa vulnerabilidade é resultado da interação de diversos fatores, destacando-se sua localização geográfica extremamente sensível a sistemas sinóticos que provocam chuvas intensas, bem como suas características fisiográficas complexas, tipos de solo e cobertura vegetal.

O primeiro registro de evento de inundação repentina na bacia remonta ao ano de 1914, e desde então, 12 episódios de inundações de grande magnitude afetaram a região (1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2004, 2010, 2011, 2017, 2022 e 2023). Observa-se que, nos últimos anos, a frequência desses eventos aumentou significativamente, com ocorrências mais próximas no tempo, especialmente a partir dos anos 2000.

Com relação à cheia de 1969, considerada a mais letal, esta ocasionou a morte de aproximadamente 1.100 pessoas em um período de apenas quatro horas. O município de São José da Laje foi o mais severamente afetado, em decorrência da cheia do rio Canhoto, afluente do rio Mundaú, tendo registrado 400 óbitos, a destruição de cerca de 1.200 residências e aproximadamente 10 mil desabrigados (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010b).

Nos anos seguintes, em 1988 e 1989, uma sequência de duas enchentes assolou a região da bacia. A primeira causou danos expressivos à infraestrutura, impactando 21 municípios. Durante esse episódio, o nível máximo de cheia registrado na estação Fazenda Boa Fortuna (Rio Largo/AL), no rio Mundaú, alcançou uma vazão máxima registrada de 912 m<sup>3</sup>/s. O segundo evento afetou 17 municípios, gerando custos de recuperação da infraestrutura estimados em 200 milhões de dólares, com uma vazão estimada em 1,042 m<sup>3</sup>/s na estação Fazenda Boa Fortuna (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010b).

Em resposta a essa série de desastres, o Governo do Estado de Alagoas, em colaboração com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e a Organização dos Estados Americanos (OEA), elaborou um relatório que propunha uma série de medidas para mitigar os problemas decorrentes das cheias. Dentre essas medidas, destacavam-se a drenagem de águas, a contenção de enchentes por meio de reservatórios, o reflorestamento da bacia, intervenções nas calhas dos rios e a implementação de um sistema de alerta e prevenção contra enchentes. Contudo, essas medidas não foram efetivamente implementadas na época

(FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010b).

Posteriormente, em 2000, a bacia foi novamente afetada por uma enchente. A cota máxima atingiu 9,79 m, ultrapassando em mais de quatro metros a cota de alerta de 5,45 m, e o pico da vazão alcançou o valor de 622 m<sup>3</sup>/s (REIS; SILVA JÚNIOR; PEDROSA, 2000). Esse evento resultou em 36 mortes, 76 mil pessoas desabrigadas, além da destruição de dezenas de milhares de residências e 14 pontes. A infraestrutura de transporte ferroviário foi interrompida devido à destruição das linhas férreas (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010b).

Em junho de 2010, fortes temporais originários de sistemas meteorológicos costeiros marcaram drasticamente mais uma vez a história da bacia. Diversos municípios nos Estados de Pernambuco e Alagoas foram afetados, resultando em perdas humanas e danos significativos ao ecossistema local e à infraestrutura (CPRM, 2010). A força das águas causou a destruição completa de cidades, como Palmares/PE, onde aproximadamente 100% das casas foram devastadas, e Branquinha/AL, com 80% de destruição. Apesar da magnitude do desastre, a rápida resposta dos estados minimizou os danos humanos. Contudo, as perdas e danos foram significativos, estimados em bilhões de reais, conforme relatório do Banco Mundial (2012).

Nos anos mais recentes, novos episódios de cheias extremas atingiram a bacia, resultando em perdas humanas e devastação nas cidades. O evento de 2022 ganhou notoriedade a nível nacional devido à sua magnitude e ao seu impressionante poder de destruição. Todos os municípios inseridos na bacia do Mundaú foram afetados pela inundação, levando os governadores dos estados de Alagoas e Pernambuco a declararem estado de emergência. Em União dos Palmares, na Zona da Mata de Alagoas, o nível do rio Mundaú chegou a 8,70 metros, muito acima da cota de transbordamento, que   de 5,80 metros (CPRM, 2010). De acordo com o Banco Mundial (2012), São José da Laje, por exemplo, registrou um total de 689 pessoas desabrigadas, além de 3.194 desalojadas devido às chuvas intensas.

No que concerne   enchente ocorrida em 2023, diversos municípios situados na bacia foram novamente afetados, destacando a persistência desses eventos na região. Semelhante a 2022, a inunda o de 2023 também causou impactos significativos em várias cidades da bacia do rio Mundaú, resultando em desabrigados, desalojados e danos   infraestrutura local. A Figura 11 retrata uma parte da inunda o ocorrida em 2022, enquanto a Figura 12 representa um exemplo dos estragos ocasionados pela inunda o de 2023.

Figura 11 – Inundação da cidade de São José da Laje – AL



Fonte: G1 Alagoas (2022).

Figura 12 – Danos à infraestrutura devido à enchente do rio Mundaú em Murici – AL

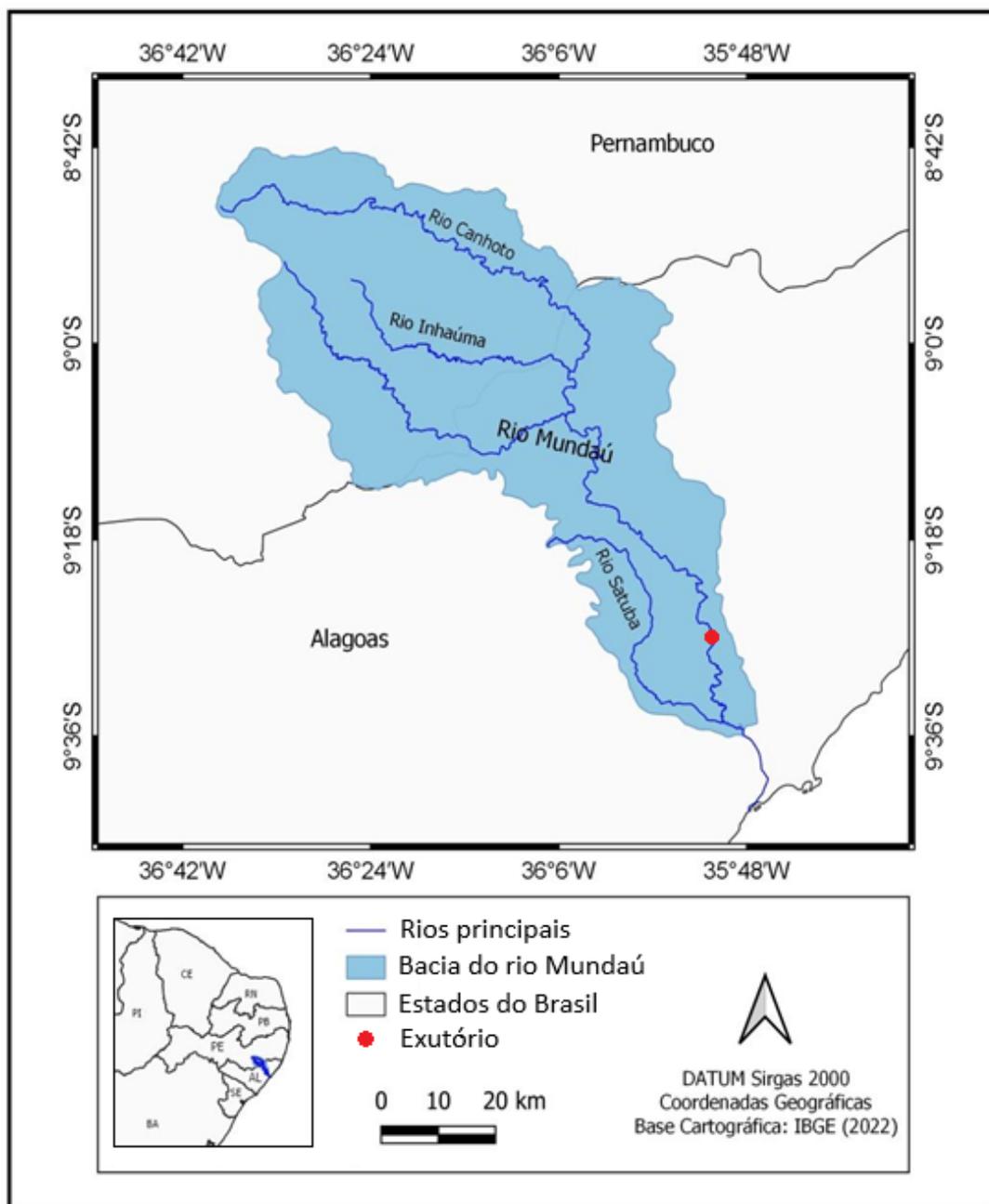


Fonte: G1 Alagoas (2023).

### 3.2 LOCALIZAÇÃO

A bacia está localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco, sendo delimitada pelas coordenadas geográficas:  $8^{\circ}42'32''$  e  $09^{\circ}42'50''$  de latitude Sul e,  $36^{\circ}41'21''$  e  $36^{\circ}18'14''$  de longitude Oeste (Figura 13). Possui uma área total de 4.131,4 km<sup>2</sup> distribuída em 33 municípios, dos quais 16 pertencem a Pernambuco e 17 a Alagoas. Outras características da bacia podem ser encontradas na Tabela 3.

Figura 13 – Localização geográfica da bacia do rio Mundaú



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

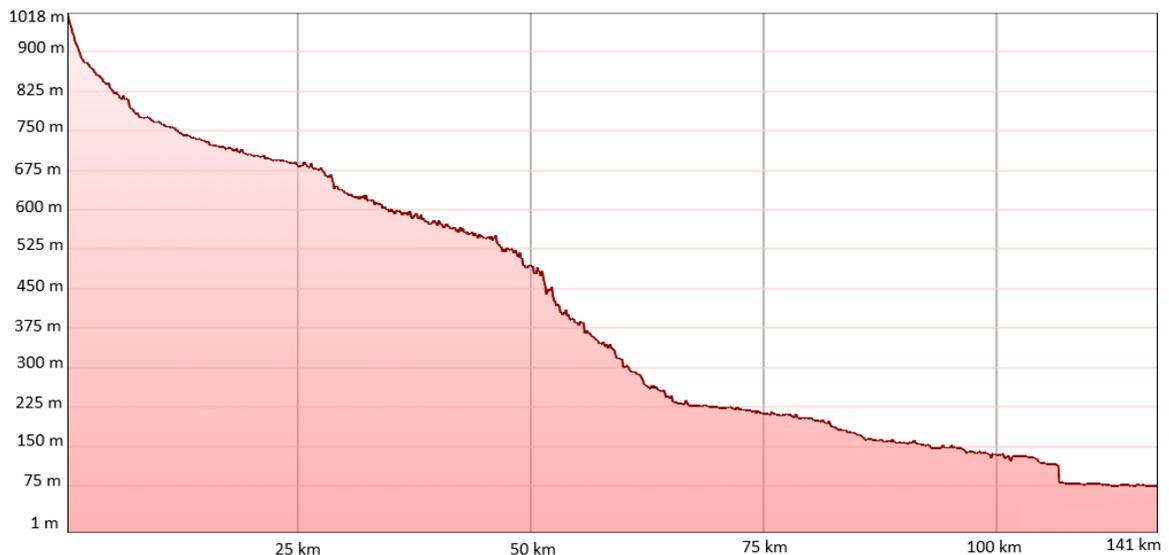
Tabela 3 – Características físicas da bacia do rio Mundaú considerando a área de drenagem a partir do exutório adotado neste estudo

Características	Unidade	Valores
Área (A)	Km <sup>2</sup>	3.592,36
Perímetro (P)	Km	315,24
Coeficiente de compacidade	-	1,72
Fator de forma (kf)	-	0,24
Densidade de drenagem	km/km <sup>2</sup>	0,23
Declividade média	m/m <sup>2</sup>	0,0032
índice de sinuosidade (Is)	%	81,46
índice de rugosidade (Ir)	-	4,43

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Seu rio principal, o Mundaú, é perene e percorre aproximadamente 141 km, com uma vazão média de 30,6 m<sup>3</sup>/s. Sua nascente está localizada a 1018 m de altitude, na parte oeste de Garanhuns, na região do Planalto da Borborema, e seu escoamento se dá no sentido sudeste, até a confluência com o oceano Atlântico, seus principais afluentes são os rios Canhoto, Inhaúma e Satuba. O trecho total do rio apresenta variações altimétricas bastante acentuada, conforme o perfil longitudinal mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Perfil do rio Mundaú entre a nascente e a foz



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

### 3.3 DINÂMICA CLIMÁTICA

A bacia hidrográfica do rio Mundaú apresenta significativa heterogeneidade climática ao longo de sua extensão. Conforme descrito por [Costa \(2014\)](#), sua porção superior insere-se no bioma Caatinga, caracterizando-se por clima semiárido e integrando o chamado Polígono das Secas. Em contraposição, a porção inferior da bacia percorre áreas do bioma Mata Atlântica até sua foz, onde predominam condições climáticas tropicais.

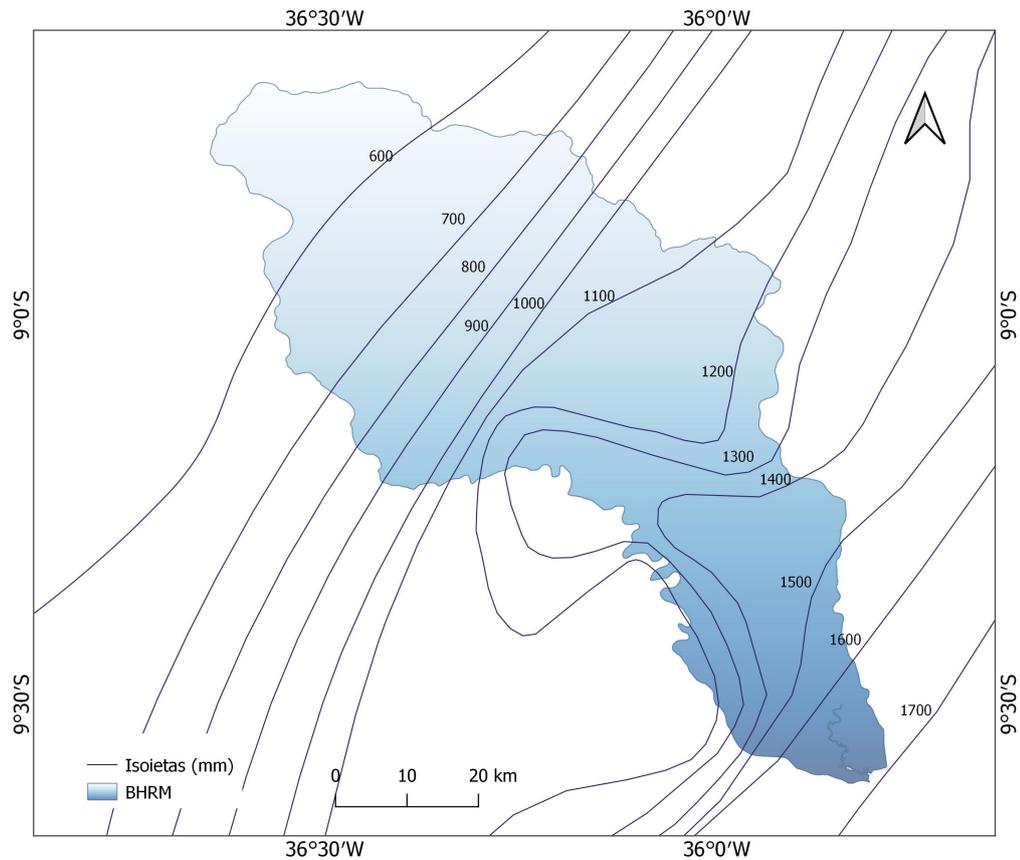
A temperatura média anual na região da bacia hidrográfica do rio Mundaú é de aproximadamente 24° ([ALVAREZ et al., 2013](#)). O regime pluviométrico da bacia caracteriza-se por uma expressiva variabilidade espacial (ver Figura 15). Na porção situada no estado de Pernambuco, a precipitação média anual varia entre 500 mm e 1.100 mm, enquanto na porção alagoana os valores são mais elevados, oscilando entre 1.100 mm e 1.700 mm.

Segundo [Pereira et al. \(2017\)](#), a distribuição sazonal das chuvas é marcadamente concentrada entre os meses de março e agosto, período responsável por cerca de 70% do total anual. O período seco estende-se de setembro a fevereiro, refletindo a influência de padrões sazonais característicos da região Nordeste.

O regime e a distribuição espacial das precipitações médias são significativamente modulados pela configuração do relevo e pela atuação de diversos sistemas meteorológicos característicos da costa leste do Nordeste. Entre esses sistemas, destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Sistemas Frontais (SF) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) ([KAYANO; ANDREOLI, 2009](#)). Além desses, os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) constituem outro mecanismo atmosférico relevante para a região, conforme apontado por [Coutinho e Fisch \(2007\)](#).

Os registros pluviométricos durante o período chuvoso evidenciam a influência predominante da ZCIT no regime de chuvas da bacia. No entanto, a atuação dos DOLs, quando presente, pode induzir anomalias positivas de precipitação, resultando em eventos de chuva intensa que frequentemente culminam em episódios significativos de inundação.

Figura 15 – Isoietas de precipitação média anual da bacia do rio Mundaú

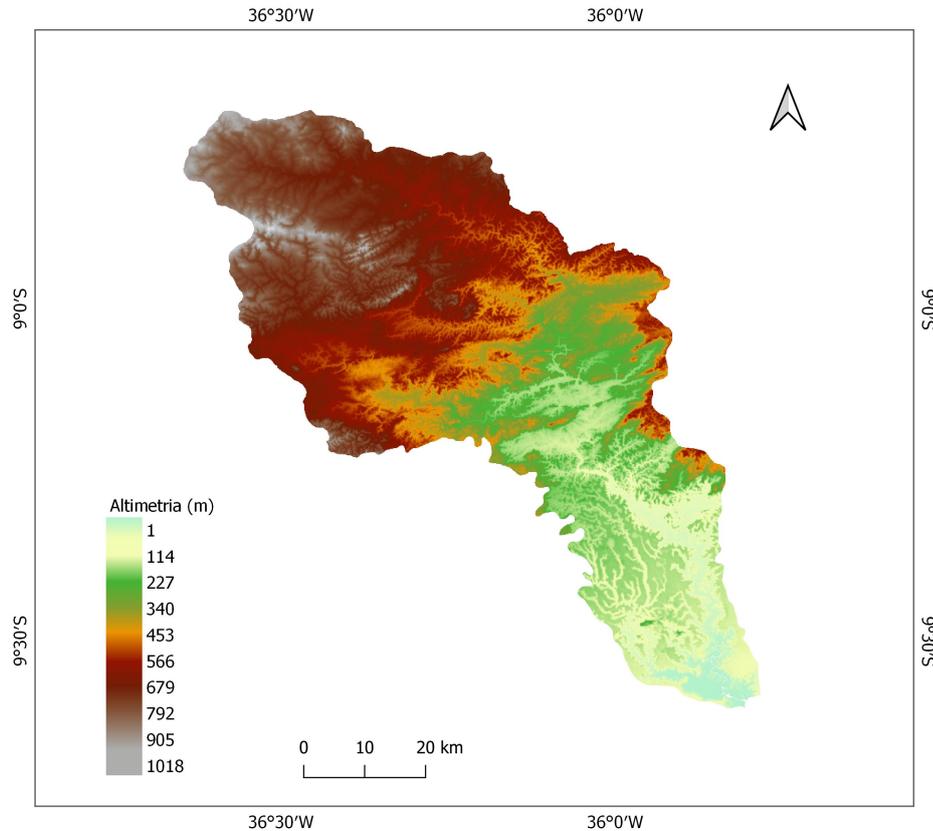


Fonte: Elaborada pela autora (2025).

### 3.4 RELEVO

A Figura 16, que representa a hipsometria da bacia, evidencia um relevo bastante recortado e acidentado, compartimentado, dividido, no contexto regional, em dois domínios geomorfológicos distintos: o Planalto da Borborema, presente nas porções média e superior do curso da bacia, e os Tabuleiros Costeiros, localizados na região inferior. A altitude na bacia varia consideravelmente, com uma mínima de 1 m nos extremos da porção Sudeste e uma máxima de 1.118 m nos extremos da porção Noroeste, resultando em uma altitude média de 559,5 m.

Figura 16 – Hipsometria da bacia do rio Mundaú

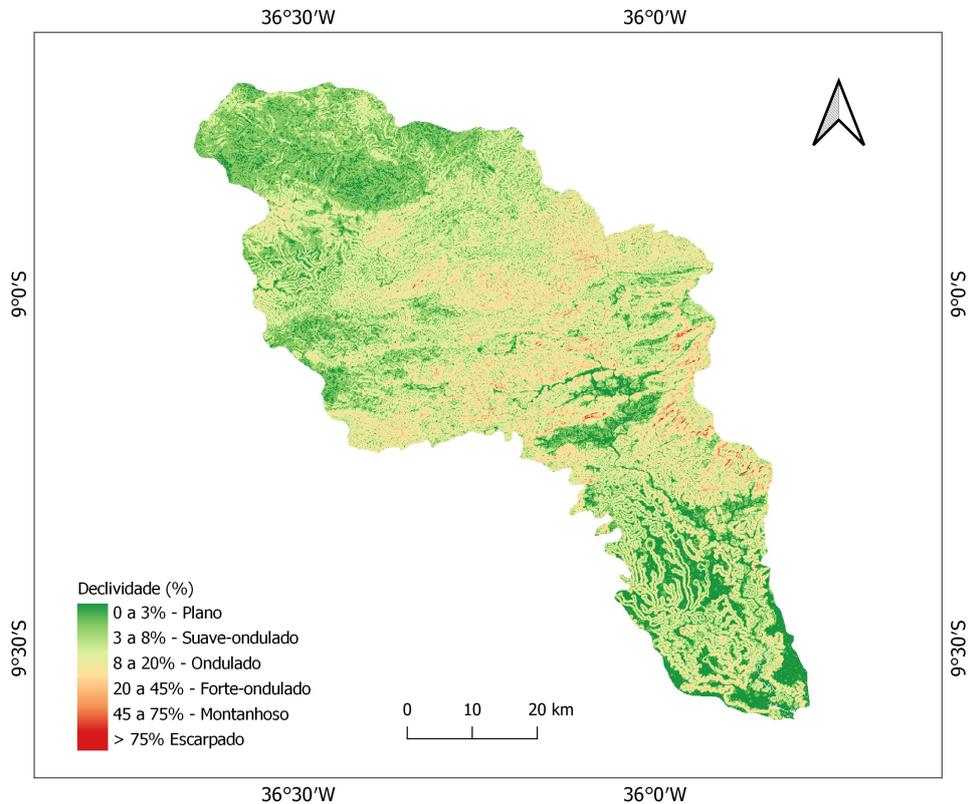


Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Figura 17 apresenta a caracterização do relevo da bacia do rio Mundaú a partir da individualização de seis classes de declividade, conforme a classificação da [EMBRAPA \(1979\)](#). As classes identificadas e suas respectivas áreas são: Relevo Plano (518,9 km<sup>2</sup>), Suave Ondulado (1.152,3 km<sup>2</sup>), Ondulado (1.618,8 km<sup>2</sup>), Forte Ondulado (811,0 km<sup>2</sup>), Montanhoso (3,1 km<sup>2</sup>) e Escarpado (3,3 km<sup>2</sup>).

A bacia hidrográfica apresenta uma topografia heterogênea, caracterizada pela predominância do relevo Ondulado, seguida por áreas classificadas como Suave Ondulada e pela presença de trechos Forte Ondulado. No trecho médio da bacia, localizado na divisa entre os estados, a variação topográfica é ainda mais acentuada, abrangendo todas as classes de relevo, com predominância do Forte Ondulado e Montanhoso, além da ocorrência pontual de trechos Escarpados. Essa configuração geomorfológica influencia diretamente a dinâmica hidrológica da bacia, resultando em uma resposta hidrológica relativamente rápida após eventos de chuva extrema provenientes das cabeceiras durante a estação chuvosa. Esse comportamento está associado à recorrência de inundações repentinas na bacia.

Figura 17 – Declividade da bacia do rio Mundaú



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

### 3.5 SOLOS

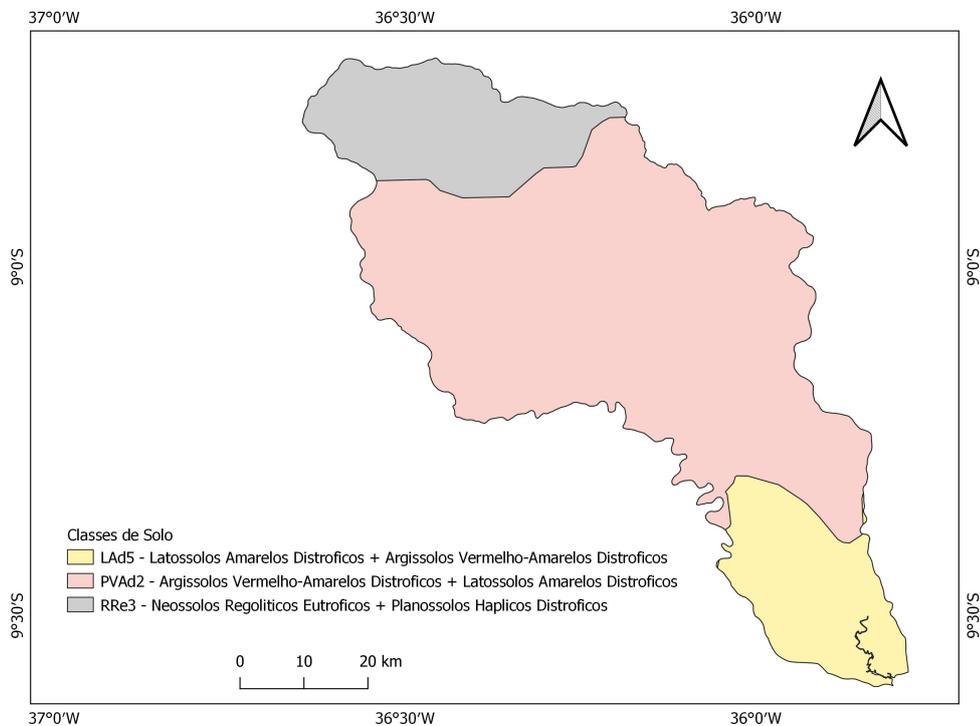
A Figura 18 apresenta o mapa dos solos predominantes na bacia do rio Mundaú. A classe mais representativa é a dos solos Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, secundado pelo Latossolos Amarelos Distróficos, que juntos ocupam um percentual de 68,98% da área total da bacia. Esses solos predominam ao longo do Médio Mundaú e também em parte das áreas do Alto e Baixo Mundaú, ocorrendo em regiões de relevo Ondulado, Forte Ondulado, Montanhoso e Escarpado, o que os tornam altamente suscetíveis à erosão. Segundo Souza e Lobato (2004), solos argilosos situados em declividades acima de 8% apresentam dificuldades no controle da erosão, como ocorre na bacia em estudo.

Os Neossolos, que representam 19,9% da área do Alto Mundaú, predominam em regiões de relevo Plano a Ondulado. Esses solos apresentam baixa capacidade de infiltração e retenção de umidade, favorecendo o aumento do escoamento superficial. Essa característica influencia diretamente a suscetibilidade à inundação no Médio Mundaú.

Por fim, os Latossolos Amarelos Distróficos, abrangendo 14,12% da área da bacia, possuem

boas condições físicas de retenção de umidade e permeabilidade, sendo amplamente utilizados para o cultivo de cana-de-açúcar e pastagens (SANTOS et al., 2018).

Figura 18 – Solos da bacia hidrográfica do rio Mundaú



Fonte: Adaptada de IBGE (2019).

