

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
Programa de Pós-Graduação em  
Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

DANIEL GUIMARÃES SILVA

**ESTUDO DA VAZÃO NA BACIA DOS RIOS  
TOCANTINS/ARAGUAIA: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE  
PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DO MODELO WRF-HYDRO**

Salvador

2024

DANIEL GUIMARÃES SILVA

**ESTUDO DA VAZÃO NA BACIA DOS RIOS  
TOCANTINS/ARAGUAIA: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE  
PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DO MODELO WRF-HYDRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira.

Salvador

2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S586e Silva, Daniel Guimarães

Estudo da vazão na bacia dos rios Tocantins/Araguaia: análise da influência de parâmetros hidrológicos do modelo WRF-Hydro / Daniel Guimarães Silva. – Salvador, 2024.

119 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024. Inclui referências.

1. Modelagem hidrometeorológica. 2. Vazão. 3. Precipitação. 4. WRF-Hydro. 5. MATOPIBA. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Moreira, Davidson Martins. III. Título.

CDD 620.00113

## Centro Universitário SENAI CIMATEC

**Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada “**Estudo da vazão na bacia dos rios Tocantins/Araguaia: análise da influência de parâmetros hidrológicos do modelo WRF-Hydro**”, apresentada no dia 01 de julho de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:  
Davidson Martins Moreira  
CPF: \*\*\*.832.500-\*\*  
Data: 18/09/2024 17:04:15 -03:00 

Orientador: **Prof. Dr. Davidson Martins Moreira**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Alex Álisson Bandeira Santos  
CPF: \*\*\*.191.765-\*\*  
Data: 18/09/2024 21:19:07 -03:00 

Membro Interno: **Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Lilian Lefol Nani Guarieiro  
CPF: \*\*\*.720.076-\*\*  
Data: 21/09/2024 22:47:39 -03:00 

Membro Interno: **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lílian Lefol Nani Guarieiro**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Marcelo Romero de Moraes  
CPF: \*\*\*.279.180-\*\*  
Data: 18/09/2024 15:58:59 -03:00 

Membro Externo: **Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes**  
UNIPAMPA

Assinado eletronicamente por:  
Antonio Jose da Silva Neto  
CPF: \*\*\*.478.197-\*\*  
Data: 19/09/2024 13:56:31 -03:00 

Membro Externo: **Prof. Dr. Antônio José da Silva Neto**  
UERJ

*Dedico este trabalho aos meus Pais,*

*Maria Madalena Guimarães Silva e  
Rogério Luiz Cardoso Silva.*

## AGRADECIMENTOS

Como deve ser, acima de tudo, agradeço à Deus. Criador, razão de tudo e sempre em cada momento de minha vida.

Agradeço também minha família, em especial meus pais, que usaram as adversidades de suas infâncias como força para proporcionar a melhor educação para mim e meus irmãos Rogerinho e Caroline. Duas pessoas que também sou grato e estão em constante disponibilidade em me ajudar no que preciso. E completando esse ciclo próximo, agradeço minha avó Joana e minha tia Nedina (*in memoriam*), presentes em várias etapas de minha criação.

Expresso minha gratidão também a todos os meus amigos, que compartilham comigo momentos de alegria e descontração e me escutam nas reclamações cotidianas.

Ao meu orientador, Professor Dr. Davidson Martins Moreira, pelo apoio, confiança, paciência e disponibilidade durante a execução do meu trabalho.

Aos Professores das disciplinas que cursei durante o doutorado pelos aprendizados importantes e úteis para esta pesquisa, em especial ao coordenador do Programa, Dr. Alex Álisson Bandeira Santos, sempre disponível no suporte das questões acadêmicas relacionadas ao curso.

Aos colegas que participaram do grupo de pesquisa, sem eles este trabalho não seria desenvolvido. Em especial Carolina Vieira, Filipe Milani, José Roberto e os Professores Dr. Marcelo Romero e Dr. Diogo Ramos, presentes em várias reuniões, muitas vezes intermináveis e em horários nada convenientes.

Ao Centro de Supercomputação para Inovação Industrial do SENAI CIMATEC, por disponibilizar alguns de seus supercomputadores para as simulações deste trabalho.

E ao Instituto Federal do Norte de Minas – *Campus* Pirapora, pela flexibilização de minhas atividades docentes para que eu pudesse cursar esse Doutorado.

## RESUMO

A gestão eficaz dos recursos hídricos em regiões de grande potencial hídrico, como a Bacia do Tocantins/Araguaia no Brasil, é fundamental diante dos desafios impostos pela geração de energia, mudanças climáticas e pelo crescimento das áreas urbanas e agrícolas. Nesse contexto, este estudo avalia o modelo hidrometeorológico WRF-Hydro (*Weather Research and Forecasting-Hydro*) para simular a vazão dos rios Manuel Alves Pequeno, Vermelho e Manuel Alves Grande na região do MATOPIBA, que abrange áreas dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Esta região é uma importante fronteira agrícola em termos de produção de grãos no Brasil. As simulações são conduzidas em dois domínios: um externo, com resolução espacial de 9 km, e um interno, com resolução de 3 km e uma rede hidrológica de 100 m. Inicialmente, são testados diferentes conjuntos de parametrizações físicas baseados em estudos anteriores com WRF (*Weather Research and Forecasting*) e WRF-Hydro em regiões com características climáticas semelhantes às da bacia do rio Tocantins/Araguaia. A seleção do melhor conjunto de parametrizações para a região é realizada comparando os resultados de precipitação simulados pelo WRF-Hydro com dados observacionais no período de 1º a 28 de março de 2019. Com as parametrizações físicas definidas, a análise dos parâmetros hidrológicos de escoamento superficial, profundidade de retenção superficial, rugosidade para o escoamento superficial e rugosidade para os canais é realizada nos resultados de vazão simulada, abrangendo um período de chuvas intensas de 13 de março a 1º de junho de 2018. Para validação do modelo, são utilizados dados observacionais de vazão em três estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com avaliações baseadas em índices estatísticos, resultando nos melhores valores de 0,69 para o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe, 0,83 para o coeficiente de correlação, 4,99 para o viés percentual e 0,56 para a razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão das observações. Em particular, o ajuste dos parâmetros de escoamento superficial e de rugosidade para esse escoamento tem uma contribuição maior para a melhoria dos resultados estatísticos do que o ajuste dos outros dois parâmetros hidrológicos. Além disso, a qualidade da simulação de vazão em cada estação de medição de rios está relacionada com a distribuição temporal da precipitação simulada em comparação com os dados observados na rede de drenagem. Este estudo destaca o potencial do WRF-Hydro como um modelo de

escala fina, facilmente acoplável à previsão numérica do tempo, e avança significativamente na avaliação da dinâmica dos rios regionais, crucial para a gestão estratégica dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Modelagem Hidrometeorológica; Vazão; Precipitação; WRF-Hydro; MATOPIBA.

# **STUDY OF THE FLOW IN THE TOCANTINS/ARAGUAIA RIVER BASIN: ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HYDROLOGICAL PARAMETERS IN THE WRF-HYDRO MODEL**

## **ABSTRACT**

Effective management of water resources in regions with great hydric potential, such as the Tocantins/Araguaia Basin in Brazil, is essential given the challenges imposed by energy generation, climate change, and the growth of urban and agricultural areas. In this context, this study evaluates the WRF-Hydro hydrometeorological model (Weather Research and Forecasting-Hydro) to simulate the flow of the Manuel Alves Pequeno, Vermelho, and Manuel Alves Grande rivers in the MATOPIBA region, which encompasses areas of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia. This region is an important agricultural frontier in terms of grain production in Brazil. The simulations are conducted in two domains: an external one, with a spatial resolution of 9 km, and an internal one, with a resolution of 3 km and a hydrological network of 100 m. Initially, different sets of physical parameterizations based on previous studies with WRF (Weather Research and Forecasting) and WRF-Hydro in regions with climatic characteristics similar to those of the Tocantins/Araguaia River basin are tested. The selection of the best set of parameterizations for the region is carried out by comparing the precipitation results simulated by WRF-Hydro with observational data from March 1st to 28th, 2019. With the physical parameterizations defined, the analysis of hydrological parameters such as surface runoff, surface retention depth, surface flow roughness, and channel roughness is performed on the simulated flow results, covering a period of intense rainfall from March 13th to June 1st, 2018. For model validation, observational flow data from three fluviometric stations of the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA) are used, with evaluations based on statistical indices, resulting in the best values of 0.69 for the Nash-Sutcliffe efficiency index, 0.83 for the correlation coefficient, 4.99 for the percentage bias, and 0.56 for the ratio between the mean square error and the standard deviation of the observations. In particular, the adjustment of the surface runoff parameters and roughness for this runoff contributes more to the improvement of the statistical results than the adjustment of the other two hydrological parameters. Additionally, the quality of the flow simulation at each river measurement station is related to the temporal distribution of simulated precipitation compared to the observed data in the drainage network. This study

highlights the potential of WRF-Hydro as a fine-scale model, easily coupled with numerical weather forecasting, and significantly advances the assessment of regional river dynamics, crucial for the strategic management of water resources.

**Keywords:** Hydrometeorological Modeling; Streamflow; Precipitation; WRF-Hydro; MATOPIBA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Delimitação territorial e (b) Bacias hidrográficas do MATOPIBA. ....	21
Figura 2. Visão conceitual do fluxo da água no WRF e WRF-Hydro. ....	26
Figura 3. Localização dos estudos realizados pelo WRF-Hydro no mundo em acordo com a revisão bibliográfica. ....	30
Figura 4. Esquema generalizado da arquitetura WRF-Hydro. ....	39
Figura 5. Diagrama esquemático da arquitetura do WRF-Hydro acoplado. ....	41
Figura 6. Diagrama conceitual dos componentes físicos do WRF-Hydro e das saídas relativas. ....	42
Figura 7. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa. ....	44
Figura 8. Região do MATOPIBA e sub-bacia do Tocantins, entre os rios Sono e Araguaia. ....	46
Figura 9. Localização das estações meteorológicas do Brasil com dados disponibilizados pelo INMET. ....	51
Figura 10. A estimativa de precipitação acumulada de 24 horas do TRMM (sombreada) para 8 de março de 2003. (a) Os pontos brancos representam os pluviômetros de relatório naquele dia específico. (b) Os quadrados brancos representam as caixas de grade TRMM de 0,25° próximas aos pluviômetros mostrados em (a). ....	52
Figura 11. Pontos de grade do Produto MERGE na rede de drenagem do rio Manuel Alves Pequeno. ....	53
Figura 12. Fluxograma dos dados utilizados no modelo, juntamente com suas interações e dados observacionais. ....	54
Figura 13. Representação conceitual dos elementos do terreno. ....	59
Figura 14. Representação esquemática do roteamento de canal. ....	62
Figura 15. Testes de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos a partir dos dados de vazão da estação Itacajá. ....	65
Figura 16. Precipitação acumulada diária observada no produto MERGE e simulada no WRF-Hydro em dois esquemas de parametrizações físicas. ....	69
Figura 17. Precipitação acumulada diária observada do MERGE e simulada no WRF-Hydro em seis esquemas de parametrizações físicas. ....	71
Figura 18. Precipitação acumulada diária observada do MERGE e simulada no WRF-Hydro no esquema de parametrizações físicas da simulação 4 em 28 dias. ....	73

Figura 19. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação de Itacajá com testes de sensibilidade do REFKDT. ....	75
Figura 20. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação de Itacajá com testes de sensibilidade do RETDEPRTFAC. ....	77
Figura 21. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação de Itacajá com testes de sensibilidade do OVROUGHRTFAC. ....	78
Figura 22. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação Itacajá com testes de sensibilidade do parâmetro MannN . ....	80
Figura 23. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas nas estações Jacaré e Goiatins. (a) Estação Jacaré - REFKDT, (b) Estação Goiatins - REFKDT, (c) Estação Jacaré - RETDEPRTFAC, (d) Estação Goiatins - RETDEPRTFAC, (e) Estação Jacaré - OVROUGHRTFAC, (f) Estação Goiatins - OVROUGHRTFAC, (g) Estação Jacaré - MannN, (h) Estação Goiatins - MannN. ....	85
Figura 24. Hidrogramas simulados pelo WRF-Hydro e observados nas estações (a) Itacajá, (b) Jacaré e (c) Goiatins, juntamente com seus respectivos hietogramas simulados e observados usando a técnica MERGE dentro da rede de drenagem de cada rio. ....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estudos relacionados ao WRF-Hydro na Ásia, Europa e América do Norte. .....	33
Tabela 2. Demais estudos que estabelecem uma comparação entre WRF e WRF-Hydro.....	35
Tabela 3. Período das simulações realizadas.....	49
Tabela 4. Principais parametrizações físicas utilizadas nas simulações.....	56
Tabela 5. Valores padrão dos parâmetros do canal.....	63
Tabela 6. Fórmulas das medidas estatísticas utilizadas neste trabalho.....	66
Tabela 7. Índices estatísticos da comparação entre as simulações 1 e 2 com o produto merge no período de 01 a 28/03/2019.....	70
Tabela 8. Índices estatísticos da comparação entre as simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 com o produto MERGE no período de 06 a 16/03/2019.....	72
Tabela 9. Índices estatísticos da comparação entre a simulação 4 com o produto MERGE de 01 a 28/03/19.....	73
Tabela 10. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade do REFKDT no período de 13/03 a 01/06/2018.....	76
Tabela 11. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade do RETDEPRTFAC no período de 13/03 a 01/06/2018.....	77
Tabela 12. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade do OVROUGHRTFAC no período de 13/03 a 01/06/2018.....	79
Tabela 13. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade para MannN no período de 13/03 a 01/06/2018.....	81
Tabela 14. Avaliação de desempenho de modelos hidrológicos a partir dos coeficientes de desvio padrão das observações, eficiência de Nash-Sutcliffe e viés percentual.....	82
Tabela 15. Índices estatísticos obtidos pela comparação das vazões observados nas estações Jacaré e Goiatins com as simulações do WRF-Hydro, usando testes de	

sensibilidade para os parâmetros REFKDT, RETDEPRTFAC, OVROUGHRTFAC e MannN no período de 13/03 a 01/06/2018. ....	83
Tabela 16. Valores acumulados de precipitações diárias simuladas e observadas, coeficientes de variação espacial e erros relativos referentes aos pontos da grade dentro da respectiva rede de drenagem de cada rio no período de 13/03 a 01/06/2018. ....	89
Tabela 17. Parâmetros hidrológicos analisados na simulação de vazão com os valores considerados mais adequados para a região de estudo no período de 13/03 a 01/06/2018. ....	89
Tabela 18. Índices estatísticos obtidos entre vazões simuladas com melhor o conjunto de parametrizações físicas e observadas em cada estação fluviométrica, ER e CVesp no período de 13/03 a 01/06/2018. ....	90

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico;
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station;</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos;
CV	Coeficiente de Variação;
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts;</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency;</i>
ER	Erro Relativo;
ERA-Interim	<i>ECMWF Reanalysis - Interim;</i>
ESS	<i>Eta Similarity Scheme;</i>
GDAS-FNL	<i>Global Data Assimilation System – Final Analysis;</i>
GIS	<i>Geographic Information Systems;</i>
GLDAS	<i>Global Land Data Assimilation System;</i>
GPM	<i>Global Precipitation Measurement Mission;</i>
HBV	<i>Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning;</i>
IMERG	<i>Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement;</i>
INLAND	<i>Integrated Model of Land Surface Processes;</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
LASH	<i>Lavras Simulation of the Hydrology;</i>
LSM	<i>Land Surface Model;</i>
MATOIIBA	Fronteira agrícola que inclui os estados brasileiros Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia;
MDE	Modelo Digital de Elevação;
MERGE	Valores de precipitação observados resultante da combinação de observações de estações pluviométricas com estimativas de satélite;
MHD	Modelo Hidrológico Distribuído;
MM5	<i>Mesoscale Model;</i>
MYJ	<i>Mellor–Yamada–Janjic Scheme;</i>
MYNN	<i>Mellor–Yamada Nakanishi Niino;</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration;</i>

NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research;</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction;</i>
NSE	Eficiência de Nash-Sutcliffe;
PBIAS	Viés percentual;
PBL	<i>Planetary Boundary Layer;</i>
RAL	<i>Research Applications Laboratory;</i>
rBIAS	Viés relativo;
RMSE	Erro quadrático médio;
RRTMG	<i>Rapid Radiative Transfer Model for General Circulations Models;</i>
RRTM	<i>Rapid Radiative Transfer Model;</i>
RSR	Razão entre RMSE e o desvio padrão das observações;
STDEV <sub>obs</sub>	Desvio padrão dos dados observados;
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool;</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model;</i>
THMB	<i>Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry;</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission;</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture;</i>
VIC	<i>Variable Infiltration Capacity;</i>
WDM6	<i>WRF Double Moment 6–class;</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting;</i>
WRF-Hydro	<i>Weather Research and Forecasting-Hydro;</i>
WSM6	<i>WRF Single–moment 5–class Schemes.</i>

## LISTA DE SIGLAS DOS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DO WRF-HYDRO

LKSATFAC	Parâmetro na condutividade hidráulica lateral saturada;
MannN	Parâmetro de rugosidade para o canal;
OVROUGHRT	Rugosidade para o escoamento superficial;
OVROUGHRTFAC	Parâmetro de escala de OVROUGHRT;
REFKDT	Parâmetro na parametrização do escoamento superficial;
RETDEPRT	Profundidade máxima de retenção superficial;
RETDEPRTFAC	Parâmetro de escala controlador de RETDEPRT;
SLOPE	Parâmetro regulador da drenagem profunda;

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	19
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.1.1 Objetivo Geral .....	23
1.1.2 Objetivos Específicos .....	24
1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	24
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	25
2.1 WRF E WRF-HYDRO .....	25
2.2 ASPECTOS RELEVANTES DA MODELAGEM HIDROLÓGICA, INCLUINDO O WRF-HYDRO PARA A REGIÃO DESTE ESTUDO.....	27
2.3 PRINCIPAIS ABORDAGENS REALIZADAS PELOS ESTUDOS.....	31
2.3.1 WRF-Hydro para Simulações em Eventos de Chuva Intensa.....	31
2.3.2 Precipitação e o fluxo de água terrestre no WRF e WRF-Hydro.....	34
2.3.2 Parâmetros Hidrológicos do WRF-Hydro .....	35
2.4 DESCRIÇÃO DO MODELO WRF-HYDRO .....	38
2.4.1 Breve Histórico.....	38
2.4.2 Visão Geral .....	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 SIMULAÇÃO COM O WRF-HYDRO .....	45
3.1.1 Área de Estudo .....	45
3.1.2 Configuração do Modelo Atmosférico (WRF).....	46
3.1.3 Configuração do Modelo Hidrológico (WRF-Hydro) .....	47
3.1.4 Simulações realizadas .....	48
3.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO .....	49
3.3 CONJUNTOS DE PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS UTILIZADOS NA PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES.....	54
3.4 PARÂMETROS HIDROLÓGICOS UTILIZADOS NA SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES .....	57
3.4.1 Descrição dos parâmetros .....	57
3.4.2 Procedimentos de calibração dos parâmetros hidrológicos .....	63
3.5 MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA.....	65

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4.1 PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES: TESTES DE PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS .....	69
4.2 SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES.....	74
4.2.1 Testes de Sensibilidade de Parâmetros Hidrológicos na Estação Itacajá.	74
4.2.2 Comparação das vazões simuladas com as observadas nas Estações Jacaré e Goiatins utilizando os valores dos parâmetros selecionados .....	82
4.3 AVALIAÇÃO DO ERRO NA PRECIPITAÇÃO SIMULADA .....	86
5 CONCLUSÕES .....	91
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	93
REFERÊNCIAS .....	95
PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA.....	111

## 1 INTRODUÇÃO

A água, além de ser um recurso fundamental para os ecossistemas, é indispensável para a saúde e o bem-estar humano, mantendo uma relação intrínseca com a economia. Seu papel desempenha uma função crucial em diversas áreas, incluindo segurança alimentar, produção de energia, desenvolvimento econômico e redução da pobreza (UNESCO, 2020). Um desafio substancial tanto para as necessidades de consumo humano quanto para as operações ligadas à agricultura, pecuária, indústrias e demais setores.

O crescimento populacional, o desperdício de água per capita e a expansão contínua da agricultura e de outras indústrias com alto consumo de água, representam uma combinação de fatores que pode levar ao esgotamento dos recursos de água doce. Essa situação é agravada pela intensificação da competição no mercado e pelas mudanças climáticas, em meio a regulamentações ambientais mais rigorosas. Esses elementos contribuem para intensificar os desafios específicos relacionados à gestão dos recursos hídricos, um processo fundamental para garantir a sustentabilidade do planeta e das gerações futuras. Desafios adicionais incluem variabilidade climática, efeitos não lineares, dinâmica estocástica e restrições hidráulicas, que precisam ser considerados no planejamento ecológico para o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos (ZHANG et al., 2023; BAGATIN et al., 2014; XIANG et al., 2021).

A variabilidade climática é considerada um dos principais fatores que contribuem para a alteração do ciclo hidrológico, sendo identificada como um importante elemento para a mudança no volume de vazão, pico de vazão e tempo de roteamento do fluxo, causando transformações no escoamento superficial, na frequência das inundações e na vazão média anual (TAN et al., 2015).

As mudanças climáticas também podem afetar a disponibilidade e a qualidade da água, além de contribuir para a ocorrência de condições meteorológicas extremas, como inundações ou secas intensas, que podem ameaçar o desenvolvimento socioeconômico sustentável e a biodiversidade de determinado local, resultando em profundas implicações para os recursos hídricos. Elas têm um impacto potencial na hidrologia por meio da alteração da quantidade de vazão e da sazonalidade em um contexto global, enfatizando o comportamento não linear chuva-escoamento, com resultados concretos específicos para o local (NÄSCHEN et al., 2019).

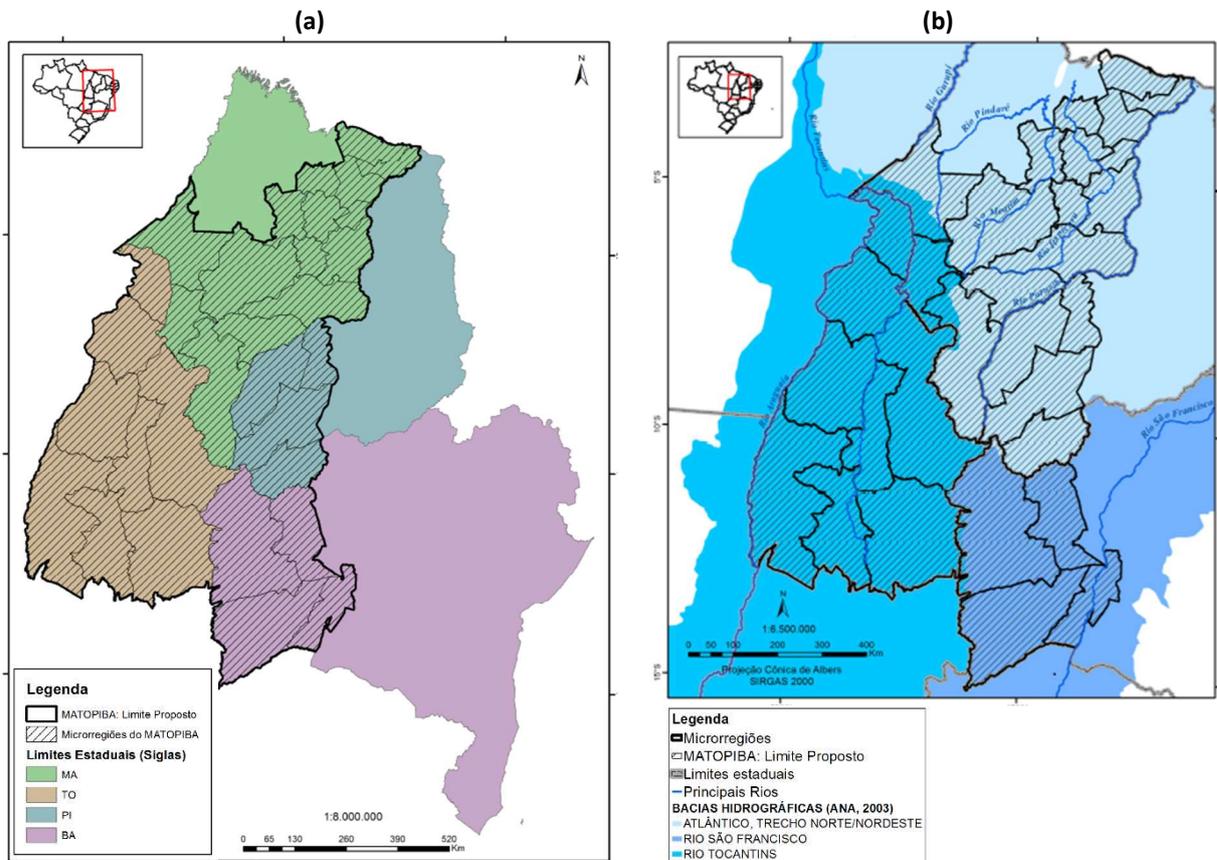
As enchentes que devastaram o estado do Rio Grande do Sul, no Brasil, desde

o final de abril deste ano representam uma crise de proporções históricas, estando associadas à variabilidade e às mudanças climáticas. Esse evento extremo, resultado direto das mudanças climáticas induzidas pelo homem, foi impulsionado por uma combinação de diversos fatores atmosféricos, incluindo uma onda de calor persistente nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, um corredor de umidade da Amazônia e fortes correntes de vento, levando a precipitações sem precedentes e aumentos dramáticos nos níveis de água dos sistemas hídricos do estado (MARTINS-FILHO et al., 2024).

Além disso, a crise hídrica no Brasil, especialmente evidente nos grandes centros urbanos, resulta da expansão urbana impulsionada pelo aumento da população, de padrões de chuva cada vez mais irregulares devido às mudanças climáticas e de uma gestão inadequada dos recursos hídricos. Nesse contexto, a crescente demanda por água apresenta um desafio significativo, tanto para o abastecimento humano quanto para as atividades relacionadas à agricultura, pecuária, indústrias e setor energético, o que atribui grande importância à disponibilização de dados hidrológicos para o desenvolvimento de projetos de gestão das águas, em especial o armazenamento de águas e tomada de medidas de prevenção no que diz respeito a enchentes e erosões (FARJALLA et al., 2021).

O Brasil está entre os países com maior disponibilidade de recursos de água doce no mundo (ANA, 2019) e é o quarto maior produtor mundial de grãos, superado apenas pela China, Estados Unidos e Índia. O país lidera a produção e exportação de soja, representando 50% do comércio mundial (EMBRAPA, 2022). Uma região que contribui significativamente para essa produtividade é a fronteira agrícola nacional conhecida como MATOPIBA, sigla que representa as iniciais dos estados que engloba: Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Essa área tem ganhado destaque nacional devido ao seu robusto potencial para a produção de grãos e fibras (SILVA, 2022). Nessa região, três bacias hidrográficas estão presentes: a bacia do rio São Francisco, a bacia do Atlântico – trecho Norte/Nordeste e a bacia do Tocantins/Araguaia, foco deste estudo, especificamente a sub-bacia do Tocantins entre os rios Sono e Araguaia. A delimitação da região e suas bacias hidrográficas são apresentadas na Figura 1.

Figura 1. (a) Delimitação territorial e (b) Bacias hidrográficas do MATOPIBA.



Fonte: Miranda et al. (2014) e Magalhães et al. (2014).

A bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia é a maior bacia hidrográfica inteiramente dentro do território nacional, abrangendo as regiões norte e centro-oeste do país, incluindo os estados de Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal. A região possui abundantes recursos hídricos que sustentam diversas atividades, que vão desde a irrigação até a produção de energia, mineração e indústria, com ênfase no processamento de produtos agrícolas como soja, arroz, milho e carne bovina. Os municípios próximos ao rio Araguaia apresentam as maiores demandas hídricas para irrigação (ANA, 2009; GOMES et al., 2019).

Embora o Brasil possua uma grande fonte hídrica, a crescente demanda, tanto para satisfazer as necessidades humanas quanto para a agricultura e a indústria é influenciada pela variabilidade temporal e espacial, impondo limites à disponibilidade de água em algumas áreas do país, o que representa um grande desafio para o planejamento dos recursos hídricos (MORAIS et al., 2018). A complexidade desse cenário ressalta a importância de estudos que visem investigar a variabilidade espaço-temporal de variáveis hidrometeorológicas em bacias hidrográficas para enfrentar e

reverter esse quadro. Nesse contexto, os modelos hidrológicos e climáticos são ferramentas que podem auxiliar os tomadores de decisão na gestão dos recursos hídricos, promovendo a segurança hídrica para as presentes e futuras gerações.

Os modelos hidrológicos foram desenvolvidos para atender à demanda por séries hidrológicas mais extensas e representativas de vazões, necessárias para diversos projetos relacionados a esses recursos, sendo ferramentas valiosas, pois ao expressar os processos em equações, possibilitam a representação, compreensão e simulação do comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2005). Dado que a hidrologia tem uma relação estreita com as condições climáticas, é desejável que modelos hidrológicos e atmosféricos estejam integrados. À medida que modelos atmosféricos vêm fornecendo previsões melhores de variáveis, como a chuva e temperatura, a previsão hidrológica poderá melhorar (COLLISCHONN, 2001).