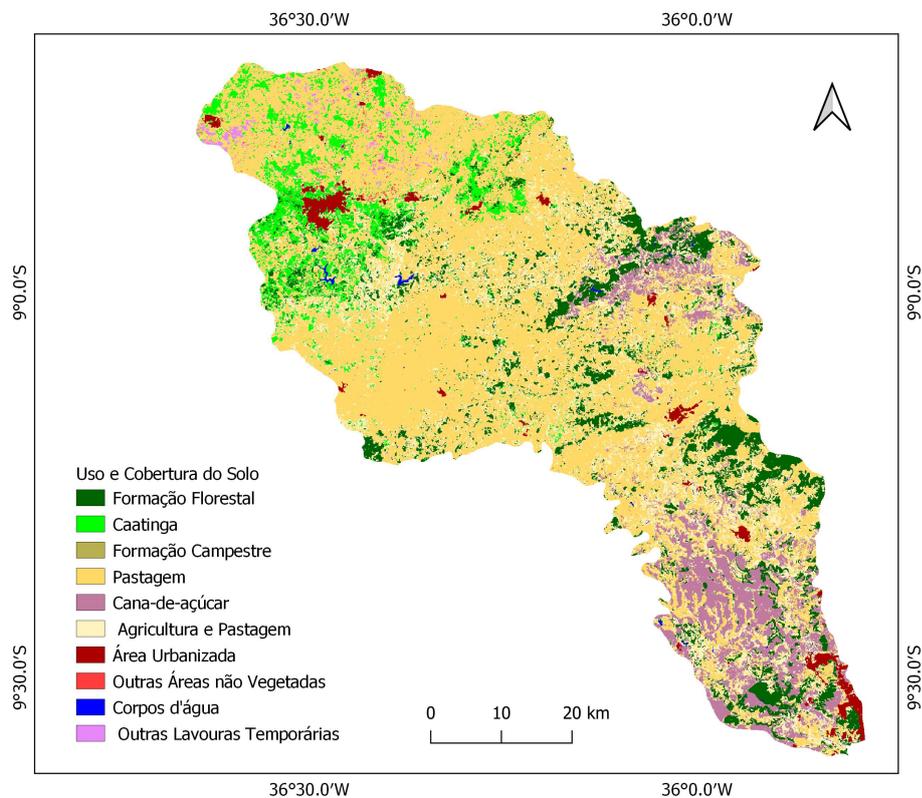
Os solos presentes na bacia desempenham um papel fundamental na susceptibilidade a inundações. Na região do Alto Mundaú, a presença de solos mal drenados intensificam esse problema, pois sua capacidade de infiltração é limitada, resultando em um aumento da lâmina d'água durante eventos de precipitação intensa. Por outro lado, solos bem drenados, quando saturados durante o período chuvoso, também podem contribuir para o aumento do escoamento superficial, uma vez que sua capacidade de retenção de água se torna insuficiente.

### 3.6 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A avaliação da cobertura vegetal e dos padrões de uso do solo é fundamental para a compreensão dos eventos de enchentes, uma vez que a redução da interceptação da precipitação pelas copas das árvores, causada pela supressão vegetal para implantação de atividades antrópicas, pode amplificar esses eventos (FRANCO; SANTO, 2015). Além disso, a compactação do solo, resultante de diversas atividades humanas, reduz sua capacidade de infiltração, intensificando o escoamento superficial e aumentando o potencial de inundação.

A Figura 19 apresenta as diferentes categorias de cobertura vegetal e uso do solo na bacia do rio Mundaú no ano de 2020. O processo de classificação identificou 10 classes, organizadas em dois grupos principais. O primeiro grupo corresponde às áreas naturais, abrangendo formações florestais, caatinga, formações campestres e corpos d'água. O segundo grupo engloba as áreas antrópicas, que incluem atividades como agricultura, agropecuária, pastagem e áreas urbanizadas.

Figura 19 – Uso e cobertura da bacia hidrográfica do rio Mundaú



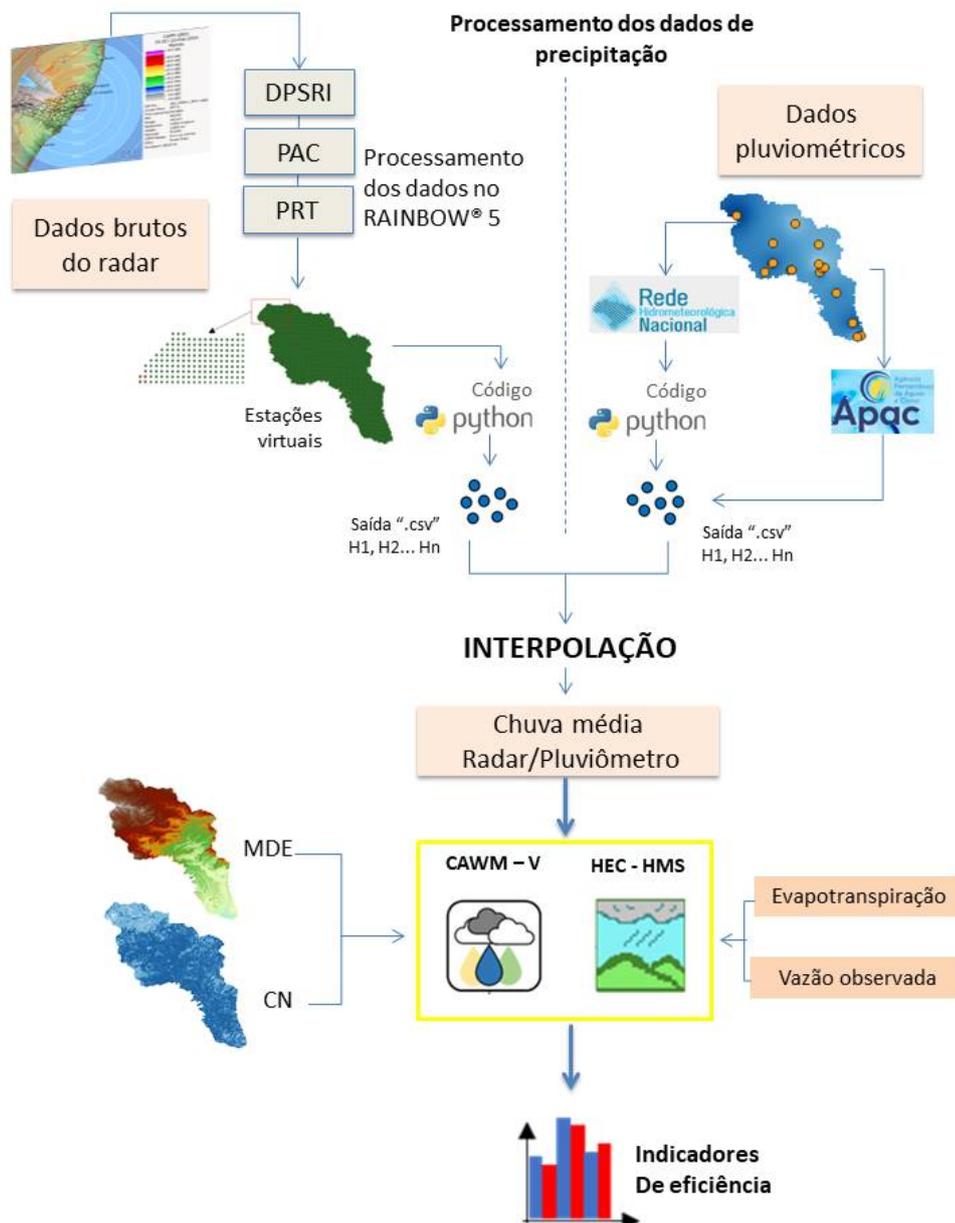
Fonte: [Farias et al. \(2021\)](#).

Ao analisar as classes de origem antrópica, observa-se que a pastagem é a categoria predominante, ocupando uma área de 2.12,7 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 51,28% da área total da bacia. Em seguida, destaca-se o mosaico de agricultura e pastagem, que abrange 819,0 km<sup>2</sup> (19,77%). Além disso, verifica-se a reduzida extensão de áreas vegetadas, que totalizam 622,69 km<sup>2</sup> (14,03%). Esses valores refletem a intensa exploração da bacia hidrográfica, que resultou em um expressivo processo de desmatamento, com impactos diretos no aumento do escoamento superficial, intensificação da erosão, assoreamento e, conseqüentemente, na dinâmica das enchentes na bacia, conforme destacado por [Farias et al. \(2021\)](#).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta em detalhes os métodos e procedimentos empregados na modelagem hidrológica chuva-vazão, utilizando os modelos CAWM-V e HEC-HMS 4.12. As seções subsequentes estão organizadas de forma sequencial, refletindo o fluxo das atividades desenvolvidas para atender aos objetivos da pesquisa. A Figura 20 fornece uma visão geral das etapas metodológicas, sintetizando o processo de modelagem hidrológica descrito ao longo deste capítulo.

Figura 20 – Estrutura geral do trabalho



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.1 SELEÇÃO DOS EVENTOS DE CHEIAS

Conforme discutido na Seção 3.1, a bacia hidrográfica do rio Mundaú apresenta de histórico de recorrentes enchentes e inundações, constituindo um desafio persistente para a região. No entanto, a disponibilidade de dados sobre esses eventos é limitada, o que tem dificultado análises mais detalhadas e robustas ao longo do tempo. Apenas recentemente a bacia passou a contar com um monitoramento hidrometeorológico mais estruturado, possibilitando uma coleta de dados mais sistemática.

Considerando as limitações tanto nas informações hidrometeorológicas das estações de monitoramento quanto nos dados fornecidos pelos radares meteorológicos, a seleção dos eventos de cheias neste estudo foi baseada, prioritariamente, na disponibilidade de dados monitorados pelos radares meteorológicos de Alagoas e/ou Pernambuco que apresentassem a menor quantidade de falhas de processamento. Além disso, foi necessário que esses eventos também tivessem sido registrados pela estação fluviométrica, garantindo a disponibilidade de dados de vazão observados para a análise. Os detalhes dos eventos selecionados estão apresentados na Tabela 4. Vale destacar que não foi reconstruir e simular o Evento 4 completo porque o posto fluviométrico arrastado pela enxurrada, interrompendo as medições durante o evento.

Tabela 4 – Eventos de cheias selecionados para o estudo

<b>Evento</b>	<b>Data Início</b>	<b>Data Fim</b>	<b>Duração Tempo (h)</b>	<b>Vazão Max (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	29/06/2015	11/07/2015	312	355,7
2	18/05/2017	30/05/2017	312	697,0
3	08/06/2020	19/06/2020	288	591,8
4	28/06/2022	02/07/2022	116	1.187,33

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.2 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

A inicialização de modelos hidrológicos requer a integração de diversos conjuntos de dados essenciais para representar, com o máximo de precisão, os processos hidrológicos inerentes a uma bacia hidrográfica. No contexto deste estudo, são utilizados dados meteorológicos, como precipitação e evapotranspiração, além de dados hidrológicos, como vazão. Adicionalmente, é imprescindível a incorporação de informações fisiográficas detalhadas, incluindo a área de

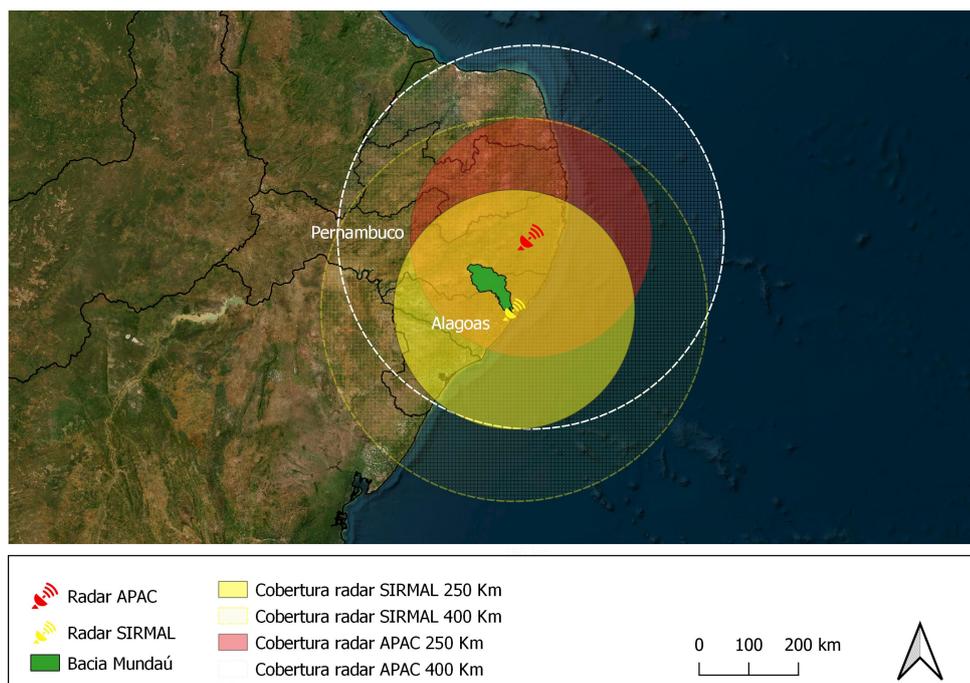
drenagem, o comprimento e a densidade da rede de drenagem, a declividade média da bacia, assim como dados referentes ao solo e à cobertura vegetal. Nos tópicos subsequentes, serão descritos, de forma detalhada, os procedimentos adotados para a aquisição, processamento e tratamento dessas informações.

#### 4.2.1 Precipitação estimada por radar meteorológico

Neste estudo, foram utilizados dados de precipitação estimada pelos radares meteorológicos S-POL de Alagoas e METEOR 1700S de Pernambuco. O radar S-POL é gerenciado pelo Cemaden e foi instalado no Campus A.C. Simões da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) em 2014, enquanto o radar METEOR 1700S é operado pela APAC e está localizado em Chã Grande, Pernambuco.

Ambos os radares são do tipo banda S, Doppler, com dupla polarização e possuem um alcance máximo de 400 km. O modo padrão, a varredura com raio de 250 km é utilizada para estimativa quantitativa de precipitação, enquanto o raio de 400 km é empregado no modo de vigilância, voltado para estimativas qualitativas de precipitação. A Figura 21 ilustra a localização e a cobertura espacial dos radares, e a Tabela 5 apresenta suas principais especificações.

Figura 21 – Localização dos radares meteorológicos SIRMAL e APAC



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 5 – Características técnicas do radar meteorológico banda S

<b>Tipo de parâmetro</b>	<b>Configuração</b>
Diâmetro da antena (m)	8
Ganho da antena (dB)	44,5
Largura do feixe (°)	1
Comprimento de onda (cm)	8 - 15
Modo de operação	Transmissão e recepção (horizontal e vertical)
Varredura volumétrica	15 inclinações
Resolução espacial máx (km/pixel)	0,25
Resolução temporal (min)	10
Raio de alcance (km)	400
Software meteorológico	RAINBOW®5

Fonte: Manual Técnico do RAINBOW®.

Esses radares utilizam o software meteorológico padrão RAINBOW® 5, uma plataforma robusta que oferece uma ampla gama de produtos relacionados à precipitação. No contexto deste estudo, a seleção dos produtos mais adequados foi essencial para a modelagem hidrológica chuva-vazão. Conforme destacado por [Chaney, Smith e Baeck \(2022\)](#) e [Cho et al. \(2022\)](#), as varreduras de baixa altitude fornecem informações valiosas sobre a variabilidade da precipitação, especialmente para bacias hidrográficas propensas a chuvas intensas e de curta duração.

Dessa forma, para este trabalho, foram selecionados os produtos Intensidade de Precipitação de Superfície com Dupla Polarização (DPSRI) e Intensidade de Precipitação de Superfície (SRI), que fornecem estimativas de precipitação na superfície. O algoritmo DPSRI utiliza, além do fator de refletividade do radar ( $Z$ ), a combinação de outras variáveis polarimétricas, como a refletividade diferencial ( $Z_{dr}$ ) e fase diferencial específica ( $K_{dp}$ ), para aprimorar as estimativas de precipitação (modo Dupla polarização). Por outro lado, o algoritmo SRI baseia-se exclusivamente no fator de refletividade do radar ( $Z$ ), correspondendo ao modo convencional de estimativa de precipitação.

É importante destacar que foi dada prioridade ao produto hidrológico DPSRI, devido à sua maior precisão na estimativa de precipitação. O produto SRI foi utilizado apenas em casos de falhas na varredura ou inconsistências nos dados bruto do radar. Essa estratégia foi adotada para garantir que todos os eventos de enchentes selecionados pudessem ser incluídos na modelagem hidrológica.

Para aprimorar a eficiência na geração de precipitação a partir dos dados brutos do radar, foram implementadas estratégias específicas. Inicialmente, foi definida uma varredura baixa ( $1^\circ$  de elevação) e estabelecida uma resolução de 1000 pixels por imagem, o máximo permitido pelo RAINBOW® 5. Além disso, para o radar de alagoas, foi adotado um raio de varredura de 150 km, resultando uma imagem com 300 km de diâmetro e uma resolução espacial de 0,3 km. Para os dados provenientes do radar da APAC, devido à maior distância em relação à bacia hidrográfica, foi estabelecido um raio de varredura de 250 km, resultando em uma resolução de 0,5 km. Essas configurações foram adotadas para assegurar maior detalhamento espacial na geração do produto e garantir estimativas de precipitação mais precisas.

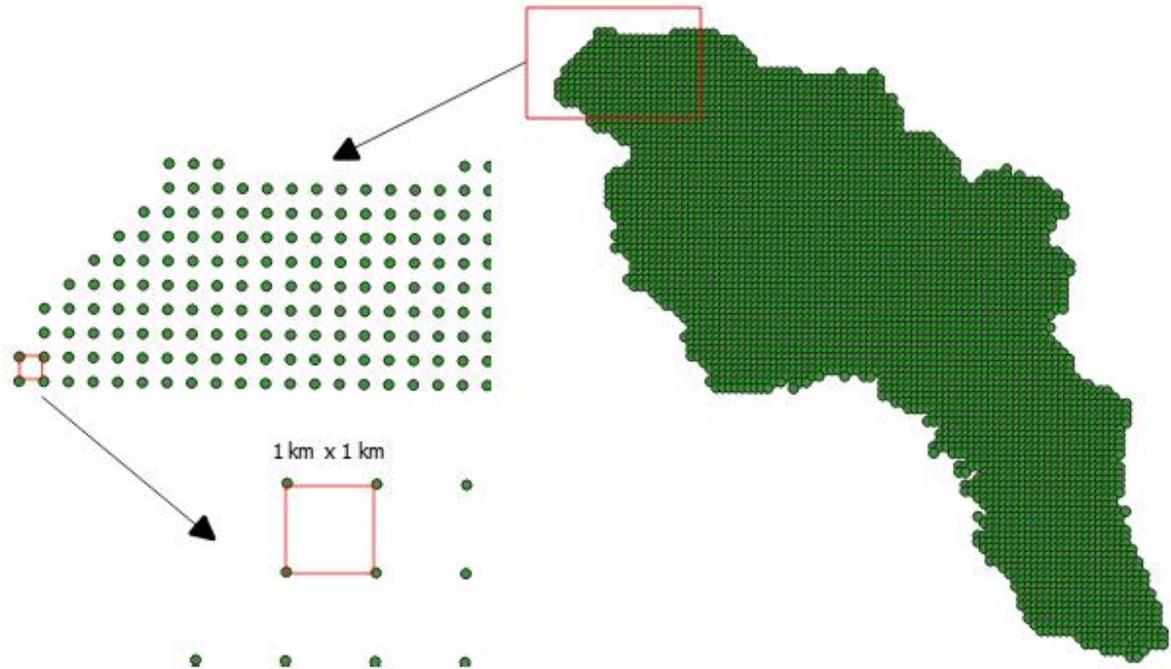
Com o objetivo de aumentar a precisão das estimativas de precipitação, além da seleção de produtos adequados, foram aplicadas as relações  $Z - R$  desenvolvidas por [Tenório, Moraes e Kwon \(2010\)](#) para chuvas estratiformes e convectivas no cálculo da precipitação estimada pelo produto DPSRI.

As estimativas de precipitação do radar, com acumulação temporal de 10 minutos, foram agregadas em intervalos de uma hora por meio do produto Precipitação Acumulada (PAC). Considerando que o modelo CAWM-V não incorpora dados em grade, as informações de precipitação foram extraídas em pontos específicos. Para representar adequadamente a distribuição espacial da chuva na bacia, foi definida uma grade com espaçamento regular de  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , totalizando 4.126 pontos, onde cada ponto equivale a uma estação pluviométrica virtual (Figura 22). As estimativas de precipitação em cada um desses pontos foram obtidas por meio do produto Precipitação Acumulada no Ponto (PRT) do sistema RAINBOW® 5.

Adicionalmente, foram desenvolvidas duas rotinas computacionais em Python para ler e organizar os dados de precipitação estimada pelo radar, seguindo a metodologia e abordagem definidas para cada modelo hidrológico.

Neste estudo, considerando a quantidade e a distribuição uniforme das estações virtuais ao longo da bacia, optou-se por calcular a precipitação média por meio do método da média aritmética. Nessas condições, esse método fornece uma estimativa adequada da precipitação média, eliminando a necessidade de aplicar técnicas mais complexas.

Figura 22 – Distribuição espacial dos pontos de grade das estações virtuais para extração de dados de precipitação estimada por radar meteorológico



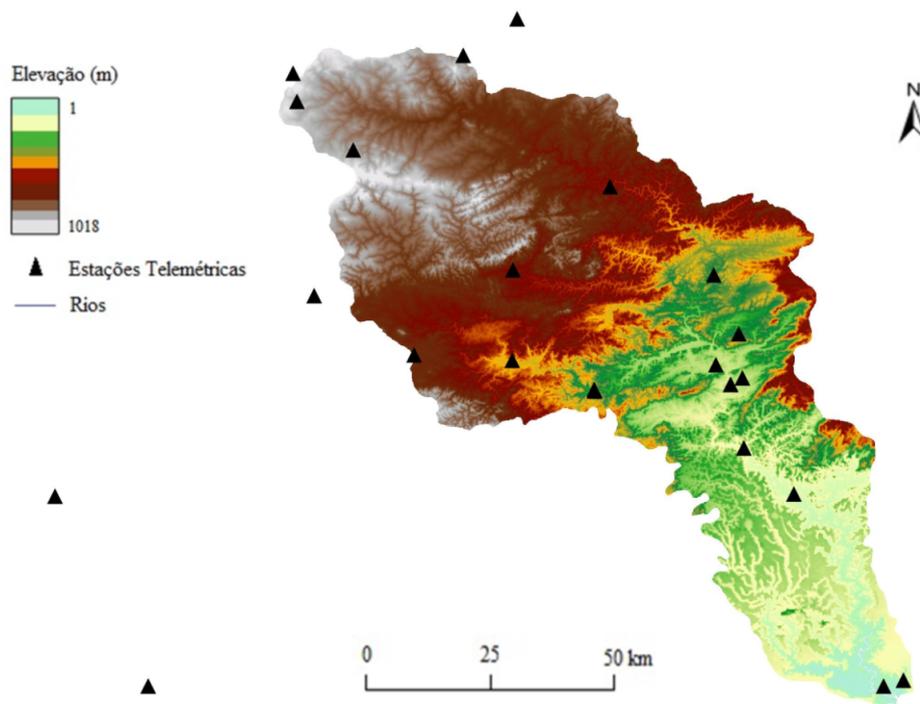
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.2.2 Precipitação de estações pluviométricas

Nesta pesquisa foram utilizados dados de precipitação horária provenientes de 22 estações telepluviométricas, cujas informações estão disponíveis nos portais da ANA, da APAC e do CEMADEN. A Figura 23 apresenta distribuição espacial da rede de estações pluviométricas automáticas na bacia do rio Mundaú e em áreas adjacentes. A lista de postos, incluindo nome, código, responsável pela operação e coordenadas geográficas encontra-se na Tabela 6.

Esses dados de precipitação estão disponíveis no Sistema HIDRO – Telemetria em intervalos de 15 minutos. Para automatizar a extração e organização desses dados em intervalos horários, foi desenvolvida uma rotina computacional em Python, executada no ambiente integrado de desenvolvimento *Google Colab*. A saída do código consiste em um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*) para cada estação, contendo registros diários, informações dos postos pluviométricos, coordenadas e medições de precipitação horária.

Figura 23 – Distribuição espacial das estações telemétricas utilizadas no estudo



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Com os dados de precipitação organizados, os valores registrados pelos pluviômetros foram interpolados por meio do método de Ponderação pelo Inverso do Quadrado da Distância (IDW), implementado no software Excel. A partir dessa técnica, foi determinada a precipitação média da bacia, necessária para a modelagem com o modelo CAWM-V, bem como a precipitação média por sub-bacia hidrográfica, utilizada na modelagem com o HEC-HMS.

Devido ao número limitado de estações pluviométricas na área de estudo, o método IDW foi escolhido por se tratar de uma abordagem eficaz para interpolação espacial em regiões com baixa densidade de pontos de medição. Esse método atribui maior peso aos valores observados em pontos mais próximos, o que é particularmente relevante em contextos com estações distribuídas de forma espaçada. Além disso, essa técnica permite representar a variabilidade espacial da precipitação de forma simplificada, sem a necessidade de modelos mais complexos que demandam maior quantidade e densidade de dados. O IDW, amplamente utilizado na literatura, baseia-se na ponderação dos valores dos pontos vizinhos ao local de interesse, cuja influência decresce com o aumento da distância (SILVA, 2019).

Tabela 6 – Informações das estações telemétricas utilizadas no estudo

UF	Município	Código	Órgão responsável	Latitude	Longitude
PE	Brejão	39800000	ANA	-9.0394	-36.5983
PE	Cachoeirinha	39530000	ANA/CPRM	-8.2902	-36.1359
PE	Caetés	260320701A	CEMADEN	-8.7733	-36.6216
PE	Caetés	260320701C	CEMADEN	-8.4307	-36.4402
PE	Canhotinho	39575000	ANA/CPRM	-8.8900	-36.1960
PE	Capoeiras	260380101A	CEMADEN	-8.7348	-36.6270
PE	Correntes	260470001A	CEMADEN	-9.1280	-36.3290
PE	Garanhuns	260600201C	CEMADEN	-8.8397	-36.5451
PE	Jupi	260830501A	CEMADEN	-8.7103	-36.3956
PE	Lagoa do Ouro	260860201A	CEMADEN	-9.1205	-36.4623
PE	Lajedo	260880001A	CEMADEN	-8.6602	-36.3223
PE	Palmeirina	39715000	ANA/CPRM	-9.0040	-36.3280
AL	Atalaia	39870000	ANA	-9.3024	-36.0122
AL	Rio Largo	39770000	ANA/CPRM	-9.4672	-35.8597
AL	Santana do Mundaú	270810501A	CEMADEN	-9.1700	-36.2170
AL	Santana do Mundaú	39700000	ANA/CPRM	-9.1678	-36.2175
AL	São José da Laje	39720000	ANA/CPRM	-9.0110	-36.0550
AL	Satuba	270890701A	CEMADEN	-9.5740	-35.8240
AL	União dos Palmares	270930101A	CEMADEN	-9.1610	-36.0320
AL	União dos Palmares	39740000	ANA/CPRM	-9.0916	-36.0209

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.2.3 Dados de evapotranspiração

A estimativa da evapotranspiração foi realizada a partir de dados da estação meteorológica de Garanhuns/PE (código 82893), operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Vale ressaltar que essa é a única estação localizada dentro dos limites da bacia hidrográfica, não havendo outras estações de medição de evapotranspiração nas proximidades, o que limita a disponibilidade de dados regionais mais abrangentes.

#### 4.2.4 Dados de vazão

O posto fluviométrico selecionado para este estudo foi o da Fazenda Boa Fortuna, localizado no município de Rio Largo, Alagoas. Em operação desde outubro de 1965, este posto

é administrado pela ANA e integra O Sistema Web SACE-Mundaú - Sistema de Alerta de Eventos Críticos da bacia do Rio Mundaú. A escolha deste posto se deve à sua característica telemétrica e à sua localização estratégica, que abrange uma área de 3.850 km<sup>2</sup>, correspondendo a 93,4% da área total da bacia hidrográfica. Detalhes técnicos adicionais sobre o posto Fazenda Boa Fortuna estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Descrição técnica do posto fluviométrico Fazenda Boa Fortuna – AL

<b>Nome</b>	<b>Fazenda Boa Fortuna</b>
Código telemétrico	39770000
Município	Rio Largo
Responsável	ANA / DNAEE – ANEEL
Operadora	CPRM
Latitude	9° 29'1,99" Sul
Longitude	35° 31'34,99" Oeste

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os dados de vazão, provenientes do Sistema HIDRO – Telemetria e gerenciados pela ANA, são disponibilizados com intervalo temporal de 15 minutos. Para compatibilizá-los com a abordagem horária adotada nesta pesquisa, foi realizado um processo de agregação e reorganização dos dados. Esse procedimento seguiu metodologia semelhante àquela aplicada aos dados de precipitação obtidos nas estações pluviométricas automáticas.

#### 4.2.5 Representação do terreno

Dispor de informações detalhadas sobre a topografia da área de estudo é essencial para a simulação hidrológica. Uma abordagem comumente utilizada para a obtenção desses dados é o sensoriamento remoto, que permite a geração do Modelo Digital do Terreno (MDT). O MDT representa digitalmente a superfície real, fornecendo a altimetria do terreno em uma grade regular de pontos (SILVA, 2019).

Este estudo utilizou o MDT da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), refinado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio do projeto TOPODATA, resultando em uma resolução de 30 m × 30 m. Conforme destacado por Machado (2002), essa resolução é adequada para representar de maneira eficaz as características do terreno e os padrões de drenagem.

Os arquivos raster contendo os MDTs foram agrupados em uma única cena cobrindo toda a bacia do rio Mundaú, utilizando o procedimento de mosaico no software QGIS 3.10. Em seguida, o raster da bacia foi georreferenciado para o sistema de coordenadas UTM, com datum WGS 84, fuso 24S. A Figura 16 da seção 3.4 ilustra o MDT da bacia.

Ainda no QGIS, foram identificadas e corrigidas inconsistências na representação do terreno, seguidas pela delimitação da bacia hidrográfica e pela geração da rede de drenagem, a qual forneceu aos modelos hidrológicos as informações referentes às características físicas das bacias analisadas.

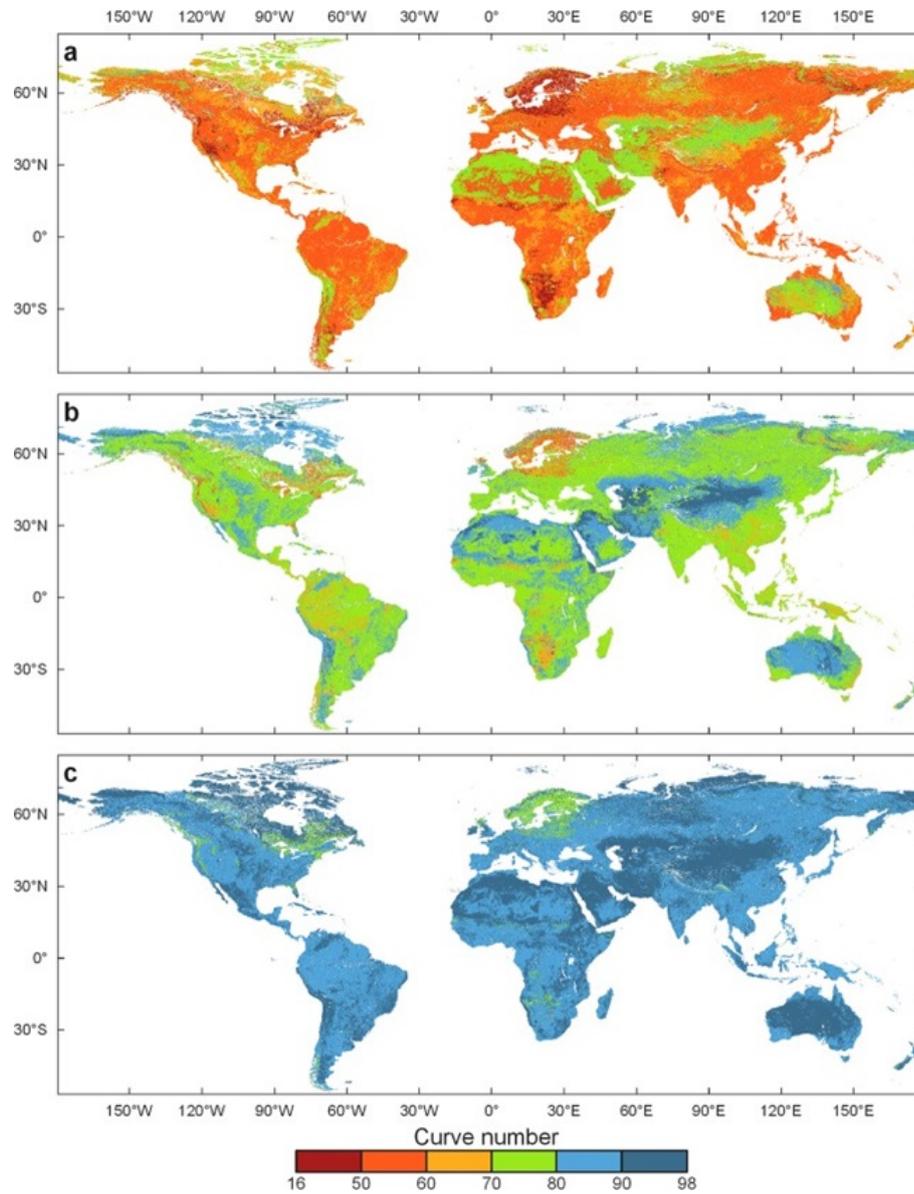
#### 4.2.6 Cálculo da Curva Número (CN)

O Curve Number (CN) é um parâmetro empírico desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (NRCS), projetado para estimar a chuva excedente a partir da precipitação total. O método do CN considera os principais fatores que influenciam a geração do escoamento, incluindo as características hidrológicas dos solos, representadas pelos grupos hidrológicos, a cobertura da terra e o uso do solo, as práticas conservacionistas adotadas na bacia e as condições de umidade antecedente. Todos esses elementos são combinados em um único índice, o CN, que constitui a base dessa metodologia (USDA-NRCS, 2004).

o CN é um valor tabelado que varia de 0 a 100, sendo que valores mais altos indicam uma maior taxa de escoamento superficial. Como o CN pode apresentar variação espacial dentro de uma bacia hidrográfica, sua aplicação em modelos hidrológicos depende da abordagem utilizada. Em modelos concentrados, como o CAWM, é necessário calcular uma média ponderada para representar adequadamente o comportamento hidrológico da bacia. Já em modelos semi-distribuídos, como o HEC-HMS, a inserção de dados em grade permite capturar essa variabilidade espacial de forma mais detalhada.

Neste estudo, os valores de CN da bacia hidrográfica do rio Mundaú foram obtidos a partir do produto Número de Curva Hidrológica Global (GCN 250), que fornece valores de CN em escala global. O conjunto de dados GCN 250 apresenta uma resolução aproximada de 250 metros e considera três condições de umidade antecedente ao escoamento superficial, conforme ilustrado na Figura 24.

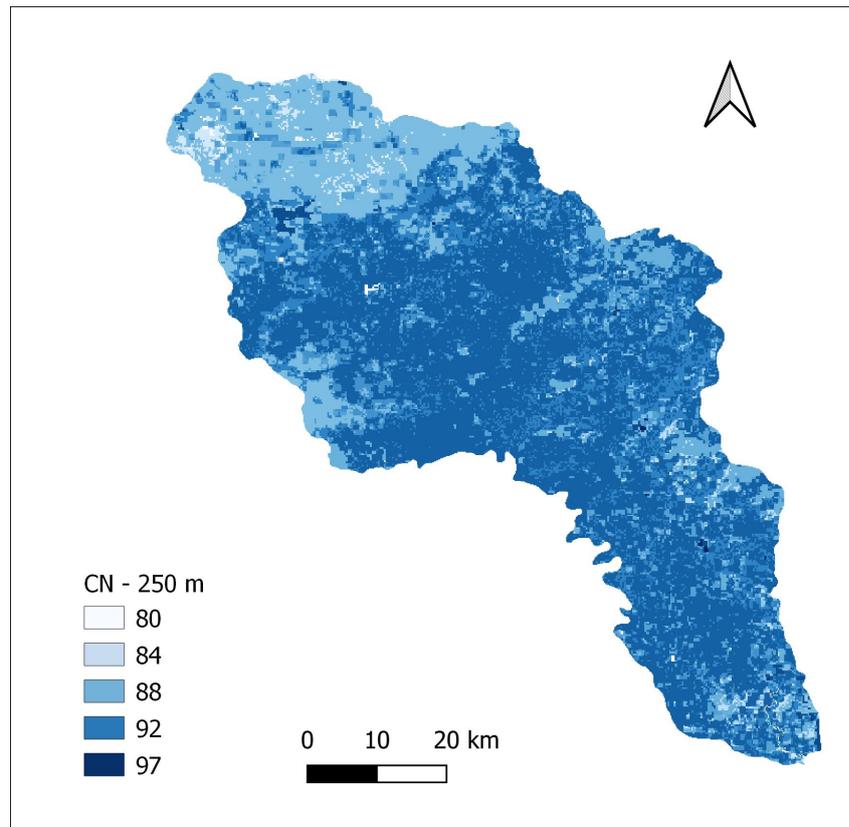
Figura 24 – Mapas globais de CN - (a) solo seco, (b) solo com umidade média e (c) solo úmido



Fonte: [Jaafar, Ahmad e Beyrouthy \(2019\)](#).

A partir do CN global, foi extraída a distribuição dos valores de CN para a área de estudo, considerando a condição de solo úmido (Figura 25). Essa escolha se justifica pelo foco da modelagem hidrológica deste estudo em eventos de enchentes, que ocorrem predominantemente durante a quadra chuvosa da bacia.

Figura 25 – Mapa CN para a bacia do rio Mundaú



Fonte: Elaborada pela autora a partir de [Jaafar, Ahmad e Beyrouthy \(2019\)](#).

#### 4.2.7 Capacidade máxima de armazenamento de água no solo

A capacidade máxima de armazenamento de água no solo ( $S$ ) é um conceito fundamental no método do Soil Conservation Service (SCS, 1956). Este método é amplamente utilizado na hidrologia para estimar a quantidade de água que o solo pode reter antes que o escoamento superficial comece a ocorrer durante um evento de precipitação, cujo cálculo é determinado pela equação:

$$S = \left( \frac{25400}{CN} \right) - 254, \quad (22)$$

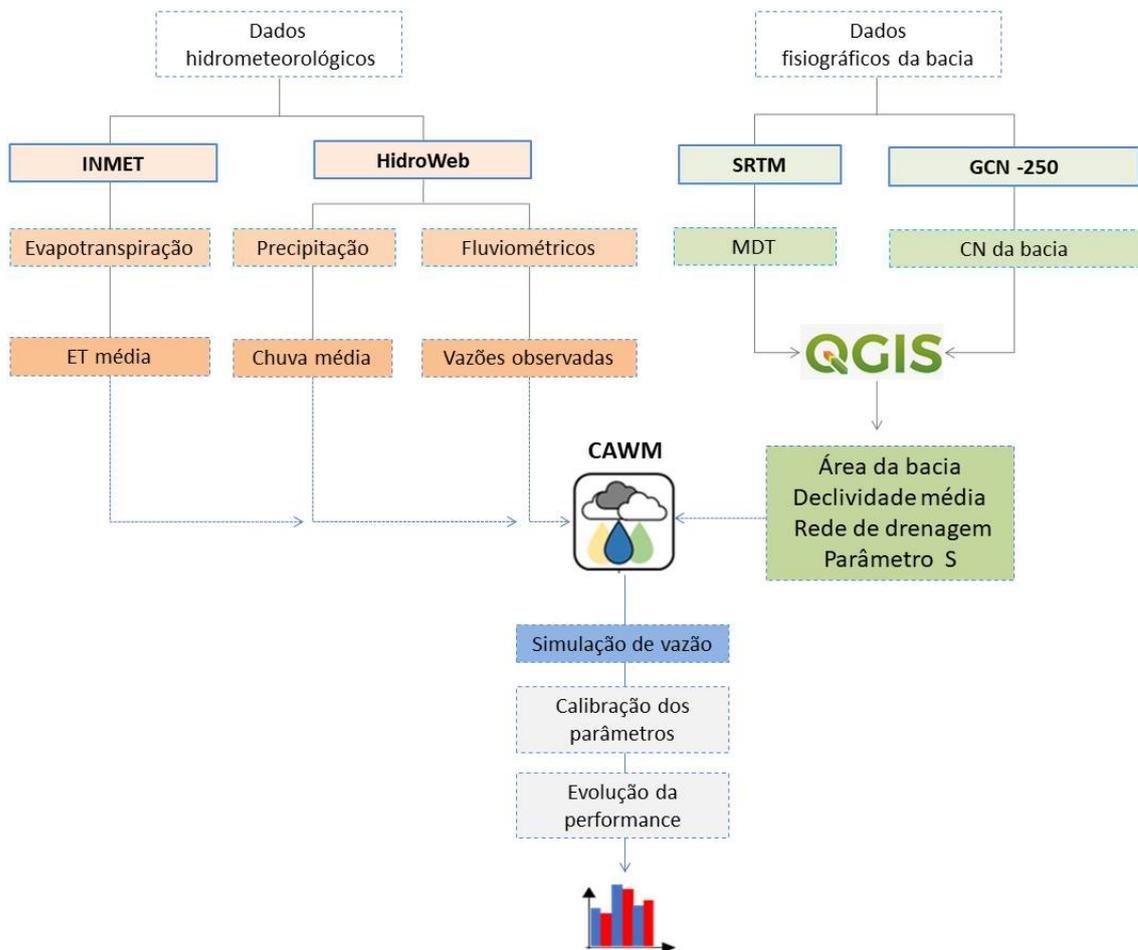
onde,  $S$  é a capacidade máxima de armazenamento de água no solo em mm.

Uma vez obtido os valores de CN através do GCN, foi possível determinar a capacidade máxima de armazenamento de água no solo da área de estudo, que será necessária nas aplicações dos modelos CAWM-V e do método de perdas de Déficit Constante disponível no HEC-HMS.

### 4.3 APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO CAWM - V

Concluída a aquisição e preparação dos dados necessários para alimentar o modelo, conforme descrito detalhadamente na seção anterior, iniciou-se o processo de modelagem hidrológica utilizando o CAWM-V, implementado no *Microsoft Office Excel*. Com a inserção dos dados de entrada, procedeu-se à etapa de calibração dos parâmetros do modelo, conduzida de forma automatizada por meio da ferramenta *Solver*, visando a otimização dos parâmetros. Posteriormente, foi realizada a etapa de validação. A Figura 26 apresenta de forma detalhada o fluxo metodológico adotado.

Figura 26 – Etapas da modelagem no CAWM-V



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

### 4.3.1 Adaptações do modelo CAWM-V

Uma das particularidades da aplicação proposta nesta pesquisa é a utilização de modelos hidrológicos para a simulação de cheias em uma bacia de médio porte com intervalos horários. Neste estudo, manteve-se a estrutura fundamental do modelo CAWM na versão V, realizando apenas um ajuste no intervalo de tempo. Originalmente projetado para simulações diárias, o modelo foi adaptado para operar em intervalos horários, possibilitando uma representação mais detalhada de eventos de cheias rápidas.

Embora o objetivo principal deste trabalho seja a simulação de eventos de cheias rápidas, o que idealmente exigiria uma escala temporal ainda mais refinada, como intervalos inferiores a uma hora, optou-se pelos intervalos horários. Essa escolha visou assegurar maior consistência entre os dados de radar meteorológico e as medições das estações telemétricas.

Com base na equação de escoamento na calha fluvial, as versões I a IV do modelo CAWM exigiam a determinação de diversas características físicas da bacia para o cálculo desse parâmetro, incluindo a área da bacia, comprimento total da drenagem, largura equivalente dos rios, declividade, entre outros aspectos. Na versão atual do modelo, o cálculo foi simplificado para depender apenas da área da bacia hidrográfica, o que facilita a estimativa sem comprometer a precisão necessária.

Neste estudo, também se aplicou o modelo HEC-HMS, que calcula automaticamente as características físicas da bacia. Assim, utilizou-se essas informações automatizadas em substituição à equação proposta na versão V do CAWM, que exige apenas da área da bacia. Para esse fim, foi empregado o MDT da bacia, no qual foram identificadas e corrigidas falhas na representação do terreno, permitindo a extração de características topográficas e hidrológicas essenciais para a modelagem.

Com os parâmetros físicos da bacia determinados, o modelo realiza o cálculo do coeficiente de escoamento superficial "K". Nesse contexto, a formulação desse coeficiente é influenciada pelo intervalo de tempo adotado, conforme apresentado na Equação 23.

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left( \frac{c^2 \cdot A_b^2}{B^2 \cdot LT^5} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

- $\Delta t = 3600$  s (1 hora, intervalo adotado neste estudo);
- Os dados de evapotranspiração devem ser reorganizados para o mesmo intervalo.

### 4.3.2 Parâmetros Calibráveis

A versão V do modelo CAWM diferencia-se das versões anteriores por requerer a calibração de apenas dois parâmetros:  $K_S$ , que representa a permeabilidade do solo, e  $K_L$ , o coeficiente linear de perdas na calha. Além disso, inclui o ajuste de três variáveis adicionais:  $p$ , que corresponde o coeficiente do expoente de perdas na calha;  $\beta$ , relacionado à infiltração; e  $\alpha$ , o coeficiente que regula a magnitude da evaporação. Essas variáveis complementam o processo de configuração do modelo, proporcionando maior precisão na simulação.

Para apoiar o processo de calibração e facilitar a inicialização da modelagem, o modelo fornece valores de referência definidos a partir de uma série de aplicações realizadas ao longo de seu desenvolvimento. Esses valores, derivados de análises em múltiplos cenários e validações sucessivas, oferecem um ponto de partida confiável para o processo de calibração e ajuste do CAWM.

Neste trabalho, para iniciar o processo de calibração do modelo CAWM-V, foram utilizados os parâmetros finais obtidos por Campos (2023), que conduziu um estudo envolvendo modelagens hidrológicas de eventos de cheias rápidas em diversas bacias hidrográficas do Brasil, incluindo a bacia do rio Mundaú, para a qual foram obtidos bons resultados. A Tabela 8 apresenta detalhadamente esses valores de referência.

Tabela 8 – Parâmetros do CAWM

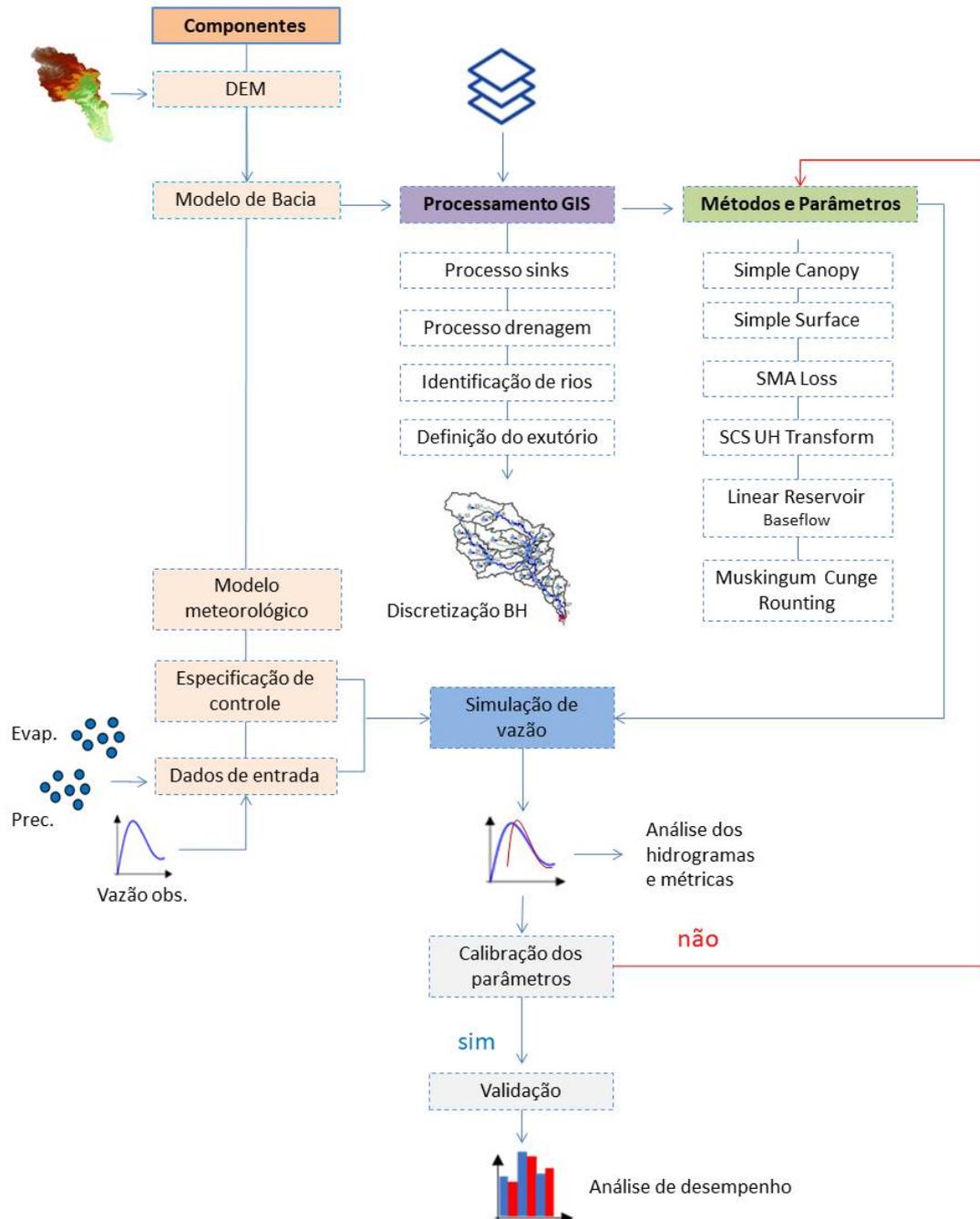
<b>Parâmetros</b>	<b>Valores de referência</b>
$K_L$	0,0 - 1,0
$K_S$	0,0 - 1,0
$\beta$	1,0 - 20,0
$p$	0,9 - 1,2
$b$	5/3
Coef. de escoamento K	0,0001 - 0,1

Fonte: Adaptada de Campos (2023).

#### 4.4 APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

Nesta seção, serão descritas as adequações do modelo HEC-HMS versão 4.12 para simular os eventos de cheias rápidas ocorridas na bacia do rio Mundaú. A Figura 27 apresenta de forma concisa a sequência das etapas envolvidas no processo de modelagem.

Figura 27 – Etapas de Simulação no HEC-HMS



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.4.1 Pré-processamento

As versões mais recentes do HEC-HMS incorporam diversas funcionalidades de geoprocessamento que anteriormente eram executadas por meio da extensão HEC-GeoHMS. Dessa forma, o pré-processamento de dados geoespaciais, essencial para a criação dos arquivos e informações necessárias à modelagem hidrológica, passou a ser realizado diretamente no ambiente do HEC-HMS, sem a necessidade de softwares adicionais.

Neste estudo, o MDT da bacia do rio Mundaú foi utilizado para delinear as sub-bacias e gerar a rede de drenagem. O primeiro passo envolveu a correção de falhas no MDT, utilizando a ferramenta *Sinks*, que corrige depressões espúrias. Posteriormente, foram geradas as camadas de direção de fluxo (*Flow Direction*) e de acúmulo de fluxo (*Flow Accumulation*), as quais são fundamentais para a definição da rede de drenagem e para a discretização da bacia hidrográfica.

A configuração da bacia no HEC-HMS foi estruturada com base em três tipos de elementos hidrológicos disponíveis: sub-bacias, trechos de rio e junções. Todos esses elementos foram interconectados para representar adequadamente a relação entre precipitação e vazão na modelagem hidrológica. A Figura 28 apresenta o esquema conceitual do modelo de bacia, destacando as 27 sub-bacias definidas.

Após o pré-processamento do MDT, o HEC-HMS realiza automaticamente o cálculo de onze características físicas das sub-bacias delineadas. Dentre essas características, destacam-se o comprimento do caminho mais longo do rio, o percurso a partir do centróide, a inclinação e o relevo das sub-bacias, a densidade de drenagem, além das propriedades associadas aos trechos fluviais. Essas informações são organizadas pelo modelo em uma tabela de atributos, a qual foi posteriormente exportada para o Excel, a fim de auxiliar na estimativa de parâmetros essenciais durante a etapa de parametrização da modelagem hidrológica.

Figura 28 – Representação esquemática do modelo de bacia construído



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.4.2 Métodos e Parâmetros para Modelagem Hidrológica

O modelo HEC-HMS, amplamente reconhecido por sua robustez e versatilidade, oferece uma extensa gama de opções para modelagem hidrológica, incluindo oito métodos de perdas de precipitação, oito métodos de transformação de escoamento, cinco tipos de fluxo de base e oito métodos de roteamento de fluxo (USACE, 2013). Nesse contexto, uma etapa crucial no processo de modelagem hidrológica com o HEC-HMS é a escolha criteriosa dos métodos a serem utilizados, considerando as especificidades da bacia e os objetivos do estudo.

Neste trabalho, as configurações iniciais da modelagem hidrológica foram estabelecidas com base nos métodos e parâmetros adotados por Alves (2017), Santos (2013) e Lima Neto (2019). Esses estudos foram selecionados por terem sido aplicados em bacias com características fisiográficas e climáticas semelhantes às da bacia do rio Mundaú, área foco desta pesquisa.

A Tabela 9 apresenta uma relação entre os processos do ciclo hidrológico e os métodos

selecionados para este estudo. Cada processo modelado requer um conjunto mínimo de parâmetros para sua implementação, cujos valores iniciais são fornecidos pelo usuário, mas podem ser ajustados posteriormente durante a calibração e validação do modelo, a fim de otimizar a precisão dos resultados.

Tabela 9 – Métodos e parâmetros adotados na modelagem com o HEC-HMS

<b>Processo</b>	<b>Método</b>	<b>Principais parâmetros</b>
Canopy	Simple Canopy	Initial Storage (%) Max Storage (mm)
Surface	Simple Surface	Initial Storage (%) Max Storage (mm)
Loss	Soil Moisture Accounting (SMA)	Soil (%)
		Groundwater 1 (%)
		Groundwater 2 (%)
		Max Infiltration (mm/h)
		Impervious (%)
		Soil Storage (mm)
		Tension Storage (mm)
		Soil Percolation (mm/h)
		Groundwater 1 Storage (mm)
		Groundwater 1 Percolation (mm/h)
GW 1 Coefficient (h)		
Groundwater 2 Storage (mm)		
Groundwater 2 Percolation (mm/h)		
GW 2 Coefficient (h)		
Transform	Unit Hydrograph (SCS)	Time of Concentration (hr) Storage Coefficient (h)
Base flow	Linear Reservoir	Groundwater 1 Initial (m <sup>3</sup> /s)
		Groundwater 1 Coefficient (h)
		Groundwater 2 Initial (m <sup>3</sup> /s)
		Groundwater 2 Coefficient (h)
Routing	Muskingum-Cunge	Length (m)
		Slope (m/m)
		Manning's n
		Width (m)

Fonte: Adaptada de [USACE-HEC \(2015b\)](#).

#### 4.4.2.1 Intercepção da Vegetação - Simple Canopy

O método *Simple Canopy* é utilizado para representar a parcela da precipitação interceptada pela copa das árvores. Os principais parâmetros associados a esse método são o Initial Storage (%), que corresponde ao nível inicial de água retida na vegetação, refletindo a umi-

dade presente no dossel, e o *Max Storage* (mm), que representa a capacidade máxima de armazenamento de água pela vegetação antes que o excesso de precipitação comece a escoar superficialmente (USACE-HEC, 2015b).

A quantidade de precipitação interceptada pela copa das árvores varia conforme o tipo e a estrutura da vegetação, a estação do ano e as características do evento de precipitação. Segundo Kuraji et al. (2001), a interceptação da chuva em regiões tropicais pode variar entre 10% e 20% do total precipitado. Para este estudo, optou-se por iniciar a modelagem com um valor de interceptação de 20%, em consonância com os resultados de Silva (2017), que, ao investigar a interceptação de chuva no semiárido pernambucano, observou valores entre 16,2% e 18% para eventos de precipitação superiores a 39 mm.

No que se refere ao parâmetro *Max Storage*, Bennett e Peters (2000) propõem valores recomendados para o cálculo da interceptação da água da chuva pela vegetação, os quais estão apresentados na Tabela 10. Os valores desse parâmetro para cada sub-bacia foram determinados com base no cruzamento do mapa de uso e cobertura do solo, apresentado na Seção 3.6 com os valores de referência de interceptação por tipo de vegetação.

Após essa análise, para as sub-bacias com predominância da classe de uso do solo relacionada à pastagem, foi adotado o valor de 1,27 mm, referente à vegetação geral. Já para as sub-bacias com presença de floresta, foi adotado o valor de 2,54 mm, representando a interceptação ocorrida. Esses valores foram utilizados como parâmetros iniciais para a modelagem hidrológica.

Tabela 10 – Armazenamento de água por interceptação em função do tipo de vegetação

Descrição	Interceptação (mm)
Vegetação geral	1,27
Gramíneas e árvores decíduais	2,03
Árvores que não perdem as folhas e árvores coníferas	2,54

Fonte: Adaptada de Bennett e Peters (2000).

#### 4.4.2.2 Armazenamento em depressões superficiais – Simple Surface

Este método modela o volume de água retido nas depressões e irregularidades da superfície do solo. Ele assume que toda a precipitação que atinge o solo é inicialmente armazenada até que a capacidade de armazenamento seja atingida. Somente após esse ponto, quando a

precipitação excede essa capacidade, o escoamento superficial é gerado (USACE, 2013).

Os parâmetros de entrada para este método são semelhantes aos utilizados no método de interceptação pela vegetação. O parâmetro *Initial Storage* (%) indica se houve algum evento de precipitação anterior que possa ter preenchido parcialmente as depressões do solo antes do evento atual. Já o parâmetro *Max Storage* (mm) define a quantidade máxima de água que pode ser armazenada nas depressões e irregularidades do terreno, sem que ocorra escoamento superficial direto.