Dentre os sistemas de acoplamento para a modelagem hidrometeorológica destaca-se o sistema WRF-Hydro (*Weather Research and Forecasting-Hydro*) (GOCHIS et al., 2021), ele é introduzido pela primeira vez pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e é originalmente projetado como uma estrutura de acoplamento de modelos destinada a facilitar o acoplamento entre WRF e múltiplos componentes de modelos hidrológicos terrestres, levando em conta diferentes resoluções entre modelos atmosféricos e hidrológicos através do uso de procedimentos de integração entre as estruturas climáticas, geológicas e outras relacionada aos fluxos de água, descrevendo de forma detalhada processos hidrológicos superficiais e subsuperficiais, diferentemente de grande parte de outros modelos meteorológicos e climáticos (SENATORE, 2015). O WRF-Hydro, considerado como estado da arte em modelos hidrológicos (NAABIL et al., 2023), permite uma boa representação de fluxos da superfície da terra e dos processos hidrológicos terrestres relacionados com a redistribuição espacial das águas na superfície, subsolo e de canal em altíssima resolução espacial, utilizando uma variedade de abordagens baseadas na física e conceituais, sendo tanto uma arquitetura de modelagem hidrológica, bem como uma arquitetura de acoplamento de modelos terrestres com modelos atmosféricos (GOCHIS et al., 2021).

Este trabalho aproveita a abordagem abrangente do modelo WRF-Hydro para integrar de forma contínua os componentes atmosféricos e terrestres, permitindo uma simulação detalhada dos ciclos da água, transições de energia e variáveis

hidrometeorológicas. Embora trabalhos semelhantes tenham sido predominantemente conduzidos nos Estados Unidos, Europa e Ásia, ainda há uma lacuna no Brasil em termos de estudos consistentes que apresentem resultados e análises desse modelo. Assim, neste estudo o WRF-Hydro é utilizado para simular vazão de rios na Bacia dos Rios Tocantins/Araguaia inserida na região do MATOPIBA, analisando a influência de quatro fatores hidrológicos, parâmetro na parametrização do escoamento superficial (REFKDT), profundidade de retenção superficial (RETDEPRT), rugosidade para o escoamento superficial (OVROUGHRT) e rugosidade para o canal (MannN). Pesquisas anteriores ressaltaram a importância desses parâmetros na calibração e otimização do modelo para capturar respostas hidrológicas com precisão, especialmente em cenários caracterizados por eventos extremos de chuva e inundação (GIVATI et al., 2016; LIU et al., 2021a; KILICARSLAN et al., 2021; QUENUM et al., 2022; KERANDI et al., 2018).

Na Bacia do Rio Tocantins/Araguaia, onde os dados hidrológicos medidos em estações fluviométricas são escassos com relação a outras regiões do Brasil, a modelagem do escoamento natural é fundamental para estabelecer bases científicas cruciais para aprimorar a gestão de reservatórios e apoiar o planejamento agrícola. Portanto, este estudo busca empregar o modelo WRF-Hydro para simular o escoamento dos rios, explorar a sensibilidade do modelo a parâmetros críticos que influenciam seu comportamento e avaliar o desempenho do modelo usando parâmetros calibrados. Os resultados desta pesquisa podem servir como pontos de referência valiosos para investigações adicionais dentro da área de estudo e em regiões vizinhas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho do modelo WRF-Hydro totalmente acoplado para simular a vazão de rios na Bacia dos Rios Tocantins/Araguaia, inserida na região do MATOPIBA, analisando a influência de parâmetros hidrológicos do modelo WRF-Hydro.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar o conjunto de parametrizações físicas mais adequado para simular vazões, com base na análise dos resultados de precipitação.
- Analisar a influência de parâmetros hidrológicos relacionados ao solo nos resultados de vazão.
- Validar os resultados das simulações de vazão com a comparação dos dados medidos nas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).
- Identificar o conjunto de parâmetros hidrológicos mais adequado na região em estudo.
- Analisar a influência das precipitações simulada e observada nos resultados de vazão.

## 1.2 Organização do Documento

Com a visão geral do estudo apresentada neste capítulo introdutório, o segundo capítulo traz um paralelo entre WRF e WRF-Hydro, seguido dos aspectos relevantes e das principais abordagens da modelagem hidrológica com o WRF-Hydro, por meio de uma revisão de literatura. Também é apresentada uma descrição geral do modelo.

No terceiro capítulo, são detalhados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, incluindo a área de estudo, configurações do modelo, descrição das etapas de simulações, os parâmetros físicos e hidrológicos empregados, os dados de precipitação utilizados e as métricas de avaliação estatística aplicadas.

Os resultados e discussões são apresentados no quarto capítulo, onde são discutidos os testes realizados com diferentes parametrizações físicas e sensibilidades dos parâmetros hidrológicos. Os resultados obtidos na simulação pelo WRF-Hydro são avaliados com ênfase nos dados de vazão da estação Itacajá, com comparação posterior aos dados das estações Jacaré e Goiatins. Além disso, são analisados os erros na precipitação simulada.

Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões do estudo, resumindo as principais descobertas e destacando as contribuições para a área de pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 WRF e WRF-Hydro

Desde seu lançamento público inicial em 2000, o modelo atmosférico de pesquisa e previsão do tempo, o WRF, tornou-se o modelo atmosférico mais utilizado no mundo. Isso é evidenciado por métricas de usuários registrados e publicações (POWERS et al. 2017). Por exemplo, o número acumulado de registros do WRF ultrapassa 57.800 em mais de 160 países em 2021 (UCAR, 2024a).

O sistema está sendo vigorosamente aplicado em novas direções de pesquisa, configurações em tempo real e oportunidades de mercado. Seu crescimento contínuo mostra seu papel de destaque na pesquisa e seu amplo uso na previsão do clima. Além disso, para lidar com a previsão do sistema terrestre além do clima, o WRF oferece suporte a uma série de recursos personalizados, como o pacote de extensão para modelagem hidrológica, o WRF-Hydro.

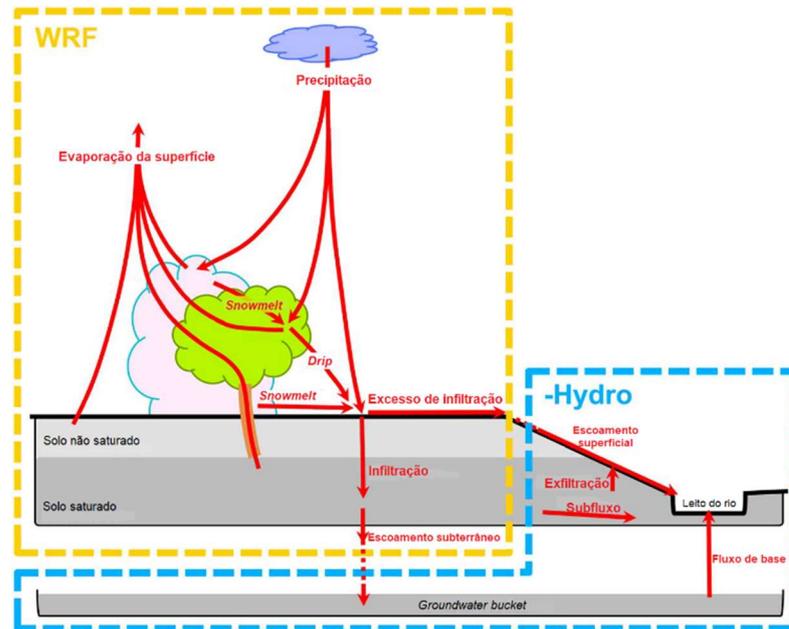
Pode-se dizer que o WRF-Hydro é uma extensão do modelo meteorológico WRF na hidrologia, fornecendo recursos especializados para uma variedade de aplicações no sistema terrestre, assim como outras extensões do WRF, como o WRF-Chem, que contém um espectro de opções para lidar com química atmosférica, o WRF-Fire que tem uma abordagem específica na propagação de incêndios florestais e o WRF-Solar, que inclui melhor rastreamento solar e parametrizações específicas (POWERS et al. 2017).

Ele é um modelo hidrometeorológico de última geração capaz de considerar a distribuição espacial de fatores de entrada meteorológicos e físicos. Numerosos parâmetros hidrológicos podem ser conectados a sistemas de modelagem atmosférica, como o WRF, e a outros sistemas terrestres usando o conjunto suplementar do modelo (NAABIL et al., 2023). Lançado pela primeira vez para a comunidade em 2013 e atraindo cada vez mais atenção de pesquisadores em meteorologia e hidrologia ao redor do mundo, o WRF-Hydro é multiescala na medida em que pode representar processos físicos como precipitação, infiltração, derretimento de neve, fluxo de encostas e vazão de rios em redes variadas. Adicionalmente, é multifísica na medida em que oferece uma série de opções para representar processos hidrológicos (POWERS et al. 2017; LIU et al., 2021a).

O WRF-Hydro não apenas trata a distribuição de água em canais, mas também

aprimora a representação das interações entre a terra e a atmosfera nos processos hidrológicos e terrestres relacionados à distribuição espacial das águas superficiais e subterrâneas da superfície terrestre, tema abordado no WRF. Apesar de compartilharem uma descrição comum da física atmosférica, o fluxo lateral de água terrestre, que é negligenciado no módulo puramente meteorológico, é considerado no WRF-Hydro, conforme ilustrado na Figura 2 (Arnault et al., 2019).

Figura 2. Visão conceitual do fluxo da água no WRF e WRF-Hydro.



Fonte: adaptado de Arnault et al. (2019).

A ausência de consideração do fluxo lateral de água terrestre na superfície e na subsuperfície compromete o realismo da simulação da umidade do solo. Quando os modelos incluem esse fluxo, observa-se geralmente um aumento no armazenamento de água no solo e na quantidade de água evaporada da superfície para a atmosfera. Esses processos podem ter um impacto significativo na precipitação regional. A água evaporada da superfície pode condensar na atmosfera e retornar à superfície como chuva, fenômeno conhecido como reciclagem regional (Arnault et al., 2021).

## 2.2 Aspectos Relevantes da Modelagem Hidrológica, incluindo o WRF-Hydro para a Região deste estudo

Não só o WRF-Hydro, mas uma série de outros modelos hidrológicos são cada vez mais utilizados, para compreender e simular os complexos processos hidrológicos que ocorrem entre a atmosfera e a superfície terrestre no mundo. Esses modelos desempenham um papel crucial na avaliação dos recursos hídricos, no gerenciamento de bacias hidrográficas e na previsão de eventos extremos, proporcionando uma base científica robusta para a tomada de decisões em questões relacionadas à água e ao meio ambiente. A utilização desses modelos não apenas aprimora a compreensão dos ciclos hidrológicos, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade dos sistemas hídricos em escala global.

Alguns deles são o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), definido como um modelo hidrológico semidistribuído, desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA), que tem sido utilizado para simular fluxo e transporte de poluentes da água, entre outras aplicações em bacias hidrográficas (AL KHOURY, 2023); o *Variable Infiltration Capacity* (VIC), que é um modelo hidrológico de macroescala e tem sido aplicado de bacias a escala global para estudos de balanço hídrico e energético, sendo originalmente desenvolvido por Liang et al. (1994) na Universidade de Washington (SCHEIDEGGER et al., 2021); o *Storm Water Management Model* (SWMM), da *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos, classificado como um modelo dinâmico de escoamento pluviométrico, que tem sido usado para planejamento, análise e projeto de sistemas de drenagem (MCDONNELL et al., 2020); o *Lavras Simulation of the Hydrology* (LASH), definido como um modelo hidrológico determinístico, semiconceitual, espacialmente distribuído e de longo prazo, com sua primeira versão apresentada por Mello et al. (2008) (ANDRADE et al., 2020) e o *Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry* (THMB) que é desenvolvido por Coe et al. (2002) para simular os processos hidrológicos de superfície terrestre como a vazão dos rios e o nível e a extensão das planícies de inundação (FONTES, 2022).

Nenhum modelo isolado pode ser identificado como ideal para o conjunto de condições hidrológicas e bacias existentes. Ao escolher um modelo, não dependemos exclusivamente de seu desempenho preditivo, mas também levamos em consideração a preferência e familiaridade do modelador ao usar modelos específicos,

o objetivo da tarefa de modelagem, o tempo disponível para desenvolver e aplicar um modelo e o nível de precisão requerido. Além dessas questões, também é dada atenção significativa ao desempenho do modelo ao ser aplicado a uma bacia hidrográfica específica. Avaliar o desempenho relativo de modelos concorrentes pode ser difícil, dada a limitada disponibilidade de dados (MARSHALL et al., 2005).

Ghonchepour et al. (2021) apresentam um processo de exploração de modelos hidrológicos para a seleção de um modelo apropriado compatível com os objetivos da modelagem. O processo consiste em três etapas: (1) escolha inicial baseada nos objetivos de modelagem; (2) seleção do modelo com base na comparação entre as conceitualizações subjacentes dos modelos; e (3) seleção final do modelo com base em critérios influentes, como disponibilidade do software do modelo e documentação, e disponibilidade de dados apropriados.

Assim, em conformidade com a primeira etapa, considerando que o objetivo deste trabalho está relacionado à simulação da vazão em rios inseridos numa região de clima tropical, com as estações secas e chuvosas bem definidas e temperaturas elevadas ao longo do ano num período de chuva intensa, o WRF-Hydro mostra-se viável por mostrar seu bom potencial na simulação de variáveis relacionadas a hidrologia em períodos de chuva extrema em diversas regiões com características climáticas semelhantes à região MATOPIBA, inclusive em regiões agrícolas (NAABIL et al., 2017; SUN et al., 2020; LIU et al., 2021a; ZHANG et al., 2019).

Em relação à seleção do modelo, que se baseia na comparação entre conceitos específicos de cada um, inúmeras são as diferenças entre o WRF-Hydro e demais modelos hidrológicos, cada qual apresentando suas particularidades, características e abordagens distintas. O modelo SWAT, por exemplo, é semidistribuído, enquanto o WRF-Hydro é distribuído. Nos modelos semidistribuídos, a bacia hidrográfica é dividida em várias sub-bacias assumindo-se uma uniformidade espacial de suas características. Já nos modelos distribuídos, a bacia hidrográfica é dividida em uma grade com células retangulares e então, esta heterogeneidade passa a ser contabilizada (FONTES, 2022). O modelo hidrológico VIC não pode ser acoplado diretamente ao modelo atmosférico como o WRF-Hydro (LI et al., 2021), esse acoplamento direto pode apresentar melhoria na representação das interações entre a atmosfera e a hidrologia. O THMB utiliza um modelo linear de reservatório para simular o escoamento superficial e subsuperficial (CASTRO et al., 2018), enquanto o

WRF-Hydro emprega uma abordagem distribuída para simular os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, podendo representar de forma mais precisa os processos hidrológicos, com uma representação física mais realista e considerando a heterogeneidade da bacia. Apesar das aparentes vantagens apresentadas entre o WRF-Hydro e os aspectos apresentados, ressalta-se que cada modelo tem ênfases e escopos específicos, apesar de compartilharem a finalidade geral de simular processos hidrológicos.

Uma diferença peculiar entre o WRF-Hydro e os outros modelos citados é que os modelos já foram aplicados em diversas pesquisas no Brasil. Na região MATOPIBA, Fontes (2022) aplicou o modelo hidrológico THMB no oeste da Bahia. Diferentemente do foco deste trabalho, que está associado à análise da influência de parâmetros hidrológicos em resultados diários de vazão, o estudo analisou o fluxo dos rios por séries temporais históricas, utilizando dados anuais para avaliar, por meio da mudança do uso do solo, os possíveis efeitos da expansão agrícola na região. Para realizar a simulação das vazões, o THMB precisa ser acoplado ao modelo INLAND (*Integrated Model of Land Surface Processes*).

Na Bacia Tocantins-Araguaia, Falck et al. (2015) utilizaram o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na simulação de vazão de rios. Diferentemente do WRF-Hydro, onde a precipitação utilizada no módulo hidrológico é simulada pelo WRF por meio de processos físicos, foram utilizados produtos pluviométricos derivados de satélites como entrada para o modelo hidrológico. O foco do estudo estava na correção desses dados por meio de um modelo de correção de erros de precipitação a partir de dados observacionais de estações meteorológicas.

Em outras áreas do Brasil, o LASH já foi testado em bacias hidrográficas de diferentes estados, incluindo Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Amazonas, representando diversos biomas, escalas e condições ambientais do solo e do clima. Além dele, o VIC e o MHD foram avaliados na bacia do Rio Verde em Minas Gerais (OLIVEIRA et al., 2023). O modelo SWAT é comparado a outro modelo para estimar vazão, perda de solo e contaminação de rios em dois estudos de caso na bacia do rio Tietê, São Paulo (SANTOS et al., 2020). Ele é utilizado também para avaliar sua capacidade em simular adequadamente a evapotranspiração na bacia hidrográfica do Gama, localizada no Distrito Federal com predominância do bioma cerrado brasileiro (FERREIRA et al., 2021). O SWMM é utilizado para estudar o comportamento

hidráulico do sistema de drenagem da Bacia do Paracuri, no município de Belém – PA (VINAGRE et al., 2015). Nas áreas de conservação de recursos e produtividade agrícola, o potencial do modelo LASH foi avaliado por Cunha et al. (2023) para simular impactos hidrológicos em resposta a cenários de mudanças no uso da terra, seguindo as tendências mais significativas do agronegócio em uma bacia amazônica.

Essas e outras abordagens foram realizadas pelo WRF-Hydro no mundo, com estudos consistentes concentrados na América do Norte, Ásia e Europa, em conformidade com a revisão bibliográfica realizada para desenvolvimento deste trabalho. Das pesquisas selecionadas, cerca de 36% foram desenvolvidas na América do Norte, 27% em bacias hidrográficas da Ásia, outras 27% na Europa, cerca de 8% na África e 2 trabalhos foram realizados com WRF-Hydro na América do Sul, sendo com 1 na Argentina e o outro na bacia hidrográfica do Taquari-Antas/RS, localizada na região Sul do Brasil no Brasil (SOUZA et al., 2019). A figura 3 apresenta a localização em que foram realizados os estudos desses artigos em acordo com a revisão bibliográfica realizada.

Figura 3. Localização dos estudos realizados pelo WRF-Hydro no mundo em acordo com a revisão bibliográfica.



Fonte: autoria Própria.

Dentre as diversas abordagens realizadas pelos estudos selecionados na revisão bibliográfica, a grande maioria está relacionada com a simulação do WRF-

Hydro em eventos extremos de chuva. Outros trabalhos comparam o WRF-Hydro com o WRF em simulações de precipitação e abordam outras características, como o fluxo lateral de água terrestre que é negligenciado no modelo apenas atmosférico. E boa parte desses artigos, como este trabalho, envolve a análise de quatro fatores que influenciam significativamente nos resultados da simulação de vazão, REFKDT, RETDEPRT, OVROUGHRT e MannN.

## **2.3 Principais Abordagens Realizadas pelos Estudos**

### **2.3.1 WRF-Hydro para Simulações em Eventos de Chuva Intensa**

A maioria das pesquisas realizadas com o WRF-Hydro está associada à previsão de eventos hidrometeorológicos extremos, como enchentes e inundações resultantes de chuvas intensas associadas a outros fatores climáticos e locais. Na Ásia, em agosto de 2018, o estado indiano de Kerala recebeu um período prolongado de chuvas muito fortes como resultado de um sistema de baixa pressão perto do início do mês, seguido por vários dias depois por uma depressão de monção. As inundações resultantes mataram mais de 400 pessoas e deslocaram mais um milhão. Uma configuração de resolução de 4 km do modelo WRF é usada em conjunto com o WRF-Hydro, executado a 125 m de resolução para explorar as circunstâncias que causaram as inundações (HUNT et al., 2020).

Na bacia do rio Chenhe, no centro-oeste da China, sete cenários meteorológicos são projetados com base nos produtos do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), bem como nas chuvas observadas e combinadas, em três domínios aninhados de resoluções 25, 5 e 1 km, a fim de avaliar o desempenho do modelo WRF-Hydro na simulação de enchentes (SUN et al., 2020). Já na encosta norte das Montanhas Troodos, localizadas na ilha de Chipre, no leste do Mar Mediterrâneo, foram utilizados os dados meteorológicos do *Reanalysis Precipitation Data* (ERA-Interim), produzidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), como forçantes na simulação de vazão com o WRF-Hydro em bacias hidrográficas, durante eventos extremos de precipitação ocorridos em janeiro de 1989 e novembro de 1994 sob a perspectiva da influência de alguns parâmetros hidrológicos (CAMERA et al., 2020).

A capacidade de previsão de inundação do modelo WRF-Hydro também é comparada com a do modelo de Xinanjiang, amplamente utilizado na China e embora

os desempenhos dos modelos sejam compatíveis, o modelo WRF-Hydro mostra potencial promissor para previsão operacional de inundações na região por produzir saídas espacialmente distribuídas, como evaporação, vazão e umidade do solo, com mais estudos planejados sobre a aplicação do modelo WRF-Hydro na bacia de Chenhe (SUN et al., 2020). Também na Ásia, o WRF-Hydro no modo acoplado é aplicado em um evento de inundação repentina causada por uma precipitação acumulada superior a 400 mm, durante 108 horas entre o período de 21 a 25 de agosto de 2012 na bacia da represa de Namgang, na Coreia do Sul. Os domínios meteorológicos têm resoluções de 4,5 km e 1,5 km e a grade hidrológica horizontal é de 150 m. Os resultados da simulação do modelo demonstram seu potencial em prever inundações repentinas na região, mostrando os picos de vazão da simulação em momentos semelhantes das observações (RYU et al., 2017).

Na Europa, o WRF-Hydro é aplicado em quatro bacias do oeste da Noruega durante a última semana de outubro de 2014, em que essa região sofreu grandes inundações após quatro dias de chuvas convectivas intensas. Com espaçamentos de grades externa e interna de 9 e 3 km, respectivamente, para o módulo meteorológico e de 300 m para a grade hidrológica, o WRF-Hydro calibrado tem melhor desempenho do que o modelo hidrológico HBV (*Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning*), desenvolvido pelo Instituto Sueco de Meteorologia e Hidrologia, no evento mencionado (LI et al., 2020). No sudeste da Grécia central, na região denominada Ática, é realizada uma análise hidrometeorológica de um evento de inundação repentina usando observações de sensoriamento remoto incluindo o WRF e o WRF-Hydro. A inundação repentina foi causada por uma forte tempestade durante a manhã de 15 de novembro de 2017 em torno da área, resultando em danos extensos e 24 mortes. O WRF-Hydro simula a inundação usando três diferentes estimativas de precipitação como dados forçantes, obtidos por meio de observações de radar meteorológico, que inclui a técnica que utiliza esquemas empíricos e/ou físicos para estimar a precipitação a partir dessas observações, denominada IMERG (*Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement*) (VARLAS et al., 2018).

Na região centro-oeste dos Estados Unidos, na cidade de Chicago, o WRF-Hydro é calibrado utilizando uma ferramenta que utiliza um conjunto de métodos e algoritmos para ajustar parâmetros hidrológicos em um evento de inundação ocorrido em abril de 2013 (WANG et al., 2019). Em bacias hidrográficas no centro-norte do

estado do Texas, a estrutura de modelagem WRF-Hydro baseada em física é distribuída para avaliar de forma abrangente o processo de infiltração, um processo frequentemente ausente nos modelos hidrológicos tradicionais. Em particular, são investigados os efeitos das condições hidrometeorológicas/geográficas e dos parâmetros do modelo em simulações de infiltração, com o objetivo de fornecer uma compreensão mais profunda sobre a infiltração do que os estudos existentes. Além disso, o papel da infiltração é investigado em relação ao potencial de inundação (indicado pelo coeficiente de escoamento) para mostrar os *trade-offs* potenciais na modelagem da infiltração para fins de previsão de inundação (ZHANG et al., 2020).

Outros autores também fazem estudos com o WRF-Hydro em previsões de variáveis hidroclimáticas em eventos extremos de chuva que provocam inundações e demais impactos em bacias da Ásia, Europa e América do Norte, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Estudos relacionados ao WRF-Hydro na Ásia, Europa e América do Norte.

Ásia	Bacias hidrográficas localizadas em Israel, Índia, China, Emirados Árabes, Turquia e Jordânia	Givati et al. (2016), Hunt e Menon (2020), Silver et al. (2017), Ozkaya e Akyurek (2020), Kilicarslan et al. (2021), Li et al. (2017), Ohana-Levi et al. (2018) e Wehbe et al. (2019).
Europa	Bacias hidrográficas da Grécia, Itália e Noruega.	Galanaki et al. (2020), Papaioannou et al. (2019), Verri et al. (2017), Avolio et al. (2019), Li et al. (2020), Furnari et al. (2020) e Senatore et al. (2020)
América do Norte	Bacias situadas nos Estados Unidos, com estudos focalizados nos estados do Arizona, Colorado, Iowa, Texas e nas regiões da Carolina do Norte e Sul.	Lahmers et al. (2019), Yu et al. (2021), Majidzadeh et al. (2017), Salas et al. (2018), Lin et al. (2018), Wright et al. (2020).

Fonte: autoria própria.

### 2.3.2 Precipitação e o fluxo de água terrestre no WRF e WRF-Hydro

No estudo de Graf et al. (2021), a umidade e precipitação do solo é comparado para a bacia sempre úmida do rio Ammer, no sul da Alemanha e para a bacia do rio Sissili, de clima semiárido a subúmido na África Ocidental, durante a estação quente, usando conjuntos de dados de precipitação do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS), do Serviço Meteorológico Alemão e conjuntos de dados de simulação do modelo meteorológico WRF e do WRF-Hydro, que se diferem por suas representações do fluxo de água terrestre. Com esta configuração, é investigada a força, o sinal e as variáveis envolvidas na umidade do solo e na resposta da precipitação para essas duas regiões.

A aplicação de ambos os modelos é realizada também para o evento de precipitação elevada em 15 de agosto de 2008 nas partes alemã e austríaca da bacia do alto rio Danúbio, esse estudo também ressalta a diferença entre WRF e WRF-Hydro no tratamento dos processos hidrológicos terrestres, em que o fluxo lateral terrestre de água é negligenciado no WRF, mas considerado no WRF-Hydro. O estudo objetiva a investigação e contribuição desse fluxo lateral para o ciclo hidrológico regional, com o auxílio de um procedimento conjunto solo-vegetação-água atmosférica desenvolvido nos modelos. A consideração do destino da água represada no WRF-Hydro aumentou a quantidade de infiltração marcada durante o evento, o que aumentou o tempo de trânsito na zona radicular da água marcada e ligeiramente aumentou a evaporação superficial marcada e a reciclagem da precipitação de origem nas poucas semanas seguintes ao evento de marcação (ARNAULT et al., 2019).

O estudo que investiga um evento climático extremo, que impactou os Emirados Árabes Unidos em março de 2016, mostra reduções de 24% e 13% nos índices estatísticos RMSE (erro quadrático médio) e rBIAS (viés relativo), respectivamente, nas previsões de precipitação do modelo WRF-Hydro no modo acoplado, quando comparado ao WRF autônomo. O sistema acoplado também apresenta melhorias nas previsões globais de radiação, com reduções de 45% e 12% para RMSE e rBIAS, respectivamente. Além disso, o modelo acoplado mostra uma camada limite planetária (*Planetary Boundary Layer – PBL*) mais rasa em comparação com a simulação autônoma do WRF, o que é atribuído ao efeito do feedback da umidade do solo. A melhoria demonstrada, em escala local, sugere que o acoplamento do WRF-Hydro pode aprimorar previsões hidrológicas e meteorológicas

em ambientes hiperáridos (WEHBE et al., 2019).

Com o objetivo de melhorar a compreensão das trocas de água em bacias hidrográficas de média escala do norte da China, Wang et al. (2020) também utilizaram o WRF autônomo como uma comparação com o sistema totalmente acoplado, esperando produzir simulações mais realistas, especialmente em relação à precipitação, permitindo a redistribuição de águas superficiais e subsuperficiais através da superfície terrestre. Em geral o escoamento gerado e a umidade do solo são consistentes com os da precipitação acumulada, enquanto a evapotranspiração nem sempre mostra a mesma tendência devido a mecanismos influenciadores mais complicados. Outros estudos estabelecem uma comparação entre o WRF-Hydro e o modelo puramente meteorológico, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Demais estudos que estabelecem uma comparação entre WRF e WRF-Hydro.

Comparação entre WRF e WRF-Hydro em pesquisas realizadas na África Ocidental, no semiárido central do Arizona, nos Estados Unidos e no centro da Argentina, mostrando desempenho semelhante na simulação de precipitação, mas apontando certas melhorias para o modelo hidrometeorológico.	Arnault et al. (2016), Lahmers et al. (2020) e Pal et al. (2021).
Abordagem do processo de redistribuição de águas superficiais fornecido pelo WRF-Hydro em detrimento do modelo atmosférico WRF em regiões do Sul da Alemanha e da Itália.	Rummler et al. (2019), Fersch et al. (2020) e Senatore et al. (2015).