O armazenamento superficial máximo está diretamente relacionado à declividade média das sub-bacias e à cobertura vegetal da superfície. Bennett (1998) apud Singh e Jain (2015) propõe valores de referência para estimar o armazenamento de água com base na inclinação e na cobertura do solo, que podem ser utilizados para calcular o parâmetro *Max Storage* (mm) de forma ponderada, levando em consideração as características específicas de cada sub-bacia.

Neste estudo, os valores desse parâmetro foram obtidos a partir da análise de SIG aplicada ao mapa de declividade, conforme indicado na Tabela 11, permitindo a atribuição de valores específicos às sub-bacias. Dessa forma, foi possível estabelecer o valor de armazenamento superficial para cada sub-bacia de forma individualizada.

Tabela 11 – Armazenamento padrão em depressões

<b>Tipo de superfície</b>	<b>Declividade (%)</b>	<b>Armazenamento superficial (mm)</b>
Áreas impermeáveis pavimentadas	NA	3,2 - 6,4
Encostas íngremes e suaves	0 - 5	50,8
Encostas moderadas a suaves	5 - 30	6,4 - 12,7
Terreno plano e sulcado	> 30	1,02

Fonte: Bennett (1998).

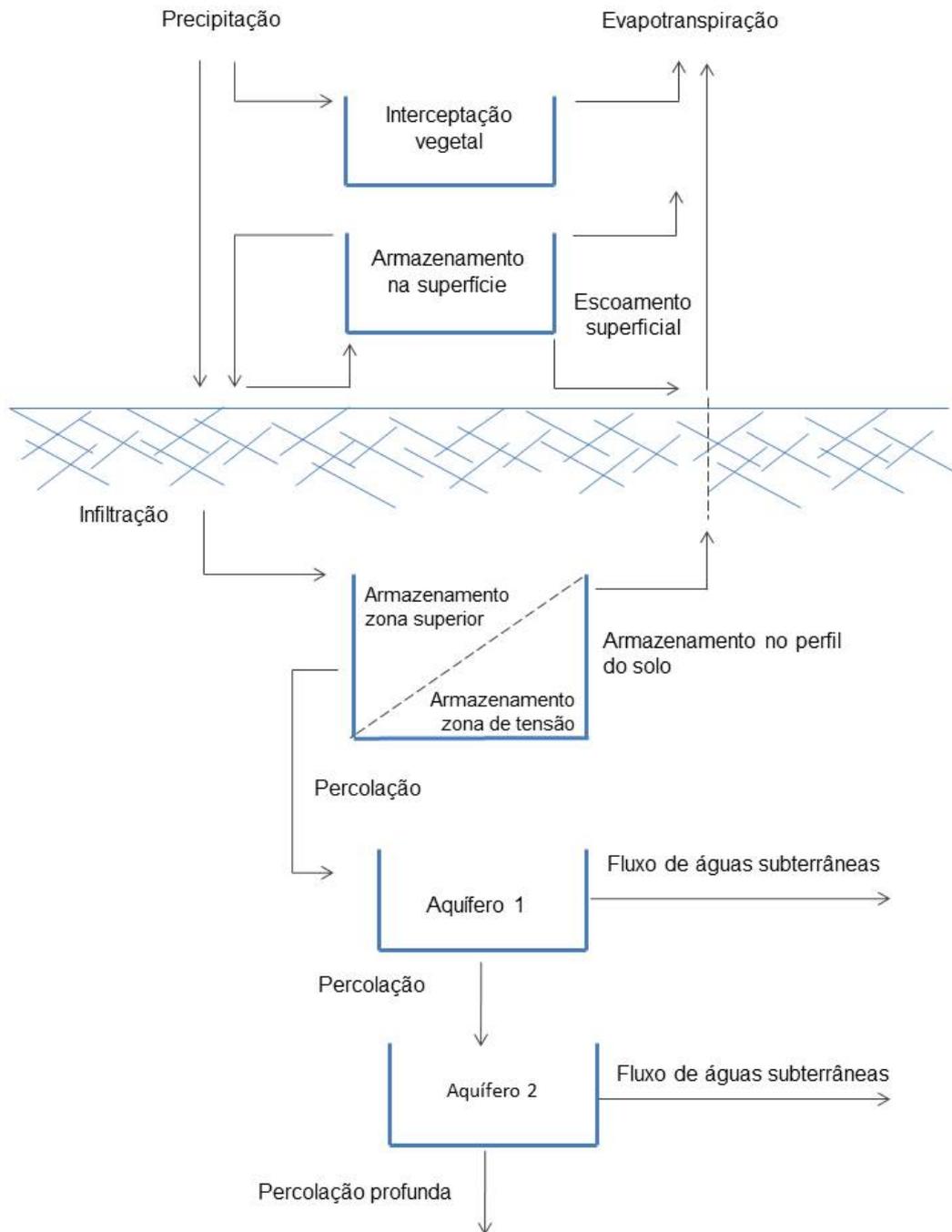
#### 4.4.2.3 Parâmetros de perdas – Soil Moisture Accounting (SMA)

O Método SMA foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE, 2000). Este modelo é um dos vários disponíveis para a modelagem de sistemas chuva-vazão. O diferencial do SMA é seu caráter contínuo, o que significa que ele pode simular o comportamento de uma bacia hidrográfica em condições climáticas variadas. Essa característica torna o SMA uma ferramenta versátil e eficaz para a análise hidrológica, permitindo uma compreensão mais detalhada e

precisa da dinâmica hídrica em diferentes cenários.

Esse método representa a bacia hidrográfica por meio de uma série de reservatórios de armazenamento, que simulam o volume de água perdido ou adicionado a cada componente terrestre do ciclo hidrológico. A Figura 29 ilustra o esquema conceitual para a aplicação do método SMA no HEC-HMS.

Figura 29 – Esquema conceitual do método contínuo SMA



Fonte: Adaptada de [Feldman \(2000\)](#).

As camadas de armazenamento de interceptação vegetal e de armazenamento superficial correspondem aos componentes *Canopy* e *Surface*, respectivamente, como já discutido anteriormente. Já o armazenamento no perfil do solo (*Soil-profile storage*) é dividido em duas regiões: a zona superior e a zona de tensão. A zona superior, responsável por reter água nos poros do solo, é a parte do perfil que perderá água tanto por evapotranspiração quanto por percolação. Por outro lado, a zona de tensão, que mantém a água ligada às partículas do solo, perde água exclusivamente através do processo de evapotranspiração (USACE, 2013).

Além dessas camadas, o método SMA também considera o armazenamento de água no subsolo, abordando as perdas associadas ao aquífero. Dependendo do caso, o método pode incluir uma ou duas camadas de armazenamento subterrâneo (*Groundwater 1* e *Groundwater 2*), sendo que a capacidade de cada uma delas é expressa em milímetros de precipitação. A água que percola do perfil do solo abastece a primeira camada e, a partir dela, pode percolar para a segunda. Em situações de percolação profunda, a água é considerada perdida do sistema, já que o fluxo no aquífero não é modelado no método SMA. As taxas de percolação dessas camadas subterrâneas (*GW Percolation 1* e *2*) são expressas em mm/h (USACE, 2013).

A implementação do método SMA requer o conhecimento de 14 parâmetros, alguns dos quais, dependendo da disponibilidade de dados, podem ser estimados por meio de calibração. Para definir os valores iniciais dos parâmetros no modelo SMA do HEC-HMS, foram consideradas as características físicas do solo da bacia hidrográfica em questão.

#### 4.4.2.4 Método de transformação chuva-vazão – SCS Unit Hydrograph

Neste estudo, considerando as informações disponíveis sobre a bacia hidrográfica do rio Mundaú, optou-se pela utilização do método do Hidrograma Unitário do Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service - SCS*), uma das opções oferecidas pelo HEC-HMS para transformar o excesso de precipitação em vazão. Este método é amplamente adotado em estudos hidrológicos, sobretudo pela facilidade na obtenção dos parâmetros necessários. Especificamente, ele requer apenas a determinação do parâmetro correspondente ao tempo de retardo *Lag Time*, que pode ser estimado como 60% do tempo de concentração ( $T_c$ ), de acordo com a equação a seguir:

$$T_{lag} = 0,6 * T_c, \quad (24)$$

o  $T_c$ , por sua vez, pode ser estimado com base nas características físicas das sub-bacias, utilizando a Equação de Kirpich, conforme descrito a seguir:

$$T_c = \frac{0,0195 \cdot L^{0,77}}{S^{0,385}}, \quad (25)$$

onde,  $L$  representa comprimento dos rios, em metros, e  $S$  corresponde a declividade dos rios (m/m). Estes parâmetros já são calculados automaticamente na fase de pré-processamento do modelo HEC-HMS.

#### 4.4.2.5 Vazão de base – Linear Reservoir

Este método de escoamento de base utiliza um ou até três reservatórios lineares para simular a recessão do fluxo de base após um evento de precipitação. Diferentemente de outros métodos de vazão de base disponíveis no HEC-HMS, este assegura a conservação da massa, garantindo que o volume de vazão não exceda as perdas por infiltração decorrentes da precipitação (USACE, 2013).

No funcionamento desse método, o volume de água infiltrada é utilizado como afluência, e esse influxo pode ser distribuído entre os reservatórios. A vazão proveniente da camada de água subterrânea 1, modelada pelo método SMA, serve como entrada para um dos reservatórios lineares, enquanto a saída da camada de água subterrânea 2 do SMA é a entrada para outro reservatório. Os fluxos resultantes dos dois reservatórios lineares são então combinados para calcular o escoamento de base total da bacia hidrográfica (SANTOS, 2013).

Para a aplicação deste método, é necessário definir alguns parâmetros, incluindo a quantidade de reservatórios a ser utilizada na modelagem, a vazão inicial de base em  $\text{m}^3/\text{s}$  (*Groundwater Initial*), a fração de partição (*GW Fraction*) e os coeficientes de roteamento em horas (*Groundwater Coefficient*). Os parâmetros *Groundwater Initial* e *Groundwater Coefficient* regulam, de maneira quantitativa e temporal, a contribuição da vazão subterrânea. O parâmetro *Groundwater Initial* ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) define a vazão inicial da água do subsolo que contribui para o hidrograma de escoamento no canal de drenagem. Já o *Groundwater Coefficient* (h) indica o tempo que a água permanece retida no solo antes de começar a contribuir para o escoamento. Sendo medido em horas, este parâmetro oferece uma estimativa do tempo de resposta da sub-bacia no que diz respeito à contribuição da vazão subterrânea ao canal de drenagem, podendo ser estimado com base nas características físicas da bacia (RICARDO, 2018).

#### 4.4.2.6 Propagação da vazão na bacia – Muskingum-Cunge

O modelo HEC-HMS oferece diversos métodos para a propagação de ondas de cheia. Para este estudo, optou-se pelo método de *Muskingum-Cunge* para todos os trechos de rios modelados. Essa escolha foi fundamentada no fato de que este método é amplamente reconhecido como o mais adequado para representar o escoamento durante eventos de cheias naturais, especialmente em regiões com declividades acentuadas (DORNELLES; COLLISCHONN, 2013).

O método de *Muskingum-Cunge* representa uma evolução do modelo *Muskingum*, originalmente proposto por McCarthy (1939). Conceitualmente, o método aproxima o canal principal de uma sub-bacia como um prisma de seção e declividade constantes, assumindo que a onda de cheia se propaga ao longo desse prisma. No contexto do *Muskingum-Cunge*, os parâmetros  $K$  e  $X$  são determinados com base em uma abordagem hidráulica e podem ser estimados a partir das propriedades físicas dos rios em estudo. Além disso, utilizam-se as Equações de velocidade (26) e largura (27) do canal para calcular a vazão no exutório de cada sub-bacia.

$$K = \frac{\Delta X}{c}, \quad (26)$$

onde,  $K$  é o tempo de propagação da onda no canal do rio, em s,  $\Delta X$  é a extensão do trecho do rio, em m, e  $c$  corresponde à celeridade de propagação da onda de cheia, em m/s.

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{B \cdot c \cdot S \cdot Ax} \right), \quad (27)$$

onde,  $X$  é o fator de ponderação ( $0 \leq X \leq 0,5$ ),  $Q$  representa a vazão no exutório de cada sub-bacia, em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $B$  é a largura média do canal do rio, em metros,  $c$  é a celeridade de propagação da onda de cheia, em m/s,  $S$  corresponde à declividade média do trecho, em m/m, e  $\Delta X$  é a extensão do trecho do rio, em metros.

Os parâmetros relacionados a comprimentos e declividades são calculados automaticamente. As informações que precisam ser definidas incluem o coeficiente de Manning, a geometria das seções transversais e a largura dos canais. Para este estudo, adotou-se a forma trapezoidal dos canais, que é comumente utilizada no dimensionamento de canais naturais e artificiais. No que diz respeito à largura dos canais, estas foram medidas utilizando o Google Earth, enquanto a declividade dos taludes foi adotada como 1:1 (H:V).

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS MODELOS

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos modelos CAWM-V e HEC-HMS na estimativa das vazões da bacia do rio Mundaú, os resultados obtidos por ambos os modelos foram comparados com os dados observados na estação fluviométrica 39700000/Fazenda Boa Fortuna. As métricas estatísticas utilizadas nessa avaliação incluem o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a porcentagem de viés (PBIAS), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a razão entre RMSE e o desvio padrão (RSR), calculados conforme descrito a seguir:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \quad (28)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (29)$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs_i}} \quad (30)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2} \quad (31)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (32)$$

onde,  $Q_{obs_i}$  é a vazão observada ( $m^3/s$ );  $Q_{sim_i}$  é a vazão simulada ( $m^3/s$ );  $\bar{Q}_{obs}$  corresponde à média das vazões observadas ( $m^3/s$ );  $\bar{Q}_{sim}$  denota a média das vazões simuladas ( $m^3/s$ ); e  $n$  é o número de valores da amostra.

A primeira métrica considerada é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que mede o grau de colinearidade entre os dados simulados e observados. Esse coeficiente é amplamente utilizado em estudos de modelagem hidrológica para avaliar o desempenho de modelos, apresentando valores que variam de 0 a 1, onde valores próximos a 1 indicam melhor ajuste. No entanto, é importante destacar que  $R^2$  pode ser sensível a valores extremos (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), desenvolvido por [Nash e Sutcliffe \(1970\)](#), é outra métrica amplamente empregada para avaliar a precisão de modelos hidrológicos. O NSE varia entre 1, indicando ajuste perfeito, e  $-\infty$ , com valores negativos sugerindo que a média observada teria sido um preditor melhor que o modelo. De forma geral, valores elevados de NSE indicam um melhor ajuste, particularmente em vazões máximas ([COLLISCHONN, 2001](#)).

O PBIAS mede o percentual de tendência dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados ([GUPTA; DAS, 1999](#)). Por definição, valores baixos indicam uma simulação mais precisa. Valores positivos indicam superestimativa e valores negativos indicam superestimativa pelo modelo.

As últimas métricas consideradas são o RMSE e o RSR. O RMSE (Root Mean Square Error) é amplamente utilizado para avaliar erros, sempre assumindo valores positivos, sendo que quanto mais próximo de zero, melhor é a qualidade da simulação. Entretanto, essa métrica é altamente sensível a grandes desvios, podendo ser significativamente influenciada por valores discrepantes ([SANTOS et al., 2014](#)). Já o RSR mede a variação residual da simulação, com seu valor ideal sendo zero. Quanto menor o RSR, menor será o RMSE, indicando um desempenho superior do modelo.

Diversos estudos na literatura fornecem diretrizes para classificar o desempenho de modelos hidrológicos. Neste estudo, os resultados das métricas de qualidade da simulação hidrológica foram categorizadas conforme os critérios estabelecidos por [Moriasi et al. \(2015\)](#) e [Moriasi et al. \(2007\)](#). A Tabela 12 apresenta as faixas de valores utilizadas para avaliar os modelos CAWM-V e HEC-HMS.

Tabela 12 – Valores das métricas estatísticas para avaliação do desempenho dos modelos

Desempenho	Critérios estatísticos			
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS %	RSR*
<b>Muito Bom</b>	> 0,85	> 0,80	≤ ±5	≤ RSR ≤ 0,5
<b>Bom</b>	0,70 ≤ R <sup>2</sup> ≤ 0,85	0,70 < NSE ≤ 0,80	±5 ≤ PBIAS ≤ ±10	0,5 < RSR ≤ 0,6
<b>Satisfatório</b>	0,50 ≤ R <sup>2</sup> ≤ 0,70	0,50 < NSE ≤ 0,70	±10 ≤ PBIAS ≤ ±15	0,6 < RSR ≤ 0,70
<b>Insatisfatório</b>	≤ 0,50	≤ 0,50	≥ ±15	> 0,7

Fonte: Adaptada de [Moriasi et al. \(2015\)](#) e [Moriasi et al. \(2007\)](#)\*.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do estudo, com foco na aplicação dos modelos hidrológicos CAWM-V e HEC-HMS à bacia hidrográfica do rio Mundaú, utilizando duas fontes distintas de dados de precipitação: estimativas geradas por radar meteorológico e registros obtidos por pluviômetros. A análise foi estruturada por modelo e por tipo de dado, com o objetivo de garantir clareza na apresentação e facilitar a comparação do desempenho entre as configurações testadas nas etapas de calibração e validação. Para a calibração, foram utilizados os Eventos 1 (2015) e 2 (2017), enquanto os Eventos 3 (2020) e 4 (2022) foram empregados na fase de validação.

Antes de apresentar os resultados, é importante destacar que a bacia do rio Mundaú possui reservatórios com volumes expressivos de armazenamento, localizados principalmente no estado de Pernambuco. Dentre os principais, destacam-se os reservatórios de Inhumas (7.872.860 m<sup>3</sup>), Cajarana (2.594.000 m<sup>3</sup>) e Mundaú/Garanhuns (1.968.600 m<sup>3</sup>), situados nos municípios de Garanhuns e Capoeiras (SILVA et al., 2020). A presença dessas estruturas pode influenciar significativamente a resposta hidrológica da bacia, especialmente devido à sua capacidade de atenuar os picos de vazão e alterar o tempo de concentração, impactando diretamente os resultados da modelagem.

Contudo, neste estudo, a operação desses reservatórios não foi considerada na modelagem, uma vez que o objetivo central foi avaliar a viabilidade do uso de dados de radar meteorológico como alternativa aos dados de pluviômetros na simulação de eventos de cheia. A escolha por não representar explicitamente os reservatórios está associada à praticidade na implementação dos modelos hidrológicos, visando facilitar a condução da análise dentro dos limites operacionais da pesquisa. Assim, a análise concentra-se na comparação entre as fontes de dados pluviométricos e os modelos aplicados, permitindo discutir seu potencial e limitações dentro de um cenário simplificado, porém representativo.

### 5.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO CAWM - V

Conforme descrito na Seção 4.3.1, o modelo CAWM-V requer a definição prévia de parâmetros específicos para a execução da modelagem hidrológica. Com base nas características físicas da bacia em estudo, foram determinadas as informações necessárias para a estimativa do

coeficiente  $K$ , utilizado na equação que representa o escoamento na calha fluvial. Os valores obtidos estão sistematizados na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros físicos da bacia necessários para o cálculo do parâmetro  $K$

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>		<b>Valor</b>
Área da bacia	Ab	km <sup>2</sup>	3.592,36
Comprimento total da drenagem	Lt	m	3.786.165,547
Declividade equivalente dos rios	l	m/m	0.0018
Largura equivalente dos rios	Be	m	3
Coeficiente de rugosidade de Manning	n	-	0.03
Intervalo de tempo	$\Delta t$	s	3600
<b>Coeficiente de escoamento da calha do rio</b>	<b>K</b>	-	0.000638536

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além do parâmetro  $K$ , a equação do escoamento fluvial também requer uma constante, denominada  $b$ , cujo o valor de referência adotado é  $5/3$ . Outro parâmetro essencial é a capacidade de retenção de água no solo ( $S$ ), que é calculada com base no CN. Neste estudo, o valor de  $S$  foi obtido com base no produto GCN-250, conforme detalhado na Seção 4.2.6.

Após a definição dos parâmetros anteriores, a etapa seguinte consistiu na calibração de três parâmetros principais:  $K_S$ ,  $K_L$  e  $p$ . Os valores adotados para esses parâmetros, assim como os valores finais ajustados durante o processo de calibração, estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores finais dos parâmetros após etapa de calibração

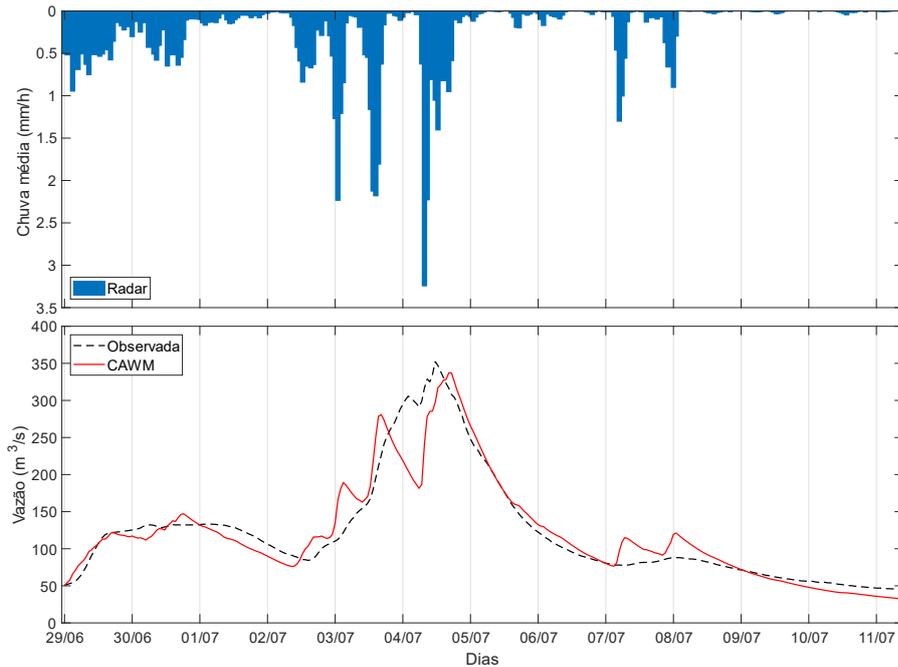
<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>		<b>Valor</b>
Coeficiente do expoente das perdas na calha	$p$	-	0.9
Coeficiente de magnitude da evaporação	$\alpha$	-	1.4
Parâmetro de infiltração	$\beta$	-	1
Coeficiente do expoente do escoamento na calha	b	-	1.666
Coeficiente de permeabilidade dos solos	$K_s$	-	0.000501
Coeficiente de perdas	$K_L$	-	0.311448
Capacidade máxima de armazenamento no solo	S	mm	182

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

### 5.1.1 Calibração e validação - simulação com precipitação estimada por radar

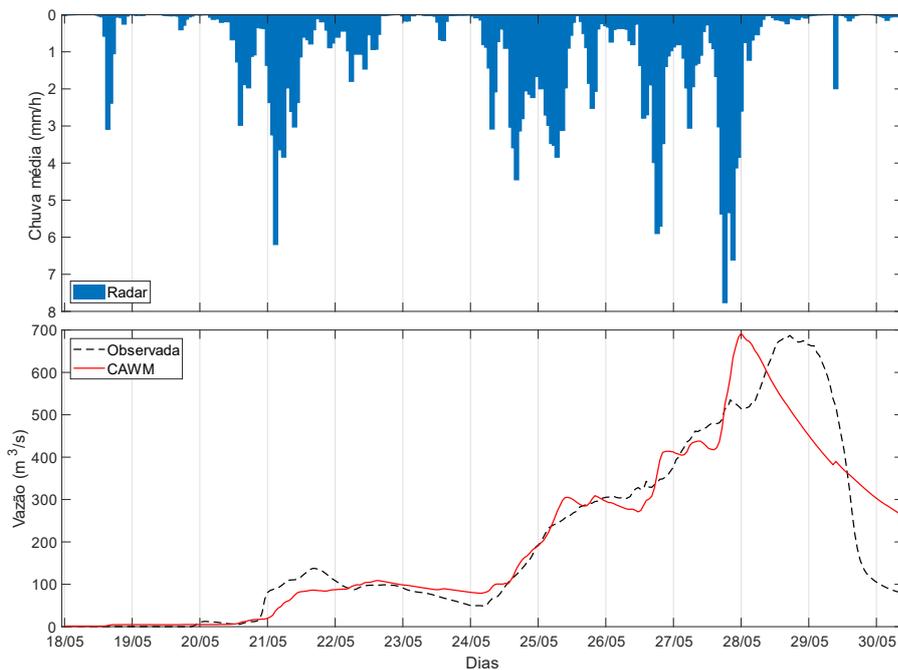
As Figuras 30 e 31 apresentam, respectivamente, os hidrogramas observados e simulados durante a etapa de calibração dos Eventos 1 e 2. A precipitação média horária na bacia é ilustrada no eixo superior, enquanto a vazão é representada no eixo inferior de cada gráfico.

Figura 30 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 1 (2015) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 31 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

No Evento 1, representado na Figura 30, observa-se que, de modo geral, houve uma boa correspondência entre as séries simulada e observada, indicando que o modelo foi capaz de representar de forma adequada a dinâmica hidrológica do evento. No entanto, a vazão de pico simulada foi de 290 m<sup>3</sup>/s, enquanto a observada atingiu 352,4 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a uma subestimação de aproximadamente 17,7%.

Em relação ao Evento 2 (Figura 31), a análise gráfica sugere que o modelo também reproduziu de forma satisfatória o comportamento do escoamento, com boa correspondência geral entre as curvas simulada e observada. A vazão de pico observada foi de 687,3 m<sup>3</sup>/s, enquanto a simulada atingiu 693,4 m<sup>3</sup>/s, caracterizando uma superestimação de apenas 0,8%. Apesar disso, observa-se uma leve antecipação no tempo de ocorrência do pico simulado em relação ao observado.

Os resultados das métricas de desempenho do modelo durante a etapa de calibração estão apresentados na Tabela 15. O ajuste dos parâmetros permitiu que as vazões simuladas se aproximassem adequadamente dos valores observados, indicando boa representatividade do modelo CAWM. Nessa etapa, o desempenho foi classificado como "Muito Bom" para todas as métricas avaliadas, de acordo com os critérios propostos por (MORIASI et al., 2015).

Tabela 15 – Indicadores estatísticos do modelo CAWM a partir de precipitação de radar

<b>CALIBRAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 1 - 2015</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 2 - 2017</b>	<b>Classificação</b>
R <sup>2</sup>	0,88	Muito Bom	0,86	Muito Bom
NSE	0,87	Muito Bom	0,86	Muito Bom
PBIAS (%)	0,38	Muito Bom	2,68	Muito Bom
RSR	0,40	Muito Bom	0,38	Muito Bom

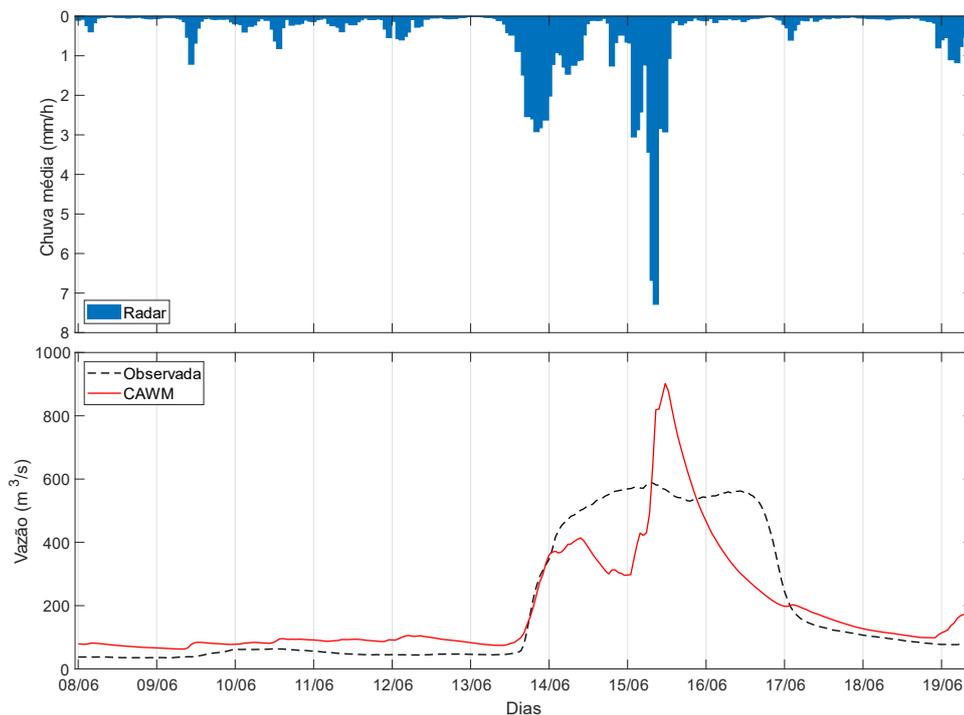
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os resultados da calibração indicam desempenho elevado por parte do modelo CAWM. O coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), com valores superiores a 0,85, evidencia uma forte correlação entre as vazões simuladas e observadas. Os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) também ficaram acima de 0,85, confirmando a consistência das simulações. O viés percentual (PBIAS), utilizado para identificar tendências sistemáticas de superestimação ou subestimação, apresentou valores bastante reduzidos, inferiores a 5%, o que indica ausência de viés significativo. Por fim, o erro padronizado da raiz quadrada (RSR) resultou em valores de 0,40 e 0,38, ambos classificados como "Muito Bom", demonstrando que os erros de simulação estão controlados e dentro de limites aceitáveis para aplicações em modelagem hidrológica.