Fonte: autoria própria.

### 2.3.2 Parâmetros Hidrológicos do WRF-Hydro

O sistema de modelagem WRF-Hydro consiste em muitos parâmetros, o que pode causar grandes incertezas. Quatro fatores são considerados os mais importantes para a simulação de chuvas e vazão de rios no WRF-Hydro, o parâmetro na parametrização do escoamento superficial (REFKDT), a profundidade de retenção da superfície (RETDEPRT), controlada por um parâmetro de escala chamado RETDEPRTFAC, a rugosidade para o escoamento superficial (OVROUGHRT), controlada pelo parâmetro de escala OVROUGHRTFAC e o parâmetro de rugosidade

para o canal (MannN) (LIU et al., 2021a). O fator REFKDT determina quanto da água da chuva infiltra no solo e quanto escorre na superfície, o RETDEPRTFAC controla a quantidade de água que fica retida na superfície antes de começar a escoar, o OVROUGHRTFAC ajusta a resistência que a superfície do solo oferece ao fluxo de água e o MannN controla a resistência ao fluxo de água dentro dos canais ou rios (LIU et al., 2021b). Esses são os parâmetros analisados neste estudo e uma descrição mais detalhada será apresentada na seção 3.4.1.

Além deles, alguns autores consideram outros parâmetros hidrológicos de chuva-escoamento em seus estudos. Yu et al. (2023), por exemplo, consideram também o coeficiente regulador da drenagem profunda (SLOPE) e a condutividade lateral do solo saturado (LKSATFAC), sendo o parâmetro SLOPE um influenciador do fluxo de água subterrânea, causando um efeito secundário no fluxo superficial e o fator LKSATFAC ajusta a capacidade do solo de conduzir água lateralmente, controlando a diferença entre a condução de água na vertical e na horizontal.

Os parâmetros mencionados podem ser calibrados de diferentes maneiras. Grande parte dos estudos publicados calibram o modelo manualmente com uma abordagem passo a passo, analisando a influência individual de cada parâmetro nos resultados da simulação. Kilicarslan et al. (2021) investigam o impacto da precisão espaço-temporal de quatro conjuntos de dados diferentes de temperatura da superfície do mar na precisão do sistema WRF-Hydro para simular a resposta hidrológica durante dois eventos catastróficos de inundação nas regiões do Mar Negro Oriental e do Mediterrâneo na Turquia. Na primeira etapa, são calibrados os parâmetros que controlam o volume do hidrograma, o REFKDT, RETDEPRTFAC e SLOPE. Na segunda etapa, os parâmetros considerados como controladores da forma do hidrograma (distribuição temporal e tempo de pico), o OVROUGHRTFAC, MannN e LKSATFAC.

A calibração do parâmetro REFKDT, cujo valor padrão é 3, que impacta a quantidade de água que infiltra através da coluna de solo, é realizada com valores do parâmetro entre 0,5 e 5,0 com incrementos de 0,5. RETDEPRTFAC (valor padrão 1), que é o multiplicador da profundidade de retenção antes que o fluxo seja direcionado como escoamento superficial, é calibrado no intervalo de 0 a 10, com incremento de 1 e o parâmetro SLOPE é calibrado inicialmente com seu valor padrão 0,1 seguido por 0,4; 0,7 e 1. Na análise do impacto da velocidade da água excedente na infiltração

transmitida sobre a superfície até atingir as grades da rede de canais, o parâmetro OVROUGHRTFAC é testado para os mesmos valores do SLOPE. O fator de escala MannN, relacionado aos coeficientes de rugosidade de Manning (indicadores da resistência ao fluxo de água em canais abertos) para todas as ordens de córregos são calibrados dentro de uma faixa de 0,5 a 2, com incrementos de 0,5, em vez de alterar os coeficientes individualmente. Por fim, o parâmetro LKSATFAC é calibrado para os valores de 10, 100, 1000 (padrão) e 10000. Medidas estatísticas são implementadas entre as vazões observada e simulada para a avaliação da precisão do modelo, objetivando encontrar o melhor valor do parâmetro entre os diferentes eventos para cada bacia.

Quenum et al. (2022), Kerandi et al. (2018), Givati et al. (2016), Zhang et al. (2020), Yucel et al. (2015), Senatore et al. (2015) e Liu et al. (2021a) fazem uma abordagem de calibração semelhante, com a maioria dos casos analisando os parâmetros REFKDT, RETDEPRT, OVROUGHRT e MannN. Os dois primeiros utilizam da análise desses quatro parâmetros para investigação de eventos ocorridos na África Oriental e Ocidental, respectivamente, explorando a capacidade de simulação de vazões em inundações e compreensão das condições hidrometeorológicas das bacias, investigando seus balanços hídricos e atmosférico-terrestres. Givati et al. (2016) realizam simulações para diferentes combinações de REFKDT, OVROUGHRT e MannN para a bacia de Ayalon no centro de Israel, ajustando-os ao longo do comprimento da bacia de acordo com as características físicas conhecidas: altas taxas de infiltração na parte superior da bacia e menor infiltração a jusante.

Zhang et al. (2020) ao testarem os parâmetros utilizados no modelo para obtenção de uma compreensão do processo de reinfiltração sob diferentes condições hidrometeorológicas e geográficas em uma série de experimentos numéricos em bacias hidrográficas no Centro-Norte do Texas, constatam que os processos de infiltração são sensíveis apenas ao REFKDT e OVROUGHRTFAC. Observa-se que o REFKDT controla essencialmente a divisão entre escoamento superficial e subsuperficial, com REFKDT maior, significa-se menos escoamento superficial, indicando menor vazão. Um OVROUGHRTFAC maior retarda a transferência de água sobre as encostas e retém o escoamento para a infiltração até o ponto em que 100% da precipitação se infiltra no solo ou desagua no rio.

## 2.4 Descrição do Modelo WRF-Hydro

### 2.4.1 Breve Histórico

O sistema de modelagem WRF-Hydro oferece um meio de acoplar componentes de modelos hidrológicos a modelos atmosféricos e outras arquiteturas de modelagem do Sistema Terrestre. Ele é introduzido pela primeira vez pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) no âmbito do *Research Applications Laboratory* (RAL) como um pacote de extensão hidrológica que poderia ser acoplado ao modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) (GOCHIS et al., 2021), sendo projetado para aprimorar simulações que representam processos hidrológicos terrestres no modelo WRF (CHO e KIM, 2022).

Antes de ser lançado para a comunidade acadêmica em 2013, algumas versões do WRF-Hydro foram desenvolvidas pelo NCAR. A versão inicial, conhecida como Noah-distributed em 2003, incorporava módulos para simular o escoamento superficial e o escoamento saturado subsuperficial no modelo de superfície terrestre Noah (Land Surface Model – LSM).

Esse desenvolvimento envolveu um método simples para desagregar e agregar subgrades, que basicamente significa dividir a superfície terrestre em pequenas áreas e, em seguida, juntar os resultados dessas pequenas áreas para formar uma visão mais detalhada da distribuição da água na superfície. O objetivo era mapear as condições hidrológicas de uma forma mais detalhada. Inicialmente, as condições eram resolvidas de forma geral, mas com esse método, foi possível criar um mapa muito mais detalhado do terreno. Essa abordagem permitiu resolver adequadamente as características da paisagem local, como colinas e vales, que são responsáveis pela redistribuição da umidade da terra de acordo com a gravidade. Em outras palavras, ajudou a entender melhor como a água se move e se acumula na superfície terrestre.

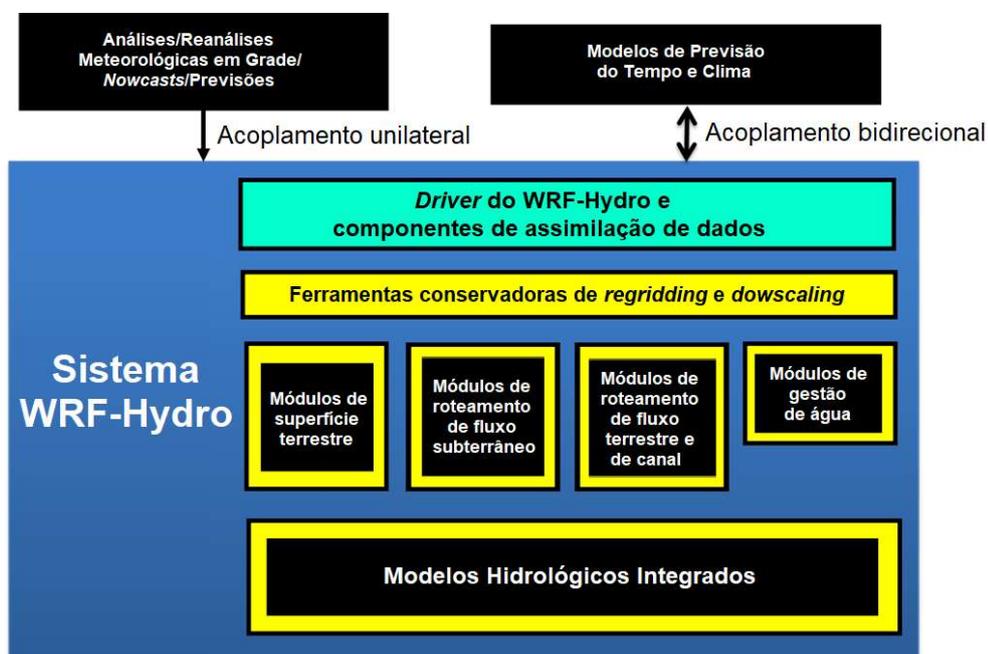
Em 2004, o sistema agora chamado de pacote de extensão hidrológica NCAR WRF-Hydro, é integrado ao modelo meteorológico de mesoescala WRF, permitindo modelagem completamente acoplada para hidrologia da superfície terrestre e modelagem atmosférica regional e então, de 2011 a 2012, há uma reconfiguração significativa do código, configurando-se o sistema de modelagem WRF-Hydro, com maior extensibilidade e atualização em relação ao modelo WRF e a outros elementos e estruturas relacionadas à modelagem hidrológica, motivada pela necessidade de

considerar uma maior complexidade nos estados e fluxos da superfície terrestre em pesquisas hidrometeorológicas e hidroclimatológicas (GOCHIS et al., 2021).

#### 2.4.2 Visão Geral

O WRF-Hydro é essencialmente um grupo de módulos e funções que tratam da comunicação de informações entre os componentes da atmosfera e conjuntos de componentes de hidrologia da superfície terrestre em uma resolução espacial bastante alta (normalmente 1 km ou menos), usando uma variedade de abordagens. Essas abordagens podem ser físicas ou conceituais, a primeira descrevendo processos de maneira mais detalhada e precisa baseados em leis e equações físicas e a segunda usando suposições e simplificações para representar os processos naturais. O modelo WRF-Hydro pode ser executado de modo autônomo ou acoplado a um modelo atmosférico (GOCHIS et al., 2021), a Figura 4 apresenta um esquema da estrutura do sistema de modelagem, mostrando várias categorias de componentes do modelo.

Figura 4. Esquema generalizado da arquitetura WRF-Hydro.



Fonte: adaptado de Gochis et al. (2021).

O sistema tem uma arquitetura de acoplamento entre modelos meteorológicos e climáticos com modelos hidrológicos terrestres e sistemas de assimilação de dados

terrestres, possuindo atributos para muitos processos hidrológicos terrestres típicos, como escoamento superficial, gerando fluxos para rios/canais ou lagos/reservatórios, fluxo subsuperficial e trocas terra-atmosfera. Quando executado em modo autônomo, o WRF-Hydro deve ler todos os dados meteorológicos necessários para depois realizar cálculos do modelo de superfície terrestre. Quando executado em um modo acoplado com um modelo atmosférico, como neste trabalho, os dados meteorológicos são fornecidos pelo modelo atmosférico, com uma frequência ditada pelo intervalo de tempo do modelo da superfície terrestre especificado.

A qualidade dos dados meteorológicos, a especificação de dados estáticos, como características geográficas da região de estudo, a seleção das opções de física do modelo e os módulos do sistema a serem selecionados são componentes cruciais para compreender e simular os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. As principais opções de física do modelo no WRF-Hydro incluem: a parametrização unidimensional da superfície terrestre, que aborda a interação vertical da água com o solo; o escoamento superficial, que modela o fluxo direto na superfície terrestre em resposta à precipitação; o escoamento subsuperficial saturado, que trata do movimento da água abaixo da superfície quando o solo está saturado; o roteamento de canais, que simula o movimento da água em rios e córregos após o escoamento superficial; o roteamento de reservatórios, que lida com o fluxo da água em corpos de água maiores, como lagos e represas; e o escoamento base conceitual/empírico, que modela o fluxo de água proveniente da água subterrânea, esse escoamento é feito a partir de valores que são baseados em observações do comportamento hidrológico real e podem ser ajustados para melhor se adequarem aos dados observados.

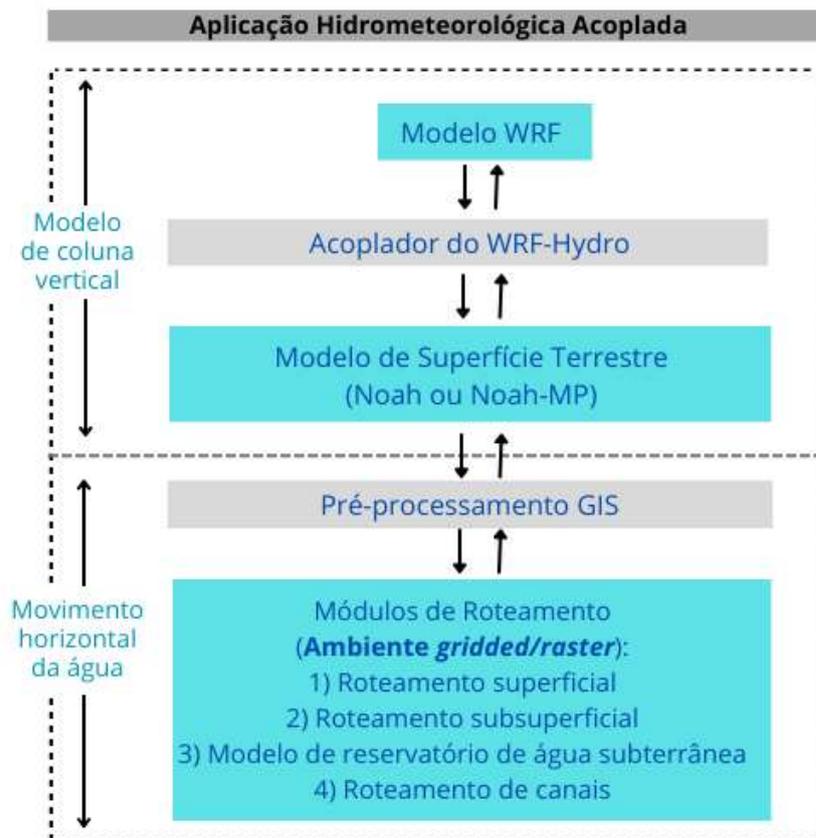
Esses processos físicos e hidrológicos, como outros fatores que influenciam as condições da superfície terrestre, são abordados pelo Modelo de Superfície Terrestre, sendo que atualmente o WRF-Hydro dispõe das opções Noah, conforme mencionado anteriormente, e Noah-MP. Assim como quase todos os modelos atuais de superfície terrestre, as parametrizações de superfície terrestre Noah e Noah-MP requerem algumas variáveis meteorológicas básicas, como radiação de ondas longas e curtas, umidade específica, temperatura do ar, pressão na superfície, vento próximo à superfície e taxa de precipitação de água líquida (GOCHIS et al., 2021).

Ferramentas externas de Sistema de Informações Geográficas (*Geographic Information Systems* – GIS) são utilizadas para criar camadas de dados para os

processos de escoamento superficial terrestre, escoamento subsuperficial e roteamento de canais necessários para o WRF Hydro. Essas informações sobre a água são mapeadas em uma grade de terreno de alta resolução. Após esse mapeamento, são realizadas verificações para garantir que os dados detalhados da grade de alta resolução sejam consistentes com os dados da grade de resolução mais baixa do modelo de superfície terrestre Noah/Noah-MP. Isso assegura que os dados se encaixem bem e que não haja discrepâncias entre as diferentes resoluções (SAMPSON e GOCHIS, 2018; GOCHIS et al., 2021).

A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático da arquitetura do WRF-Hydro no modo acoplado, apresentando comunicações bidirecionais entre o modelo meteorológico, no caso o WRF, e os componentes hidrológicos, nos quais dados meteorológicos simulados são fornecidos para alimentar os componentes hidrológicos.

Figura 5. Diagrama esquemático da arquitetura do WRF-Hydro acoplado.

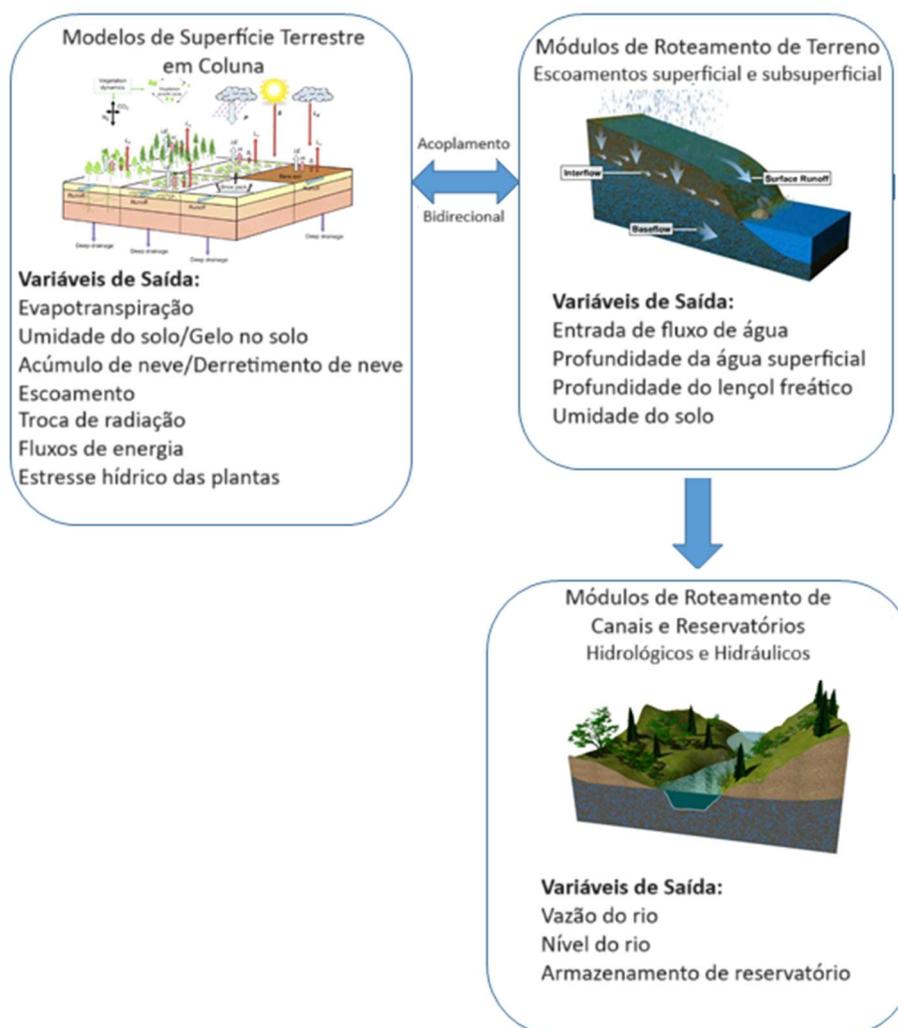


Fonte: adaptado de Lin et al. (2018).

Os componentes hidrológicos do modelo calculam fluxos de umidade, que podem ser devolvidos à atmosfera ou direcionados para cursos d'água e rios, passando por reservatórios. Dependendo das opções de física selecionadas e configurações adicionais definidas de acordo com as necessidades e possibilidades do estudo, diversos conjuntos de variáveis de saídas podem ser geradas no módulo hidrológico do modelo, dentre as 171 opções apresentadas em UCAR (2024b).

Esses arquivos de saída estão disponíveis em cada componente do módulo hidrológico do WRF-Hydro. A Figura 6 mostra uma visão abrangente relacionada às variáveis de saída que estão associadas a cada componente físico do modelo WRF-Hydro.

Figura 6. Diagrama conceitual dos componentes físicos do WRF-Hydro e das saídas relativas.



Fonte: adaptado de Gochis et al. (2021).

Inicialmente, o modelo de superfície terrestre (LSM) em coluna unidimensional (1D) calcula os fluxos verticais de energia (calor sensível e latente, radiação líquida) e umidade (interceptação do dossel, infiltração, excesso de infiltração, percolação profunda) e os estados térmicos e de umidade do solo. O excesso de infiltração, a profundidade da água acumulada e a umidade do solo são posteriormente desagregados da grade do LSM, geralmente com resolução espacial de 1 a 4 km, para uma grade de roteamento de alta resolução, tipicamente de 30 a 100 m, e são encaminhados para os módulos de roteamento de terreno de fluxo subsuperficial e superficial.

O LSM não considera as trocas horizontais de água, assim ele é complementado com algoritmos do módulo hidrológico do WRF-Hydro de fluxo lateral para proporcionar uma simulação precisa do ciclo hidrológico. Primeiro, é calculado o fluxo lateral de água que ocorre abaixo da superfície. Isso é feito antes de calcular o escoamento da água na superfície para permitir que a infiltração nas células da grade, que estão completamente saturadas, seja incluída no excesso de infiltração calculado pelo LSM.

O escoamento superficial ocorre quando a quantidade de água na superfície de uma determinada área excede a profundidade máxima que essa área pode reter. O escoamento subsuperficial é ativado quando a capacidade máxima de umidade de uma camada do solo é excedida. A água acumulada na superfície pode infiltrar no solo ou evaporar posteriormente. O escoamento superficial em duas dimensões é direcionado pelo terreno de acordo com a topografia local. Quando a água superficial excedente atinge áreas identificadas como canais, ela é transferida para o modelo de canal para ser simulada adequadamente (CERBELAUD et al., 2022).

O fluxo para a rede de rios ou para lagos/reservatórios é um processo unidirecional. Quando o escoamento superficial atinge áreas identificadas como canais, uma parte do excesso de água é transferida para o modelo do canal, uma vez que a capacidade de retenção local é ultrapassada. Isso significa que a entrada de água do terreno para o rio ou lago é sempre positiva. A vazão dos reservatórios é diretamente introduzida no rio com base em uma relação de armazenamento-vazão derivada de observações práticas e dados reais. Essa relação modela como a quantidade de água armazenada nos reservatórios é liberada para o rio, permitindo uma representação dinâmica e realista do comportamento do sistema em resposta às condições hidrológicas (GOCHIS et al., 2021).

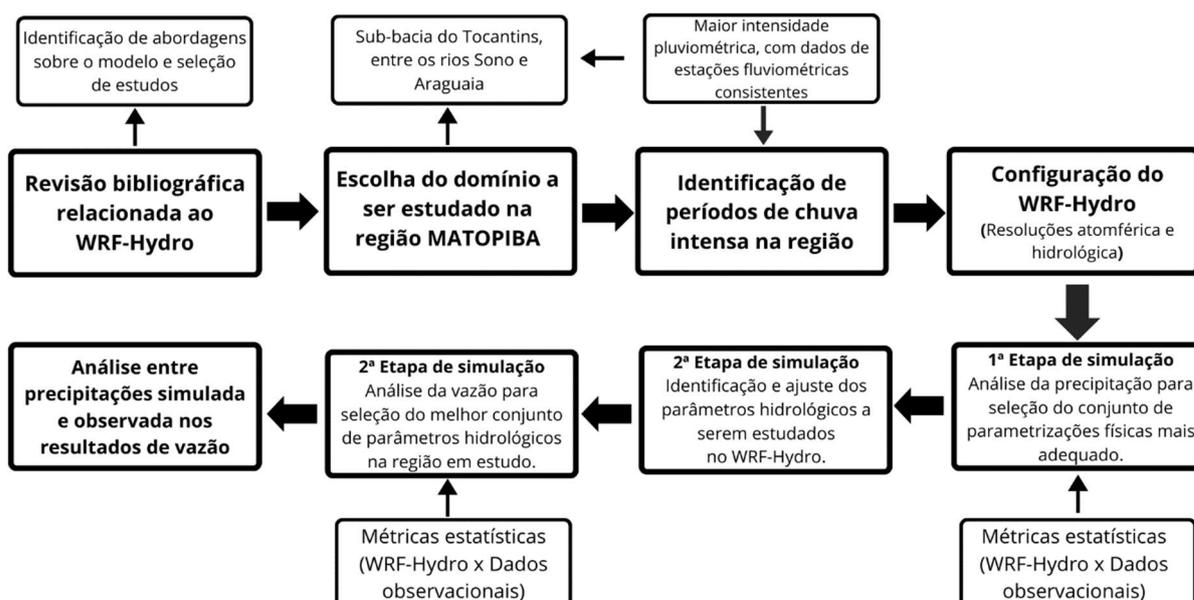
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão bibliográfica deste trabalho identificou diversas pesquisas relacionadas à gestão de recursos hídricos ao redor do mundo com conceitos relevantes do WRF-Hydro e aspectos comuns aos objetivos deste estudo.

Foi selecionado um domínio dentro da região MATOPIBA e, em seguida, foram considerados períodos de chuvas intensas registrados na região. O WRF-Hydro foi então configurado na área de estudo com seus componentes atmosféricos e hidrológicos. Foram realizadas duas etapas de simulações: na primeira, focou-se na análise da precipitação para identificar o conjunto de parametrizações físicas mais adequado para a simulação de vazão. Na segunda etapa, os parâmetros hidrológicos foram identificados e ajustados no modelo, e os resultados de vazão foram analisados para verificar a influência desses parâmetros no comportamento hidrológico do solo.

A validação desses resultados foi realizada por meio de métricas estatísticas, comparando-os com dados de estações fluviométricas da ANA, visando determinar o conjunto mais adequado de parâmetros para a região em estudo. Além disso, foram analisadas as influências das precipitações simuladas e observadas nos resultados de vazão. As etapas dessa metodologia estão ilustradas na Figura 7.

Figura 7. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.



Fonte: autoria própria.

### 3.1 Simulação com o WRF-Hydro

#### 3.1.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região denominada MATOPIBA, que é formada pelo estado do Tocantins e partes dos estados do Maranhão, Piauí e Bahia, onde ocorreu forte expansão agrícola a partir da segunda metade dos anos 1980, especialmente no cultivo de grãos. Ela abrange uma área de 731.700 km<sup>2</sup> e é atravessada por três bacias hidrográficas: a bacia do Tocantins/Araguaia (ocupando 43% da área), a bacia Atlântica – trecho Norte/Nordeste (com 40%) e a bacia do Rio São Francisco (com 17%) (MAGALHÃES et al., 2014).

O MATOPIBA é caracterizado por três zonas climáticas: tropical Brasil central, tropical zona equatorial e equatorial, com um inverno seco, temperaturas médias mensais variando de 25 a 27 °C ao longo do ano e uma precipitação média anual entre 800 e 2000 mm, distribuída em duas estações bem definidas: a estação seca de maio a setembro e a estação chuvosa de outubro a abril. A vegetação dominante na região é o bioma do Cerrado, que cobre 91% da área. Além disso, a região engloba remanescentes da Amazônia (7%) e áreas da Caatinga (2%) (REIS et al., 2020).

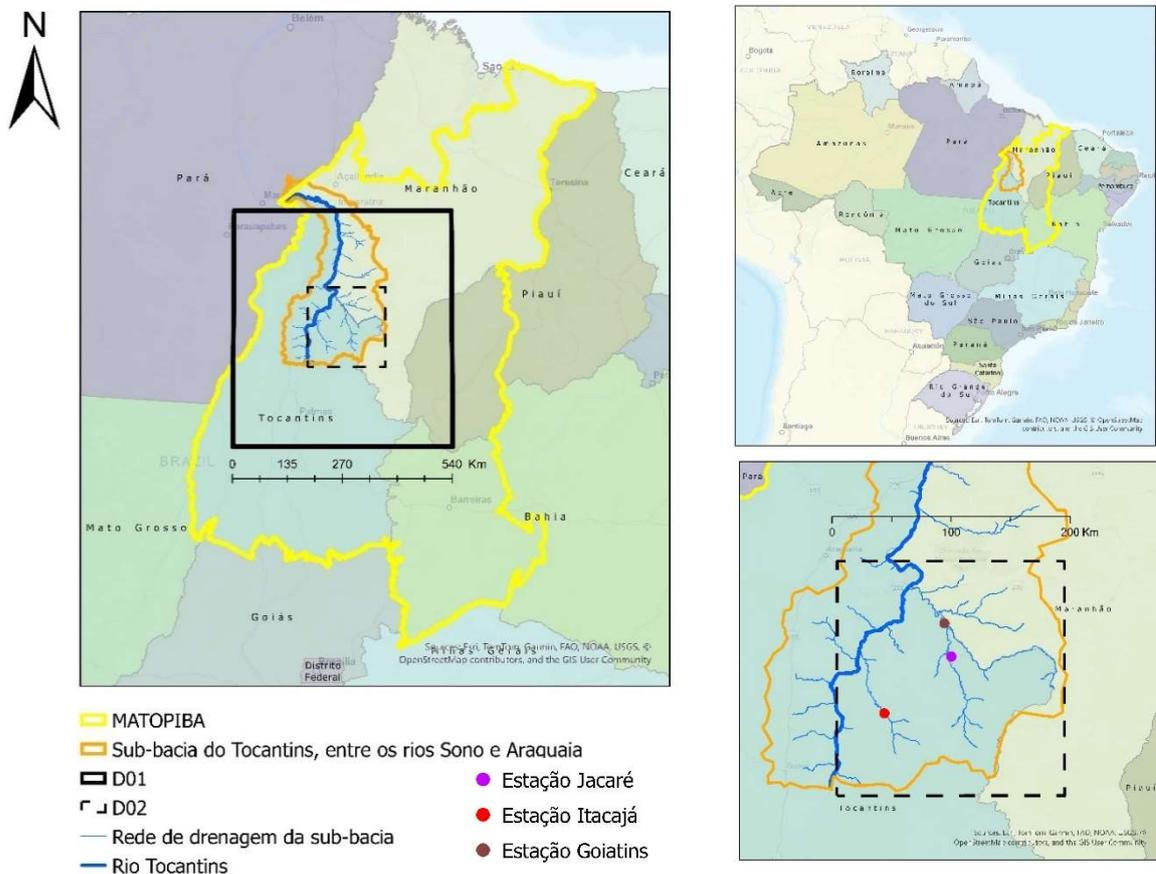
Este estudo hidrológico é conduzido na bacia do rio Tocantins/Araguaia, especificamente em uma de suas sub-bacias pertencentes ao MATOPIBA, a sub-bacia do Tocantins entre os rios Sono e Araguaia, que está inserida na área mais chuvosa da região, com clima tropical semiúmido. Essa área influencia significativamente o escoamento regional das bacias dos rios Tocantins/Araguaia e São Francisco (MAGALHÃES et al., 2014; CRISTO et al., 2014; MAURIZ et al., 2008). O rio Araguaia é o principal afluente do rio Tocantins, e o rio Sono é outro afluente significativo na região. Os pontos de confluência dos rios Araguaia e Sono com o rio Tocantins demarcam essencialmente as fronteiras norte e sul da sub-bacia.

Os rios analisados pelo WRF-Hydro são os rios Manuel Alves Pequeno, Vermelho e Manuel Alves Grande, para os quais os dados de vazão são medidos nas estações Itacajá, Jacaré e Goiatins, respectivamente, a localização dessas estações é apresentada na Figura 8 da seção seguinte. Esses rios são afluentes do rio Tocantins, todos com redes de drenagem totalmente dentro da sub-bacia do Tocantins, entre os rios Sono e Araguaia.

### 3.1.2 Configuração do Modelo Atmosférico (WRF)

O WRF-Hydro foi utilizado em seu modo totalmente acoplado, no qual os modelos atmosférico e hidrológico são executados simultaneamente. O modelo atmosférico é a versão 3.9.1.1 do WRF e foi configurado com duas grades aninhadas, conforme mostrado na Figura 8. O domínio externo (D01) abrange a parte central da região MATOPIBA, tem uma resolução de 9 km e consiste em 60 pontos de grade na direção oeste-leste e 66 na direção sul-norte. O domínio interno (D02), onde a análise hidrológica foi conduzida e engloba toda a rede de drenagem dos rios observados, está localizado na sub-bacia do Tocantins entre os rios Sono e Araguaia. Ele tem uma resolução espacial de 3 km e compreende 64 pontos de grade na direção oeste-leste e 67 na direção sul-norte. Foram utilizados cinquenta níveis verticais, com o topo do modelo definido em 50 hPa. A localização e distribuição dos domínios no modelo e uma visão ampliada do D02, incluindo a rede de drenagem também são exibidos na Figura 8.

Figura 8. Região do MATOPIBA e sub-bacia do Tocantins, entre os rios Sono e Araguaia.



Fonte: autoria própria.

O processo de simulação meteorológica foi realizado usando dados derivados do sistema global GDAS-FNL (*Global Data Assimilation System – Final Analysis*) da agência científica dos Estados Unidos NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), com uma resolução horizontal de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , 32 níveis verticais e uma resolução temporal de 6 horas (NCEP, 2015). Os dados de uso e cobertura da terra foram fornecidos pelo MapBiomas, uma iniciativa multi-institucional destinada a gerar dados anuais de uso e cobertura da terra para todo o Brasil por meio de um processo de classificação automatizado aplicado a dados de satélite. Uma série histórica de 1985 a 2019 de uso da terra abrangendo 27 categorias foi desenvolvida com base na coleção LANDSAT (com uma resolução espacial de 30 m) e está disponível em seu site oficial (PEDRUZZI et al., 2022).

### 3.1.3 Configuração do Modelo Hidrológico (WRF-Hydro)

A versão do WRF-Hydro utilizada é a 5.2.0, totalmente acoplada ao WRF no domínio D02. Ferramentas de geoprocessamento foram empregadas neste domínio para redimensionar a grade de 3 km para 100 m, com o objetivo de criar dados de entrada para o WRF-Hydro relacionados aos fluxos de água superficial, subterrânea e em canais. Esses dados foram obtidos com o auxílio do WRF Hydro *GIS Pre-Processing Toolkit* v. 5.1, desenvolvido pelo NCAR, para uso no ambiente GIS (SAMPSON et al., 2018). Este *kit* de ferramentas utilizou os arquivos de entrada do Sistema de Pré-Processamento do WRF e o Modelo Digital de Elevação (MDE) para gerar campos de alta resolução em grades de roteamento, incluindo direção de fluxo, escoamento subsuperficial e processos de roteamento em canais. Esses campos foram utilizados como dados de entrada no modelo WRF-Hydro.

As configurações hidrológicas principais incluem a ativação dos módulos de escoamento superficial e subsuperficial e de roteamento em canais na sub-bacia de estudo (D02). O modelo de reservatório é utilizado para calcular o escoamento de base da bacia (MANABE et al., 1969; MILLY et al., 1994a; MILLY et al., 1994b). O modelo de superfície terrestre Noah é o utilizado nas simulações acopladas WRF/WRF-Hydro, ele é responsável pelos processos hidrológicos da coluna, ou seja, precipitação, evapotranspiração, infiltração do solo, movimento vertical da água no solo e acumulação de escoamento superficial e subsuperficial (NAABIL et al., 2017). Assim, é realizado o processo de desagregação-agregação ponderada espacialmente

para integrar o LSM e a grade de roteamento no WRF-Hydro gerando o escoamento, onde o excesso de precipitação é considerado quando a capacidade de infiltração é excedida. O roteamento subsuperficial considera topografia, profundidade do solo saturado e condutividade hidráulica saturada. O roteamento superficial é implementado como uma abordagem de onda difusa, enquanto o roteamento de rios utiliza uma equação de onda de difusão unidimensional, como descrito anteriormente (WANG et al., 2021a).

#### 3.1.4 Simulações realizadas

As simulações hidrometeorológicas com o WRF-Hydro foram conduzidas no supercomputador OGUN do Centro de Supercomputação para Inovação Industrial do SENAI CIMATEC.

Foram realizadas duas etapas de simulações, na primeira são analisados os resultados de precipitação, a fim de testar alguns conjuntos de parametrizações físicas apresentados em trabalhos desenvolvidos com WRF e WRF-Hydro em regiões com algumas características climáticas semelhantes à bacia do rio Tocantins/Araguaia localizadas no norte e nordeste do Brasil, oeste da África e na China (SOUSA et al., 2019; KITAGAWA et al., 2022; NAABIL et al., 2017; WANG et al.; 2020).

Para verificar o melhor conjunto de parametrizações para a região, dentre as analisadas, os resultados de precipitações diárias simulados pelo WRF-Hydro são comparados com dados observacionais na região do domínio D02. Nessa etapa, as simulações são realizadas num período chuvoso de 32 dias dos meses de fevereiro e março de 2019, sendo que os 5 primeiros dias foram utilizados como tempo de *spin-up*, que é o tempo de execução necessário que permite que o WRF atinja um estado de equilíbrio físico. Esse período é desconsiderado na análise dos dados simulados.

O tempo ideal de spin-up não é fixo e pode ser diferente para cada evento. Em estudos com o WRF e WRF-Hydro, esse tempo varia amplamente, de um mínimo de 6 h até 1 ano. Jankov et al. (2007) descrevem que para prevenir instabilidades no modelo, WRF deve ser utilizado um tempo de spin-up de pelo menos 12 horas (LIU et al., 2023).

Na segunda fase, que visa atingir o principal objetivo deste trabalho, são observados os dados de vazão. As simulações desta etapa utilizam o conjunto de

parametrizações físicas identificado como mais adequado na primeira fase. Os resultados são avaliados por meio de comparações com as medições reais de vazão das estações Itacajá, Jacaré e Goiatins, as quais são registradas diariamente pelas estações fluviométricas operadas pela ANA e estão disponíveis em seu site oficial (ANA, 2023). As simulações foram realizadas ao longo de um período que inclui eventos de chuvas intensas, de 1º de dezembro de 2017 a 1º de junho de 2018. Observações preliminares indicam que os dados se estabilizam por volta dos primeiros 102 dias, considerados como o período de *spin-up*. A Tabela 3 resume os períodos das duas etapas de simulações.

Tabela 3. Período das simulações realizadas.

<b>Etapas de Simulações</b>	<b>Variável Analisada</b>	<b>Período</b>	<b>Tempo de <i>Spin-up</i></b>
1	Precipitação	24/02/2019 a 28/03/2019	5 dias
2	Vazão	01/12/2017 a 01/07/2018	102 dias

Fonte: autoria própria.

### 3.2 Dados de Precipitação

A incerteza na precipitação é a principal fonte de erro na modelagem hidrológica. Estudos demonstram que o escoamento superficial simulado e, conseqüentemente, a vazão simulada dependem fortemente do conjunto de dados de precipitação utilizado. Esse fato, embora esperado, enfatiza a necessidade de dados mais precisos e informações detalhadas para a regulação dos rios na modelagem hidrológica (WEILAND et al., 2015).

Nesse contexto, os dados de precipitação simulados pelo WRF-Hydro são analisados antes da avaliação da vazão, visto que a simulação hidrológica é realizada com base nos dados simulados do módulo meteorológico, incluindo a precipitação, que é o fator determinante no ciclo hidrológico da bacia hidrográfica, indicando padrões temporais e espaciais nos resultados de vazão.

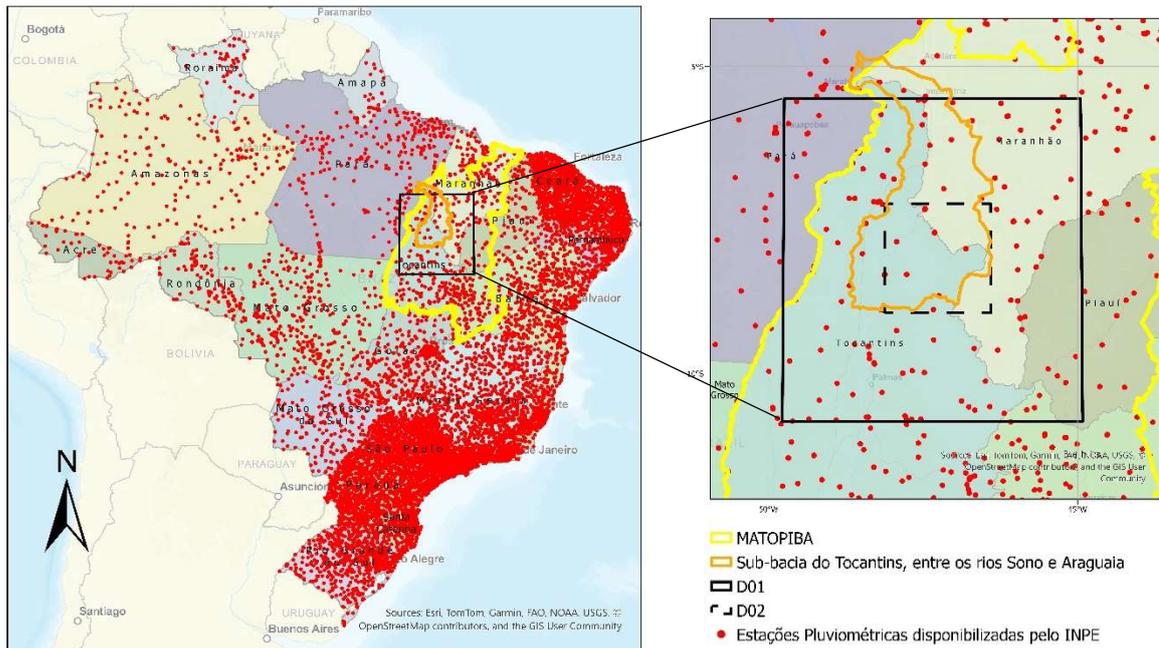
Existem várias fontes de dados de precipitação, cada uma com seus pontos fortes e fracos. Os medidores de precipitação em estações pluviométricas, por exemplo, são amplamente utilizados em diferentes contextos no Brasil. Eles fornecem

valores temporais precisos em locais específicos, mas não conseguem oferecer os detalhes espaciais necessários para a maioria das aplicações hidrológicas (GRIM et al., 2023).

Para uma modelagem hidrológica sólida, é essencial dispor de dados que capturem a variabilidade temporal e espacial dos padrões de precipitação. Estudos indicam que relativizar a variabilidade espacial da precipitação pode resultar em erros significativos nos modelos. Como as redes de pluviômetros geralmente não conseguem representar completamente esse padrão espacial, basear-se apenas nelas pode gerar incertezas devido à amostragem espacial limitada. Uma abordagem promissora para aprimorar os dados de precipitação é o uso de métodos de sensoriamento remoto (STRAUCH et al., 2012).

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utiliza uma técnica chamada MERGE (do inglês mesclar), que emprega sensoriamento remoto por meio de dados de satélite integrados com informações de estações meteorológicas em solo. Essa abordagem possibilita a geração de estimativas de precipitação mais precisas e igualmente distribuídas espacialmente, superando as limitações das medições realizadas apenas por satélites ou em estações pluviométricas. Essa técnica é destinada a minimizar as incertezas nos dados de precipitação associadas a interpolações sobre regiões com baixa densidade de pluviômetros (ROZANTE et al., 2010). A Figura 9 evidencia essa baixa densidade na região de estudo em comparação com outras áreas do Brasil, como as regiões Sudeste, Sul e Nordeste, a partir da localização das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 9. Localização das estações meteorológicas do Brasil com dados disponibilizados pelo INMET.

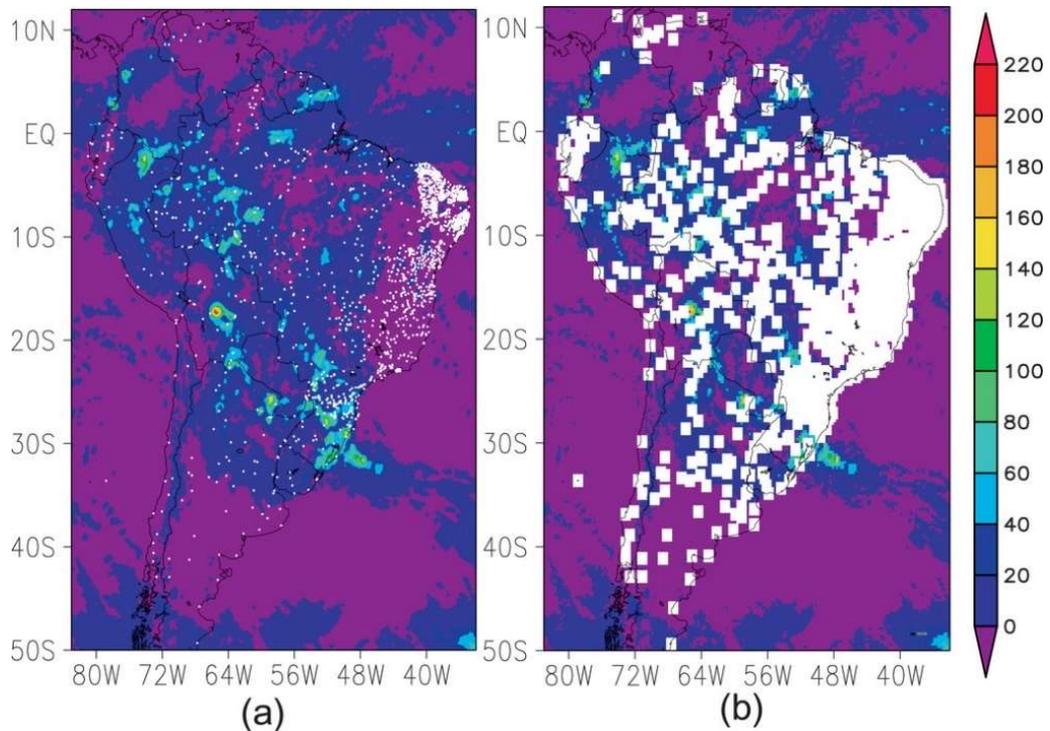


Fonte: autoria própria.

Na técnica MERGE os dados observacionais das estações pluviométricas são combinados com dados do algoritmo IMERG da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), esse algoritmo funde estimativas de precipitação coletadas durante a operação do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), de 2000 a 2015, com estimativas recentes de precipitação coletadas pela missão GPM (*Global Precipitation Measurement Mission*), com dados a partir de 2014, criando um conjunto de dados de precipitação contínua (ROZANTE et al., 2010).

A técnica consiste das seguintes etapas. Primeiro, os dados pluviométricos são georreferenciados na grade do satélite (TRMM-GPM), como mostrado na Figura 10, em que os pontos brancos (Figura 10a) representam os pluviômetros relatados naquele dia específico e os quadrados brancos (Figura 10b) representam as caixas de grade de satélite TRMM de resolução  $0,25^\circ$  perto dos pluviômetros indicados pelos pontos brancos.

Figura 10. A estimativa de precipitação acumulada de 24 horas do TRMM (sombreada) para 8 de março de 2003. (a) Os pontos brancos representam os pluviômetros de relatório naquele dia específico. (b) Os quadrados brancos representam as caixas de grade TRMM de 0,25° próximas aos pluviômetros mostrados em (a).



Fonte: Rozante et al. (2010).

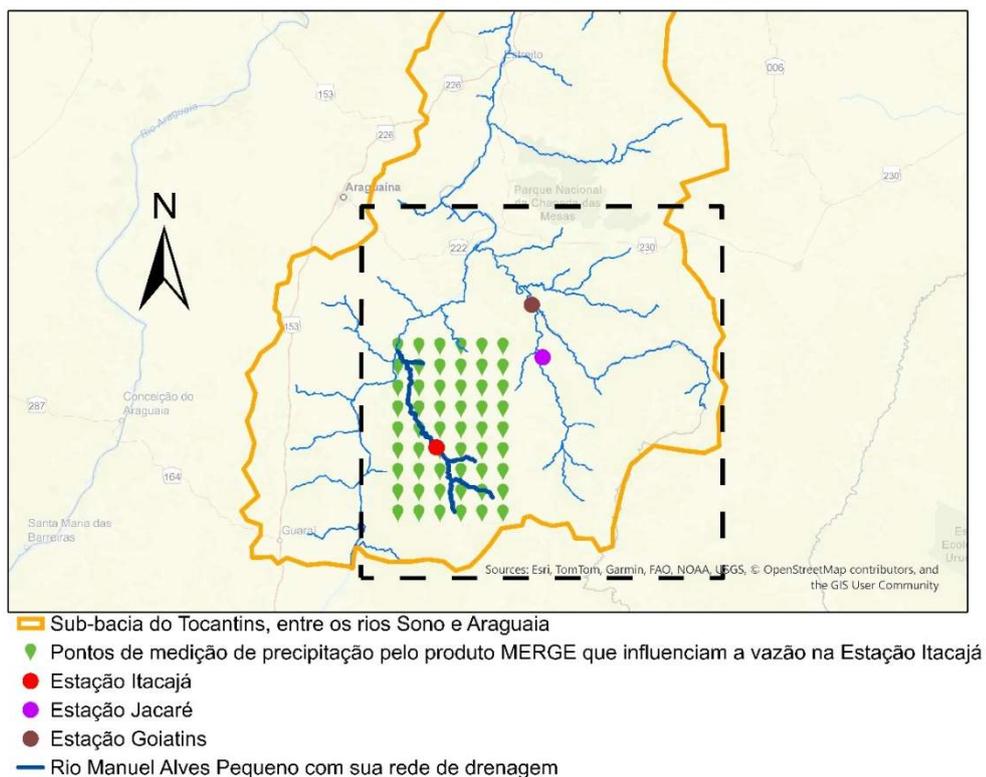
Observa-se que, no ponto de observação, os dados do TRMM não são utilizados, de modo que o peso máximo é dado ao valor de observação. Em seguida, é gerada uma lista com a quantidade de precipitação, a localização geográfica (latitude-longitude) e um identificador de estação atribuído para as caixas restantes da grade do TRMM. Assim, o produto gerado fornece valores de precipitação em pontos de grade regularmente espaçados, semelhantes ao WRF, permitindo uma análise que não apenas é pontual, mas considerando qualquer subgrade dentro do domínio de estudo.

Assim, na primeira etapa de simulações deste estudo, a análise entre precipitações observadas e simuladas foi feita na subgrade retangular do domínio D02 apresentada na Figura 8 da seção 3.1.2.

A chuva que afeta diretamente a vazão de um rio é aquela que ocorre sobre a rede de drenagem associada a esse curso d'água, aumentando o escoamento superficial na região da bacia hidrográfica e recarregando as correntes fluviais desse rio. Assim, a comparação realizada na fase final deste trabalho, entre as precipitações observadas e simuladas, foi realizada em regiões retangulares que abrangem toda a

rede de drenagem de cada um dos três rios analisados pelo WRF-Hydro. Para cada rio, foram selecionadas três dessas regiões retangulares. A Figura 11 mostra a distribuição dos pontos da grade do MERGE na rede de drenagem do Rio Manuel Alves Pequeno, onde a precipitação que incide nessa área influencia diretamente o fluxo do rio.

Figura 11. Pontos de grade do Produto MERGE na rede de drenagem do rio Manuel Alves Pequeno.



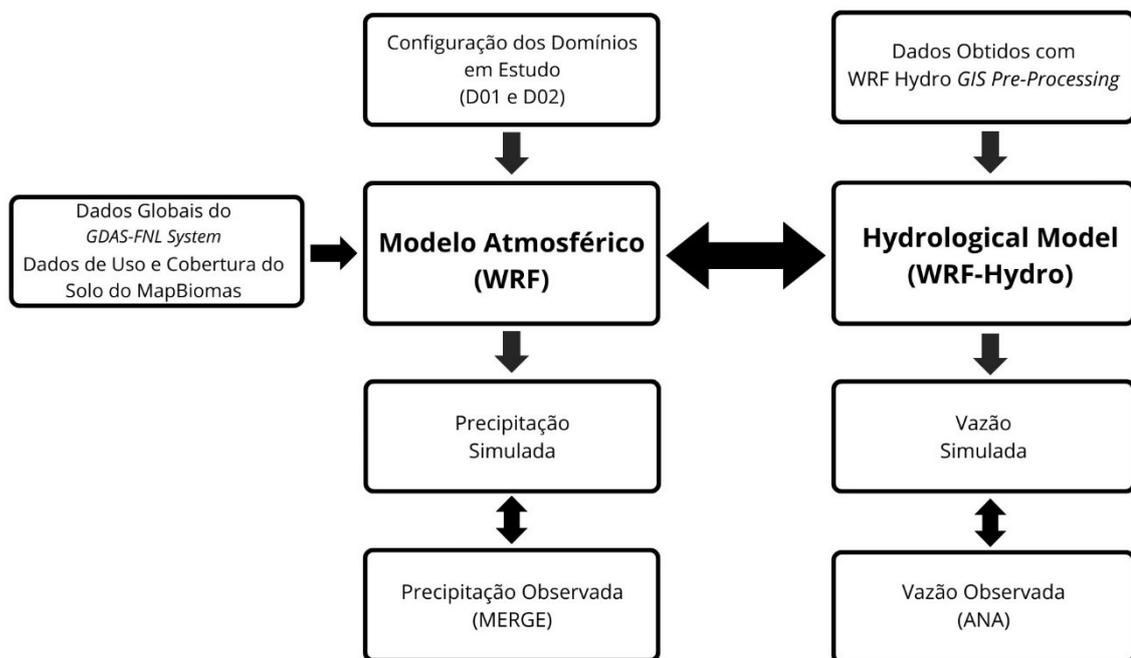
Fonte: autoria própria.

Os valores das precipitações diárias simuladas a serem comparados com os dados em cada subgrade do produto MERGE são retirados da mesma área. Esses resultados são a média aritmética da precipitação diária acumulada em cada ponto das grades do WRF e MERGE. Por exemplo, a precipitação do produto MERGE, a ser utilizada nas observações, na rede de drenagem do Rio Manuel Alves Pequeno é a média aritmética da precipitação apresentada na localização de cada um dos 54 pontos apresentados em verde na Figura 11. Na simulação, a precipitação a ser comparada com essa é a média aritmética dos valores apresentados em cada ponto da grade do WRF-Hydro nessa mesma região (ROZANTE et al., 2010; ROZANTE et al., 2020).

Os resultados do produto MERGE em regiões de baixa densidade de observações, como a região da bacia do rio Tocantins/Araguaia, mostram uma melhora substancial em comparação com a simples interpolação das observações existentes nas estações pluviométricas. Esses dados podem ser acessados no site do CPTEC (ROZANTE et al., 2010; CPTEC, 2024).

A Figura 12 apresenta um resumo dos dados usados no modelo, tanto no módulo meteorológico como no hidrológico, juntamente com suas interações e os dados observacionais usados para validação.

Figura 12. Fluxograma dos dados utilizados no modelo, juntamente com suas interações e dados observacionais.



Fonte: autoria própria.

### 3.3 Conjuntos de Parametrizações Físicas Utilizados na Primeira Etapa de Simulações

Alguns esquemas de parametrizações físicas geralmente são métodos empíricos baseados em observações limitadas e teorias imperfeitas. Na literatura, é comum realizar testes de sensibilidade para identificar um conjunto de esquemas que respondam eficientemente às variáveis meteorológicas e espaciais específicas de

cada caso e região, sendo esses testes propostos empiricamente, ou mesmo por tentativa e erro (SALES et al., 2022).

Assim, na primeira etapa de simulações, que consiste na análise dos resultados de precipitação, seis simulações foram realizadas com conjuntos de parametrizações físicas distintos com o objetivo de identificar o mais adequado para ser utilizado nas análises de vazão. Os parâmetros físicos empregados são baseados em trabalhos desenvolvidos com WRF e WRF-Hydro em regiões com algumas características climáticas semelhantes à bacia do rio Tocantins/Araguaia.

Dentre as parametrizações físicas, as principais para simulação de precipitação são a microfísica e esquemas de parametrização de convecção *cumulus*, com a simulação sendo menos sensível à microfísica em contraste com o esquema *cumulus* (LIU et al., 2021a). Além dos valores de *cumulus*, as categorias microfísica e camada limite planetária (PBL) foram alteradas, pois também são identificadas como importantes fatores influentes para a simulação de precipitação (TIAN et al., 2017b). As principais parametrizações físicas dessas simulações foram baseadas nos estudos de Naabil et al. (2017), Wang et al. (2020) e Kitagawa et al. (2022), Bae et al. (2016), Stergiou et al. (2017), Sousa et al. (2019), Costa et al. (2022) e Wang et al. (2021b) e são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Principais parametrizações físicas utilizadas nas simulações.

Parametrização	Simulação	Esquema	Referência
Microfísica	1 e 2	Lin	Chen e Sun (2002)
	3	WDM6	Lim e Hong (2010)
	4	WSM6	Hong e Lim (2006)
	5 e 6	Morrison	Morrison et al. (2009)
<i>Cumulus</i>	1	Kain–Fritsch	Kain (2004)
	2	Grell–Devenyi	Grell e Devenyi (2002)
	3 e 5	Grell–Freitas	Grell e Freitas (2014)
	4	Grell-3D	Grell (1993)
	6	Kain–Fritsch	Kain (2004)
Radiação de onda longa	1 e 2	RRTM	Mlawer et al. (1997)
	2 a 6	RRTMG	Iacono et al. (2008)
Radiação de onda curta	1 e 2	Dudhia	Dudhia (1989)
	2 a 6	RRTMG	Iacono et al. (2008)
Camada limite planetária	1 e 2	MYJ	Janjic (1994)
	3	BouLac	Bougeault e Lacarrere (1989)
	4	MYNN2.5	Nakanishi e Niino (2009)
	5	Shin-Hong	Shin e Hong (2015)
	6	MYNN3	Olson et al. (2019)
Camada superficial	1, 2 e 3	ESS	Janjic (2002)
	4 e 6	MYNN	Nakanishi e Niino (2006)
	5	MM5	Jiménez et al. (2012)
Modelo de superfície terrestre	1 a 6	Noah-LSM	Tewari et al. (2004)

Fonte: autoria própria.