De maneira análoga, são apresentados os resultados da etapa de validação, que consistiu na simulação do modelo com os parâmetros ajustados durante a calibração. A análise do hidrograma referente ao Evento 3 (Figura 32) mostra que o modelo foi capaz de representar a tendência geral do escoamento. No entanto, observou-se uma resposta excessivamente sensível às variações da precipitação, sugerindo que a conversão da chuva em vazão ocorreu de forma direta, com baixo amortecimento ao longo do processo hidrológico. Além disso, ao analisar as vazões máximas, foram identificadas diferenças expressivas entre os valores simulados e observados. A vazão simulada atingiu 901,6 m<sup>3</sup>/s, enquanto a observada foi de 588,4 m<sup>3</sup>/s, resultando em uma superestimação de 53,3%. Essa diferença indica que o modelo está superestimando o escoamento superficial.

Ressalta-se a presença de um platô na vazão observada, o que pode indicar falhas sistemáticas ou problemas operacionais no posto fluviométrico. Tais distorções podem comprometer a precisão dos dados e a representatividade da dinâmica do escoamento.

Figura 32 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o evento 3 (2020) - Validação

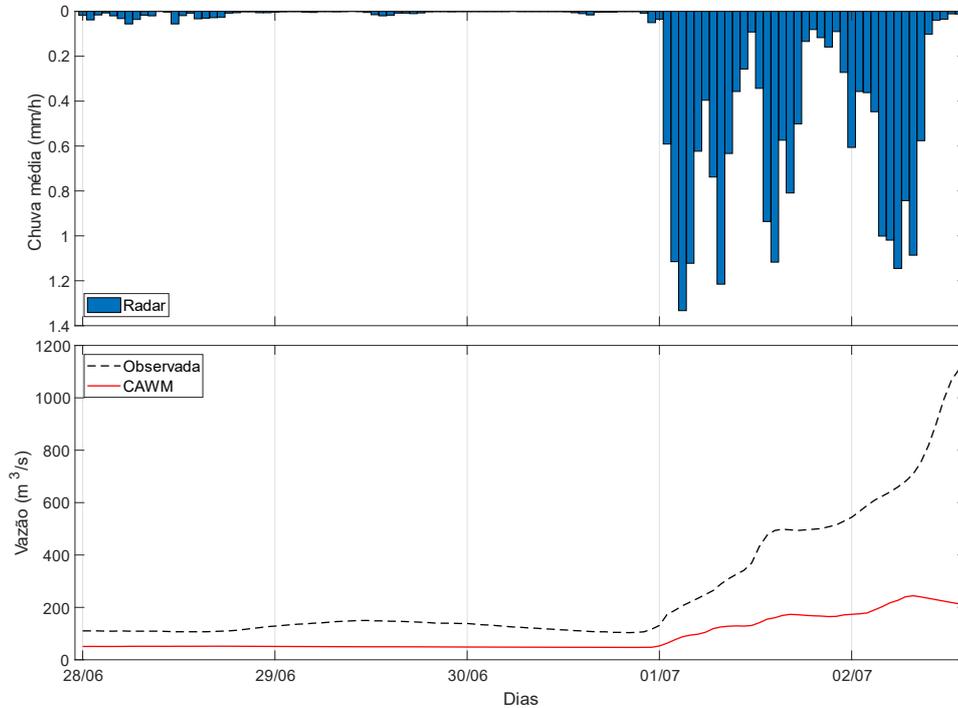


Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Conforme observado no hidrograma referente ao Evento 4 (33), correspondente à inundação ocorrida no ano de 2022, verifica-se uma baixa aderência entre as vazões simuladas e observadas. A análise do hidrograma, que apresenta no eixo superior a precipitação média na bacia, revela que os valores de chuva não ultrapassaram 1,3 mm, o que contrasta significa-

tivamente com a magnitude da vazão observada, cujo pico atingiu 1.183,7 m<sup>3</sup>/s. Esse valor expressivo de escoamento não é compatível com a baixa intensidade da chuva estimada pelo radar, sugerindo subestimativa nos dados de entrada.

Figura 33 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia para o evento 4 (2022) - Validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A subestimativa da precipitação por radares meteorológicos pode ocorrer por diversos fatores. Conforme apontado por [Fabry e Zawadzki \(1995\)](#) e [Germain e Fabry \(2000\)](#), a presença de chuvas intensas nas proximidades da antena pode atenuar significativamente o sinal do radar, reduzindo sua capacidade de detectar corretamente a precipitação em regiões mais distantes. Esse efeito é especialmente crítico em eventos volumosos, como o observado neste estudo, nos quais a forte atividade pluviométrica próxima ao radar compromete a propagação do feixe e, conseqüentemente, a qualidade das estimativas em áreas mais afastadas.

Quanto aos índices estatísticos, os resultados obtidos na etapa de validação estão apresentados na Tabela 16. Na validação do Evento 3, o modelo apresentou um NSE de 0,76, classificado como "Bom", enquanto os valores R<sup>2</sup> e PBIAS foram de 0,79 e -6,47%, respectivamente, ambos classificados como "Bom". Já o RSR, com valor de 0,5 foi classificado como "Muito Bom". Esses resultados indicam que o modelo foi capaz de representar adequadamente a dinâmica do escoamento.

Por outro lado, no Evento 4, o desempenho do modelo foi classificado como "Insatisfató-

rio”, com NSE de  $-0,11$  e PBIAS de  $-67,26\%$ , indicando falhas expressivas na sua capacidade de representar adequadamente as vazões observadas nesse período. Ainda assim, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) permaneceu elevado, com valor de  $0,91$ , sendo classificado como “Muito Bom”. Esse resultado sugere que, apesar das limitações evidenciadas pelas demais métricas, o modelo foi capaz de reproduzir a tendência geral do comportamento hidrológico ao longo do evento.

A discrepância observada entre os eventos reforça a sensibilidade do desempenho do modelo à qualidade dos dados de entrada. Enquanto a simulação do Evento 3 apresentou bons níveis de correlação, os resultados do Evento 4 foram provavelmente comprometidos por deficiências na estimativa da precipitação, o que afetou a confiabilidade das vazões simuladas.

Tabela 16 – Indicadores estatísticos do Modelo CAWM a partir precipitação de radar

<b>VALIDAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 3 - 2020</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 4 - 2022</b>	<b>Classificação</b>
$R^2$	0,79	Satisfatório	0,91	Muito Bom
NSE	0,76	Bom	-0,11	Insatisfatório
PBIAS (%)	-6,47	Bom	-67,26	Insatisfatório
RSR	0,5	Muito Bom	1,04	Insatisfatório

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

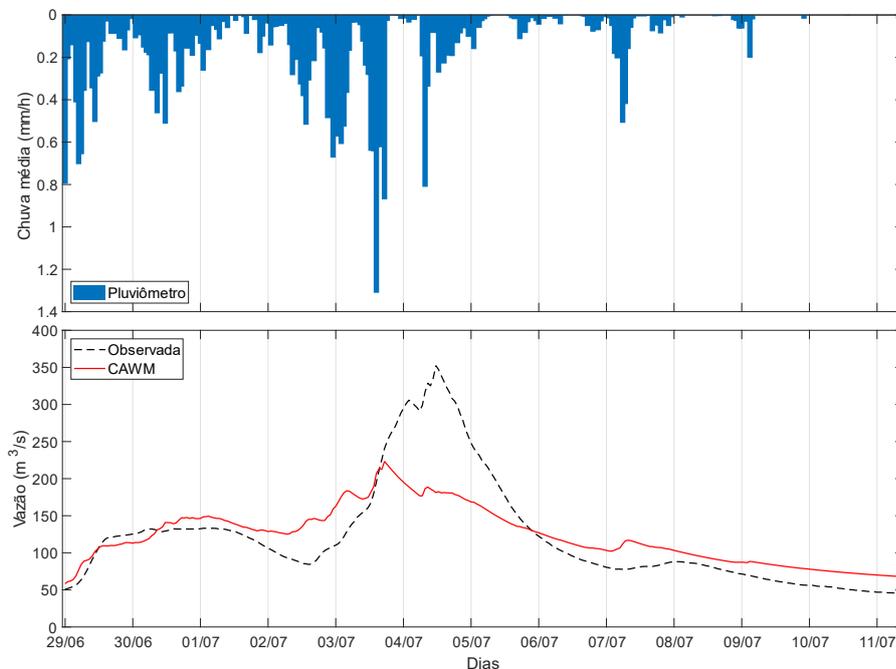
### 5.1.2 Calibração e validação - simulação com precipitação de pluviômetro

A Figura 34 apresenta o hidrograma correspondente ao Evento 1. A análise indica que o modelo foi capaz de representar razoavelmente bem a dinâmica da vazão observada ao longo do evento. Entretanto, algumas discrepâncias são perceptíveis, especialmente na vazão máxima, no qual os valores simulados apresentam-se ligeiramente deslocados e subestimados em aproximadamente  $37\%$ . Nos períodos que antecedem e sucedem o pico, o modelo demonstra melhor aderência às vazões observadas.

Quanto aos resultados da calibração realizada com o Evento 2, representado na Figura 35, observa-se que, de modo geral, o modelo reproduziu a tendência geral do comportamento hidrológico, especialmente no início do evento, acompanhando a ascensão da curva de vazão. No entanto, nota-se uma discrepância significativa na estimativa da vazão de pico, que foi subestimada em relação à observada. Essa diferença de aproximadamente  $28,6\%$  indica que o modelo apresentou limitações na simulação dos volumes máximos. Além disso, há um pequeno

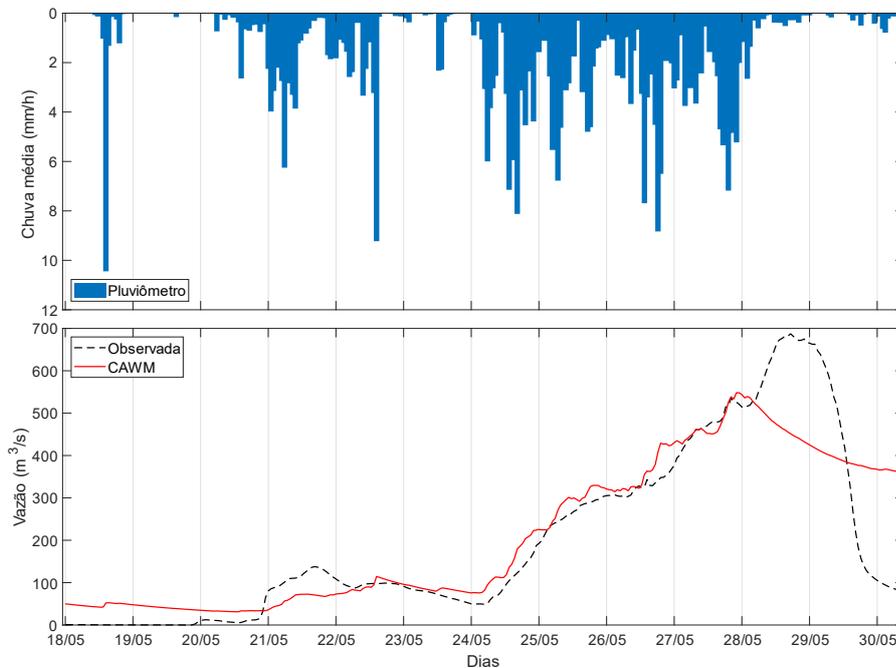
deslocamento temporal no pico simulado, evidenciando dificuldades do modelo em representar com precisão o tempo de concentração da bacia.

Figura 34 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o evento 1 (2015) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 35 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 17 apresenta os indicadores estatísticos obtidos na etapa de calibração. Para o Evento 1, o modelo obteve um  $R^2$  de 0,72 ("Bom") e NSE de 0,68 ("Satisfatório"), demons-

trando capacidade razoável de representar a variabilidade das vazões observadas. O PBIAS foi de apenas 0,73%, indicando excelente estimativa do volume médio de escoamento. No entanto, observou-se subestimação da vazão de pico, sugerindo falhas na distribuição temporal do escoamento. Essa discrepância pode estar relacionada a incertezas na estimativa da precipitação, que possivelmente não captou com precisão a intensidade e o momento da chuva responsável pelo pico.

Para o Evento 2, as métricas  $R^2$  e NSE apresentaram valores de 0,79 e 0,78, respectivamente, ambos classificados como "Bom". Esses resultados indicam uma melhora no desempenho geral do modelo em comparação ao Evento 1, especialmente no que se refere à representação da variabilidade das vazões observadas. Quanto ao PBIAS, obteve-se um valor de 3,45%, mantendo-se na categoria "Muito Bom", o que reforça a presença de um viés médio reduzido e uma boa estimativa dos volumes médios de escoamento.

Os resultados obtidos na calibração do Evento 2 estão alinhados com os valores encontrados por Campos (2023), que alcançou 0,74 tanto para o NSE quanto para o  $R^2$  ao calibrar o mesmo evento de cheia, porém em uma escala temporal sub-horária.

Tabela 17 – Indicadores estatísticos do CAWM a partir de precipitação de pluviômetro

<b>CALIBRAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 1 - 2015</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 2 - 2017</b>	<b>Classificação</b>
$R^2$	0,72	Bom	0,79	Bom
NSE	0,68	Satisfatório	0,78	Bom
PBIAS (%)	0,73	Muito Bom	3,45	Muito Bom
RSR	0,62	Satisfatório	0,45	Muito Bom

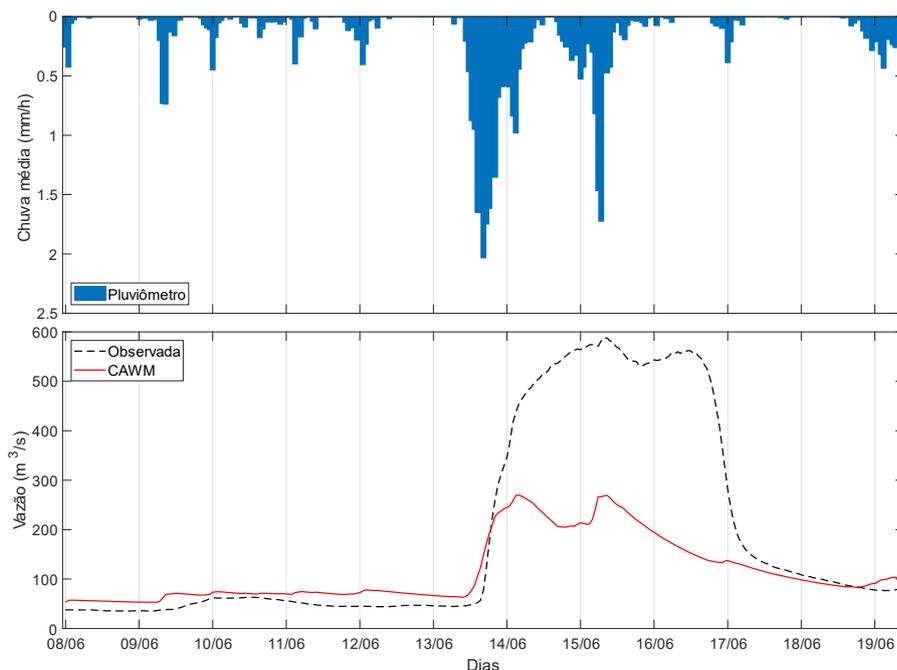
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

As Figuras 36 e 37 apresentam os hidrogramas observados e simulados na etapa de validação do modelo CAWM com dados de pluviômetros. No Evento 3, o modelo simulou adequadamente as vazões mais baixas, com boa correspondência entre as séries na fase de recessão. No entanto, houve subestimação significativa da vazão de pico, indicando falhas na reprodução da magnitude máxima observada. Ainda assim, o recuo das vazões simuladas manteve padrão semelhante ao observado, evidenciando coerência no escoamento de base. Essa discrepância no pico sugere limitações na resposta do modelo à intensidade da chuva, possivelmente associadas à distribuição espacial e temporal da precipitação de entrada.

No Evento 4, o desempenho do modelo também foi limitado. Diferentemente do evento anterior, observou-se uma superestimação expressiva durante a ascensão da curva até a vazão

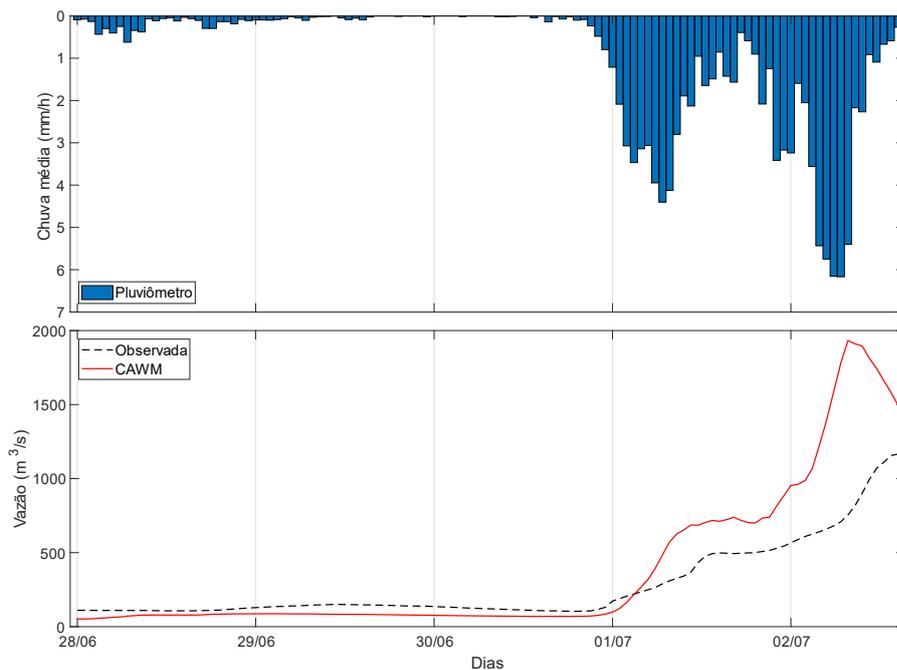
máxima, o que pode estar associado ao método de interpolação utilizado na estimativa da precipitação, possivelmente superestimando os volumes incidentes sobre a bacia. Apesar disso, a forma geral do hidrograma foi parcialmente preservada, especialmente nas vazões mais baixas.

Figura 36 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 3 (2020) - Validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 37 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 4 (2022) - Validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Nesse estudo, utilizou-se o IDW, que atribui maior peso aos pluviômetros mais próximos de cada ponto interpolado. Em eventos nos quais os pluviômetros com registros mais elevados estão localizados em regiões pontuais da bacia, o IDW pode superestimar a precipitação média ao ampliar a influência desses valores locais. Por outro lado, caso os pluviômetros mais próximos registrem volumes reduzidos, enquanto regiões mais distantes tenham recebido precipitações intensas, o método pode levar à subestimação da chuva média real. Estudos como os de [Gilewski \(2021\)](#) e [Ruman et al. \(2020\)](#) evidenciam a influência significativa do método de interpolação sobre o desempenho da modelagem hidrológica, ressaltando que a distribuição espacial da precipitação pode impactar diretamente a representatividade das vazões simuladas.

Assim, a chuva média ponderada pode não refletir adequadamente o padrão espacial do evento, comprometendo a estimativa do volume escoado e, por consequência, o desempenho do modelo hidrológico. Essa limitação se agrava nos casos em que há falhas nos registros pluviométricos e o preenchimento é realizado com dados de estações vizinhas. Nessas situações, a interpolação pode intensificar distorções na distribuição espacial da precipitação, principalmente se a estação utilizada estiver localizada em uma área com comportamento pluviométrico distinto da região mais afetada pelo evento. Tais inconsistências elevam o grau de incerteza da simulação, interferindo diretamente nas respostas hidrológicas geradas pelo modelo.

Com relação ao desempenho do modelo durante a etapa de validação, os resultados podem ser visualizados na Tabela 18. Para o Evento 3, o NSE foi de 0,57, classificado como "Satisfatório", indicando que o modelo conseguiu representar, ainda que de forma limitada, parte da variabilidade das vazões observadas, conforme já evidenciado no hidrograma. Por outro lado, o  $R^2$  alcançou um valor de 0,81, classificado como "Muito Bom", sugerindo uma boa correlação entre os valores simulados e observados, resultado, contudo, atribuído majoritariamente à boa representação das vazões mais baixas.

Já o PBIAS ultrapassou os limites recomendados, com uma subestimação do volume médio escoado em 39%, o que compromete a representatividade da simulação desse evento. O RSR também foi classificado como "Insatisfatório", reforçando as limitações observadas.

No Evento 4, o modelo apresentou NSE de -0,29, classificado como "Insatisfatório", indicando baixa aderência entre as vazões simuladas e observadas. Em contrapartida, o  $R^2$  foi de 0,92, classificado como "Muito Bom", sugerindo que o modelo captou bem a variabilidade dos dados, embora sem reproduzir com precisão os valores absolutos. O PBIAS evidenciou superestimação de cerca de 45% no volume escoado, comprometendo a confiabilidade da simulação para esse evento.

Tabela 18 – Indicadores estatísticos do modelo CAWM a precipitação de pluviômetro

<b>VALIDAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 3 - 2020</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 4 - 2022</b>	<b>Classificação</b>
R <sup>2</sup>	0,81	Muito Bom	0,92	Muito Bom
NSE	0,57	Satisfatório	-0,29	Insatisfatório
PBIAS (%)	-39,1	Insatisfatório	37,41	Insatisfatório
RSR	0,79	Insatisfatório	1,13	Insatisfatório

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

## 5.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO HEC-HMS

Os métodos definidos neste trabalho para a modelagem com o HEC-HMS exigem a definição de uma série de parâmetros baseados nas características físicas da bacia hidrográfica, como uso e ocupação do solo, declividade e coeficiente de escoamento, além de parâmetros adicionais detalhados anteriormente na Seção 4.4.2. Após a definição e o preenchimento dos parâmetros de entrada no modelo, as etapas subsequentes consistiram na simulação, calibração e validação, conduzidas com o objetivo de avaliar e aprimorar a capacidade do modelo em reproduzir os padrões hidrológicos observados na bacia.

Inicialmente, foram realizadas simulações individuais dos eventos de cheias selecionados para a etapa de calibração (anos de 2015 e 2017). Em seguida, deu-se início ao processo de calibração, conduzido por meio de ajustes manuais baseados no método de tentativa e erro. Para isso, os valores dos parâmetros do modelo foram sistematicamente modificados, com o intuito de melhorar seu desempenho, maximizar o coeficiente NSE e reduzir as discrepâncias entre os hidrogramas simulados e observados, assegurando uma representação mais fidedigna dos eventos hidrológicos analisados.

Os parâmetros mais sensíveis identificados durante o processo de calibração foram a infiltração máxima do solo, o percentual de impermeabilização e a capacidade de armazenamento do solo. Esses parâmetros apresentaram maior influência na resposta hidrológica do modelo, evidenciando sua relevância para a representação dos processos físicos envolvidos. A Tabela 19 apresenta os valores finais dos parâmetros do método *Soil Moisture Accounting* (SMA) para cada sub-bacia discretizada, conforme a metodologia adotada no processo de calibração.

Após essa etapa, os valores ajustados dos parâmetros foram utilizados para simular dois eventos distintos (anos de 2020 e 2022), com o propósito de validar o modelo e avaliar sua capacidade preditiva.

Tabela 19 – Parâmetros calibrados do método SMA / HEC-HMS

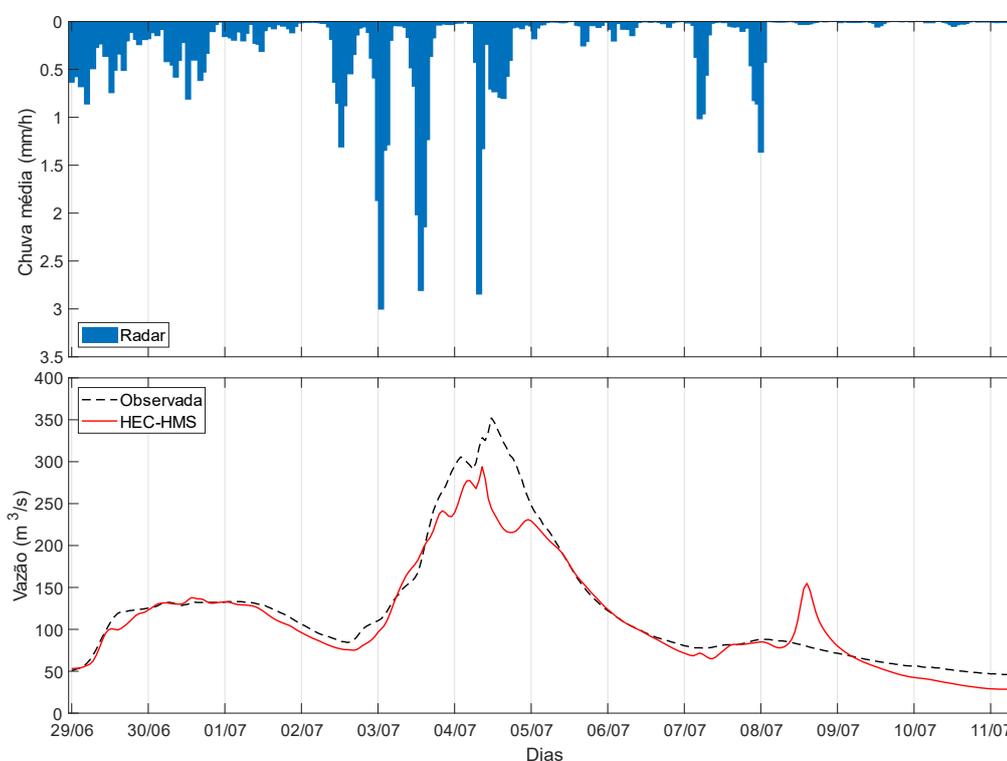
Subbasin	Soil (%)	Groundwater 1 (%)	Groundwater 2 (%)	Max infil. (mm/h)	Impervious (%)	Soil storage (mm)	Tension storage (mm)	Soil percolation (mm/h)	Groundwater 1 storage (mm)	Groundwater 1 percolation (mm/h)	GW 1 coef. (h)	Groundwater 2 storage (mm)	Groundwater 2 percolation (mm/h)	GW 2 coef. (h)
W1	40	25	0	2	10	90	40	2	20	1	50	0	0	0
W2	40	25	0	2	20	80	35	2	20	1	14.6	0	0	0
W13	40	25	0	4	10	180	50	4	30	2	10.92	0	0	0
W19	40	25	0	2	20	80	50	2	20	1	31.5	0	0	0
W6	30	25	0	2	10	120	50	2	20	1	9.9	0	0	0
W7	40	25	0	2	15	120	50	2	20	1	25.7	0	0	0
W5	30	25	0	2	20	120	50	2	20	1	11.8	0	0	0
W20	30	25	0	2	12	140	50	2	40	1	8.1	0	0	0
W18	30	25	0	2	10	140	50	2	40	1	4.9	0	0	0
W8	40	25	0	2	10	140	50	2	40	1	12.5	0	0	0
W21	40	25	0	2	10	140	50	2	40	1	5	0	0	0
W3	40	25	0	2	10	100	50	2	20	1	5.9	0	0	0
W4	40	25	0	2	10	100	50	2	20	1	8.6	0	0	0
W9	30	25	0	2	10	120	50	2	20	1	17.9	0	0	0
W15	30	25	0	2	15	120	50	2	20	1	16.7	0	0	0
W11	40	25	0	2	17	120	50	2	20	1	8.17	0	0	0
W16	40	25	0	3	20	140	50	3	20	2	4.4	0	0	0
W17	50	25	0	1	20	160	40	1	30	1	25.5	0	0	0
W22	40	25	0	3	15	160	50	3	30	2	4.5	0	0	0
W10	40	25	0	3	18	140	50	3	30	2	12.4	0	0	0
W23	40	25	0	3	18	160	50	3	30	2	11.6	0	0	0
W12	40	25	0	3	10	160	50	3	30	2	7.7	0	0	0
W24	30	25	0	3	10	160	50	3	30	2	17.8	0	0	0
W25	30	25	0	3	10	160	50	3	30	2	12.6	0	0	0
W27	40	25	0	4	10	200	50	4	30	2	20.9	0	0	0
W14	40	25	0	4	10	200	50	4	30	2	9.5	0	0	0
W26	40	25	0	4	10	200	50	4	30	2	12.7	0	0	0

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

### 5.2.1 Calibração e validação - simulação com precipitação estimada por radar

A Figura 38 exibe o hidrograma resultante da simulação realizada para o Evento 1. Observa-se uma excelente aderência entre as vazões simuladas e observadas na maior parte da evolução do hidrograma. No entanto, ressalta-se que o modelo subestimou levemente a vazão de pico, além de apresentar uma discrepância pontual, em forma de superestimativa, durante a fase de recessão. Apesar dessas limitações localizadas, o desempenho geral do modelo manteve-se consistente ao longo do evento.