As duas primeiras simulações diferenciam-se apenas pela escolha do esquema *cumulus*, enquanto nas outras quatro simulações, os conjuntos de parametrizações foram combinados conforme as referências, mantendo constantes apenas os parâmetros de radiação de ondas longas e curtas e o modelo de superfície terrestre. Para o modelo de radiação, foi utilizado o RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models*), uma versão relativamente recente do RRTM (*Rapid Radiative Transfer Model*), aplicada em regiões de clima tropical no Brasil (COSTA et

al., 2022; MOYA et al., 2018). O modelo de superfície terrestre escolhido foi o LSM Noah, uma vez que o WRF-Hydro atualmente opera exclusivamente com ele e com o Noah-MP, que não apresentou melhorias significativas nos resultados e aumentou o tempo de simulação em quase 20%.

### **3.4 Parâmetros Hidrológicos Utilizados na Segunda Etapa de Simulações**

#### **3.4.1 Descrição dos parâmetros**

Dentre os variados parâmetros hidrológicos do WRF-Hydro, neste estudo foram analisados o REFKDT, os parâmetros de escala RETDEPRTFAC e OVROUGHTFAC, que controlam RETDEPRT e OVROUGHT, respectivamente, e o MannN, que está no contexto do fluxo calculado pela fórmula definida como equação de Manning. Ajustar esses parâmetros, considerados entre os mais importantes no processo de infiltração e escoamento superficial, pode resultar em melhorias potenciais nos dados simulados, dependendo da região de estudo (RYU et al., 2017). Esses quatro parâmetros são determinados empiricamente, o que significa que são ajustados com base em observações e experiência prática, em vez de serem diretamente derivados de princípios teóricos. Além disso, são adimensionais, o que implica que não possuem unidades físicas.

Frequentemente, esses parâmetros não possuem um significado físico direto e específico. No contexto do WRF-Hydro, embora possam estar presentes em fórmulas físicas, esses coeficientes são ajustados por tentativa e erro para melhorar a precisão das simulações, em vez de serem diretamente derivados de características físicas observáveis, como a velocidade de um rio ou a capacidade de armazenamento de água no solo. Portanto, é recomendável ajustá-los por meio da calibração do modelo, um processo que envolve a comparação dos resultados simulados com dados observacionais reais e a modificação dos parâmetros para alcançar uma melhor correspondência (ZHANG et al., 2020).

REFKDT é um coeficiente correspondente à condutividade hidráulica saturada para solo argiloso arenoso e pode influenciar significativamente a infiltração superficial e a divisão do escoamento total em escoamento superficial e subsuperficial. Um aumento em REFKDT leva a uma redução no escoamento superficial (ZHANG et al., 2020). A equação envolvendo REFKDT pode ser descrita na forma:

$$K_{dtref} = K_{dt} \times \frac{K_{ref}}{K_{sat}} \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $K_{dtref}$  é o parâmetro REFKDT,  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica saturada,  $K_{ref}$  é a condutividade hidráulica saturada para solo argiloso arenoso e  $K_{dt}$  é uma constante para calcular a taxa máxima de infiltração do solo ( $I_{max}$ ), derivado da equação:

$$I_{max} = \frac{P \times \left\{ \frac{d_{tot} \times [1 - e^{(-K_{dt} \times \Delta t)}]}{P + d_{tot} \times [1 - e^{(-K_{dt} \times \Delta t)}]} \right\}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 2}$$

em que  $P$  é a intensidade efetiva da precipitação,  $d_{tot}$  é a profundidade total da água no solo (m), e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo.

O escoamento superficial no WRF-Hydro é calculado usando uma formulação de onda difusiva, que é um pouco mais elaborada que a equação da onda cinemática comumente empregada na hidrologia para simular o movimento da água em superfícies inclinadas. A vantagem da equação da onda difusiva é que ela consegue representar melhor situações em que a água precisa fluir em terrenos irregulares ou até subir pequenas elevações, além de considerar o acúmulo de água, resultando em uma simulação mais precisa do comportamento real do fluxo de água.

O procedimento desse escoamento pode ser implementado em um método bidimensional (nas direções x e y) ou em um método unidimensional (ou método D8, que considera oito direções possíveis de escoamento para cada célula da grade do modelo, sendo a direção determinada com base na célula vizinha mais baixa). Embora o método bidimensional possa fornecer uma representação mais precisa do movimento da água em algumas superfícies complexas, ele é mais caro em termos de tempo computacional em comparação com o método unidimensional (GOCHIS et al., 2021). Motivo pelo qual foi utilizado o método unidimensional neste trabalho.

A Figura 13 representa o escoamento superficial para ambos os métodos, que possuem física idêntica. O escoamento é roteado através dos elementos do terreno até intersectar uma célula da grade de "canal" indicada pela linha azul, onde ele se torna "escoamento" para a rede de canais de córrego.

Figura 13. Representação conceitual dos elementos do terreno.

Se altura da água na superfície > Profundidade de retenção)  
-> Encaminhar a água como escoamento superficial



Fonte: adaptado de Gochis et al. (2021).

Em geral, o escoamento para o canal é baseado em um cálculo de balanço de massa, onde o canal roteia água quando a profundidade de água acumulada das células da grade do canal excede uma profundidade de retenção predefinida (RETDEPRT). A profundidade da água na superfície em qualquer célula da grade é determinada pela combinação do excesso de infiltração local, da água proveniente do escoamento superficial que chega à célula e da exfiltração do fluxo subterrâneo. Quando a quantidade de água ultrapassa a profundidade de retenção, o excesso é considerado como influxo para o canal do córrego e é direcionado para o procedimento de roteamento do canal. Um aumento no fator de escala RETDEPRTFAC, que controla a profundidade máxima de retenção (RETDEPRT), pode resultar em maior infiltração local nas proximidades do canal do rio, levando a solos mais úmidos que melhor refletem as condições das áreas ribeirinhas..

A formulação da onda difusiva é uma simplificação das equações de continuidade e momento mais gerais de St. Venant para uma onda de água rasa. A equação de continuidade unidimensional para uma onda de inundação que flui sobre a superfície terrestre é:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_e \quad \text{Eq. 3}$$

onde  $t$  é o tempo,  $x$  é a coordenada no sentido do escoamento,  $h$  é a profundidade do escoamento superficial,  $q$  é o escoamento unitário e  $i_e$  é o excesso de infiltração. A equação do momento usada na formulação da onda difusiva é:

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{Eq. 4}$$

sendo  $S_f$  a inclinação de atrito (ou inclinação da linha de energia),  $S_o$  a inclinação do terreno e  $\partial h/\partial x$  a mudança na profundidade da superfície da água acima da superfície terrestre.

Para resolver a Eq. 3 é necessário obter o valor para  $q$ , que pode ser calculado pelo uso de uma equação de resistência que a água encontra ao se mover sobre a superfície. No WRF-Hydro, assim como nos canais, é utilizada a equação de Manning, que incorpora a expressão para perdas de momento dada na Eq. 4. Uma forma da equação de Manning é:

$$q = \frac{1}{n_{ov}} S_f^{1/2} h^\beta; \quad \beta = \frac{5}{3} \quad \text{Eq. 5}$$

em que  $\beta$  é um coeficiente que ajusta a equação de Manning para garantir que os resultados estejam nas unidades corretas do Sistema Internacional de Unidades (no caso da variável  $q$  em  $m^2/s$ ).

O coeficiente  $n_{ov}$  é o parâmetro de rugosidade para o escoamento superficial (OVROUGHRT), controlado pelo parâmetro ajustável de escala OVROUGHRTFAC. Ele é determinado pelo tipo de uso do solo e afeta a velocidade de descida dos escoamentos superficiais. Esse parâmetro é usado para representar quão rugosa ou lisa é a superfície do solo, influenciando a rapidez com que a água escoar sobre ela em resposta à precipitação. Um valor mais alto de OVROUGHRT torna a superfície mais rugosa, fazendo com que a água escoar mais lentamente sobre ela. Esse escoamento mais lento permite maior infiltração na superfície terrestre, resultando em menor volume de água direcionado aos canais dos rios.

Na Eq. 5 observa-se que quanto maior o valor de  $n_{ov}$ , o resultado do escoamento unitário  $q$  é menor, diminuindo a taxa de variação desse escoamento em relação ao seu deslocamento ( $\partial q/\partial x$ ) e conseqüentemente o excesso de infiltração ( $i_e$ ) representado na Eq. 3, que indica a velocidade do escoamento na superfície.

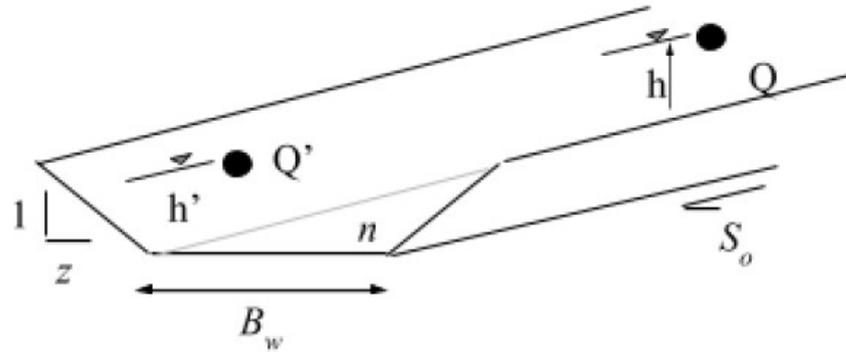
O módulo de roteamento de canais do WRF-Hydro possibilita o roteamento unidimensional e distribuído do fluxo de água ao longo do domínio de simulação. Isso significa que ele calcula como a água se desloca pelos rios e córregos considerando a variação espacial ao longo de toda a área de estudo. Entre essas variações espaciais, o módulo também pode considerar lagos e reservatórios, incorporando algoritmos específicos que modelam o comportamento desses corpos d'água no cálculo do escoamento.

Essa consideração é implementada por meio de um algoritmo opcional de lago/reservatório, que pode ser ativado utilizando um arquivo de entrada adicional para simular o comportamento desses elementos aquáticos. Neste estudo, essa opção foi ativada e utilizou-se um arquivo contendo polígonos que delimitam a extensão de cada lago no formato *shapefile*. Esse arquivo, denominado HydroLAKES, contém polígonos de todos os lagos globais com uma área de superfície mínima de 10 hectares, obtidos do banco de dados HydroSHEDS.

O HydroSHEDS oferece uma série de camadas de dados digitais globais que apoiam pesquisas e aplicações hidroecológicas em todo o mundo. Seus diversos produtos de dados hidrográficos incluem limites de bacias hidrográficas, redes de rios e lagos em várias resoluções e escalas. Esses dados estão disponíveis gratuitamente em formatos GIS padrão e constituem a estrutura geoespacial para uma ampla gama de avaliações, incluindo aplicações hidrológicas, ambientais, de conservação, socioeconômicas e de saúde humana. (MESSAGER et al., 2016; HYDROSHEDS, 2023).

Dentro de cada célula da grade do canal, há um trecho do canal assumido com geometria trapezoidal, em que a fórmula de Manning é aplicada. A Figura 14 mostra uma representação dessa geometria.

Figura 14. Representação esquemática do roteamento de canal.



Fonte: Gochis et al. (2021).

A variável  $S_0$  indica a inclinação do Canal,  $Z$  a inclinação lateral,  $B_w$  a largura inferior constante e  $h$  a profundidade da água. Os elementos do canal recebem fluxo lateral do escoamento superficial e atualmente não há retorno da vazão para a grade, então o fluxo para o modelo do canal é efetivamente unidirecional. A vazão na rede de canais em grade é calculada usando uma formulação unidimensional e um esquema de passo de tempo da onda difusiva, conforme a equação de continuidade:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad \text{Eq. 6}$$

onde  $t$  é o tempo,  $x$  é a coordenada no sentido do fluxo,  $A$  é a área de fluxo da seção transversal,  $q_{lat}$  é a taxa de vazão/fluxo lateral do canal e  $Q$  é a vazão, que dentre diversas interações no tempo e espaço também é obtida a partir da equação de Manning. Ela pode ser descrita conforme a Eq. 7, que é uma das mais utilizadas para calcular a vazão sobre superfícies livres, por ter sido experimentada desde os canais de dimensões minúsculas até os grandes canais, obtendo resultados coerentes (NETTO et al., 2015).

$$Q = \frac{A_m R_H^{2/3}}{n S_0^{1/2}} \quad \text{Eq. 7}$$

sendo  $A_m$  a área molhada do canal ( $m^2$ ),  $R_H$  o raio hidráulico (m) e  $n$  o parâmetro MannN, definido como o coeficiente de rugosidade de Manning. A área molhada é a

área útil do escoamento em uma seção transversal, no caso da Figura 14 é a área do trapézio com uma das bases sendo  $B_w$  e altura  $h$ . O raio hidráulico é a razão entre  $A_m$  e a medida do contorno da área molhada, definido como perímetro molhado.

O WRF-Hydro considera a largura média da base do canal ( $B_w$ ), a profundidade inicial da água ( $h$ ), a inclinação do canal ( $S_o$ ) e o coeficiente de Manning (MannN) com base em cada ordem de curso d'água (*Stream Order*). Os valores padrão dos parâmetros do canal estão listados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores padrão dos parâmetros do canal.

<b><i>Stream Order</i></b>	<b><math>B_w</math></b>	<b><math>S_o</math></b>	<b><math>h</math></b>	<b>MannN</b>
1	1,5	0,02	3,0	0,55
2	3,0	0,02	1,0	0,35
3	5,0	0,02	0,5	0,15
4	10	0,03	0,18	0,10
5	20	0,03	0,05	0,07
6	40	0,03	0,05	0,05
7	60	0,03	0,05	0,04
8	70	0,10	0,05	0,03
9	80	0,30	0,05	0,02
10	100	0,30	0,05	0,01

Fonte: Yucel et al. (2015).

As propriedades geométricas dos canais foram ajustadas para seus valores padrão, pois não há dados disponíveis de seção transversal do canal para a região em relação à ordem dos cursos d'água. Portanto, apenas o parâmetro de rugosidade do canal (MannN) é calibrado. O ajuste do coeficiente de Manning é realizado multiplicando cada valor inicial de MannN por um fator de escala, preservando assim os padrões espaciais dos parâmetros durante a calibração. Esse fator de escala torna-se o parâmetro de calibração, gerando valores de MannN para todos os canais fluviais.

### 3.4.2 Procedimentos de calibração dos parâmetros hidrológicos

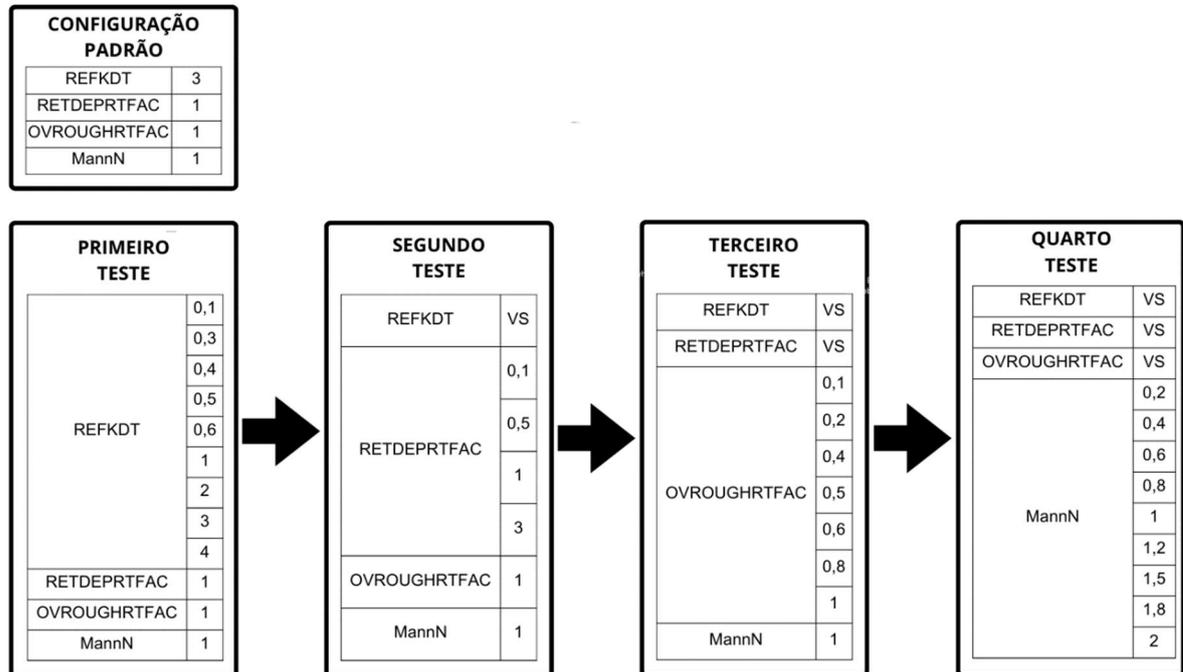
Após identificar o conjunto de parametrizações físicas mais adequado na primeira etapa das simulações, a influência dos parâmetros hidrológicos foi analisada

com base nos resultados de vazão na segunda etapa. Os testes de sensibilidade foram realizados utilizando dados observacionais de vazão da estação Itacajá, localizada no Rio Manuel Alves Pequeno e a calibração dos parâmetros foi baseada em diversos estudos da literatura (GIVATI et al., 2016; LIU et al., 2021a; QUENUM et al., 2022; KERANDI et al., 2018; YUCEL et al., 2015; NAABIL et al., 2017; RYU et al., 2017; ZANG et al., 2020).

Cada parâmetro hidrológico possui um valor padrão estabelecido no sistema de modelos em sua configuração inicial: REFKDT = 3, RETDEPRTFAC = 1, OVROUGHRTFAC = 1 e o multiplicador do parâmetro MannN igual a 1. Primeiramente, foi realizado um teste de sensibilidade com o REFKDT, mantendo os valores padrão dos demais parâmetros. Após identificar o valor considerado adequado para o fator de infiltração utilizando métricas estatísticas, iniciaram-se os testes para o parâmetro de escala da profundidade de retenção superficial (RETDEPRTFAC), utilizando o valor de REFKDT obtido no teste anterior e os valores padrão para os outros dois parâmetros. Da mesma forma, foram realizados testes para o parâmetro de escala OVROUGHRTFAC, mantendo os valores considerados adequados de REFKDT e RETDEPRTFAC, e o valor padrão para MannN. Por fim, o parâmetro MannN foi testado, utilizando valores considerados ideais para os outros três parâmetros.

Os valores dos parâmetros hidrológicos selecionados a partir dos testes de simulação, comparados com os dados observacionais de vazão da estação Itacajá, foram utilizados para avaliação com os dados das estações Jacaré e Goiatins, que medem a vazão dos rios Vermelho e Manuel Alves Grande, respectivamente. A Figura 15 apresenta o procedimento dos testes de sensibilidade e os valores atribuídos aos parâmetros.

Figura 15. Testes de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos a partir dos dados de vazão da estação Itacajá.



VS: Valor selecionado na etapa anterior, considerado adequado.

Fonte: autoria própria.

### 3.5 Métricas de Avaliação Estatística

O desempenho do modelo na simulação de precipitação e vazão foi avaliado com base em medidas estatísticas comumente utilizadas em outros estudos com o WRF e WRF-Hydro. O erro quadrático médio (RMSE) foi empregado na primeira etapa de simulações, que analisa a precipitação simulada, ao testar alguns conjuntos de parametrizações físicas. A eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) foi utilizada na segunda etapa, para avaliação da vazão com variação dos parâmetros hidrológicos. A razão entre RMSE e o desvio padrão das observações (RSR), viés percentual (PBIAS) e o coeficiente de correlação (R) foram utilizados em ambas as etapas (CHO e KIM, 2022; KERANDI et al., 2018; ZHANG et al., 2012; LIU et al., 2021b; MORIASI et al., 2007).

Foram utilizados também o coeficiente de variação (CV) e o erro relativo (ER) na segunda etapa, para avaliação da uniformidade das precipitações observadas pelo produto MERGE e verificação da qualidade da chuva simulada com base nas observações. Os índices estatísticos são definidos pelas equações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Fórmulas das medidas estatísticas utilizadas neste trabalho.

$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}$	<p>Eq. 8</p> <p>Índice de erro usado para medir o desvio entre simulações e observações, variando de 0 a <math>\infty</math>.</p>
$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right]$	<p>Eq. 9</p> <p>Parâmetro que mede o alinhamento entre os dados observados e simulados, variando de <math>-\infty</math> a 1.</p>
$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$	<p>Eq. 10</p> <p>Índice de erro que oferece uma medida do desempenho do modelo, independente da escala da variável prevista.</p>
$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100$	<p>Eq. 11</p> <p>Indica se os dados simulados tendem a ser consistentemente maiores ou menores do que os dados observados.</p>
$R = \frac{\{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})\}}{\{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 (O_i - \bar{O})^2\}^{\frac{1}{2}}}$	<p>Eq. 12</p> <p>Mede a relação linear entre simulações e observações, variando de -1 a 1.</p>
$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i}{\bar{O}} - 1\right)^2}{N}}$	<p>Eq. 13</p> <p>Utilizado para medir a variabilidade de um conjunto de dados.</p>
$ER = \left  \frac{M_i - O_i}{O_i} \right $	<p>Eq. 14</p> <p>Empregado para medir o grau de concordância ou discordância entre dois conjuntos de dados.</p>
<p><math>O_i</math> e <math>M_i</math> referem-se às quantidades observadas e simuladas para cada dia, respectivamente; <math>\bar{O}</math> indica o valor médio diário observado ao longo de todo o período; <math>STDEV_{obs}</math> é o desvio padrão dos dados observados; e <math>N</math> é o número de dias na simulação.</p>	

Fonte: Liu et al. (2021), Moriasi et al. (2007), Cho e Kim (2022), Yang et al. (2019), Tian et al. (2017), Kat e Els (2012).

O RMSE é uma medida de desempenho quantitativo de índice de erro comumente usada para avaliar métodos de previsão. Ele é usado para mensurar o desvio entre simulações e observações, com o intervalo de 0 a  $\infty$ . Quanto mais próximo de 0, melhor o desempenho do modelo (LIU et al., 2021b).

O NSE é um índice de desempenho amplamente utilizado para avaliar a qualidade de modelos hidrológicos. Esse parâmetro indica quão bem o gráfico de dados observados versus dados simulados se alinha. Varia de  $-\infty$  a 1, quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho do modelo; valores entre 0 e 1 são geralmente considerados níveis aceitáveis de desempenho e, se o valor for inferior a 0, o desempenho é considerado insatisfatório (MORIASI et al., 2007).

A métrica RSR é calculada como a razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados observados ( $STDEV_{obs}$ ), que mede a variabilidade das observações em torno de sua média. O RSR, então, fornece uma medida padronizada do desempenho do modelo que é independente da escala da variável que está sendo prevista. Ele varia de zero, considerado o valor perfeito, a um grande valor positivo. Quanto menor o RSR, menor o RMSE e melhor o desempenho de simulação do modelo (MORIASI et al., 2007).

O índice PBIAS indica a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que seus pares observados. O valor ideal para PBIAS é 0, valores positivos indicam superestimação média pelo modelo, enquanto valores negativos indicam subestimação (CHO e KIM, 2022).

O valor R avalia a relação linear entre simulações e observações, variando de -1 a 1. Um valor de -1 indica uma correlação negativa perfeita (quando uma variável aumenta, a outra diminui na mesma proporção), 1 indica uma correlação positiva perfeita (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta na mesma proporção) e 0 não mostra correlação (YANG et al., 2019).

O coeficiente de variação (CV) é empregado para avaliar quantitativamente a irregularidade de um conjunto de dados. Ele é utilizado para classificar eventos de chuva intensa de acordo com sua uniformidade espacial e temporal, sendo que valores menores de CV indicam uma precipitação observada ( $O_i$ ) mais homogênea (TIAN et al., 2017a).

O ER é comumente utilizado para quantificar a concordância/discordância entre dois conjuntos de dados, como a quantidade total de precipitação de uma previsão ( $O_i$ ) e seu valor previsto ( $M_i$ ). Quanto maior o valor dessa métrica, maior a super ou

subestimação da simulação em relação ao valor medido, indicando menor acurácia dos resultados do modelo (KAT e ELS, 2012).

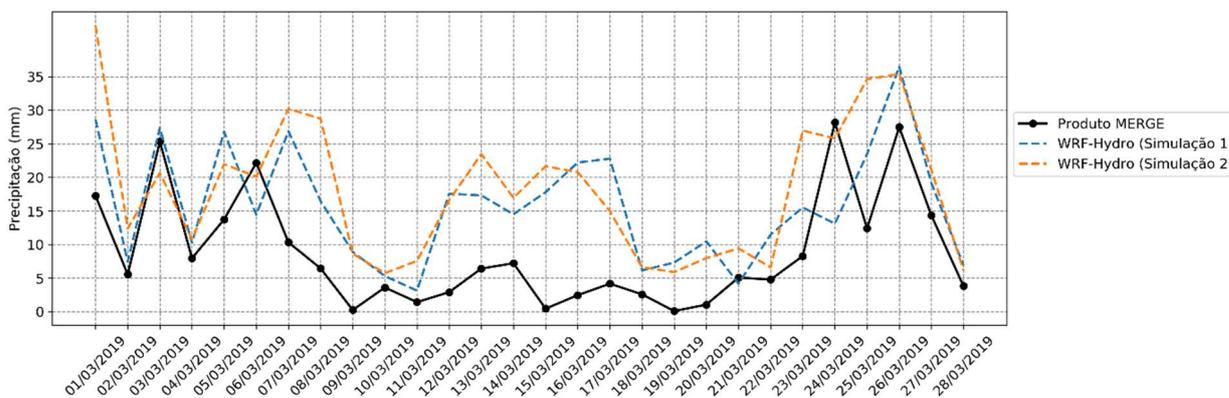
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Primeira Etapa de Simulações: Testes de Parametrizações Físicas

Nessa etapa, seis conjuntos de parametrizações físicas foram testados. Inicialmente, foram realizadas duas simulações em que os conjuntos de parametrizações diferiam apenas no esquema físico *cumulus*, conforme detalhado na Tabela 4 da seção 3.3. Essas duas simulações foram realizadas separadamente das demais, pois ainda não havia sido feita uma análise de precipitação com os dados do produto MERGE. Considerou-se prudente verificar esses dados antes de prosseguir com as demais simulações para evitar o consumo ineficiente de tempo de processamento do supercomputador utilizado. O uso inadequado desses recursos para simulações que possam exigir ajustes subsequentes não apenas resulta em tempo de processamento ocioso, mas também na ocupação de recursos de alto desempenho que poderiam ser alocados para outras atividades computacionais no ambiente compartilhado da instituição.

Após o período inicial de cinco dias de *spin-up*, a Figura 16 apresenta os resultados das precipitações acumuladas diariamente durante o período de 01 a 28 de março de 2019. Esses resultados são mostrados tanto no produto MERGE quanto nas simulações realizadas pelo WRF-Hydro utilizando os primeiros conjuntos de parametrizações físicas. As precipitações diárias correspondem à média aritmética de todos os pontos de grade do WRF-Hydro e do produto MERGE no domínio D02.

Figura 16. Precipitação acumulada diária observada no produto MERGE e simulada no WRF-Hydro em dois esquemas de parametrizações físicas.



Fonte: autoria própria.

Apesar das divergências entre os valores das precipitações diárias acumuladas nas simulações 1 e 2 em diversos momentos, o gráfico dessas simulações tem padrão semelhante, com crescimento e decréscimo dos resultados em momentos similares. Como nos gráficos exibidos em Naabil et al. (2017), os valores das chuvas simuladas diferem consideravelmente dos dados de referência em partes da análise, no caso deste trabalho o produto MERGE, principalmente na parte central do gráfico. Durante o intervalo de 05 a 16/03/19 observa-se a maior disparidade em comparação com os períodos de 01 a 04/03/19 e 17 a 28/03/19. A Tabela 7 mostra os valores dos índices estatísticos R, RMSE, RSR e PBIAS obtidos pela comparação dos valores de cada simulação com o produto MERGE em todo e período das simulações.

Tabela 7. Índices estatísticos da comparação entre as simulações 1 e 2 com o produto merge no período de 01 a 28/03/2019.

<b>Simulação</b>	<b>R</b>	<b>RMSE</b>	<b>RSR</b>	<b>PBIAS</b>
1	0,59	10,30	1,25	79,89
2	0,62	12,47	1,52	107,69

Fonte: autoria própria.

A proximidade entre os índices estatísticos das simulações 1 e 2 em relação aos dados do produto MERGE reforça a semelhança gráfica entre as simulações mostradas na Figura 16 e a moderada superestimação dos resultados da simulação 2 em comparação com a simulação 1 é evidenciada pelo índice PBIAS.

A maioria dos artigos pesquisados utiliza as métricas estatísticas RMSE e R para avaliação entre precipitações observadas e simuladas pelo modelo WRF, empregando diferentes esquemas de parametrização física. Considerando essas duas métricas, os resultados apresentados na Tabela 7 são razoáveis, visto que a validação da precipitação a partir de saídas de modelos meteorológicos é um processo desafiador, principalmente devido à sua irregularidade espacial. Estudos obtêm valores de RMSE em torno de 8 e R em torno de 0,6 (MERINO et al., 2022; YANG et al., 2021).

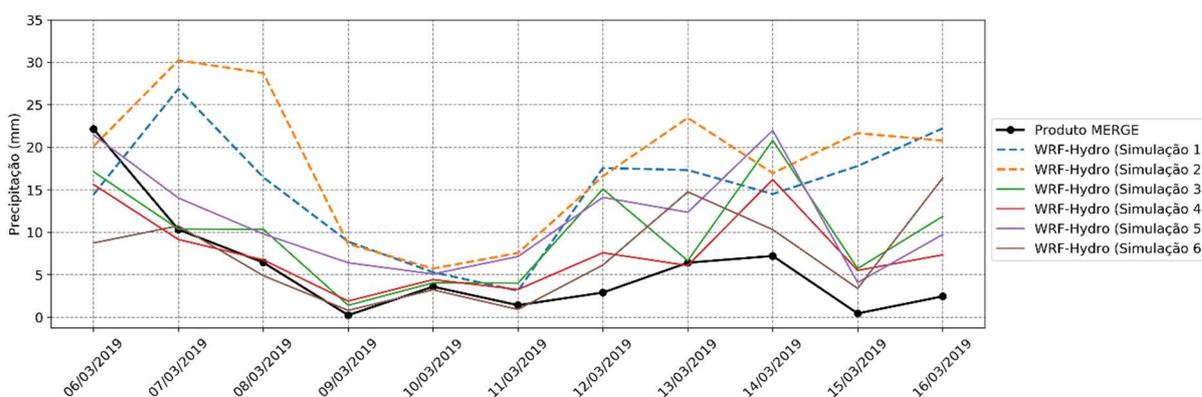
Objetivando a melhora desses índices, as outras quatro simulações foram conduzidas focando na análise dos resultados durante o período mais crítico das duas simulações iniciais. Descontando o tempo de *spin-up* de cinco dias, a análise foi

realizada de 06 a 16/03/2019. Nessas simulações, além dos valores de *cumulus*, as categorias de microfísica e camada limite planetária (PBL) também foram alteradas.

Além de buscar melhorias especificamente na parte mais crítica das simulações, optou-se por um período de execução menor devido à baixa eficiência do modelo nesse estágio, onde o tempo gasto com a simulação praticamente correspondia ao período simulado. Essa lentidão foi atribuída a vários fatores, como o acesso limitado a unidades de processamento no supercomputador da instituição, configurações não otimizadas de arquivos do modelo e ativação de módulos desnecessários. Esses problemas foram influenciados pelo processo em andamento de adaptação às etapas do modelo.

Essas quatro simulações apresentaram resultados mais próximos dos registrados no produto MERGE do que as simulações 1 e 2 no período de 06 a 16/03/2019, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17. Precipitação acumulada diária observada do MERGE e simulada no WRF-Hydro em seis esquemas de parametrizações físicas.



Fonte: autoria própria.

Essa proximidade de resultados é especialmente evidente no intervalo inicial, até o dia 10/03, em que a discrepância entre os valores das duas simulações iniciais em comparação com as demais se torna perceptível. Além disso, há uma notável disparidade na trajetória dos gráficos, o que resulta em uma significativa melhoria nos índices estatísticos durante esse período, como demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8. Índices estatísticos da comparação entre as simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 com o produto MERGE no período de 06 a 16/03/2019.

<b>Simulação</b>	<b>R</b>	<b>RMSE</b>	<b>RSR</b>	<b>PBIAS</b>
1	0,24	12,03	2,01	158,50
2	0,38	14,67	2,45	214,96
3	0,58	6,73	1,12	68,89
4	0,76	4,30	0,72	31,81
5	0,75	7,03	1,17	98,30
6	0,34	6,57	1,10	26,20

Fonte: autoria própria.

Embora o índice PBIAS indique que todas as simulações superestimam os valores fornecidos pelo produto MERGE, ele é significativamente maior nas duas primeiras simulações, como previsto pelo gráfico apresentado na Figura 17. Os demais índices estatísticos também são consistentemente melhores nas quatro últimas simulações. A simulação 4 se destaca como a mais adequada dentre as seis no período observado, apresentando a correlação R mais próxima de 1, RMSE menor e RSR mais próximo de zero. O PBIAS da simulação 4 só não é inferior ao da simulação 6, que, no entanto, apresenta correlação muito fraca e  $RSR > 1$ .

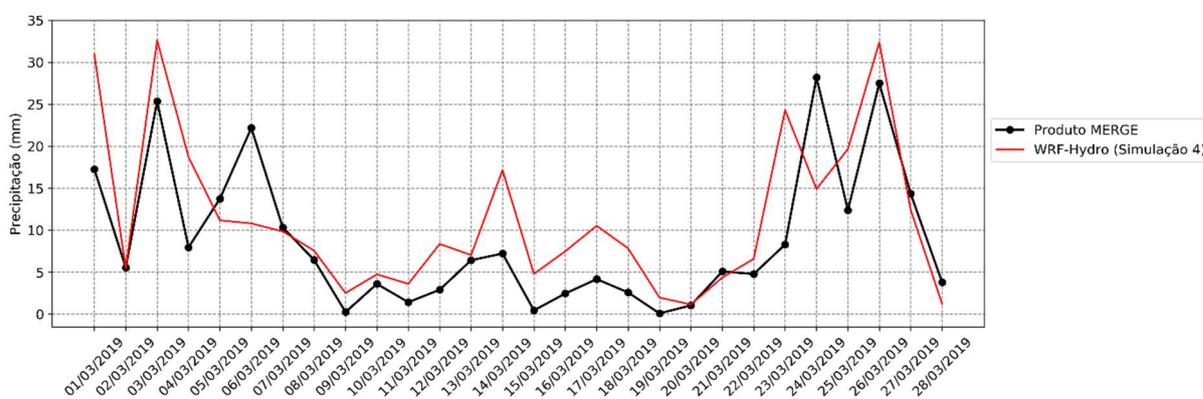
Das et al. (2015) examinaram os valores RMSE de precipitação para melhorar a simulação pelo WRF de eventos de tempestades em nove localidades de uma região indiana, realizando diversos experimentos de sensibilidade com diferentes combinações de microfísica, camada limite planetária e esquemas de parametrização de cumulus, e obtiveram  $RMSE = 12,91$  para a melhor combinação de parametrizações. Yang et al. (2021) e Kitagawa et al. (2022) testaram também diferentes combinações de esquemas físicos para avaliar a capacidade do WRF em simular precipitação em uma bacia hidrográfica localizada na China e na cidade de Salvador-BR, respectivamente. No primeiro caso a configuração mais adequada apresentou  $RMSE = 7,7$  e  $R = 0,6$  e no estudo realizado no Brasil  $RMSE = 4,11$  e  $R = 0,55$ , valores dentro do padrão do melhor esquema físico apresentado na simulação 4 deste trabalho.

Patil et al. (2016), ao fazerem uma análise semelhante para examinar a sensibilidade do modelo durante um evento denominado perturbação ocidental numa região do noroeste da Índia, obtiveram entre os 10 conjuntos de parametrizações

físicas apresentados, RMSE e RSR variando de 3,6 a 5,2 e de 0,32 a 0,72, respectivamente. Sales et al. (2022), ao realizarem experimentos para avaliar a sensibilidade dos esquemas de cúmulos e microfísica para identificar a combinação que melhor representa a distribuição de chuvas na bacia do Paraíba do Sul, no Brasil, obtiveram os melhores valores de RMSE variando de 2,84 a 3,36 quando os testes estatísticos das simulações foram realizados a partir da média horária de estações meteorológicas do INMET e de outros experimentos, e RMSE = 29,68 quando comparados apenas com os valores interpolados das estações do INMET.

As configurações físicas da simulação 4, identificadas como ideais entre as seis simulações para o período de 06 a 16/03/19, foram aplicadas ao período completo de 24/02 a 28/03/19. Descontando o tempo de spin-up de cinco dias, as partes final e inicial do gráfico, assim como nas simulações 1 e 2, mantiveram um padrão razoável de crescimento e decrescimento das precipitações simuladas pelo WRF-Hydro e observadas no produto MERGE, conforme mostra a Figura 18. A Tabela 9 apresenta os índices estatísticos comparando essa simulação com os valores observados.

Figura 18. Precipitação acumulada diária observada do MERGE e simulada no WRF-Hydro no esquema de parametrizações físicas da simulação 4 em 28 dias.



Fonte: autoria própria.

Tabela 9. Índices estatísticos da comparação entre a simulação 4 com o produto MERGE de 01 a 28/03/19.

<b>Simulação</b>	<b>R</b>	<b>RMSE</b>	<b>RSR</b>	<b>PBIAS</b>
4 (28 dias)	0,75	6,74	0,82	30,23

Fonte: autoria própria.

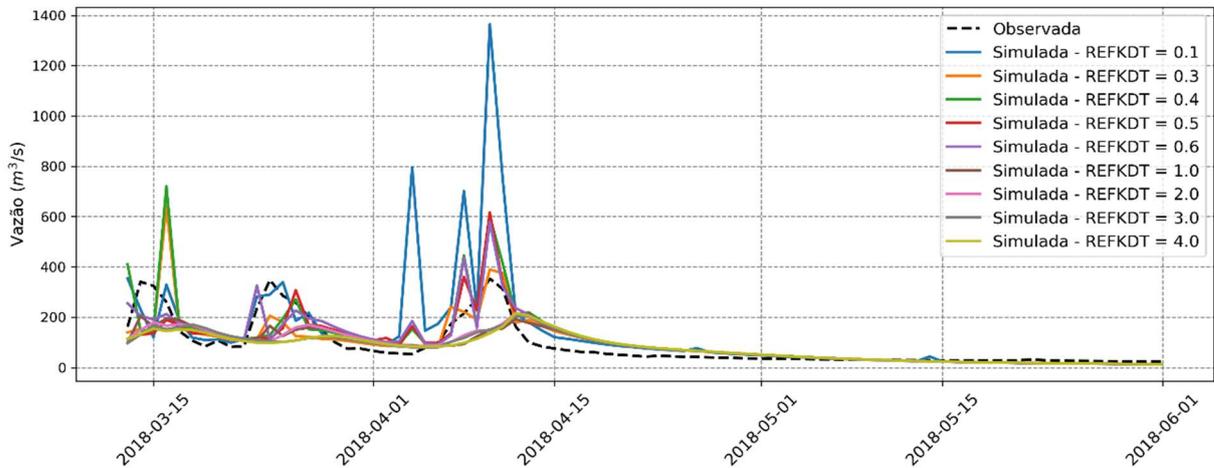
## 4.2 Segunda Etapa de Simulações

Antes de iniciar a segunda fase de simulações, foram realizadas investigações sobre módulos e arquivos do WRF-Hydro que poderiam ser ajustados para reduzir o tempo de execução das simulações. Além disso, reuniões com a equipe técnica do Centro de Supercomputação do SENAI CIMATEC foram realizadas. Como resultado, algumas atualizações foram implementadas, o acesso a unidades de processamento no supercomputador foi ampliado, e os arquivos e módulos do WRF-Hydro foram reconfigurados. Após vários testes, o tempo computacional médio foi significativamente reduzido, permitindo que cada dia de simulação fosse completado em aproximadamente 1 hora e 15 minutos. Com essas melhorias, foram iniciados os testes de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos do WRF-Hydro, utilizando dados observacionais de vazão da estação Itacajá, localizada no Rio Manuel Alves Pequeno.

### 4.2.1 Testes de Sensibilidade de Parâmetros Hidrológicos na Estação Itacajá

Utilizando o conjunto de parametrizações físicas selecionado na primeira etapa, os valores do parâmetro de escoamento superficial (REFKDT) foram escolhidos com base principalmente nas pesquisas de Givati et al. (2016), Liu et al. (2021a), Quenum et al. (2022), Kerandi et al. (2018) e Yucel et al. (2015). Os valores selecionados foram: 0,1; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 1; 2; 3 e 4. A Figura 19 ilustra as vazões observadas e simuladas pelo WRF-Hydro na estação Itacajá para os valores especificados de REFKDT, no período de 13 de março a 01 de junho de 2018.

Figura 19. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação de Itacajá com testes de sensibilidade do REFKDT.



Fonte: autoria própria.

Observa-se um impacto significativo do REFKDT nos resultados de vazão do modelo, destacando a sensibilidade desse parâmetro, conforme demonstrado por Quenum et al. (2022) no caso do Rio Ouémé, por Kerandi et al. (2018) na Bacia do Rio Tana, ambos na África, e por Ryu et al. (2017) na Península Coreana. Yucel et al. (2015) também conduziram um processo de calibração similar ao utilizado nas simulações do WRF-Hydro. Eles utilizaram diversos valores para REFKDT, RETDEPRTFAC e OVROUGHRTFAC para identificar os valores de parâmetros mais eficazes para sua bacia, localizada no oeste da Turquia. Suas descobertas destacaram que REFKDT é o parâmetro com maior sensibilidade quando se trata de regular reações de escoamento durante eventos de precipitação. Eles também observaram que valores mais altos de REFKDT levam a uma redução na vazão. No modelo WRF-Hydro, a água que entra no canal, afetando a vazão, é principalmente derivada da quantidade de precipitação que excede a capacidade de infiltração em cada célula de grade (LIU et al., 2021a). Conforme ilustrado em estudos na região do Mediterrâneo (GIVATI et al., 2016) e na Bacia do Daqinghe, no norte da China (LIU et al., 2021a), geralmente observa-se que um aumento em REFKDT resulta em uma diminuição no escoamento superficial e, conseqüentemente, uma redução na vazão simulada. Essa tendência é visível no gráfico para o período de 1º de abril a 15 de abril de 2018, onde REFKDT = 0,1 mostra uma vazão de pico próxima a 1400 m³/s, REFKDT = 0,5; cerca de 600 m³/s e para valores de REFKDT de 2, 3 e 4, o pico é em

torno de 200 m<sup>3</sup>/s. A Tabela 10 apresenta os coeficientes estatísticos NSE, RSR, R e PBIAS ao comparar a vazão simulada e observada para cada valor de REFKDT.

Essa característica é coerente com o estudo de Wang et al. (2022), que destaca a capacidade do modelo WRF-Hydro de gerenciar e simular adequadamente condições de picos de vazão, demonstrando, assim, o potencial do modelo na compreensão de eventos de inundação.

Tabela 10. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade do REFKDT no período de 13/03 a 01/06/2018.

<b>REFKDT</b>	<b>NSE</b>	<b>RSR</b>	<b>R</b>	<b>PBIAS</b>
0,1	-2,3	1,82	0,67	50,43
0,3	0,44	0,75	0,74	6,94
0,4	0,03	0,99	0,74	6,94
0,5	0,45	0,74	0,74	10,03
0,6	0,47	0,73	0,78	17,82
1,0	0,46	0,70	0,73	-7,31
2,0	0,47	0,73	0,69	-6,68
3,0	0,41	0,77	0,65	-11,58
4,0	0,36	0,80	0,61	-12,56

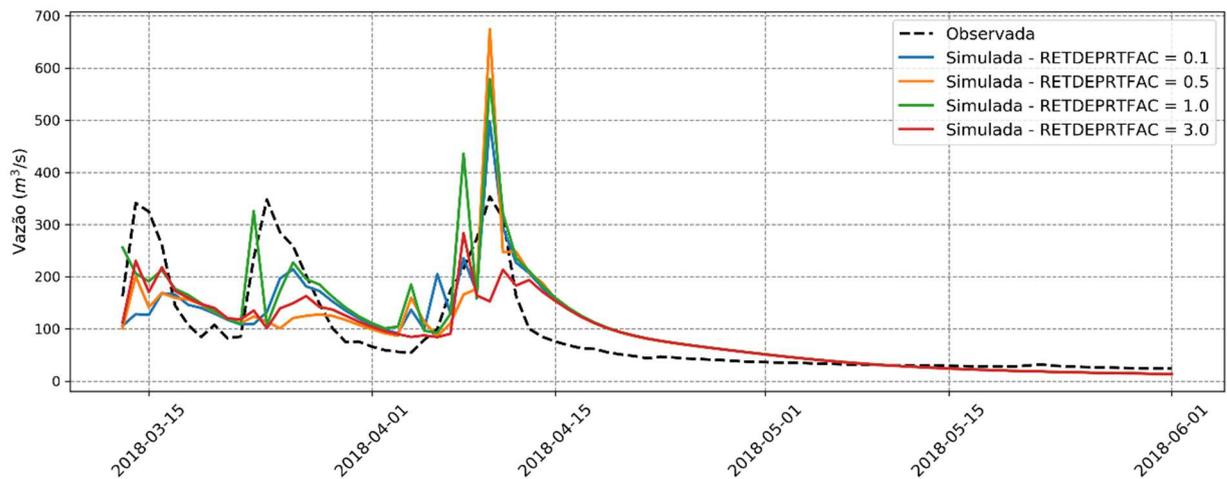
Fonte: autoria própria.

O índice PBIAS geralmente indica uma diminuição na vazão média com o aumento de REFKDT, representando a superestimação máxima (PBIAS = 50,43) para REFKDT = 0,1 e a maior magnitude de subestimação (PBIAS = -12,56) quando REFKDT = 4. Os valores de REFKDT de 0,5; 0,6; 1 e 2 produziram índices estatísticos similares. REFKDT = 0,6 foi selecionado, pois apresentou a melhor correlação (R = 0,78), um dos maiores valores de NSE e o menor erro (RSR = 0,73). Os resultados das métricas estatísticas também são interessantes para REFKDT = 0,3, pois mostrou um PBIAS menor e valores razoáveis para outras métricas. No entanto, não utilizamos esse valor, porque durante o segundo pico de vazão, por volta de 22 de março de 2018, a vazão simulada mostrou uma subestimação significativa.

Com a seleção de REFKDT = 0,6, os valores de 0,1; 0,5; 1 e 3 foram analisados para o parâmetro RETDEPRTFAC. Seu valor padrão é 1 e ele possui uma função

semelhante à de REFKDT, podendo influenciar o cálculo do escoamento superficial. Isso ocorre porque RETDEPRTFAC serve como um fator de profundidade máxima de retenção; antes disso, o fluxo é encaminhado como escoamento superficial (GOCHIS et al., 2021). A Figura 20 apresenta os valores de vazão observados na estação hidrológica e os valores simulados para os parâmetros RETDEPRTFAC mencionados.

Figura 20. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação de Itacajá com testes de sensibilidade do RETDEPRTFAC.



Fonte: autoria própria.

Os valores de RETDEPRTFAC 0,1; 0,5 e 1 avaliados em Liu et al. (2021a) mostraram praticamente nenhuma influência em seus resultados de vazão. Neste estudo, há uma leve variação na vazão simulada com esses valores, especificamente nos pontos de pico em torno de 10 de abril de 2018, sugerindo que a influência do parâmetro RETDEPRTFAC na vazão do canal não é evidente. A Tabela 11 apresenta os coeficientes estatísticos derivados dos dados representados no gráfico.

Tabela 11. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade do RETDEPRTFAC no período de 13/03 a 01/06/2018.

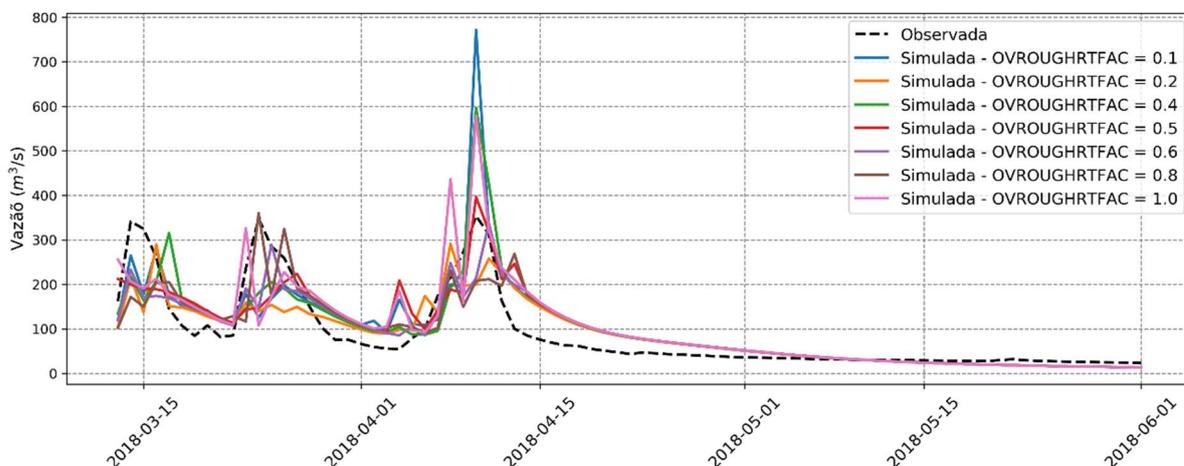
<b>RETDEPRTFAC</b>	<b>NSE</b>	<b>RSR</b>	<b>R</b>	<b>PBIAS</b>
0,1	0,45	0,67	0,75	13,64
0,5	0,38	0,78	0,69	12,79
1,0	0,47	0,73	0,78	15,82
3,0	0,46	0,62	0,79	-2,60

Fonte: autoria própria.

No sistema de modelagem do WRF-Hydro, geralmente espera-se que o escoamento superficial, e conseqüentemente, a vazão, diminua com o aumento de RETDEPRTFAC. Essa tendência não foi consistentemente observada, exceto para o valor mais alto, RETDEPRTFAC = 3, que exibiu o índice PBIAS mais baixo (-2,60), indicando a única subestimação dos dados simulados em relação aos dados observados.

Como observado em Liu et al. (2021a), assim como nos casos da Bacia do Rio Kaidu, na China (YU et al., 2023), e nas regiões do Mar Negro Oriental e Mediterrâneo (KILICARSLAN et al., 2021), em que os resultados de vazão mostraram quase nenhuma resposta ao RETDEPRTFAC, os índices estatísticos demonstram menor variabilidade em comparação com os outros parâmetros, sugerindo que RETDEPRTFAC possui uma sensibilidade mais fraca na simulação de vazão entre os parâmetros testados neste estudo. Isso pode ser devido a variações significativas na altitude e no terreno na área de estudo, como sugerido em Liu et al. (2021a), onde há pouco acúmulo em superfícies íngremes. Apesar de sua influência limitada, o valor padrão, RETDEPRTFAC = 1, produziu a melhor correlação R e um NSE mais próximo de 1. Com a determinação do valor do segundo parâmetro, são realizados os testes de sensibilidade da rugosidade do escoamento superficial. A Figura 21 apresenta os valores de cada vazão simulada de acordo com seu respectivo fator OVROUGHRTFAC e a vazão observada na estação Itacajá.

Figura 21. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação de Itacajá com testes de sensibilidade do OVROUGHRTFAC.



Fonte: autoria própria.

Assim, como no estudo desenvolvido em uma bacia hidrográfica do Texas – EUA (ZHANG et al., 2020), os processos de escoamento e infiltração foram mais sensíveis ao REFKDT e ao OVROUGHRTFAC. Conseqüentemente alterando significativamente os dados de vazão em determinados valores de OVROUGHRTFAC, mudando o formato dos hidrogramas, exibindo picos de vazão em tempos e valores diferentes. No ponto máximo das simulações observadas, por exemplo, por volta de 10 de abril de 2018, a vazão é maior quando OVROUGHRTFAC é 0,1 do que quando este parâmetro é 0,5; o que, por sua vez, é maior quando OVROUGHRTFAC = 0,8. A Tabela 12 mostra os coeficientes estatísticos para todos os valores do parâmetro.

Tabela 12. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade do OVROUGHRTFAC no período de 13/03 a 01/06/2018.

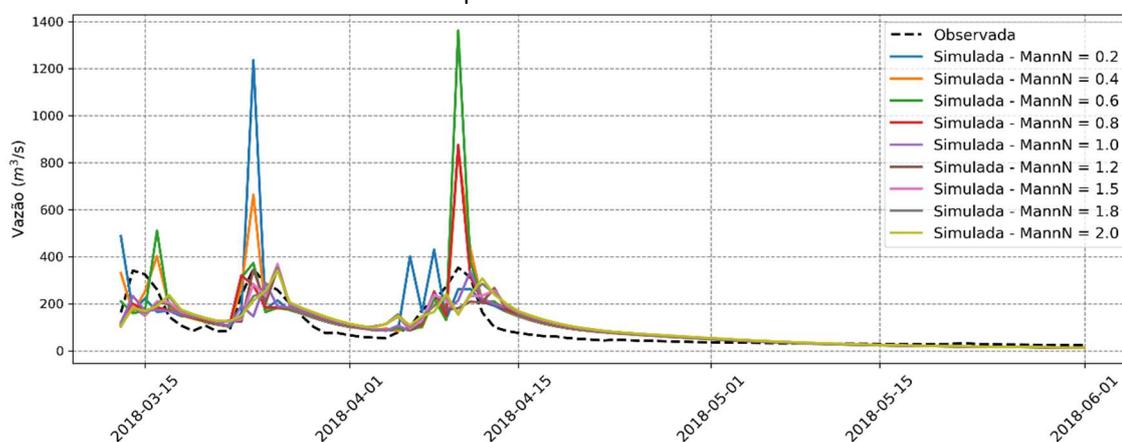
<b>OVROUGHRTFAC</b>	<b>NSE</b>	<b>RSR</b>	<b>R</b>	<b>PBIAS</b>
0,1	0,44	0,75	0,77	13,26
0,2	0,62	0,61	0,79	10,35
0,4	0,57	0,66	0,80	10,06
0,5	0,63	0,61	0,80	10,38
0,6	0,69	0,56	0,83	4,99
0,8	0,61	0,62	0,79	6,00
1,0	0,47	0,73	0,78	17,82

Fonte: autoria própria.

Observa-se, como em LIU et al. (2021a), que este parâmetro teve um impacto bastante significativo na melhoria dos índices estatísticos ao variar o OVROUGHRTFAC em relação ao seu valor padrão, exceto quando OVROUGHRTFAC = 0,1. Nesses casos de melhoria, o NSE, que é o índice estatístico usado em todos os estudos envolvendo vazão com o WRF-Hydro, melhorou em uma escala de 21% a 47%. Os outros índices estatísticos também melhoraram consideravelmente, tornando-o, juntamente com REFKDT, o parâmetro que mais influenciou a simulação de vazão neste estudo. Quando OVROUGHRTFAC = 0,6, todos os índices estatísticos apresentaram os melhores resultados: NSE e R mais próximos de 1, e RSR e PBIAS menores em módulo.

Por fim, após analisar a transmissão do escoamento superficial para a rede fluvial, o transporte de água ao longo dos canais foi avaliado por meio do teste de sensibilidade do parâmetro de rugosidade do canal (MannN), que também pode afetar a forma do hidrograma. Neste estudo, os valores foram estabelecidos com base na calibração realizada por Quenum et al. (2022), abrangendo uma série de valores que variam entre 0,2 e 2, incluindo incrementos de 0,2. A Figura 22 mostra as vazões simuladas com seus respectivos parâmetros MannN e as vazões medidas na estação fluviométrica.

Figura 22. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas na estação Itacajá com testes de sensibilidade do parâmetro MannN .



Fonte: autoria própria.

Quando os coeficientes MannN variaram de 0,2 a 0,8, os picos das vazões simuladas foram significativamente maiores em comparação com os valores obtidos quando MannN era igual ou superior a 1. Nesse intervalo, não foram observadas vazões superiores a 400 m³/s, indicando uma estabilização dos picos de vazão. A Tabela 13 exibe os índices estatísticos para cada valor de MannN observado.

Tabela 13. Índices estatísticos da comparação entre as vazões observadas na estação Itacajá e simuladas pelo WRF-Hydro, com os testes de sensibilidade para MannN no período de 13/03 a 01/06/2018.

<b>MannN</b>	<b>NSE</b>	<b>RSR</b>	<b>R</b>	<b>PBIAS</b>
0,2	-0,81	1,35	0,65	26,32
0,4	0,10	0,95	0,81	25,09
0,6	-0,92	1,39	0,69	26,27
0,8	0,32	0,82	0,77	15,08
1,0	0,69	0,56	0,83	4,99
1,2	0,61	0,62	0,79	8,36
1,5	0,61	0,62	0,79	10,79
1,8	0,58	0,65	0,78	11,29
2,0	0,57	0,66	0,77	10,28

Fonte: autoria própria.

A superestimação mais acentuada apresentada graficamente quando MannN é inferior a 1 é comprovada pelo índice PBIAS, que apresenta maiores resultados nesses casos, chegando ser superior a 5 vezes o menor valor obtido, quando MannN é 1 (PBIAS = 4,99). Todos os outros índices estatísticos foram melhores no valor padrão do parâmetro de rugosidade do canal, quando MannN = 1.