Figura 38 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 1 (2015) - Calibração



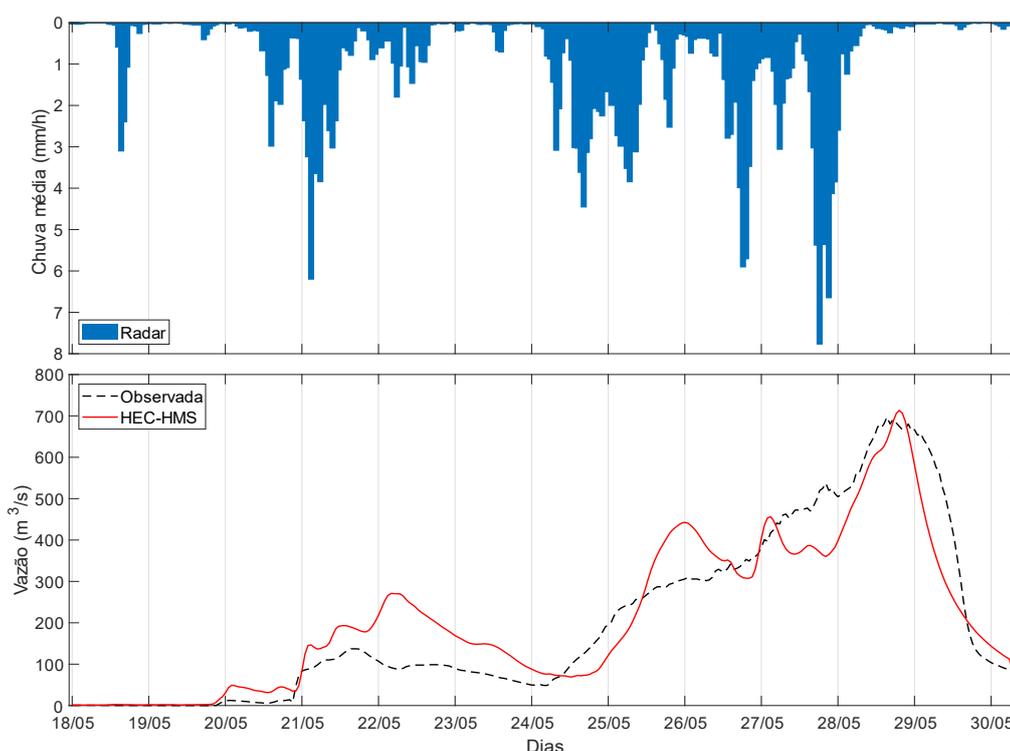
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

No Evento 2, apresentado na Figura 39, observa-se que o hidrograma simulado apresentou boa correspondência com o observado, especialmente em relação à forma geral da curva e ao tempo de resposta hidrológica. O modelo foi capaz de representar, com razoável precisão, a dinâmica do evento, destacando-se na simulação do pico principal de vazão, cuja magnitude e momento de ocorrência mostraram-se bem alinhados aos dados observados. Pequenas discrepâncias foram identificadas nas oscilações intermediárias, mas não comprometeram o desempenho geral da simulação.

Embora o modelo tenha reproduzido satisfatoriamente a dinâmica geral do evento, alguns desvios hidrológicos pontuais merecem atenção. Nota-se uma tendência à superestimação das

vazões durante o período inicial do evento, sugerindo uma resposta hidrológica ligeiramente mais rápida do que a real. Além disso, a fase de recessão foi representada de forma levemente antecipada. Ainda assim, considera-se que a calibração foi consistente, uma vez que os desvios observados não comprometeram de maneira relevante a representação global do hidrograma.

Figura 39 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 20 apresenta o desempenho do modelo HEC-HMS durante a etapa de calibração. Os resultados obtidos para os dois eventos analisados (2015 e 2017) demonstraram desempenho elevado, com todos os indicadores estatísticos classificados na categoria "Muito Bom", exceto para o PBIAS do Evento 1, que foi considerado "Bom". Os valores do NSE foram de 0,89 e 0,85, respectivamente, evidenciando a elevada capacidade do modelo em representar a variabilidade temporal das vazões observadas.

De forma complementar, os valores de  $R^2$  atingiram 0,91 em 2015 e 0,86 em 2017, o que reforça a forte correlação entre os hidrogramas simulados e observados. A análise PBIAS revelou valores de -7,54% no primeiro evento e 4,55% no segundo, ambos dentro da faixa considerada "Muito Bom" ( $|\text{PBIAS}| < 10\%$ ), indicando a ausência de viés sistemático relevante, ainda que com tendência leve à subestimação no primeiro caso e à superestimação no segundo. Por fim, o RSR apresentou valores de 0,33 e 0,38, reforçando o bom ajuste do modelo às séries observadas.

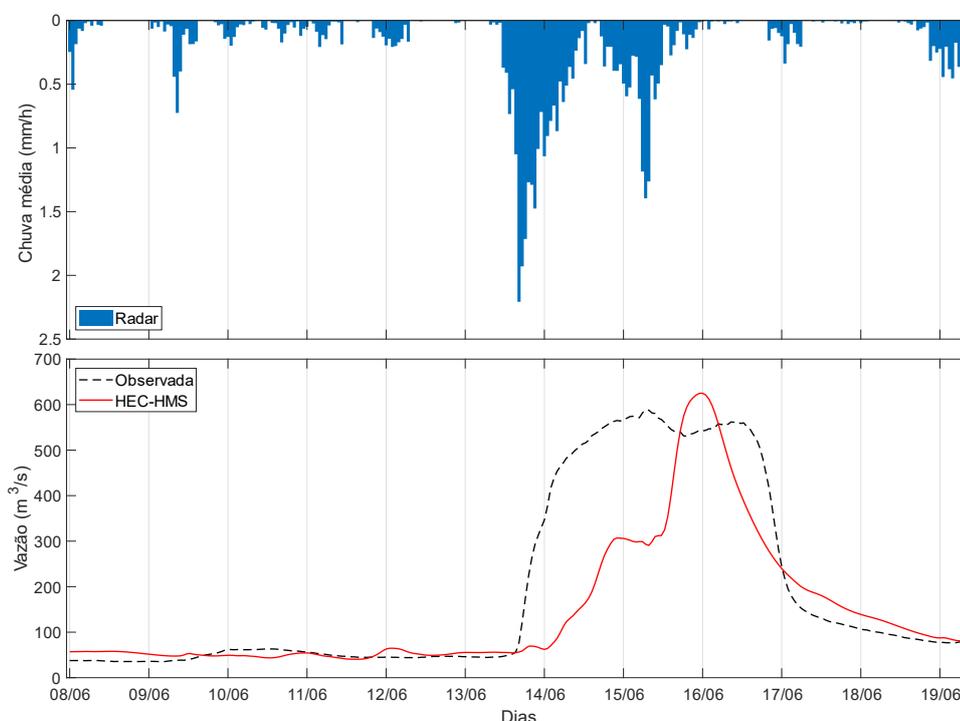
Tabela 20 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de radar

<b>CALIBRAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 1 - 2015</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 2 - 2017</b>	<b>Classificação</b>
R <sup>2</sup>	0,92	Muito Bom	0,86	Muito Bom
NSE	0,89	Muito Bom	0,85	Muito Bom
PBIAS (%)	-7,83	Bom	4,69	Muito Bom
RSR	0,33	Muito Bom	0,38	Muito Bom

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Na sequência, são apresentados os resultados da etapa de validação do modelo. No Evento 3, apresentado na Figura 40, observa-se que o modelo foi capaz de representar satisfatoriamente a resposta inicial do escoamento, evidenciada pela coerência entre as curvas simulada e observada nos primeiros instantes do evento. Contudo, nos períodos de maior vazão, verifica-se uma subestimação sistemática por parte do modelo, resultando em uma resposta atenuada frente ao volume efetivamente observado. Além disso, nota-se que a vazão simulada não respondeu adequadamente à variabilidade da chuva registrada, sugerindo uma defasagem na sensibilidade do modelo à intensidade e ao padrão temporal da precipitação.

Figura 40 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 3 (2020) - Validação



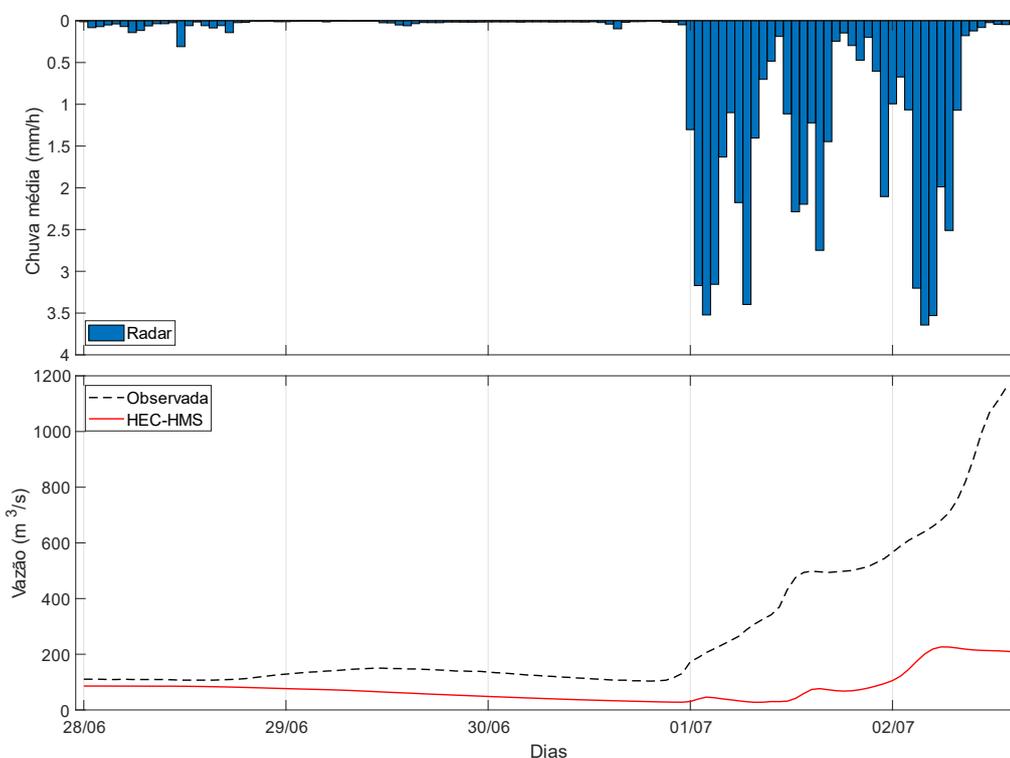
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Já no Evento 4 (41), também se observa uma subestimativa por parte do modelo, desta vez de forma mais acentuada. Essa discrepância está diretamente relacionada às incertezas

nas estimativas de precipitação por radar, cujos os dados impactaram de forma significativa a geração do escoamento simulado.

Ao analisar o hidrograma, observa-se que a precipitação estimada nos dias 1 e 2, embora superior à registrada nos dias iniciais do evento, não foi suficiente para representar adequadamente a intensidade da vazão observada. Essa atenuação torna-se ainda mais evidente quando comparada a eventos anteriores, como os de 2015, 2017 e 2020, que, apesar de apresentarem vazões menores na saída da bacia, registraram estimativas de precipitação significativamente superiores às observadas em 2022. Nesse último evento, a precipitação média máxima na bacia foi de aproximadamente 3,5 mm.

Figura 41 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 4 (2022) - Validação



**Fonte:** Elaborada pela autora (2025).

Com o intuito de mitigar essa limitação, foram incorporados, de forma agregada, os dados de precipitação provenientes do radar meteorológico da APAC. Embora essa integração tenha promovido um leve incremento nas estimativas, a medida ainda se mostrou insuficiente para representar com fidelidade a magnitude do evento analisado.

A coerência entre a análise visual dos hidrogramas e os resultados numéricos é evidenciada pelas métricas de desempenho apresentadas na Tabela 21, que reforçam as limitações apresentadas pelo modelo na simulação dessas cheias. No Evento 3, o  $R^2$  foi de 0,69 e o NSE de 0,62, ambos classificados como "Satisfatório", indicando que o modelo representou razo-

avelmente a variabilidade temporal das vazões observadas. Por outro lado, o PBIAS atingiu  $-24,1\%$ , sendo considerado "Insatisfatório" por exceder o limite de  $\pm 15\%$ . O índice RSR foi de 0,63, também enquadrado como "Satisfatório", refletindo uma aderência aceitável entre os hidrogramas observado e simulado. De forma geral, os resultados do evento de 2020 revelam um desempenho misto do modelo, com boa representação da variabilidade temporal, mas tendência à subestimação dos volumes escoados.

Para o Evento 4, os resultados foram ainda mais críticos. O valor negativo de NSE (-0,19) evidencia que a simulação foi pior do que a média das observações, enquanto o PBIAS de  $-70,08\%$  indica uma subestimação extremamente acentuada das vazões, sinalizando falhas importantes na reprodução do volume escoado. O RSR (1,09) reforça essa análise, caracterizando um ajuste inadequado entre os dados observados e simulados. Mesmo o  $R^2$  (0,74), apesar de classificado como "Bom", não é suficiente para compensar o baixo desempenho global do modelo neste evento.

Tabela 21 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de radar

<b>VALIDAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 3- 2020</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 4 - 2022</b>	<b>Classificação</b>
$R^2$	0,69	Satisfatório	0,74	Bom
NSE	0,62	Satisfatório	-0,19	Insatisfatório
PBIAS (%)	-24,21	Insatisfatório	-70,08	Insatisfatório
RSR	0,63	Satisfatório	1,09	Insatisfatório

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

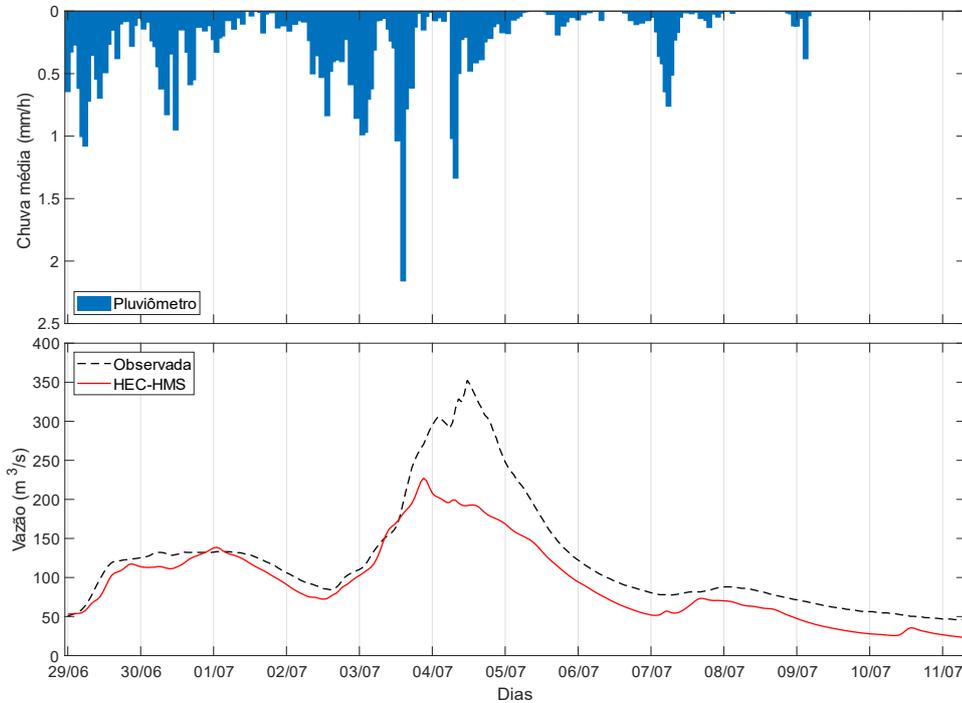
### 5.2.2 Calibração e validação - simulação com precipitação de pluviômetro

Nesta seção, são apresentados os hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante a etapa de calibração, utilizando como entrada a precipitação obtida por meio de dados pluviométricos. Ao analisar a Figura 42, observa-se que, de modo geral, o modelo foi capaz de representar adequadamente o comportamento hidrológico da bacia durante o evento do ano de 2015. No entanto, o pico de vazão não foi bem representado, apresentando uma subestimação de aproximadamente 37% em relação ao valor observado.

Já a Figura 43, apresenta resultados da calibração do Evento 2. A análise revela que o modelo conseguiu captar, de forma geral, a tendência dos picos de vazão ao longo do evento, evidenciando uma relação direta entre os volumes de chuva registrados e os escoamentos

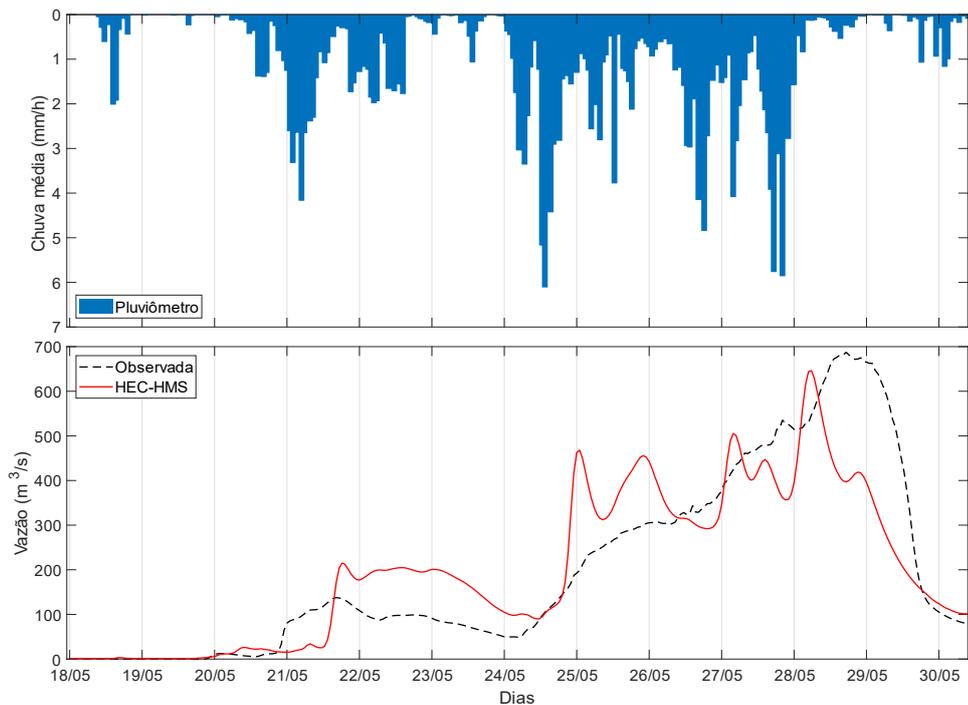
gerados. Contudo, algumas diferenças significativas podem ser observadas, especialmente na magnitude e no tempo de resposta dos picos.

Figura 42 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 1 (2015) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 43 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 2 (2017) - Calibração



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Na Tabela 22, são apresentados os resultados das métricas de desempenho durante a etapa de calibração. O NSE foi superior no Evento 2, com valor de 0,72 (“Bom”), enquanto no Evento 1 foi de 0,69 (“Satisfatório”). No entanto, o  $R^2$  foi mais elevado no evento 1, indicando melhor correlação entre os dados simulados e observados. Por outro lado, o PBIAS apresentou melhora significativa no evento 2, revelando menor tendência à subestimação.

Esses resultados indicam que, embora o modelo tenha respondido de forma coerente em ambos os eventos, seu desempenho pode ter sido influenciado pelos dados de entrada de precipitação, refletindo diferentes níveis de aderência nas simulações.

Tabela 22 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de pluviômetro

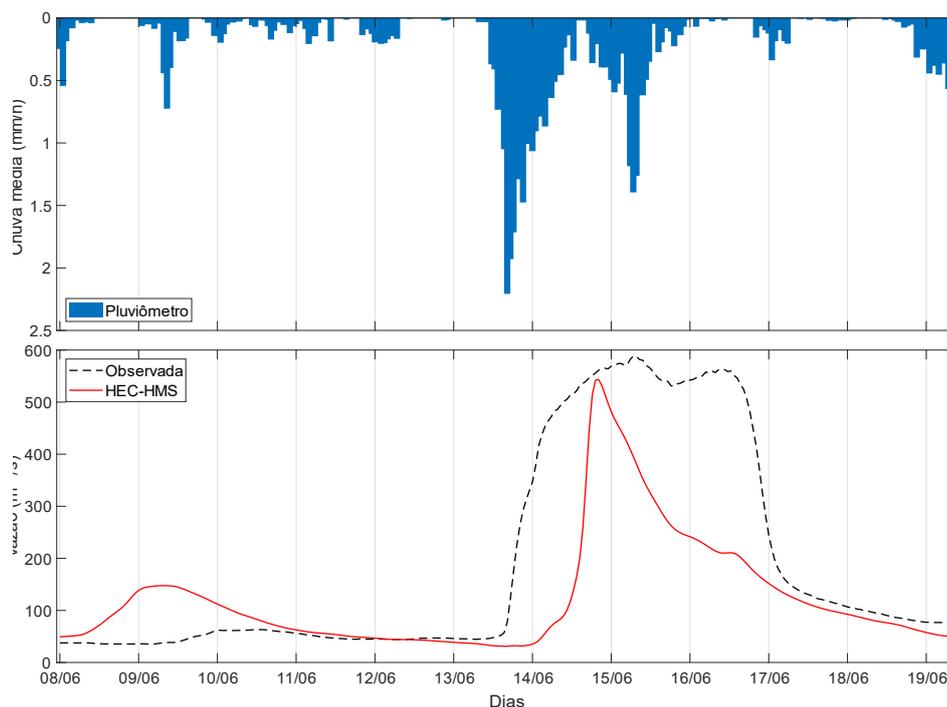
<b>CALIBRAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 1 - 2015</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 2 - 2017</b>	<b>Classificação</b>
$R^2$	0,89	Muito Bom	0,72	Bom
NSE	0,69	Satisfatório	0,72	Bom
PBIAS (%)	-23,2	Insatisfatório	-0,36	Muito Bom
RSR	0,57	Bom	0,53	Bom

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

As Figuras 44 e 45 apresentam os hidrogramas obtidos durante a etapa de verificação do modelo HEC-HMS com dados de pluviômetro. No Evento 3, a resposta simulada pelo modelo reproduz parcialmente a forma geral do hidrograma, mas apresenta discrepâncias importantes. A vazão de pico observada, que ocorre de forma abrupta e prolongada, não foi devidamente captada pelo HEC-HMS. O modelo retardou o início da ascensão e adiantou o momento de recessão da vazão. Além disso, não conseguiu manter a estabilidade do platô observado no pico da vazão, resultando em uma subestimação expressiva, tanto na magnitude quanto na taxa total da vazão máxima.

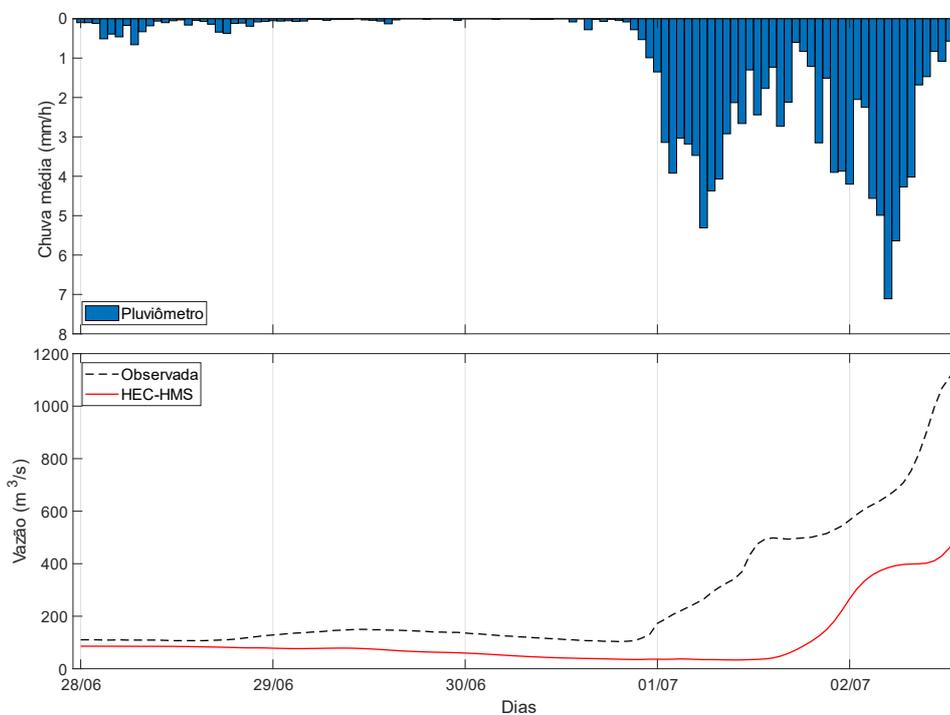
Em relação ao Evento 4, os dados de entrada utilizados na modelagem apresentaram diversas falhas. Apesar da aplicação dos procedimentos de preenchimento adotados neste estudo, essas correções não foram suficientes para representar adequadamente a distribuição e a intensidade da chuva ocorrida na bacia hidrográfica. Como consequência, os resultados das simulações foram significativamente comprometidos, afetando a capacidade do modelo de reproduzir, de forma realista, a resposta hidrológica da bacia.

Figura 44 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 3 (2017) - Validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 45 – Hidrogramas observados e simulados na saída da bacia durante o Evento 4 (2022) - Validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Tabela 23 apresenta os resultados dos indicadores estatísticos obtidos na etapa de validação do modelo HEC-HMS com dados de precipitação de pluviômetro. No Evento 3, os coeficientes  $R^2$  (0,60) e NSE (0,43) foram classificados como “Satisfatório” e “Insatisfatório”,

respectivamente, indicando desempenho limitado na representação da variabilidade temporal do escoamento. O PBIAS foi de  $-34,81\%$ , revelando uma subestimação acentuada do volume escoado, sendo classificado como “Insatisfatório”. Já o índice RSR, com valor de  $0,57$ , foi enquadrado como “Bom”, sugerindo uma aderência razoável entre as vazões.

No Evento 4, o modelo apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de  $0,78$ , classificado como “Bom”, sugerindo boa correlação linear entre as séries. No entanto, o NSE permaneceu “Insatisfatório” ( $0,23$ ), evidenciando a limitação do modelo em reproduzir a variabilidade temporal do escoamento. O PBIAS, de  $-59,1\%$ , revelou uma subestimação severa do volume escoado, enquanto o índice RSR, com valor de  $0,76$ , também foi enquadrado como “Insatisfatório”. De forma geral, os resultados demonstram limitações significativas na simulação da resposta hidrológica com o uso exclusivo de dados pluviométricos.

Tabela 23 – Indicadores estatísticos do modelo HEC-HMS a partir de precipitação de pluviômetro

<b>VALIDAÇÃO</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Evento 3 - 2020</b>	<b>Classificação</b>	<b>Evento 4 - 2022</b>	<b>Classificação</b>
$R^2$	0,60	Satisfatório	0,78	Bom
NSE	0,43	Insatisfatório	0,23	Insatisfatório
PBIAS (%)	-34,81	Insatisfatório	-59,10	Insatisfatório
RSR	0,57	Bom	0,76	Insatisfatório

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Diante do panorama discutido nesta seção, em que foram analisadas individualmente as 16 combinações entre modelos e fontes de dados, a seção seguinte apresenta uma comparação mais sintética e integrada entre os diferentes cenários testados. O objetivo é oferecer uma visão consolidada do desempenho das abordagens aplicadas, a fim de identificar a combinação mais adequada para a simulação hidrológica na bacia do rio Mundaú.