Portanto, o melhor desempenho na simulação de vazão com o WRF-Hydro apresentado neste estudo foi alcançado quando REFKDT = 0,6; RETDEPRTFAC = 1,0; OVROUGHRTFAC = 0,6 e MannN = 1,0. Os índices estatísticos NSE = 0,69, RSR = 0,56, R = 0,83 e PBIAS = 4,99 indicam que os resultados obtidos são bons. Liu et al. (2021b) descrevem que a faixa de  $NSE > 0,65$  e  $RSR \leq 0,60$  é considerada boa para a avaliação de modelos hidrológicos e o índice  $-10 < PBIAS < 10$  é considerado muito bom, conforme avaliação proposta por Moriasi et al. (2007), apresentada na Tabela 14.

Tabela 14. Avaliação de desempenho de modelos hidrológicos a partir dos coeficientes de desvio padrão das observações, eficiência de Nash-Sutcliffe e viés percentual.

<b>Classificação de Desempenho</b>	<b>RSR</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>
Muito bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$-10 < PBIAS < 10$
Bom	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$-15 < PBIAS \leq -10$ ou $10 \leq PBIAS < 15$
Satisfatório	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$-25 < PBIAS \leq -15$ ou $15 \leq PBIAS < 25$
Insatisfatório	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \leq -25$ ou $PBIAS \geq 25$

Fonte: adaptado de Moriasi et al. (2007).

Em sua melhor simulação de vazão com o WRF-Hydro em modo acoplado, Quenum et al. (2022) obtiveram um índice de correlação  $R = 0,84$ . Naabil et al. (2017) alcançaram  $R = 0,83$  e  $NSE = 0,70$  e Kerandi et al. (2018) relataram  $NSE = 0,71$  e  $RSR = 0,51$ .

#### 4.2.2 Comparação das vazões simuladas com as observadas nas Estações Jacaré e Goiatins utilizando os valores dos parâmetros selecionados

Nas estações Jacaré e Goiatins, que medem a vazão dos rios Vermelho e Manuel Alves Grande, respectivamente, o mesmo evento de chuva da estação Itacajá, cobrindo o período de 13 de março a 1 de junho de 2018, foi analisado. Por se tratar da mesma simulação, a escolha padrão dos valores dos parâmetros do modelo hidrológico foi mantida. A Tabela 15 mostra os parâmetros estatísticos para os resultados dessas simulações.

Tabela 15. Índices estatísticos obtidos pela comparação das vazões observados nas estações Jacaré e Goiatins com as simulações do WRF-Hydro, usando testes de sensibilidade para os parâmetros REFKDT, RETDEPRTFAC, OVROUGHRTFAC e MannN no período de 13/03 a 01/06/2018.

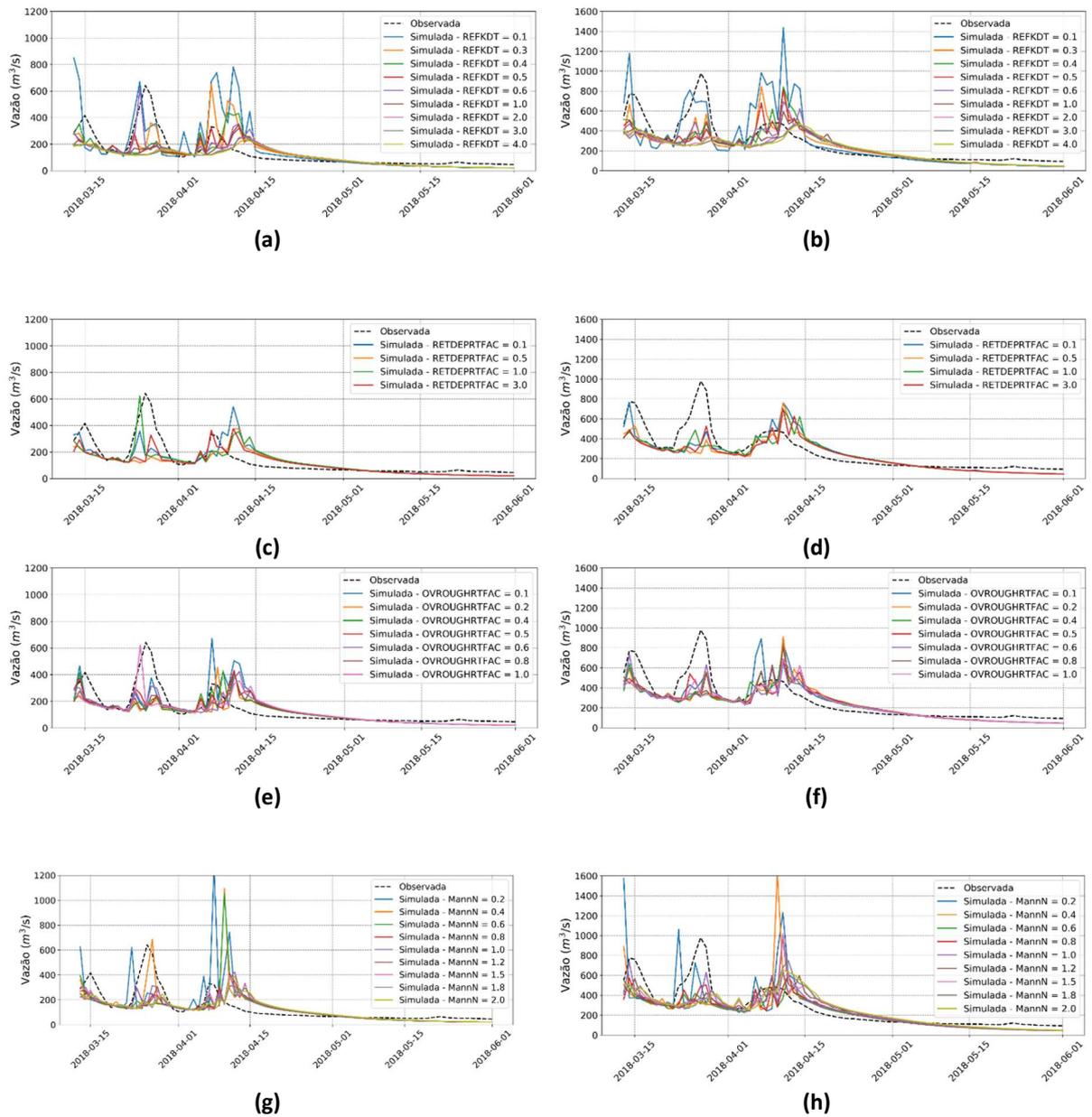
	Estação Jacaré				Estação Goiatins			
	NSE	RSR	R	PBIAS	NSE	RSR	R	PBIAS
<b>REFKDT</b>								
0,1	-0,61	1,27	0,64	24,54	0,06	0,97	0,75	8,87
0,3	0,25	0,87	0,61	-3,80	0,51	0,70	0,74	-12,08
0,4	0,17	0,91	0,61	-3,80	0,50	0,70	0,74	-12,13
0,5	0,33	0,82	0,59	-13,79	0,46	0,73	0,70	-12,67
0,6	0,37	0,79	0,63	-9,43	0,50	0,71	0,75	-13,96
1,0	0,29	0,84	0,57	-16,58	0,51	0,70	0,75	-16,08
2,0	0,17	0,91	0,48	-22,55	0,38	0,79	0,68	-21,29
3,0	0,17	0,91	0,48	-23,31	0,33	0,82	0,65	-22,39
4,0	0,18	0,91	0,51	-24,80	0,36	0,80	0,66	-20,67
<b>RETDEPRTFAC</b>								
0,1	0,30	0,83	0,60	-5,78	0,50	0,71	0,75	-10,18
0,5	0,19	0,90	0,50	-14,48	0,43	0,75	0,69	-17,17
1,0	0,37	0,79	0,63	-9,43	0,50	0,71	0,75	-13,96
3,0	0,38	0,78	0,64	-14,86	0,50	0,71	0,79	-17,44
<b>OVROUGHRTFAC</b>								
0,1	0,16	0,91	0,59	1,93	0,50	0,71	0,73	-8,46
0,2	0,27	0,85	0,56	-16,95	0,50	0,70	0,73	-10,75
0,4	0,30	0,84	0,58	-13,79	0,49	0,71	0,73	-14,34
0,5	0,38	0,79	0,63	-9,85	0,56	0,66	0,77	-12,79
0,6	0,39	0,79	0,64	-9,60	0,61	0,63	0,80	-13,78
0,8	0,33	0,82	0,60	-14,75	0,49	0,71	0,71	-10,16
1,0	0,37	0,79	0,63	-9,43	0,50	0,71	0,75	-13,96
<b>MannN</b>								
0,2	-0,91	1,38	0,42	7,10	-0,06	1,03	0,61	-4,65
0,4	-0,12	1,06	0,54	-4,86	0,05	0,98	0,56	-13,87
0,6	-0,33	1,15	0,38	-8,13	0,54	0,68	0,78	-18,37
0,8	0,36	0,80	0,62	-11,92	0,61	0,62	0,82	-16,39
1,0	0,39	0,79	0,64	-9,60	0,61	0,63	0,80	-13,78
1,2	0,31	0,83	0,58	-14,14	0,45	0,74	0,70	-9,44
1,5	0,30	0,84	0,57	-12,96	0,43	0,75	0,68	-7,90
1,8	0,32	0,82	0,59	-12,63	0,44	0,75	0,68	-7,66
2,0	0,26	0,86	0,54	-11,49	0,43	0,75	0,67	-7,39

Fonte: autoria própria.

À semelhança das análises realizadas na estação Itacajá, os mesmos valores atribuídos a REFKDT, RETDEPRTFAC, OVROUGHRTFAC e MannN convergiram para os melhores índices estatísticos na maioria dos casos em que as simulações foram analisadas nas estações Jacaré e Goiatins. Além disso, a melhora nos resultados foi mais acentuada quando se alteraram os parâmetros REFKDT e OVROUGHRTFAC.

O coeficiente estatístico PBIAS é frequentemente menor à medida que os parâmetros do modelo hidrológico são maiores, especialmente para o parâmetro REFKDT, indicando uma diminuição no escoamento superficial e uma consequente redução na vazão simulada. A Figura 23 mostra as simulações comparadas com as estações Jacaré e Goiatins.

Figura 23. Vazões simuladas pelo WRF-Hydro e observadas nas estações Jacaré e Goiatins. (a) Estação Jacaré - REFKDT, (b) Estação Goiatins - REFKDT, (c) Estação Jacaré - RETDEPRTFAC, (d) Estação Goiatins - RETDEPRTFAC, (e) Estação Jacaré - OVROUGHRTFAC, (f) Estação Goiatins - OVROUGHRTFAC, (g) Estação Jacaré - MannN, (h) Estação Goiatins - MannN.



Fonte: autoria própria.

As Figuras 23a e 23b mostram essa relação do parâmetro REFKDT principalmente nos pontos de pico de vazão, em que os dois menores valores de REFKDT apresentam resultados de vazão consideravelmente superiores aos demais, que se encontram embaralhados em diversos momentos. Nas Figuras 23c a 23h também há alterações dos resultados de vazão com a variação dos parâmetros RETDEPRTFAC, OVROUGHRTFAC e MannN, mas sem um padrão gráfico claramente estabelecido. Nota-se que, em todos os gráficos da Figura 23, nos dois

primeiros picos da vazão observada, as simulações, em sua grande maioria, têm seus valores subestimados; já no último pico, as vazões simuladas são superestimadas.

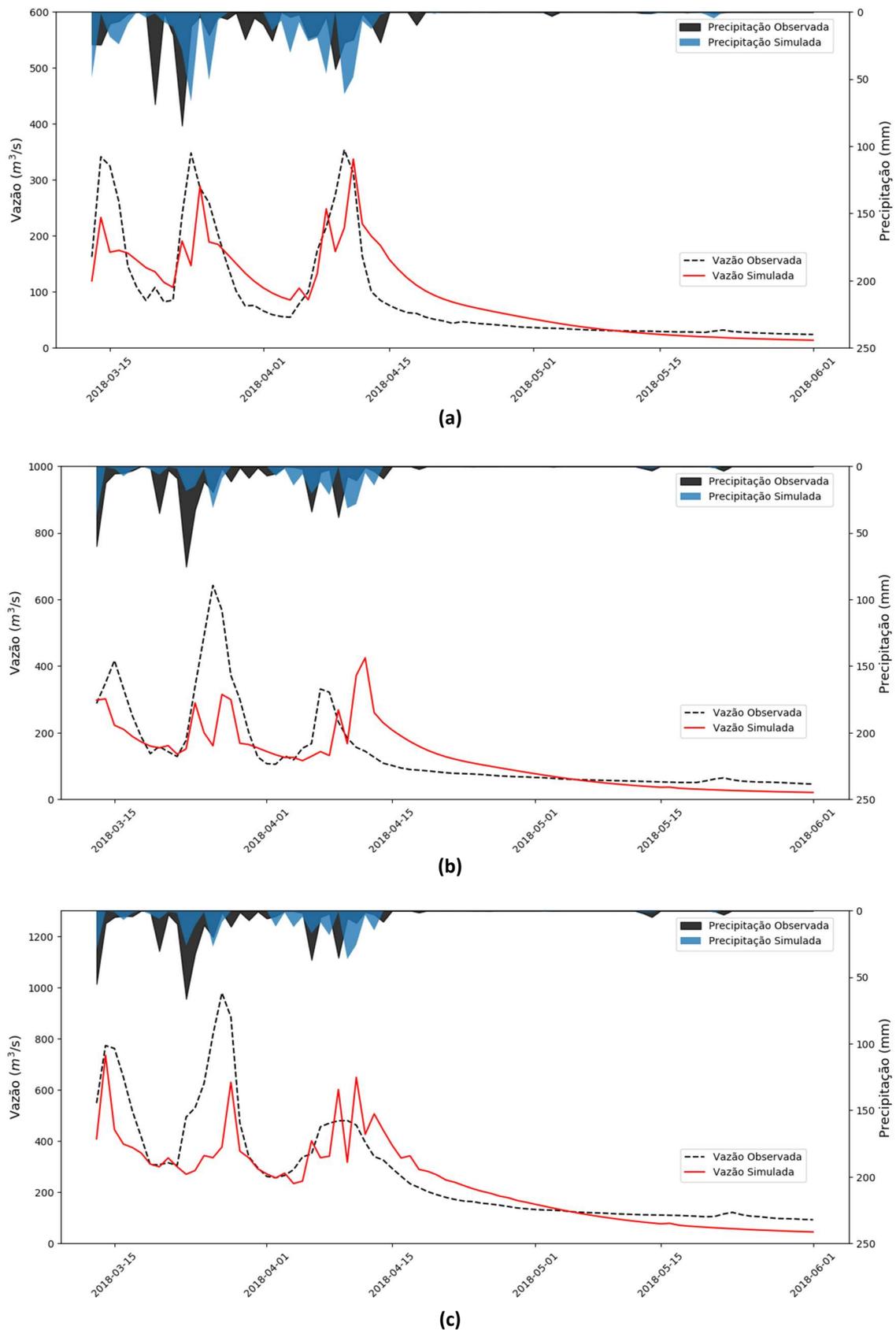
Os resultados da simulação do sistema de modelagem WRF-Hydro não estão apenas intimamente relacionados à incerteza dos parâmetros-chave, mas também aos dados de entrada. A incerteza inerente nas previsões climáticas causa necessariamente uma incerteza paralela nas previsões hidrológicas. Assim, as diferenças gráficas e a inferioridade dos índices estatísticos entre os resultados de vazão das simulações nessas estações com os resultados na localização da estação Itacajá, podem estar relacionadas a uma maior disparidade entre observação e simulação da chuva nas dimensões espacial e temporal. Isso pode resultar de erros nos dados direcionais, no caso deste trabalho, dos dados GDAS-FNL usados no WRF, o que afeta indiretamente o desempenho do WRF-Hydro na simulação vazão (LIU et al., 2021a).

#### **4.3 Avaliação do Erro na Precipitação Simulada**

Os valores de precipitação simulada, quando comparados aos valores observados, usando o produto MERGE na região da rede de drenagem do Rio Manuel Alves Pequeno (onde está localizada a estação Itacajá), exibem uma distribuição mais uniforme da chuva ao longo do tempo do que nas regiões da rede de drenagem dos Rios Manuel Alves Grande e Vermelho (onde estão localizadas as estações Goiatins e Jacaré, respectivamente). Isso afeta diretamente a diferença entre os picos de vazões simuladas e observadas e o momento em que ocorrem.

A Figura 24 exhibe as precipitações diárias acumuladas obtidas a partir da média aritmética dos valores do produto MERGE dentro da área da rede de drenagem de cada rio, bem como aquelas simuladas pelo módulo meteorológico e obtidas de maneira análoga, na mesma área. Também mostra as vazões diárias observadas nas estações de medição dos rios e as simuladas no modelo WRF-Hydro nos mesmos momentos de análise das precipitações, sob as condições de melhor desempenho.

Figura 24. Hidrogramas simulados pelo WRF-Hydro e observados nas estações (a) Itacajá, (b) Jacaré e (c) Goiatins, juntamente com seus respectivos hietogramas simulados e observados usando a técnica MERGE dentro da rede de drenagem de cada rio.



Fonte: autoria própria.

Nota-se que, principalmente, no segundo pico das vazões observadas apresentadas nas Figuras 24b e 24c (entre os dias 20/03 e 01/04/18), os resultados das vazões simuladas são consideravelmente subestimados em detrimento ao resultado apresentado na Figura 24a, que mostra uma subestimação mais amena. No momento relativamente anterior a esse segundo pico de vazão, há um ápice nos valores da precipitação observada, superior a 50 mm, que não é acompanhado nos resultados de precipitação simulados apresentados nas Figuras 24b e 24c, que são notavelmente inferiores nesse período. Nesse instante, a menor diferença entre o pico da precipitação observada e a simulada refletiu uma subestimação mais amena da vazão simulada da Figura 24a.

Essa comparação entre os hidrogramas com seus respectivos hietogramas ilustra a precipitação como o fator mais importante para simular vazão, conforme apresentado por Grim et al. (2023). Como a precipitação simulada é a utilizada como variável de entrada no módulo hidrológico do WRF-Hydro, o erro relativo (ER) é utilizado para quantificar a concordância entre a quantidade total de precipitações simulada ( $M_i$ ) e observada ( $O_i$ ) (TIAN et al., 2017a; LIU et al., 2021a; LOPES et al., 1996). Os valores de  $M_i$  e  $O_i$  são obtidos pelo total das precipitações diárias acumuladas referentes à rede de drenagem de cada um dos três rios analisados. Essas precipitações diárias são resultantes da média aritmética dos valores de cada ponto da grade do WRF-Hydro e do produto MERGE, respectivamente.

O ER tem uma certa relação com a homogeneidade espacial do evento de chuva intensa ocorrido no período analisado, como relatado em Wang et al. (2020). Essa homogeneidade é indicada pelo valor espacial do CV ( $CV_{esp}$ ) calculado pela Eq. 13, em que  $O_i$  é o acúmulo de chuva dos 81 dias da simulação do  $i$ -ésimo ponto das observações do produto MERGE, e  $N$  é o número de pontos de medição do produto MERGE (no caso da rede de drenagem do Rio Manuel Alves Pequeno  $N = 54$ ). Os valores de  $M_i$ ,  $O_i$ , ER e  $CV_{esp}$  encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16. Valores acumulados de precipitações diárias simuladas e observadas, coeficientes de variação espacial e erros relativos referentes aos pontos da grade dentro da respectiva rede de drenagem de cada rio no período de 13/03 a 01/06/2018.

<b>Rio</b>	<b>M<sub>i</sub> (mm)</b>	<b>O<sub>i</sub> (mm)</b>	<b>ER</b>	<b>CV<sub>esp</sub></b>
Manuel Alves Pequeno	572,73	517,55	0,11	0,09
Vermelho	304,56	441,45	0,31	0,19
Manuel Alves Grande	290,26	407,55	0,29	0,23

Fonte: autoria própria.

A área da rede de drenagem do Rio Manuel Alves Pequeno demonstra o melhor resultado na simulação da precipitação acumulada em relação às outras duas áreas, com o menor valor do ER = 0,11 e coincidindo com a distribuição mais uniforme das chuvas no espaço, com CV<sub>esp</sub> menor que a metade dos outros dois resultados.

Há pesquisas que relatam que em pequenas escalas de bacias hidrográficas, a qualidade e a quantidade de escoamento superficial, que influenciam diretamente nos resultados de vazão, foram melhores no cenário de uniformidade espacial de chuvas do que no cenário de não uniformidade espacial de chuvas (ZHOU et al., 2021).

Por outro lado, na rede de drenagem do Rio Vermelho encontram-se os piores resultados de simulação de precipitação de acordo com o valor de ER, que é o maior. A relação direta entre ER e CV<sub>esp</sub> não foi apresentada nesse caso, em que seus resultados entre as áreas das redes de drenagem dos rios Vermelho e Manuel Alves Grande foram relativamente próximos.

Entre os gráficos da Figura 24, que mostraram as simulações utilizando o conjunto de parâmetros hidrológicos considerado mais adequado para a região estudada (conforme Tabela 17), o primeiro apresenta os melhores resultados tanto na simulação de vazão quanto na de precipitação.

Tabela 17. Parâmetros hidrológicos analisados na simulação de vazão com os valores considerados mais adequados para a região de estudo no período de 13/03 a 01/06/2018.

<b>Parâmetros Hidrológicos</b>	<b>Melhor Resultado</b>
REFKDT	0,6
RETDEPRTFAC	1,0
OVROUGHRTFAC	0,6
MannN	1,0

Fonte: autoria própria.

Os resultados superiores na simulação de vazão são corroborados pelos índices estatísticos NSE, RSR, R e PBIAS, os quais foram calculados comparando a vazão simulada com a observada na estação Itacajá, pertencente ao rio Manuel Alves Pequeno. Este desempenho superior também reflete uma melhor simulação da precipitação na bacia hidrográfica desse rio, evidenciada por um menor erro relativo. Este menor erro pode estar relacionado a um evento de chuva mais homogêneo registrado na região, conforme indicado pelo produto MERGE e pelo menor coeficiente de variação espacial (CV<sub>esp</sub>). Os resultados detalhados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Índices estatísticos obtidos entre vazões simuladas com melhor o conjunto de parametrizações físicas e observadas em cada estação fluviométrica, ER e CV<sub>esp</sub> no período de 13/03 a 01/06/2018.

<b>Rio</b>	<b>NSE</b>	<b>RSR</b>	<b>R</b>	<b>PBIAS</b>	<b>ER</b>	<b>CV<sub>esp</sub></b>
Manuel Alves Pequeno	0,69	0,56	0,83	4,99	0,11	0,09
Vermelho	0,39	0,79	0,64	-9,60	0,31	0,19
Manuel Alves Grande	0,61	0,63	0,80	-13,78	0,29	0,23

Fonte: autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES

A gestão dos recursos hídricos desempenha papel crucial na garantia de uma distribuição sustentável da água, no enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e na expansão das áreas urbanas e agrícolas. Modelos hidrológicos são ferramentas essenciais para estimar o balanço hídrico, analisar os níveis de água subterrânea, os lançamentos de água superficial e projetar cenários para diferentes bacias hidrográficas. Esses modelos fornecem informações detalhadas sobre as condições hídricas de uma região, sendo fundamentais para embasar decisões relacionadas à alocação de água. No Brasil, um país com vasta disponibilidade de água doce e diversas regiões com grande produtividade agrícola, essa importância é ainda mais evidente.

Diversos modelos hidrológicos são empregados em pesquisas no Brasil, como o SWAT, LASH, SWMM e VIC. No entanto, os estudos com o WRF-Hydro, modelo reconhecido como referência em modelagem hidrológica e desenvolvido pelo NCAR, um dos principais centros de pesquisa atmosférica mundial, estão majoritariamente concentrados em outras regiões do planeta. O WRF-Hydro é capaz de realizar previsões e análises abrangentes de todos os principais componentes do ciclo hidrológico terrestre, como precipitação, vazão de rios, umidade do solo, inundações e água subterrânea. Esse modelo tem sido cada vez mais adotado globalmente em contextos diversos, abrangendo áreas como previsão de enchentes, projeções sazonais de recursos hídricos e avaliações de impacto hidroclimático regional, inclusive em áreas agrícolas.

Nesse contexto, este estudo avaliou o desempenho do sistema de modelagem WRF-Hydro totalmente acoplado em uma das principais áreas agrícolas do Brasil: a região MATOPIBA, especificamente na Bacia dos Rios Tocantins/Araguaia, entre os rios Sono e Araguaia. A avaliação foi realizada em duas etapas: a primeira para identificar o conjunto de parametrizações físicas mais adequado, uma vez que essa ferramenta avançada foi projetada para regiões com características climáticas diferentes das do Brasil. Nessa etapa, foram testados seis conjuntos de parametrizações físicas baseados em estudos realizados com o WRF e WRF-Hydro em regiões com climas semelhantes ao da área de estudo, sendo o teste conduzido a partir dos resultados de precipitação do modelo.

A análise dos resultados de precipitação do WRF-Hydro foi realizada no

período de 1º a 28 de março de 2019. Esses resultados foram comparados com os dados observados do produto MERGE para toda a região onde ocorreram os processos hidrológicos, cobrindo as redes de drenagem dos três rios analisados: Manuel Alves Pequeno, Vermelho e Manuel Alves Grande. Diferentes combinações de parâmetros físicos foram testadas, sendo que a configuração mais adequada utilizou os esquemas WSM6, Grell-3D e RRTMG para microfísica, cúmulos e camada limite planetária, respectivamente. Essa configuração apresentou os seguintes índices estatísticos:  $R = 0,75$ ;  $RMSE = 6,74$ ;  $RSR = 0,82$  e  $PBIAS = 30,23$  na comparação entre os resultados do WRF-Hydro e as observações do produto MERGE.

Com a definição do conjunto de parametrizações físicas a partir da análise da precipitação, foi avaliada a simulação das vazões dos três rios no período de 13 de março a 1º de junho de 2018. A análise focou em avaliar os parâmetros hidrológicos: parametrização do escoamento superficial (REFKDT), parâmetro controlador da profundidade de retenção superficial (RETDEPRTFAC), controlador da rugosidade da superfície (OVROUGHRTFAC) e o parâmetro de rugosidade para o canal (MannN). Testes de sensibilidade desses parâmetros foram realizados com base nos dados de vazão da estação de Itacajá, localizada no rio Manuel Alves Pequeno. Os parâmetros selecionados para as estações Jacaré e Goiatins, que medem a vazão dos rios Vermelho e Manuel Alves Grande, seguiram o mesmo padrão.

Os resultados indicaram que os parâmetros REFKDT e OVROUGHRTFAC tiveram o maior impacto nos índices estatísticos obtidos da comparação entre as vazões observada e simulada. Em muitos casos, o coeficiente estatístico PBIAS foi menor quando os parâmetros hidrológicos do modelo eram mais elevados, especialmente no caso do parâmetro REFKDT. Isso sugere que o aumento desses parâmetros pode reduzir o escoamento superficial e, conseqüentemente, a vazão simulada.

O melhor desempenho na simulação de vazão foi alcançado com os seguintes parâmetros: REFKDT = 0,6; RETDEPRTFAC = 1,0; OVROUGHRTFAC = 0,6; e MannN = 1,0. Os melhores índices estatísticos obtidos foram NSE = 0,69; RSR = 0,56;  $R = 0,83$ ; e  $PBIAS = 4,99$  na comparação com as observações da estação Itacajá. Esses resultados demonstram que o sistema de modelagem WRF-Hydro totalmente acoplado apresenta boa capacidade na simulação de vazões, destacando a significativa influência dos parâmetros hidrológicos do modelo.

Apesar das melhorias significativas obtidas com a calibração dos parâmetros hidrológicos, os resultados de vazão poderiam ser ainda melhores se os erros de entrada de precipitação no módulo hidrológico do WRF-Hydro fossem minimizados. Esses erros foram mais evidentes na rede de drenagem do Rio Vermelho, onde está localizada a estação fluviométrica Jacaré. Nesse caso, o erro relativo (ER) entre a precipitação simulada e observada no produto MERGE foi o maior ( $R = 0,31$ ), refletindo-se nos índices estatísticos de simulação de vazão, que foram mais baixos, mesmo com o melhor conjunto de parâmetros hidrológicos:  $NSE = 0,39$ ;  $RSR = 0,79$ ;  $R = 0,64$ ; e  $PBIAS = -9,60$ . A região da rede de drenagem do Rio Manuel Alves Grande, onde está localizada a estação Goiatins, apresentou um ER semelhante ( $R = 0,29$ ), mas com índices estatísticos relativamente melhores:  $NSE = 0,61$ ;  $RSR = 0,63$ ;  $R = 0,80$ ; e  $PBIAS = -13,78$ .

Este trabalho representa um avanço na aplicação do modelo WRF-Hydro no Brasil. Embora exista um estudo que aplicou o modelo em uma bacia hidrográfica no sul do país, de acordo com a revisão bibliográfica realizada, não foram apresentadas discussões relacionadas aos módulos, funcionalidades e parâmetros do modelo, bem como a outros fatores influenciadores dos resultados de vazão, como distribuições temporal e espacial das chuvas. As discussões apresentadas neste trabalho podem contribuir significativamente para a compreensão e o aprimoramento da aplicação do WRF-Hydro no contexto brasileiro, especialmente em termos de ajuste de parâmetros e análise de influências hidrológicas regionais.