### **5.2.3 Comparação do desempenho de modelos hidrológicos com precipitação de radar e de pluviômetro**

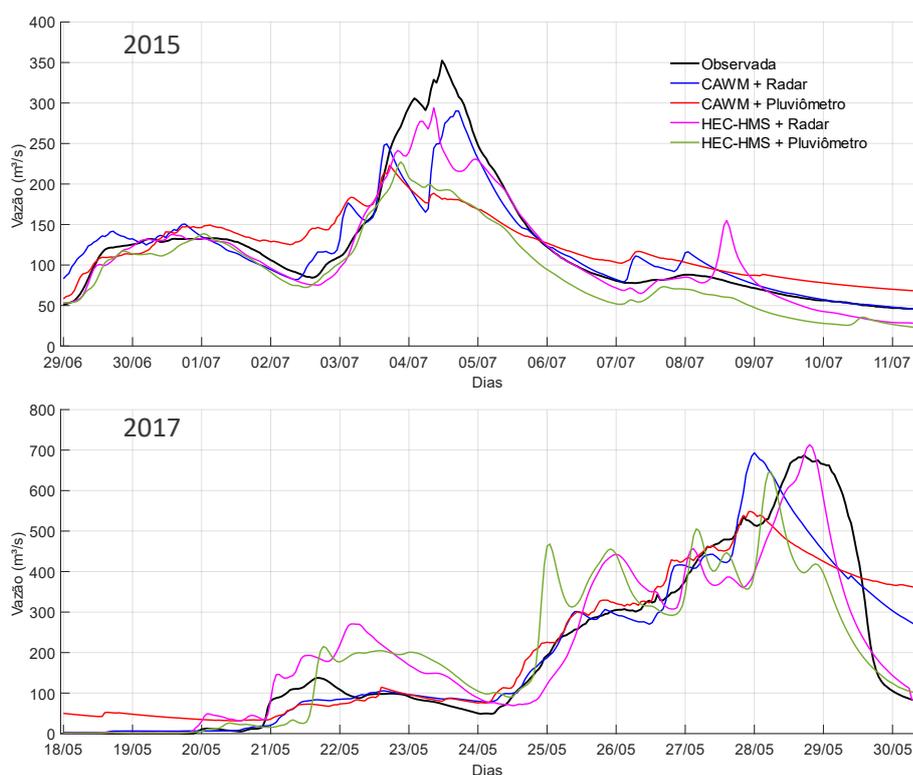
Dando continuidade à análise proposta, os hidrogramas apresentados na Figura 46 sintetizam a comparação entre as vazões observadas e simuladas durante os eventos de cheia ocorridos nos anos de 2015 e 2017, considerando diferentes combinações entre modelos hidrológicos e fontes de dados de precipitação. Recomenda-se a consulta aos Apêndices A, B e C, os

quais apresentam, de forma concisa e com melhor clareza gráfica, os hidrogramas simulados, bem como as respectivas métricas de desempenho associadas a cada modelagem.

No Evento 1, ambos os modelos hidrológicos avaliados apresentaram desempenho satisfatório na simulação da forma e da magnitude do hidrograma observado quando alimentados com dados provenientes de radar meteorológico. Durante o período de vazões elevadas, tanto o modelo concentrado CAWM quanto o HEC-HMS apresentaram comportamento oscilante, alternando entre momentos de boa representação e episódios de subestimação em relação às vazões observadas. Adicionalmente, o HEC-HMS evidenciou a ocorrência de um pico secundário na fase de recessão do hidrograma. De modo geral, contudo, ambos os modelos demonstraram capacidade adequada de representar o pico máximo de vazão.

No Evento 2, o modelo HEC-HMS com dados de radar destacou-se por representar a cheia observada com maior fidelidade, tanto na forma do hidrograma quanto no tempo do pico de vazão. Contudo, apresentou oscilações acentuadas durante a ascensão do hidrograma. Já o modelo CAWM, durante esse período, capturou melhor as vazões observadas, com maior aderência temporal e volumétrica. Entretanto, na simulação com dados de radar, antecipou o momento do pico, enquanto que, quando alimentado com dados pluviométricos, subestimou significativamente o valor da vazão de pico.

Figura 46 – Hidrogramas simulados por diferentes combinações de modelo e fonte de precipitação

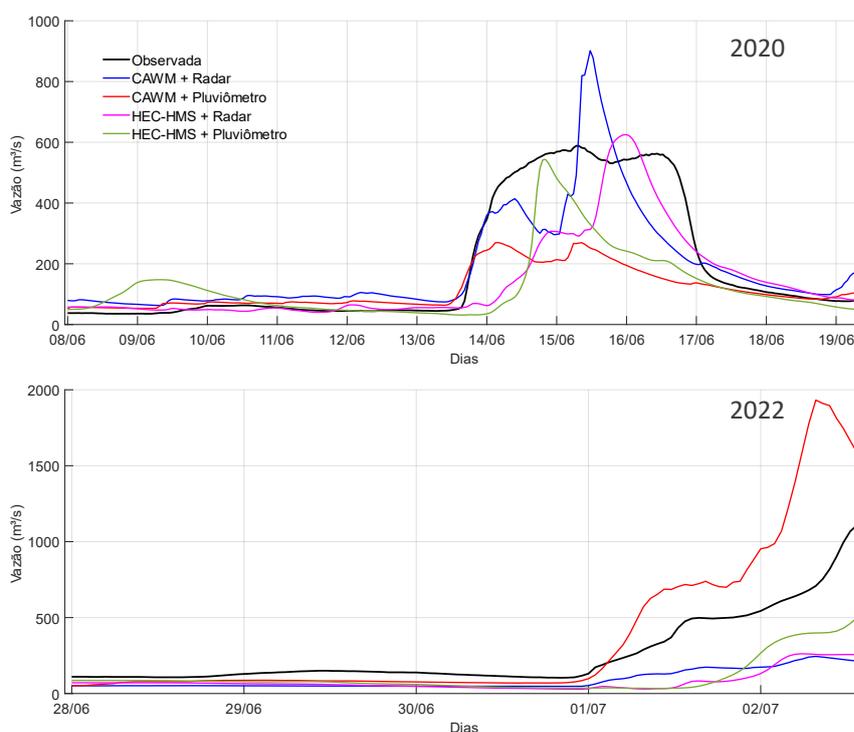


Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Ao analisar os hidrogramas correspondentes à etapa de validação (Figura 47), observa-se que, no Evento 3, ambos os modelos hidrológicos, independentemente da fonte de dados de precipitação utilizada, apresentaram boa aderência entre as vazões simuladas e as observadas durante os períodos de vazões mais baixas. Os tempos de ascensão foram melhor representados pelo modelo CAWM. No entanto, observa-se que nenhum dos modelos foi capaz de reproduzir adequadamente o platô da vazão observada. Ademais, a vazão de pico simulada por ambos os modelos apresentou atrasos em relação ao observado, com destaque para o modelo CAWM, que, quando alimentado com precipitação estimada por radar, superestimou de forma significativa o valor da vazão de pico.

O Evento 4 apresentou dois comportamentos hidrológicos distintos. O primeiro corresponde ao início do evento, até aproximadamente o dia 01/07, período no qual a vazão manteve-se em níveis reduzidos e as simulações apresentaram boa concordância com os dados observados. A partir do momento em que a vazão iniciou seu processo de elevação, observou-se o segundo comportamento, caracterizado por um progressivo afastamento entre as vazões simuladas e a observada. De modo geral, todos os cenários de simulação apresentaram comportamentos semelhantes, com exceção da configuração do modelo CAWM alimentado com dados pluviométricos, que apresentou uma superestimativa acentuada das vazões.

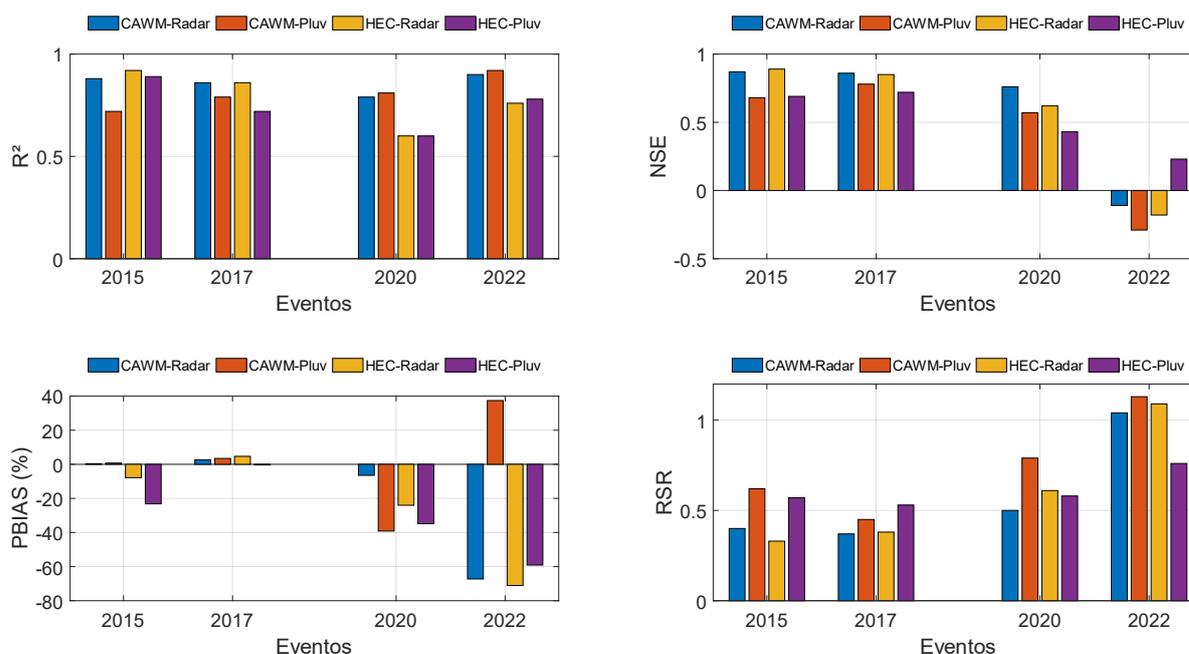
Figura 47 – Evento 4: Hidrogramas simulados por diferentes combinações de modelo e fonte de precipitação.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Como complemento à análise dos hidrogramas previamente apresentados, a Figura 48 fornece uma avaliação adicional do desempenho dos modelos nas etapas de calibração e validação, com base nas métricas estatísticas adotadas neste estudo. De modo geral, observa-se que os modelos apresentaram desempenho satisfatório durante a etapa de calibração (Evento de 2015 e 2017). De modo geral, observa-se que os modelos apresentaram desempenho satisfatório durante a etapa de calibração, referente aos eventos de 2015 e 2017. Destacam-se os elevados valores dos coeficientes  $R^2$  e NSE, a baixa razão do erro padrão (RSR) e os valores de PBIAS próximos de zero, indicando boa aderência entre os hidrogramas simulados e observados. Esses resultados são atribuídos à qualidade dos dados de entrada, que impactou diretamente a capacidade dos modelos em reproduzir fielmente o comportamento hidrológico observado.

Figura 48 – Comparação das métricas de desempenho da modelagem hidrológica por evento: Calibração (2015 e 2017) e Validação (2020 e 2022)



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

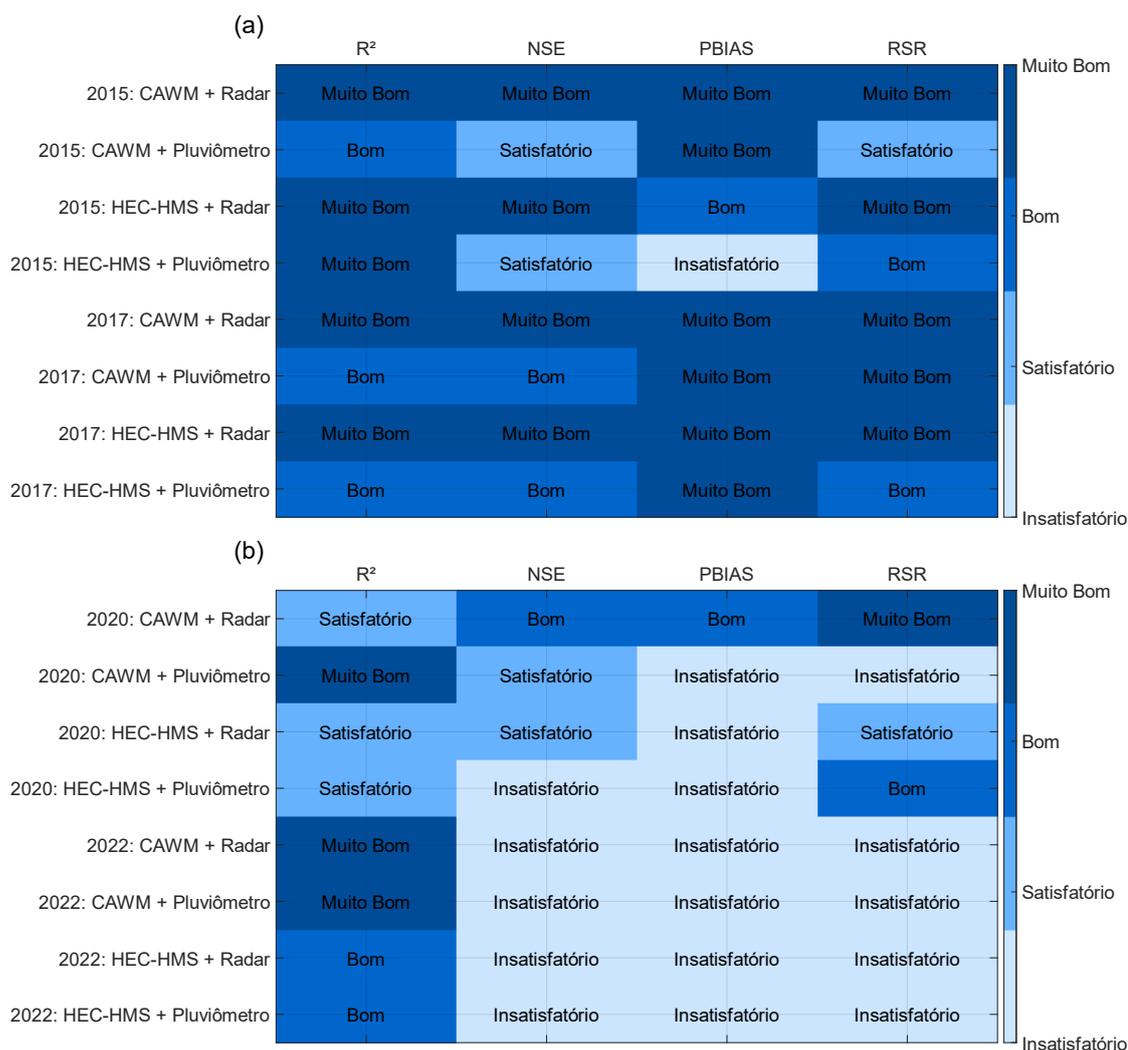
Por outro lado, nos anos de 2020 e 2022 (validação), observa-se uma degradação significativa nas métricas de desempenho, com reduções acentuadas nos valores de  $R^2$  e NSE, elevação nos valores de RSR e desvios mais expressivos no PBIAS. No Evento 2020, todas as configurações apresentaram subestimação do volume escoado, refletida em valores negativos de PBIAS. Já no Evento 2022, houve uma inversão de comportamento na configuração do modelo CAWM com dados de pluviômetro, que passou a superestimar fortemente o volume escoado.

Com o objetivo de complementar a análise quantitativa e proporcionar uma visão geral

do desempenho das diferentes combinações testadas, apresenta-se a seguir um mapa de calor Figura (49), com a classificação qualitativa das métricas  $R^2$ , NSE, PBIAS e RSR. Essa representação gráfica permite identificar, de forma sintética e comparativa, os padrões de desempenho ao longo dos eventos analisados, facilitando a avaliação conjunta dos resultados e destacando as configurações mais adequadas para a modelagem hidrológica na bacia.

Observa-se, por meio do mapa de calor, que durante a fase de calibração, ambas as combinações de modelos e fontes de dados alcançaram predominantemente classificações “Muito Bom” e “Bom” para as métricas analisadas, refletindo um desempenho adequado na representação do escoamento. Já na etapa de validação, nota-se uma degradação significativa dos resultados, com destaque para a piora nos valores de NSE e PBIAS, que, em diversas configurações, foram classificados como “Insatisfatórios”. A combinação CAWM com radar manteve os melhores desempenhos relativos, mesmo nas condições mais desafiadoras da validação.

Figura 49 – Mapas de calor com a classificação qualitativa das métricas de desempenho dos modelos CAWM e HEC-HMS, com dados de precipitação por radar e por pluviômetro: (a) calibração e (b) validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os resultados apresentados nesta seção indicam que, apesar dos desafios inerentes ao uso de dados de radar, especialmente relacionados às incertezas nas estimativas de precipitação, essa fonte se revela vantajosa para a modelagem hidrológica. Além disso, mostra-se promissora na modelagem de eventos extremos. A capacidade do radar em fornecer uma representação espacialmente detalhada da chuva contribui de forma significativa para a simulação das cheias em bacias de resposta rápida, como a do rio Mundaú.

Dentre as combinações testadas, a configuração que utilizou o modelo CAWM alimentado com dados de radar apresentou desempenho ligeiramente superior, conforme evidenciado pelas métricas avaliadas. Essa configuração destacou-se especialmente durante a calibração dos eventos de 2015 e 2017 e, apesar das limitações observadas na etapa de validação, manteve maior robustez em comparação às demais abordagens. Contudo, ressalta-se que a análise dos hidrogramas evidencia que a combinação do modelo HEC-HMS com dados de radar apresentou maior aderência às vazões elevadas, característica particularmente relevante para a simulação de eventos extremos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de estimativas quantitativas de precipitação por radar meteorológico na modelagem de cheias rápidas em bacias hidrográficas montanhosas, utilizando a bacia do rio Mundaú como estudo de caso.

Entre os cenários testados, aquele que empregou o modelo CAWM-V com estimativas de precipitação por radar apresentou desempenho superior em relação aos demais. Essa configuração se destacou pela consistência das simulações e pela capacidade de representar de forma eficaz a resposta hidrológica da bacia em estudo, resultado da associação entre a simplicidade estrutural do modelo e a abrangência espacial do radar.

No conjunto das análises, tanto o CAWM-V quanto o HEC-HMS demonstraram desempenho satisfatório, com diferenças atribuídas à complexidade conceitual e ao nível de detalhamento exigido por cada abordagem. Enquanto o CAWM-V mostrou-se mais adequado a aplicações operacionais, por demandar menor esforço computacional e permitir calibração mais ágil, o HEC-HMS ofereceu maior refinamento na representação espacial dos processos, embora com maior sensibilidade a incertezas e à qualidade dos dados de entrada.

A comparação entre os resultados das simulações hidrológicas utilizando estimativas de precipitação por radar e aquelas baseadas em dados de pluviômetros evidenciou diferenças significativas de desempenho. Apesar das limitações conhecidas do radar em escala pontual, os resultados mostraram que, na escala de bacia, as simulações forçadas com dados de radar apresentaram desempenho superior, indicando sua viabilidade como fonte de entrada para a modelagem de cheias rápidas.

Apesar desse desempenho superior, os resultados também evidenciaram desafios relacionados à qualidade dos dados de radar, como observado no evento de 2022, em que a atenuação do sinal comprometeu a simulação hidrológica. Esse caso reforça a importância de considerar o uso combinado de dados de radar e pluviômetros, estratégia que contribui para a mitigação de incertezas e para o aumento da confiabilidade nas estimativas de vazão.

De modo geral, os achados contribuem para o aprimoramento de metodologias de previsão hidrológica, e oferecem subsídios relevantes para o fortalecimento de sistemas de alerta precoce, especialmente em bacias com resposta rápida e elevada vulnerabilidade a inundações.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Face ao trabalho apresentado nesta tese, é relevante destacar alguns potenciais caminhos para estudos futuros, os quais poderão contribuir para o aprimoramento da metodologia e da aplicação aqui adotada.

Recomenda-se ampliar o conjunto de eventos de cheias para as etapas de calibração e validação, uma vez que os eventos de inundações apresentam volumes muito distintos entre si, o que pode influenciar significativamente a resposta hidrológica da bacia e a performance dos modelos. Assim, a inclusão de um maior número de eventos, contemplando diferentes magnitudes e características hidrológicas, possibilitaria uma avaliação mais abrangente da capacidade preditiva dos modelos e contribuiria para uma calibração multieventos mais robusta.

Outro ponto relevante para investigações futuras é a análise de produtos alternativos de radar meteorológico que possam ser utilizados como substitutos em situações em que os produtos SRI e DPSRI apresentem falhas ou indisponibilidades, a exemplo do PPI (Plan Position Indicator), do CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator). A avaliação da influência dessas alternativas na modelagem pode contribuir para garantir a continuidade das simulações e a consistência das estimativas de precipitação, mesmo quando os principais produtos não estiverem disponíveis.

Uma vez confirmada a viabilidade do uso de dados de radar na modelagem hidrológica, recomenda-se que, em estudos futuros, sejam consideradas as barragens inseridas na bacia do rio Mundaú, com o objetivo de aprimorar a simulação da resposta hidrológica e avaliar com maior precisão os impactos dessas estruturas sobre a vazão durante eventos extremos.

Por fim, recomenda-se analisar o uso integrado de estimativas de radar e dados pluviométricos na modelagem hidrológica, por meio de técnicas de *data merging*. Essa abordagem visa combinar as vantagens de cada fonte de dados, minimizando suas limitações individuais, o que pode resultar em simulações mais consistentes e adequadas à previsão de cheias rápidas.

## REFERÊNCIAS

- ADAMOVIC, M.; BRANGERA, F.; BRAUDA, I.; KRALISCH, S. Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to mediterranean flash floods. *Journal of Hydrology*, v. 541, Part A, p. 173–189, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.032>>. Acesso em: 20 set. 2022.
- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <<http://10.1127/0941-2948/2013/0507>>. Acesso em: 14 out. 2022.
- ALVES, F. H. B. *Sistema de Previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica*. 183 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundação e enchentes. In: TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. (ORG.). *Desastres Naturais: conhecer para prevenir*. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 39–52. E-book. Disponível em: <[https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer\\_para\\_Prevenir\\_3ed\\_2016.pdf](https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2022.
- ARAÚJO, L. F. de. *Uso de Modelo Chuva-Vazão Concentrado Espacialmente na Transferência de Parâmetros para Sub-bacias Aninhadas em Meso Regiões Hidrográficas: Estudo da Bacia Amazônica*. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.
- AUSTIN, G. L.; BELLON, A. Precipitation classification and quantification using x-band dual-polarization weather radar: Application in the hydrometeorology testbed. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 30, n. 9, p. 2108–2120, 1974. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00123.1>>. Acesso em: 21 jun. 2023.
- AUSTIN, G. L.; BELLON, A. The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. *Royal Meteorological society*, v. 100, n. 3, p. 658–666, 1974. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/qj.49710042612>>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- AYZEL, G.; HEISTERMANN, M.; WINTERRATH, T. Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0.1). *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 4, p. 1387–1402, 2019. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/articles/12/1387/2019/>>. Acesso em: 15 out. 2022.
- AZMERI, A.; ISA, A. An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of aceh besar regency, aceh province, indonesia. *Journal of Disaster Risk Studies*, v. 10, n. 1, p. 597–610, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.550>>. Acesso em: 14 set. 2022.
- BACELAR, L. C. S. D. *Prognóstico de Inundações Bruscas Utilizando Conjunto de Previsões em Curto Prazo de Radar Meteorológico*. 181 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Banco Mundial. *Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Alagoas – Junho de 2010*. Brasília: [s.n.], 2012. Relatório elaborado com apoio do Governo do Estado de Alagoas. Agosto de 2012. Coordenação: Joaquín Toro.

BENNETT, T. H. *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade da Califórnia, Davis, 1998.

BENNETT, T. H.; PETERS, J. C. Continuous soil moisture accounting in the hydrologic engineering center hydrologic modeling system (hec-hms). In: \_\_\_\_\_. *Building Partnerships*. [s.n.], 2000. p. 1–10. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40517%282000%29149>>.

BOUT, B.; JETTEN, V. G. The validity of flow approximations when simulating catchment-integrated flash floods. *Journal of Hydrology*, v. 674–688, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.033>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. da S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por radar. *Rev. Ambient. Água*, v. 12, n. 1, p. 57–70, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1924>>. Acesso em: 14 out. 2023.

CALHEIROS, R. V.; ZAWADZKI, I. Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 26, p. 118–132, 1987. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<0118:RRRRFR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0118:RRRRFR>2.0.CO;2)>. Acesso em: 3 fev. 2023.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; MEDEIROS, O. Identificação de fenômenos meteorológicos por radar meteorológico. In: ANDRÉ BECKER NUNES GLAUBER LOPES MARIANO (ORG.). *Meteorologia em tópicos*. Pelotas: Pelotas: Clube dos Autores, 2017. p. 165–225. E-book. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/10559>>.

CAMPOS, M. de L. C. *Aperfeiçoamento e aplicação de modelo hidrológico chuva vazão para simulação sub-diária de eventos de cheias*. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023.

CAMPOS, M. de L. C.; FARIAS, V. N. C. de; CIRILO, J. A.; FARIAS, C. C. de; VASCONCELOS and Rochele S. Estudo comparativo de modelos conceituais concentrados para modelagem de cheias rápidas. In: *XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [S.l.]: ABRH, 2021.

CAPOZZOLI, C. R.; FUJITA, T.; FREITAS, E. D. de. Avaliação dos campos de precipitação mswep, chirps e merge para bacia do alto rio paraná. 2021.

CEMADEN. *Inundação*. 2016. São Paulo: CEMADEN. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/inundacao/>>. Acesso em: 07 jul. 2022.

CHANEY, M. M.; SMITH, J. A.; BAECK, M. L. Range dependence of polarimetric radar estimates for extreme flood-producing rainfall in urban watersheds. *Journal of Hydrometeorology*, v. 23, n. 8, p. 1205–1226, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/jhm-d-21-0191.1>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

CHAVES, J. V. B.; MENEZES ana Beatriz Accioly de; JÚNIOR, E. J. D.; BASTOS, J. C. F.; CIRILO, J. A. Análise comparativa dos modelos HEC-HMS, CAWM e GR4J aplicados às sub-bacias do rio parnaíba. In: *XVI SRHNe - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e 15<sup>o</sup> SILUSBA - Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa*. [S.l.]: ABRH, 2022.

CHO, J. Y. N. et al. Impact of wsr-88d intra-volume low-level scans on severe weather warning performance. *Wea. Forecasting*, v. 37, p. 1169 – 1189, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0152.1>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

CHO, Y. Application of nexrad radar-based quantitative precipitation estimations for hydrologic simulation using arcpy and hec software. *Water*, v. 12, n. 273, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12010273>>. Acesso em: 11 abr. 2021.

CIFELLI, R. et al. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in colorado precipitation events. *Canadian Water Resources Journal*, v. 28, p. 352–364, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1488.1>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

CIRILO, J. A. *Modelo Conceitual CAWM 2022*. 2022. Disponível em: Modelo Conceitual CAWM 2022.pdf.

CIRILO, J. A. et al. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. *Brazilian Journal of Water Resources*, Porto Alegre, v. 25, n. 15, p. 717–720, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>>. Acesso em: 6 ago. 2020.

CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*, v. 375, n. 3, p. 173–189, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.005>>. Acesso em: 20 set. 2022.

COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia) — Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COSTA, D. D. *Previsão hidrológica de longo-prazo baseada em componentes climáticas em bacias hidrográficas semiáridas/tropicais*. 46 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

COUTINHO, E. D. C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (dols) na região do centro de lançamento de alcântara-ma. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, n. 2, p. 193–203, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000200005>>. Acesso em: 16 out. 2022.

CPRM. *Projeto de monitoramento de eventos hidrológicos extremos: enchentes de Alagoas em junho 2010*. Recife, 2010. Tomo I: Levantamento de Campo.

DEFESA CIVIL, D. C. do Rio Grande do S. *Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS - 24/4*. 2024. *Estado do Rio Grande do Sul*. Recuperado de <<https://www.estados.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-24-4>>. Disponível em: <<https://www.estados.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-24-4>>.

DORNELLES, F.; COLLISCHONN, W. *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. [S.l.]: ABRHidro, 2013. v. 1. 342 p. ISBN 978-85-8868-634-2.

EM-DAT. *Hydrological Disasters in South America (CRED Crunch, Issue N° 75)*. 2024. Retrieved from <<https://files.emdat.be/2024/07/seunomearquivo.pdf>>. Disponível em: <<https://files.emdat.be/2024/07/seunomearquivo.pdf>>.

EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. v. 1.

FABRY, F. *Radar Meteorology Principles and Practice*. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.

FABRY, F.; ZAWADZKI, I. Systematic biases in radar rainfall estimation due to the rainfall variability: An analysis of the mount allison radar data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 12, n. 6, p. 1322–1330, 1995.

FAGUNDES, H. de O.; PAIVA, R. C. D. de; FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; FASSONI-ANDRADE, A. C. Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. *Catena*, v. 190, p. 104535, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104535>>. Acesso em: 18 set. 2022.

FALCK, A. S.; VILA, D.; TOMASELLA, J.; MAGGIONI, V.; DINIZ, F. L. Avaliação de um modelo estocástico de erro multidimensional aplicado a estimativas de precipitação por satélite. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 52–63, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140042>>. Acesso em: 14 out. 2022.

FARIAS, V. N. C. de; FARIAS, C. C. de; GOMES, G. T. C.; RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A. Conflitos de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú - AL/PE. In: *XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Belo Horizonte: ABRH, 2021. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=12921f>>. Acesso em: 14 out. 2022.

FELDMAN, A. D. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Reference Manual*. Davis, California, USA, 2000. Disponível em: <[http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HEC\\_HMS\\_Technical%20Reference%20Manual\\_\(CPD74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HEC_HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD74B).pdf)>.

FERRAZ, G. de F. *Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto*. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. B. de. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio mundaú e paraíba. In: *Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste - SRHN*. [S.l.]: ABRH, 2010b.

FRANCO, A. C. V.; SANTO, M. A. D. Contribuição da morfometria para o estudo das inundações na sub-bacia do rio luís alves/sc. *Mercator*, v. 14, n. 3, p. 151–167, 2015. Disponível em: <<https://10.4215/RM2015.1403.0009>>. Acesso em: 16 out. 2022.

FREE, J. e. a. Flood risk and uncertainty. In: ROUGIER, J.; SPARKS, S.; HILL, L. J. (ORG.). *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 190–233. E-book. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781139047562, urlaccessdate={19nov.2021}.>>

GARRETT, G. *Understanding floods: Questions & Answers*. Queensland Government, 2011. Disponível em: <[www.chiefscientist.qld.gov.au](http://www.chiefscientist.qld.gov.au)>. Acesso em: 4 set. 2023.

GERMAIN, K.; FABRY, F. The role of vertical reflectivity profile variations in radar rainfall estimates. *Journal of Applied Meteorology*, v. 39, n. 1, p. 84–94, 2000.

GILEWSKI, P. Impact of the grid resolution and deterministic interpolation of precipitation on rainfall-runoff modeling in a sparsely gauged mountainous catchment. *Water*, v. 13, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/2/230>>.

GOMES, G. T. C. *Sistema de alerta a cheias com ênfase na previsão de vazões*. 55 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) — Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Performance of centrifugal dehulling system for sunflower seeds. *Journal of Food Engineering*, v. 42, p. 191–198, 1999. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00119-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00119-3)>.

HEBA, E.-B.; AHMED, G. Integrated hydrological modeling for watershed analysis, flood prediction, and mitigation using meteorological and morphometric data, scs-cn, hec-hms/ras, and qgis. *Water*, v. 16, n. 2, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/16/2/356>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

HEC, U. A. C. of E. *HEC-HMS Hydrologic Modeling System, Technical Reference Manual*. Davis, CA, 2000.

HEC, U. A. C. of E. *Hydrologic Engineering Center, Hydrologic modeling system. HEC-HMS User's Manual*. [S.l.], 2021. v. 4.9, 671 p.

IBGE. *Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IHADUA, I. M. T. J. *Estabelecimento de critérios inovadores para a quantificação da precipitação para a região coberta pelo radar meteorológico de Maceió*. 79 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto de Ciências Atmosféricas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A.; BEYROUTHY, N. E. Cn250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Sci Data*, v. 6, n. 145, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

JAIN, S. K. et al. A brief review of flood forecasting techniques and their applications. *International Journal of River Basin Management*, v. 16, n. 3, p. 329–344, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>>. Acesso em: 15 out. 2022.

JIMENEZ, P. S. J. *Sistema de alerta a cheias com ênfase na previsão de vazões*. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. Justificativa; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 135–147.

KHAJEHEI, S.; AHMADALIPOUR, A.; SHAO, W.; MORADKNI, H. A place-based assessment of flash flood hazard and vulnerability in the contiguous United States. *Nature*, v. 10, n. 448, 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-019-57349-z>>. Acesso em: 09 fev. 2022.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci*, v. 7, p. 89–97, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>>.

KUCZERA, G.; RENARD, B.; THYER, M.; KAVETSK, D. There are no hydrological monsters, just models and observations with large uncertainties! *Journal des Sciences Hydrologiques*, v. 56, n. 16, p. 980–991, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504677>>. Acesso em: 14 set. 2022.

KUMJIAN, M. Principles and applications of dual-polarization weather radar. part i: Description of the polarimetric radar variables. *Journal of Operational Meteorology*, v. 1, p. 226–242, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119>>. Acesso em: 18 ago. 2023.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, v. 59, n. 1, p. 1–28, 2014. Accessed: 17 Jan. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>>.

KURAJI, K.; TANAKA, Y.; TANAKA, N.; KARAKAMA, I. Generation of stemflow volume and chemistry in a mature japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, Wiley, v. 15, n. 10, p. 1967–1978, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/hyp.250>>.

LI, Z.; YANG, D.; HONG, Y.; QI, Y.; CAO, Q. Evaluation of radar-based precipitation estimates for flash flood forecasting in the three gorges region. *Water Resources Management*, v. 368, p. 89–95, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/piahs-368-89-2015>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

LIMA, F. N. *Dinâmica de precipitações extremas em eventos de inundações urbanas: aspectos espaciais e hidrológicos*. 191 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

LIMA NETO, O. C. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com intervalo de tempo sub-diário na bacia do rio Una em Pernambuco*. 291 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LIMA NETO, O. C.; RIBEIRO NETO, A.; ALVES, F. H. B.; CIRILO, J. A. Sub-daily hydrological-hydrodynamic simulation in flash flood basins: Una river (pernambuco/brazil). *Revista Ambiente & Água*, v. 15, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2556>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

MACHADO, R. E. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MAKI, M. et al. Analyses of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Elsevier, v. 412, p. 107178, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107178>>.

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 5, p. 165–166, 1948. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)>. Acesso em: 3 fev. 2024.

MCCARTHY, G. *The Unit Hydrograph and Flood Routing*. Army Engineer District, Providence, 1939. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=oDXmHAAACAAJ>>.

MCKEE, J. L.; BINNS, A. D. A review of gauge–radar merging methods for quantitative precipitation estimation in hydrology. *Canadian Water Resources Journal*, v. 41, p. 186–203, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1064786>>. Acesso em: 18 ago. 2023.

MELLER, A.; BRAVO, W. C. J. M. Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico mgb-iph. *RBRH*, v. 17, n. 3, p. 209–224, 2012. Disponível em: <[https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=94&SUMARIO=1144&ST=assimilacao\\_de\\_dados\\_de\\_vazao\\_na\\_previsao\\_de\\_cheias\\_em\\_tempo\\_real\\_com\\_o\\_modelo\\_hidrologico\\_mgb\\_iph](https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=94&SUMARIO=1144&ST=assimilacao_de_dados_de_vazao_na_previsao_de_cheias_em_tempo_real_com_o_modelo_hidrologico_mgb_iph)>. Acesso em: 20 set. 2022.

MENDES, J. M. M. *Previsão e Alerta de Cheias em bacias Regularizadas: Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa*. 291 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.

MIGUEL, B. H.; RENNÓ, C. D. Validação de estimativas de precipitação por radar meteorológico em uma bacia hidrológica na região central do estado de São Paulo, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 2, p. 325–339, 2020. Disponível em: <[http://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_325\\_339](http://doi.org/10.11137/2020_2_325_339)>. Acesso em: 3 fev. 2023.

MORAES, M. C. da S. *Parâmetros de radar e distribuição do tamanho de gotas de chuvas em sistema de precipitação continental ou marinha no Leste do Nordeste do Brasil: sua influência na estimativa de vazão na bacia do rio Mundaú*. 147 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, Campina, Grande, 2011.

MORIASI, D. N. et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885900, 2007.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *ASABE*, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

MORRELL, D. A. *Estimativa da taxa de precipitação com variáveis polarimétricas do radar meteorológico MXPOL*. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

NASH, J.; SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part i — a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282–290, 1970. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)>.

OFCM. *Doppler Radar Meteorological Observations, Part B, Doppler Radar Theory and Meteorology*. Washington, D.C., 2005. Disponível em: <<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/radar/radarresources.html>>. Acesso em: 4 set. 2023.

OLIVEIRA, F. D. T. de. *Modelagem hidrológica com vistas à operação de reservatório de múltiplos usos no semiárido*. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade do Ceará, Fortaleza, 2021.

PAULA, S. C. de. *Precipitação estimada por satélite para uso em modelo concentrado chuva-vazão aplicado em diferentes escalas de bacias*. 170 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

PEREIRA, M. L. T.; SOARES, M. P. A.; SILVA, E. A.; MONTENEGRO, A. A. de A.; SOUZA, V. M. de. Variabilidade climática no agreste de pernambuco e os desastres decorrentes dos extremos climáticos. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 4, p. 394–402, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1452.394-402>>. Acesso em: 16 out. 2022.

QUEIROZ, A. C. D. S. *Assinaturas de radar polarimétrico de sistemas precipitantes atuantes no Leste do Nordeste do Brasil*. 105 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) — Programa de Pós-graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

QUEIROZ, K. D. S. *Simulação de eventos extremos de cheias de curto-prazo usando precipitação estimada por radar*. 41 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

RAJULAPATI, C. R.; MUJUMDAR, P. P. Flood modelling: Recent indian contributions. *Indian National Science Academy*, v. 28, p. 705–722, 2019. Disponível em: <<https://DOI:10.16943/ptinsa/2019/49648>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

RAMLY, S. et al. Flood estimation for smart control operation using integrated radar rainfall input with the hec-hms model. *Water Resources Management*, v. 34, p. 3113–3127, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02595-4>>. Acesso em: 14 out. 2023.

RAMOS, C. Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: O caso das cheias e inundações. *Engineering and Technology Journal*, v. 4, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10437/5308>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

RAO, K. H. V. D.; RAO, V. V.; DADHWAL, V. K.; BEHERA, G.; SHARMA, J. R. A distributed model for real-time flood forecasting in the godavari basin using space inputs. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, v. 2, n. 3, p. 31–40, 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13753-011-0014-7.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

REIS, L. G. de M.; SILVA JÚNIOR, O. B.; PEDROSA, V. A. Análise da cheia de agosto de 2000 no rio mundaú em alagoas. In: *V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste - SRHN*. [S.l.]: ABRH, 2000.

REN, D.; CAO, A. Precipitation–runoff simulation in xiushui river basin using hec–hms hydrological mode. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 9, p. 2845–2856, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40808-022-01679-x>>. Acesso em: 14 out. 2023.

RENTSCHLER, J.; SALHAB, M.; JAFINO, B. A. Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 3527, 2022.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood-prone areas: Municipality of ipojuca/pe. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 377–390, 2016. Accessed: 20 Sep. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p377-390>>.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. de O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio una em pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. *RBRH*, v. 20, n. 2, p. 394–403, 2015. Disponível em: <<https://10.21168/rbrh.v20n2.p394-403>>. Acesso em: 14 out. 2022.

RICARDO, G. da S. *Impacto de Cenários de Mudanças Climáticas no Regime Hídrico da Bacia Hidrográfica Passo Marombas*. 127 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) — Programa de Pós-Graduação em ECiências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

RUMAN, S. et al. Impact of missing precipitation values on hydrological model output: a case study from the eddleston water catchment, scotland. *Acta Geophysica*, 2020.

SANTOS, A. G. D. *Acoplamento do modelo atmosférico wrf ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na bacia do paraíba do meio em Alagoas*. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SANTOS, H. G. et al. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa solos, 2018.

SANTOS, K. A. D. *Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. estudo de caso: bacia do rio Mundaú*. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SANTOS, L. B. L. et al. A neural network-based hydrological model for very high-resolution forecasting using weather radar data. *Eng*, v. 4, p. 1787–1796, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/eng4030101>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

SANTOS, W. de O. et al. Variabilidade espacial e temporal das precipitações para a microrregião de pau dos ferros-rn. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 3, p. 434–441, 2014.

SCS. *National Engineering Handbook, Section 4*. Washington, DC: USDA, 1956. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=7J0AOYfTXlcC>>.

SEASS, P. S. E. de A. S. *Boletim Informativo nº 003/2023*. 2023. Disponível em: <<https://www.sigas.pe.gov.br/files/09282023114025-boletim.infor.emergencia.e.calamidade.28.09.2023.final.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SELEX. *Software Manual: Rainbow5 - Products and Algorithms*. Neuss: Selex EX GmbH - Gematronik Weather Radar Systems, 2016. 514 p.

SILVA, A. S. d.; ANJOS, M. M. S. d.; GOMES, A. W. A.; BEZERRA, A. C.; GUIMARÃES, M. J. M. Modelagem automática e cálculo da precipitação média da bacia hidrográfica do rio mundaú. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 10, p. e4919108867, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8867>>.

- SILVA, B. de M. *Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica para Avaliação de Inundações na Zona Urbana de Caruaru, PE*. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- SILVA, D. C. d. *Interceptação da chuva e escoamento superficial de água no solo no semiárido pernambucano*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Serra Talhada, Brasil, 2017. Acesso Aberto. Disponível em: <<http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/8080>>.
- SILVA, E. R. *Modelagem integrada para controle de cheias, previsão e alerta de inundações: estudo de caso da bacia do rio Una em Pernambuco*. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- SILVA, T. G. G. J. da; SIQUEIRA, P. H.; BENETI, C. A. A.; BUZZI, M. F.; CALVETTI, L. Identificação de evento de tempo severo com dados 3d de radar meteorológico e support vector machine. In: *Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. [S.l.]: UFPR, 2017.
- SILVEIRA, G. B.; RODRIGUES, L. H. R.; DORNELLES, F. Uso de soluções baseadas na natureza (sbn) pela gestão pública brasileira no manejo de Águas pluviais urbanas. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 17, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20240012>>.
- SINGH, W. R.; JAIN, M. K. Continuous hydrological modeling using soil moisture accounting algorithm in vamsadhara river basin, india. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, v. 4, n. 4, p. 398–408, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5963/JWRHE0404011>>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- SIVASUBRAMANIAM, K.; SHARMA, A.; ALFREDSEN, K. Merging radar and gauge information within a dynamical model combination framework for precipitation estimation in cold climates. *Environmental Modelling & Software*, v. 119, p. 99–110, 2019.
- SKOLNIK, M. *Radar Handbook*. 3. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2008.
- SKOLNIK, M. I. *Introduction to Radar Systems*. 3rd. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2001.
- SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrado, 2004. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222588/1/Cerrado-Correcao-solo-adubacao-ed-02-8a-impresao-2017.pdf>>.
- SOUZA, R. V. B.; ROCHA, P. C. Inundações e conceitos correlatos: revisão bibliográfica e análise comparativa. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A., GOMES, M. C. V., GUIMARÃES, R.F., GOMES, R. A. T. (ORG.). *Revisões de literatura da geomorfologia Brasileira*. Brasília: Universidade de Brasília, 2022. v. 2, p. 252–262. E-book. Disponível em: <[chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://lsie.unb.br/ugb/livro/Cap10\\_Sousa%20&%20Rocha%20250-262%20v2.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://lsie.unb.br/ugb/livro/Cap10_Sousa%20&%20Rocha%20250-262%20v2.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2024.
- TAYOB, L. J. D. *Determinação da relação entre a intensidade da chuva e refletividade radar no litoral do estado de Alagoas usando disdrômetro a laser*. 76 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

TENÓRIO, R. S.; MORAES, M. C. da S.; KWON, B. H. Raindrop distribution in the eastern coast of northeastern Brazil using disdrometer data. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 4, p. 415–426, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000400001>>. Acesso em: 26 fev. 2024.

TRIGO, R. M. et al. The deadliest storm of the 20th century striking Portugal: Flood impacts and atmospheric circulation. *Journal of Hydrology*, v. 541, p. 597–610, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.036>>. Acesso em: 14 set. 2022.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, ABRH, 2004.

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

UNDRR, U. N. O. for D. R. R. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Resilience Pays: Financing and Investing for our Future*. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2025. Acesso em: 10 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.preventionweb.net/publication/global-assessment-report-gar-2025-resilience-pays-financing-and-investing-our-future>>.

USACE-HEC, U. S. A. C. of E. *HEC-HMS User's Manual*. [S.l.], 2010. US Army Corps of Engineers, Davis.

USACE-HEC, U. S. A. C. of E. *HEC-HMS User's Manual*. [S.l.], 2015b. US Army Corps of Engineers, Davis.

USACE, U. S. A. C. of E. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual*. [S.l.], 2000.

USACE, U. S. A. C. of E. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual*. [S.l.], 2013.

USDA-NRCS, U. S. D. of A. N. R. C. S. *Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. USA: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, 2004. 2004a.

WARMINK, J. J.; KLIS, H. V. der; BOOIJ, M. J.; HULSCHER, S. J. M. H. Identification and quantification of uncertainties in a hydrodynamic river model using expert opinions. *Water Resources Management*, v. 25, p. 601–622, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-010-9716-7>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

WMO. *Guidelines on early warning systems and application of nowcasting and warning operations*. Geneva, Switzerland, 2010. Disponível em: <[http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/publicationsguidelines\\_en.htm](http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/publicationsguidelines_en.htm)>. Acesso em: 15 jan. 2024.

World Meteorological Organization, W. *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. Geneva, 2021. Disponível em: <<https://library.wmo.int/idurl/4/57564>>.

WU, R.-S. et al. Real-time flood warning system application. *Water*, v. 14, n. 12, p. 1866, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w14121866>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

YUAN, W. et al. Research on the critical rainfall of flash floods in small watersheds based on the design of characteristic rainfall patterns. *Water Resour Manage*, v. 35, p. 3297–3319, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-021-02893-5>>. Acesso em: 16 mar 2022.

YULIHASTIN, E.; NURYANTO, D. E.; TRISMIDIANTO; MUHARSYAH, R. Improvement of heavy rainfall simulated with sst adjustment associated with mesoscale convective complexes related to severe flash flood in luwu, sulawesi, indonesia. *Atmosphere*, v. 12, n. 11, p. 1445, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/12/11/1445>>. Acesso em: 08 mai. 2022.

ZAWADZKI, I. I. A neural network-based hydrological model for very high-resolution forecasting using weather radar data. *Journal of Applied Meteorology*, v. 12, n. 3, p. 459–472, 1973. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26176712>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

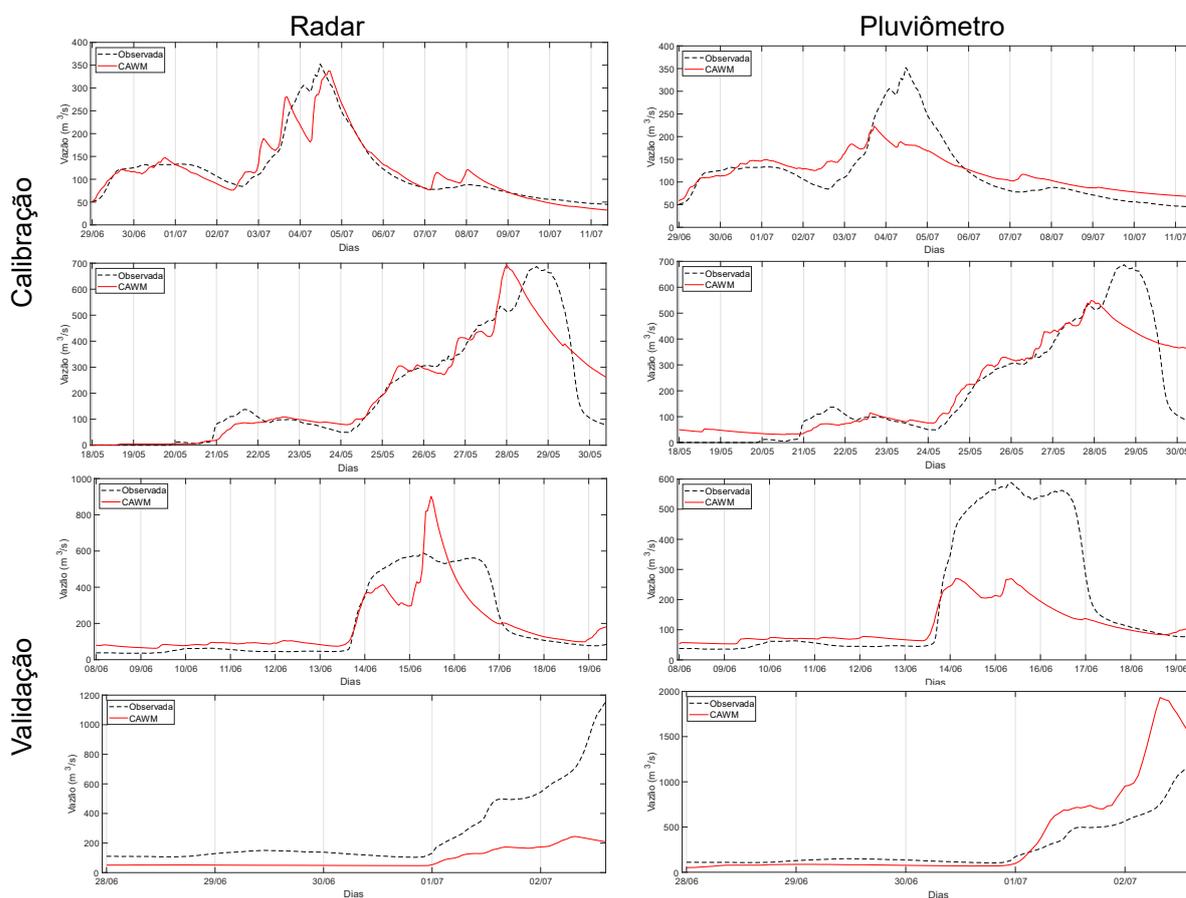
ZHANG, Y.; LIU, L.; WEN H.; YU, B.; WANG H.AND ZHANG, Y. Combined radar quality index for quantitative precipitation estimation of heavy rainfall events. *Remote Sensing*, v. 14, n. 13, p. 3154, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14133154>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

## APÊNDICE A – RESUMO GRÁFICO DOS HIDROGRAMAS SIMULADOS PELO MODELO CAWM - V

Este apêndice apresenta, de forma sintética e comparativa, os hidrogramas observados e simulados para os diferentes eventos hidrológicos modelados com o CAWM, utilizando como dados de entrada a precipitação proveniente de radar e de pluviômetro.

A disposição paralela dos gráficos tem como objetivo permitir uma análise visual direta do desempenho do modelo em diferentes situações, tanto na etapa de calibração quanto na etapa de validação.

Figura 50 – Comparação visual dos hidrogramas simulados com o modelo CAWM - V utilizando dados de radar e pluviômetro nas etapas de calibração e validação



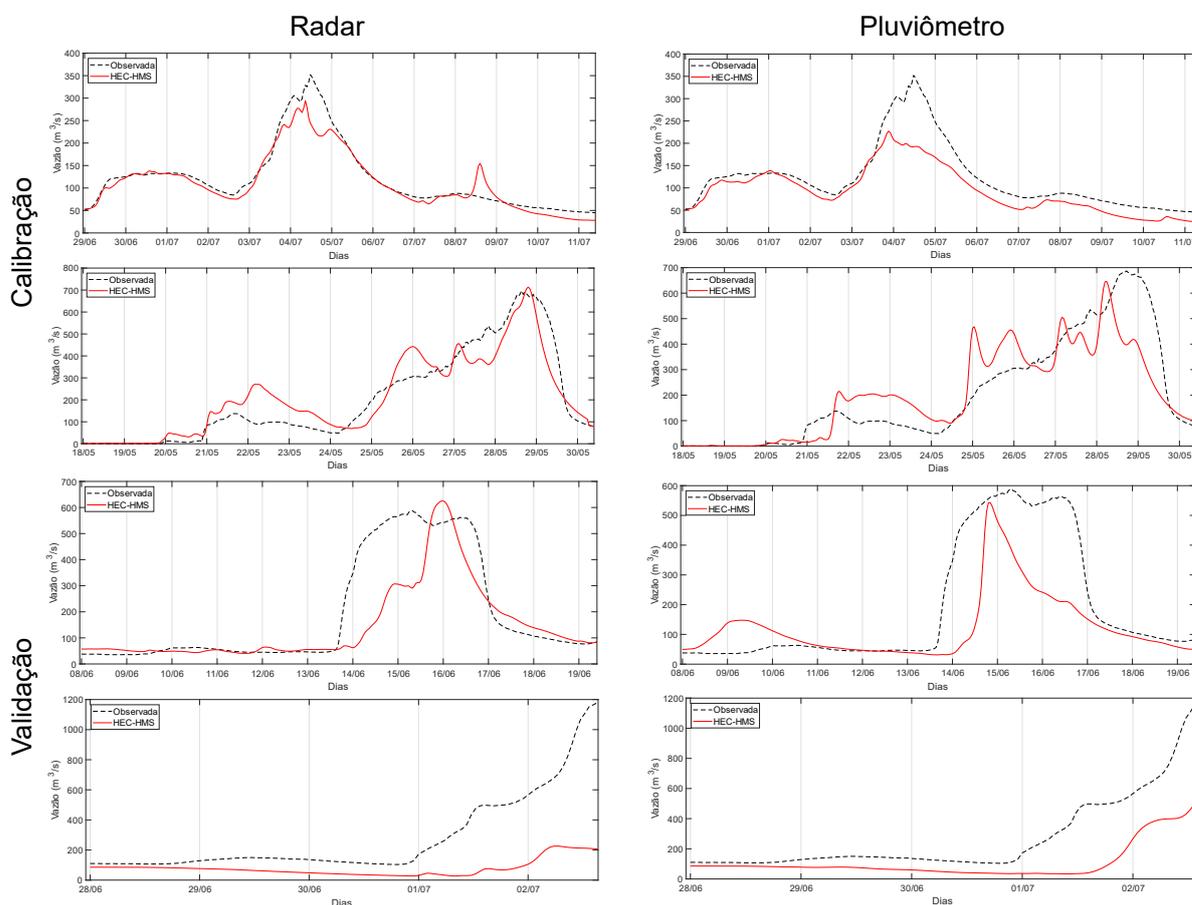
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

## APÊNDICE B – RESUMO GRÁFICO DOS HIDROGRAMAS SIMULADOS PELO MODELO HEC-HMS

Apresentam-se, a seguir, os hidrogramas observados e simulados para diferentes eventos hidrológicos modelados com o HEC-HMS, utilizando como dados de entrada as estimativas de precipitação obtidas por radar meteorológico e por pluviômetros.

Os gráficos estão organizados em pares e dispostos paralelamente, permitindo uma análise visual direta do desempenho do modelo nas etapas de calibração e validação, com foco na comparação entre as respostas geradas a partir das diferentes fontes de dados de precipitação.

Figura 51 – Comparação visual dos hidrogramas simulados com o modelo CAWM utilizando dados de radar e pluviômetro nas etapas de calibração e validação



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

## APÊNDICE C – RESUMO ESTATÍSTICO DE DESEMPENHO NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Este apêndice apresenta o resumo estatístico dos desempenhos obtidos nas simulações hidrológicas com os modelos CAWM e HEC-HMS, calibrados e validados com diferentes produtos de precipitação.

Foram adotadas as seguintes métricas de avaliação: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), viés percentual (PBIAS) e razão do erro padrão residual (RSR), permitindo uma comparação quantitativa entre os modelos e as fontes de dados utilizadas. A tabela a seguir consolida os indicadores de desempenho para os diferentes eventos simulados, oferecendo uma visão integrada dos resultados discutidos ao longo deste trabalho.

Tabela 24 – Resumo estatístico de desempenho na calibração e validação de modelos hidrológicos com diferentes produtos de precipitação

Etapa	Evento	Modelo	Precipitação	Métricas de desempenho			
				$R^2$	NSE	PBIAS	RSR
<b>Calibração</b>	2015	CAWM	Radar	0,88	0,87	0,38	0,40
		CAWM	Pluviômetro	0,72	0,68	0,73	0,62
		HEC-HMS	Radar	0,92	0,89	-7,83	0,33
		HEC-HMS	Pluviômetro	0,89	0,69	-23,2	0,57
	2017	CAWM	Radar	0,86	0,86	2,68	0,37
		CAWM	Pluviômetro	0,79	0,78	3,45	0,45
		HEC-HMS	Radar	0,86	0,85	4,69	0,38
		HEC-HMS	Pluviômetro	0,72	0,72	-0,36	0,53
<b>Validação</b>	2020	CAWM	Radar	0,79	0,76	-6,47	0,50
		CAWM	Pluviômetro	0,81	0,57	-39,10	0,79
		HEC-HMS	Radar	0,69	0,62	-24,21	0,61
		HEC-HMS	Pluviômetro	0,60	0,43	-34,83	0,58
	2022	CAWM	Radar	0,90	-0,11	-67,26	1,04
		CAWM	Pluviômetro	0,92	-0,29	37,41	1,13
		HEC-HMS	Radar	0,76	-0,18	-71,07	1,09
		HEC-HMS	Pluviômetro	0,78	0,23	-59,1	0,76

Fonte: Elaborada pela autora (2025).