## **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Ao simular a vazão dos rios, verificando a sensibilidade de parâmetros hidrológicos e considerando as precipitações simuladas e observadas nas redes de drenagem, esta pesquisa representa um ponto de partida para futuras iniciativas de modelagem hidrológica utilizando o WRF-Hydro na região MATOPIBA e em outras áreas do Brasil.

As parametrizações físicas e os testes hidrológicos de sensibilidade utilizados, podem ser empregados em outros eventos de chuva intensa no mesmo domínio e em outras áreas, para aprofundar a relação entre os resultados da simulação com eventos de chuva ou características climáticas da região, respectivamente.

Outros dados climáticos globais podem ser testados no processo de simulação

meteorológica, como ERA-Interim que pode apresentar melhores resultados que o sistema GDAS-FNL em algumas regiões.

A considerável sensibilidade dos parâmetros hidrológicos, verificada neste trabalho especialmente nos valores de REFKDT e OVROUGHRTFAC, sugere possíveis estudos para a automatização dos testes de parametrização, que se mostram necessários dependendo das características do domínio em questão.

## REFERÊNCIAS

- AL KHOURY, I.; BOITHIAS, L.; LABAT, D. **A Review of the Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in Karst Watersheds.** *Water*, v. 15, n. 5, p. 954, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15050954>.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Portal HidroWeb - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).** Brasília, DF: ANA, 2023. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Último acesso em 10 de outubro de 2023.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019: Informe Anual.** Brasília, DF: ANA, 2019. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Último acesso em 13 de junho de 2023.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Tocantins e Araguaia: Relatório Síntese.** Brasília, DF: ANA, 2009. Disponível em: [https://www.senado.gov.br/comissoes/CDR/AP/AP20090528\\_ANA-Jos%C3%A9LuizZobiRioTocantins-Araguaia.pdf](https://www.senado.gov.br/comissoes/CDR/AP/AP20090528_ANA-Jos%C3%A9LuizZobiRioTocantins-Araguaia.pdf). Último acesso em 13 de junho de 2023.
- ANDRADE, N. P.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L.; GUO, L.; MELLO, C. R. **Assessment of Spatial and Temporal Soil Water Storage Using a Distributed Hydrological Model.** *Water Resources Management*, v. 34, p. 5031-5046, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02711-4>.
- ARNAULT, J.; FERSCH, B.; RUMMLER, T.; ZHANG, Z.; QUENUM, G. M.; WEI, J.; KUNSTMANN, H. **Lateral Terrestrial Water Flow Contribution to Summer Precipitation at Continental Scale - A Comparison Between Europe and West Africa with WRF-Hydro-Tag Ensembles.** *Hydrological Processes*, v. 35, n. 5, p. 14183, 2021. <https://doi.org/10.1002/hyp.14183>.
- ARNAULT, J.; WAGNER, S.; RUMMLER, T.; FERSCH, B.; BLIEFERNICHT, J.; ANDRESEN, S.; KUNSTMANN, H. **Role of Runoff-Infiltration Partitioning and Resolved Overland Flow on Land-Atmosphere Feedbacks: A Case Study with the WRF-Hydro Coupled Modeling System for West Africa.** *Journal of Hydrometeorology*, v. 17, n. 5, p. 1489-1516, 2016. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0089.1>.
- ARNAULT, J.; WEI, J.; RUMMLER, T.; FERSCH, B.; ZHANG, Z.; JUNG, G.; KUNSTMANN, H. **A Joint Soil-Vegetation-Atmospheric Water Tagging Procedure with WRF-Hydro: Implementation and Application to the Case of Precipitation Partitioning in The Upper Danube River Basin.** *Water Resources Research*, v. 55, n. 7, p. 6217-6243, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019WR024780>.
- AVOLIO, E.; CAVALCANTI, O.; FURNARI, L.; SENATORE, A.; MENDICINO, G. **Brief Communication: Preliminary Hydro-Meteorological Analysis of the Flash Flood of 20 August 2018 in Raganello Gorge, Southern Italy.** *Natural Hazards*

- and Earth System Sciences*, v. 19, n. 8, p. 1619-1627, 2019. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1619-2019>.
- BAE, S. Y.; HONG, S. Y.; LIM, K. S. S. **Coupling WRF Double-Moment 6-Class Microphysics Schemes to RRTMG Radiation Scheme in Weather Research Forecasting Model.** *Advances in Meteorology*, p. 1-11, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5070154>.
- BAGATIN, R.; KLEMES, J. J.; REVERBERI, A. P.; HUISINGH, D. **Conservation and Improvements in Water Resource Management: A Global Challenge.** *Journal of Cleaner Production*, v. 77, p. 1-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.027>.
- BOUGEAULT, P.; LACARRERE, P. **Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta-Scale Model.** *Monthly Weather Review*, v. 117, n. 8, p. 1872-1890, 1989. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2).
- CAMERA, C.; BRUGGEMAN, A.; ZITTIS, G.; SOFOKLEOUS, I.; ARNAULT, J. **Simulation of Extreme Rainfall and Streamflow Events in Small Mediterranean Watersheds with a One-Way-Coupled Atmospheric-Hydrologic Modelling System.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 20, n. 10, p. 2791-2810, 2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2791-2020>.
- CASTRO, A.; CUARTAS, L. A.; COE, M. T.; VON RANDOW, C.; CASTANHO, A.; OVANDO, A.; COSTA, M. H. **Coupling the Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry to the Integrated LAND Surface Model: Amazon Basin Applications.** *Hydrological Sciences Journal*, v. 63, n. 13-14, p. 1954-1966, 2018. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1538592>.
- CERBELAUD, A.; LEFÈVRE, J.; GENTHON, P.; MENKES, C. **Assessment of the WRF-Hydro Uncoupled Hydro-Meteorological Model on Flashy Watersheds of the Grande Terre Tropical Island of New Caledonia (South-West Pacific).** *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 40, p. 101003, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101003>.
- CHEN, S. H.; SUN, W. Y. **A One-Dimensional Time Dependent Cloud Model.** *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, v. 80, n. 1, p. 99-118, 2002. <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.99>.
- CHO, K.; KIM, Y. **Improving Streamflow Prediction in the WRF-Hydro Model with LSTM Networks.** *Journal of Hydrology*, v. 605, p. 127297, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127297>.
- COE, M. T.; COSTA, M. H.; BOTTA, A.; BIRKETT, C. **Long-Term Simulations of Discharge and Floods in the Amazon Basin.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 107, p. 1-17, 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JD000740>.
- COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2500>.  
Último acesso em 10 de novembro de 2023.

COSTA, S. B.; HERDIES, D. S.; SOUZA, D. O. **Extreme Precipitation Events on the East Coast of Brazil's Northeast: Numerical and Diagnostic Analysis.** *Water*, v. 14, n. 19, p. 3135, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14193135>.

CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Produto de Precipitação MERGE.** Brasília, DF: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2024. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/DAILY/>. Último acesso em 10 janeiro de 2024.

CRISTO, S. S. V.; ROBAINA, L. E. S. **Caracterização da Rede Hidrográfica na Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins, Estados do Tocantins e Bahia.** *Geografia Ensino & Pesquisa*, p. 103-116, 2014. <https://doi.org/10.5902/2236499414729>.

CUNHA, Z.A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; VARGAS, M.M.; GUZMAN, J.A.; MOURA, M.M. **A Modeling Approach for Analyzing the Hydrological Impacts of the Agribusiness Land-Use Scenarios in an Amazon Basin.** *Land*, v. 12, n. 7, p. 1422, 2023. <https://doi.org/10.3390/land12071422>.

DAS, M. K.; CHOWDHURY, M. A. M.; DAS, S. **Sensitivity Study with Physical Parameterization Schemes for Simulation of Mesoscale Convective Systems Associated with Squall Events.** *International Journal of Earth and Atmospheric Science*, v. 2, n. 2, p. 20-36, 2015.

DUDHIA, J. **Numerical Study of Convection Observed During the Winter Monsoon Experiment using a Mesoscale Two-Dimensional Model.** *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 46, n. 20, p. 3077-3107, 1989. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. **O Agro no Brasil e no Mundo.** Brasília, DF: EMBRAPA, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/26187851/O+agro+no+Brasil+e+no+mundo/098fc6c1-a4b4-7150-fad7-aaa026c94a40#:~:text=O%20Brasil%20atingiu%20o%20posto,3%20trilh%C3%B5es%20de%20d%C3%B3lares%20americanos>. Último acesso em 15 de setembro de 2023.

FALCK, A. S.; MAGGIONI, V.; TOMASELLA, J.; VILA, D. A.; DINIZ, F. L. **Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil.** *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 943-957, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>.

FARJALLA, V.F.; PIRES, A.P.F.; AGOSTINHO, A.A.; AMADO, A.M.; BOZELLI, R.L.; DIAS, B.F.S.; DIB, V.; FARIA, B.M.; FIGUEIREDO, A.; GOMES, E.A.T. **Turning Water Abundance Into Sustainability in Brazil.** *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, p. 727051, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.727051>.

- FERREIRA, A. D. N.; DE ALMEIDA, A.; KOIDE, S.; MINOTI, R. T.; SIQUEIRA, M. B. B. D. **Evaluation of Evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome Simulated with the SWAT Model.** *Water*, v. 13, n. 15, p. 2037, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13152037>.
- FERSCH, B.; SENATORE, A.; ADLER, B.; ARNAULT, J.; MAUDER, M.; SCHNEIDER, K.; KUNSTMANN, H. **High-resolution fully coupled atmospheric–hydrological modeling: a cross-compartment regional water and energy cycle evaluation.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 5, p. 2457-2481, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2457-2020>.
- FONTES, V. C. **Efeitos da Expansão Agrícola na Disponibilidade Hídrica Do oeste da Bahia via Modelagem Hidrológica.** Tese de Doutorado em Meteorologia Aplicada - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/29012>. Último acesso em 05 de dezembro de 2023.
- FURNARI, L.; MENDICINO, G.; SENATORE, A. **Hydrometeorological ensemble forecast of a highly localized convective event in the Mediterranean.** *Water*, v. 12, n. 6, p. 1545, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12061545>.
- GALANAKI, E.; LAGOUVARDOS, K.; KOTRONI, V.; GIANNAROS, T.; GIANNAROS, C. **Implementation of WRF-Hydro at Two Drainage Basins in the Region of Attica, Greece.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, p. 1-28, 2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-26>.
- GHONCHEPOUR, D.; SADODDIN, A.; BAHREMAND, A.; CROKE, B.; JAKEMAN, A.; SALMANMAHINY, A. **A Methodological Framework for the Hydrological Model Selection Process in Water Resource Management Projects.** *Natural Resource Modeling*, v. 34, n. 3, p. 12326, 2021. <https://doi.org/10.1111/nrm.12326>.
- GIVATI, A.; GOCHIS, D.; RUMMLER, T.; KUNSTMANN, H. **Comparing One-Way and Two-Way Coupled Hydrometeorological Forecasting Systems for Flood Forecasting in the Mediterranean Region.** *Hydrology*, v. 3, n. 2, p. 19, 2016. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020019>.
- GOCHIS, D.J.; M. BARLAGE, R. CABELL, M. CASALI, A. DUGGER, K. FITZGERALD, M. MCALLISTER, J. MCCREIGHT, A. RAFIEEINASAB, L. READ, K. SAMPSON, D. YATES, Y. ZHANG. **The WRF-Hydro modeling system technical description, (Version 5.2.0).** NCAR Technical Note, 2021. Disponível em: <https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/projects/wrf-hydro/technical-description-user-guide/wrf-hydrov5.2technicaldescription.pdf>. Último acesso em 26 de janeiro de 2024.
- GOMES, D. J. C.; FERREIRA, N. S.; LIMA, A. M. M. **Tendências de Variabilidade Espaço-Temporal Pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Araguaia.** *Enciclopédia Biosfera*, v. 16, n. 29, 2019. [https://doi.org/10.18677/EnciBio\\_2019A126](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2019A126).

- GRAF, M.; ARNAULT, J.; FERSCH, B.; KUNSTMANN, H. **Is the Soil Moisture Precipitation Feedback Enhanced by Heterogeneity and Dry Soils? A Comparative Study.** *Hydrological Processes*, v. 35, n. 9, p. 14332, 2021. <https://doi.org/10.1002/hyp.14332>.
- GRELL, G. A. **Prognostic Evaluation of Assumptions used by Cumulus Parameterizations.** *Monthly weather review*, v. 121, n. 3, p. 764-787, 1993. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2).
- GRELL, G. A.; DEVENYI, D. **A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques.** *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 14, 2002. <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>.
- GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. **A Scale and Aerosol Aware Stochastic Convective Parameterization for Weather and Air Quality Modeling.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 14, n. 10, p. 5233-5250, 2014. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>.
- GRIM, J. A.; ZHANG, Y.; GOCHIS, D. J. **Impact of the Alamosa Gap-Filling Radar on Streamflow in the National Water Model.** *Frontiers in Earth Science*, v. 10, p. 995424, 2023. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.995424>.
- HONG, S. Y.; LIM, J. O. J. **The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6).** *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, v. 42, n. 2, p. 129-151, 2006. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120362377>. Último acesso em 16 Julho de 2022.
- HUNT, K. M.; MENON, A. **The 2018 Kerala floods: a climate change perspective.** *Climate Dynamics*, v. 54, n. 3-4, p. 2433-2446, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05123-7>.
- HYDROSHEDS. **Shoreline Polygons of all Global Lakes (HydroLAKES).** HYDROSHEDS, 2023 Disponível em: <https://www.hydrosheds.org/products/hydrolakes>. Último acesso em 12 de agosto de 2024.
- IACONO, M. J.; DELAMERE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; & COLLINS, W. D. **Radiative Forcing by Long-Lived Greenhouse Gases: Calculations with the AER Radiative Transfer Models.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 113, n. 13, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>.
- JANJIC, Z. I. **Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso Model.** *NCEP Office Note*, n. 437, 2002. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/11409>. Último acesso em 07 outubro de 2023.
- JANJIC, Z. I. **The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes.** *Monthly Weather Review*, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2).

- JANKOV, I.; GALLUS JR, W. A.; SEGAL, M.; KOCH, S. E. **Influence of initial conditions on the WRF-ARW model QPF response to physical parameterization changes.** *Weather and Forecasting*, v. 22, n. 3, p. 501-519, 2007. <https://doi.org/10.1175/WAF998.1>.
- JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; NAVARRO, J.; MONTÁVEZ, J. P.; GARCÍA, B. E. **A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation.** *Monthly weather review*, v. 140, n. 3, p. 898-918, 2012. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1>.
- KAIN, J. S. **The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update.** *Journal of applied meteorology*, v. 43, n. 1, p. 170-181, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).
- KAT, C. J.; ELS, P. S. **Validation Metric Based on Relative Error.** *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, v. 18, n. 5, p. 487-520, 2012. <https://doi.org/10.1080/13873954.2012.663392>.
- KERANDI, N.; ARNAULT, J.; LAUX, P.; WAGNER, S.; KITHEKA, J.; KUNSTMANN, H. **Joint Atmospheric-Terrestrial Water Balances for East Africa: A WRF-Hydro Case Study for the Upper Tana River Basin.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 131, p. 1337-1355, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2050-8>.
- KILICARSLAN, B. M.; YUCEL, I.; PILATIN, H.; DUZENLI, E.; YILMAZ, M. T. **Improving WRF-Hydro Runoff Simulations of Heavy Floods Through the Sea Surface Temperature Fields with Higher Spatio-Temporal Resolution.** *Hydrological Processes*, v. 35, n. 9, p. 14338, 2021. <https://doi.org/10.1002/hyp.14338>.
- KITAGAWA, Y. K. L.; NASCIMENTO, E. G. S.; SOUZA, N. B. P. D.; ZUCATELLI JUNIOR, P.; KUMAR, P.; ALBUQUERQUE, T. T. D. A.; MOREIRA, D. M. **Evaluation of the WRF-ARW Model During an Extreme Rainfall Event: Subtropical Storm Guara.** *Atmosfera*, v. 35, n. 4, p. 651-672, 2022. <https://doi.org/10.20937/atm.52977>.
- LAHMERS, T. M.; CASTRO, C. L.; HAZENBERG, P. **Effects of Lateral Flow on the Convective Environment in a Coupled Hydrometeorological Modeling System in a Semiarid Environment.** *Journal of Hydrometeorology*, v. 21, n. 4, p. 615-642, 2020. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0100.1>.
- LAHMERS, T. M.; GUPTA, H.; CASTRO, C. L.; GOCHIS, D. J.; YATES, D.; DUGGER, A.; HAZENBERG, P. **Enhancing the Structure of the WRF-Hydro Hydrologic Model for Semiarid Environments.** *Journal of Hydrometeorology*, v. 20, n. 4, p. 691-714, 2019. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0064.1>.
- LI, G.; MENG, X.; BLYTH, E.; CHEN, H.; SHU, L.; LI, Z.; MA, Y. **Impact of Fully Coupled Hydrology-Atmosphere Processes on Atmosphere Conditions: Investigating the Performance of the WRF-Hydro Model in the Three River Source Region on the Tibetan Plateau, China.** *Water*, v. 13, n. 23, p. 3409, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13233409>.

- LI, L.; GOCHIS, D. J.; SOBOLOWSKI, S.; MESQUITA, M. D. **Evaluating the present annual water budget of a Himalayan headwater river basin using a high-resolution atmosphere-hydrology model.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 122, n. 9, p. 4786-4807, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JD026279>.
- LI, L.; PONTOPPIDAN, M.; SOBOLOWSKI, S.; SENATORE, A. **The Impact of Initial Conditions on Convection-Permitting Simulations of a Flood Event Over Complex Mountainous Terrain.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 2, p. 771-791, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-771-2020>
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. **A Simple Hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for General Circulation Models.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994. <https://doi.org/10.1029/94JD00483>.
- LIM, K. S. S.; HONG, S. Y. **Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models.** *Monthly weather review*, v. 138, n. 5, p. 1587-1612, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>.
- LIN, P.; YANG, Z. L.; GOCHIS, D. J.; YU, W.; MAIDMENT, D. R.; SOMOS-VALENZUELA, M. A.; DAVID, C. H. **Implementation of a Vector-Based River Network Routing Scheme in the Community WRF-Hydro Modeling Framework for Flood Discharge Simulation.** *Environmental Modelling and Software*, v. 107, p. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.018>.
- LIU, S.; WANG, J.; WEI, J.; WANG, H. **Hydrological Simulation Evaluation with WRF-Hydro in a Large and Highly Complicated Watershed: The Xijiang River Basin.** *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 38, p. 100943, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100943>.
- LIU, Y.; CHEN, X.; LI, Q.; YANG, J.; LI, L.; WANG, T. **Impact of Different Microphysics and Cumulus Parameterizations in WRF for Heavy Rainfall Simulations in the Central Segment of the Tianshan Mountains, China.** *Atmospheric research*, v. 244, p. 105052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105052>.
- LIU, Y.; LIU, J.; LI, C.; YU, F.; WANG, W.; QIU, Q. **Parameter Sensitivity Analysis of the WRF-Hydro Modeling System for Streamflow Simulation: A Case Study in Semi-Humid and Semi-Arid Catchments of Northern China.** *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, v. 57, p. 451-466, 2021a. <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00205-2>.
- LIU, Y.; ZHUO, L.; HAN, D. **Developing spin-up time framework for WRF extreme precipitation simulations.** *Journal of Hydrology*, v. 620, p. 129443, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129443>.
- LOPES, V. L. **On the Effect of Uncertainty in Spatial Distribution of Rainfall on Catchment Modelling.** *Catena*, v. 28, n. 1-2, p. 107-119, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00030-6).

- MAGALHÃES, L. A.; MIRANDA, E. E. **MATOPIBA: Quadro Natural**. Campinas, SP: EMBRAPA, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1037412>. Último acesso em 13 de junho de 2023.
- MAJIDZADEH, H.; UZUN, H.; RUECKER, A.; MILLER, D.; VERNON, J.; ZHANG, H.; CHOW, A. T. **Extreme Flooding Mobilized Dissolved Organic Matter from Coastal Forested Wetlands**. *Biogeochemistry*, v. 136, p. 293-309, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0394-x>.
- MANABE, S. **Climate and the Ocean Circulation: I. The Atmospheric Circulation and the Hydrology of the Earth's Surface**. *Monthly weather review*, v. 97, n. 11, p. 739-774, 1969. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0739:CATOC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0739:CATOC>2.3.CO;2).
- MARSHALL, L.; NOTT, D.; SHARMA, A. **Hydrological Model Selection: A Bayesian Alternative**. *Water Resources Research*, v. 41, n. 10, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004WR003719>.
- MARTINS-FILHO, P. R.; CRODA, J.; ARAÚJO, A. A. D. S.; CORREIA, D.; QUINTANS-JÚNIOR, L. J. **Catastrophic Floods in Rio Grande do Sul, Brazil: The Need for Public Health Responses to Potential Infectious Disease Outbreaks**. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, v. 57, p. e00603-2024, 2024. <https://doi.org/10.1590/0037-8682-0162-2024>.
- MAURIZ, T.V.M. **Análise Do Inventário Hidroelétrico da Bacia do rio do sono—TO, Subsídio Para a Identificação de Variáveis Socioambientais Aplicadas na Construção de um Modelo de Inventário Hidroelétrico Dinâmico**. Dissertação de Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <https://bdtd.ucb.br:8443/jspui/handle/123456789/1748>. Último acesso em 17 de setembro de 2023.
- MCDONNELL, B. E.; RATLIFF, K.; TRYBY, M. E.; WU, J. J. X.; MULLAPUDI, A. **PYSWMM: The Python Interface to Stormwater Management Model (SWMM)**. *Journal of Open Source Software*, v. 5, n. 52, p. 1, 2020. <https://doi.org/10.21105/joss.02292>.
- MELLO, C. D.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. **Development and Application of a Simple Hydrologic Model Simulation for a Brazilian Headwater Basin**. *Catena*, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.002>.
- MERINO, A.; GARCÍA-ORTEGA, E.; NAVARRO, A.; SÁNCHEZ, J. L.; TAPIADOR, F. J. **WRF hourly evaluation for extreme precipitation events**. *Atmospheric Research*, v. 274, p. 106215, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106215>.
- MESSAGER, M. L.; LEHNER, B.; GRILL, G.; NEDEVA, I.; SCHMITT, O. (2016). **Estimating the volume and Age of Water Stored in Global Lakes using a Geo-**

- Statistical Approach.** *Nature communications*, v. 7, n. 1, p. 13603, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>.
- MILLY, P. C. D. **Climate, Interseasonal Storage of Soil Water, and the Annual Water Balance.** *Advances in Water Resources*, v. 17, n. 1-2, p. 19-24, 1994a. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0309-1708(94)90020-5).
- MILLY, P. C. D. **Climate, Soil Water Storage, and the Average Annual Water Balance.** *Water Resources Research*, v. 30, n. 7, p. 2143-2156, 1994b. <https://doi.org/10.1029/94WR00586>.
- MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. **Proposta de Delimitação Territorial do MATOPIBA.** Campinas: EMBRAPA, 2014. Disponível em: [https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1\\_DelimitacaoMatopiba.pdf](https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf). Último acesso em 13 de junho de 2023.
- MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. **Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated-K Model for the Longwave.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 102, n. 14, p. 16663-16682, 1997. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>.
- MORAIS, J. L. M.; FADUL, E.; CERQUEIRA, L. S. **Limites e Desafios na Gestão de Recursos Hídricos por Comitês de Bacias Hidrográficas: Um Estudo nos Estados do Nordeste do Brasil.** *Revista Eletrônica de Administração*, v. 24, p. 238-264, 2018. <https://doi.org/10.1590/1413-2311.187.67528>
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.** *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- MORRISON, Hugh; THOMPSON, Gregory; TATARSKII, V. **Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One-And Two-Moment Schemes.** *Monthly Weather Review*, v. 137, n. 3, p. 991-1007, 2009. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>.
- MOYA, A. S.; MARTÍNEZ, D.; FLORES, J. L.; SILVA, Y. **Sensitivity Study on the Influence of Parameterization Schemes in WRF\_ARW Model on Short-And Medium-Range Precipitation Forecasts in the Central Andes of Peru.** *Advances in Meteorology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1381092>.
- NAABIL, E.; KOUADIO, K.; LAMPTEY, B.; ANNOR, T.; & CHUKWUDI ACHUGBU, I. **Tono Basin Climate Modeling, the Potential Advantage of Fully Coupled WRF/WRF-Hydro Modeling System.** *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 9, n. 2, p. 1669-1679, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01574-5>.
- NAABIL, E.; LAMPTEY, B.L.; ARNAULT, J.; OLUFAYO, A.; KUNSTMANN, H. **Water Resources Management Using the WRF-Hydro Modelling System: Case-Study of the Tono Dam in West Africa.** *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 12, p. 196-209, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.010>.

- NAKANISHI, M.; NIINO, H. **An Improved Mellor–Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog.** *Boundary-Layer Meteorology*, v. 119, p. 397-407, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>.
- NAKANISHI, M.; NIINO, H. **Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer.** *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, v. 87, n. 5, p. 895-912, 2009. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-015>.
- NÄSCHEN, K.; DIEKKRÜGER, B.; LEEMHUIS, C.; SEREGINA, L.S.; LINDEN, R. V. **Impact of Climate Change on Water Resources in the Kilombero Catchment in Tanzania.** *Water*, v. 11, n. 4, p. 859, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11040859>.
- NCEP, National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. **NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids.** Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2015. Disponível em: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>. Último acesso em 03 de maio de 2023.
- NETTO, J. M. A.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica.** 9 ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- OHANA-LEVI, N.; GIVATI, A.; ALFASI, N.; PEETERS, A.; KARNIELI, A. **Predicting the effects of urbanization on runoff after frequent rainfall events.** *Journal of land use science*, v. 13, n. 1-2, p. 81-101, 2018. <https://doi.org/10.1002/2016JD026279>.
- OLIVEIRA, C. D. M.; ALVARENGA, L. A.; BESKOW, S.; DA CUNHA, Z. A.; VARGAS, M. M.; MELO, P. A.; SILVA, V. O. **Hydrological Model Performance in the Verde River Basin, Minas Gerais, Brazil.** *Resources*, v. 12, n. 8, p. 87, 2023. <https://doi.org/10.3390/resources12080087>.
- OLSON, J. B.; KENYON, J. S.; ANGEVINE, W.; BROWN, J. M.; PAGOWSKI, M.; SUŠELJ, K. **A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRF–ARW.** *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, 2019. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19837>. Último acesso em 03 de maio de 2023.
- OZKAYA, A.; AKYUREK, Z. **WRF-Hydro Model Application in a Data-Scarce, Small and Topographically Steep Catchment in Samsun, Turkey.** *Arabian Journal for Science and Engineering*, v.45, p. 3781–3798, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04251-5>.
- PAL, S.; DOMINGUEZ, F.; DILLON, M. E.; ALVAREZ, J.; GARCIA, C. M.; NESBITT, S. W.; GOCHIS, D. **Hydrometeorological observations and modeling of an extreme rainfall event using WRF and WRF-hydro during the RELAMPAGO field campaign in Argentina.** *Journal of Hydrometeorology*, v. 22, n. 2, p. 331-351, 2021. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0133.1>.

- PAPAIIOANNOU, G., VARLAS, G., TERTI, G., PAPADOPOULOS, A., LOUKAS, A., PANAGOPOULOS, Y., DIMITRIOU, E. **Flood Inundation Mapping at Ungauged Basins using Coupled Hydrometeorological-Hydraulic Modelling: The Catastrophic Case of the 2006 Flash Flood in Volos City, Greece.** *Water*, v. 11, n. 11, p. 2328, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11112328>.
- PATIL, R.; PRADEEP, P. K. **WRF Model Sensitivity for Simulating Intense Western Disturbances Over North West India.** *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 2, p. 1-15, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0137-3>.
- PEDRUZZI, R.; ANDREÃO, W.L.; BAEK, B.H.; HUDKE, A.P.; GLOTFELTY, T.W.; FREITAS, E.D.D.; MARTINS, J.; BOWDEN, J.H.; PINTO, J.A.; ALONSO, M.F.; ALBUQUERQUE, T. T. A. **Update of land use/land cover and soil texture for Brazil: Impact on WRF modeling results over São Paulo.** *Atmospheric Environment*, v. 268, p. 118760, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118760>.
- POWERS, J. G.; KLEMP, J. B.; SKAMAROCK, W. C.; DAVIS, C. A.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; COEN, J. L.; GOCHIS, D. J.; AHMADOV, R.; PECKHAM, S. E.; GRELL, G. A.; MICHALAKES, J.; TRAHAN, S.; BENJAMIN, S. G.; ALEXANDER, C. R.; DIMEGO, G. J.; WANG, W.; SCHWARTZ, C. S.; ROMINE, G. S.; LIU, Z. Q.; SNYDER, C.; CHEN, F.; BARLAGE, M. J.; YU, W.; DUDA, M. G. **The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 98, p. 1717–1737, 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.
- QUENUM, G.M.L.D.; ARNAULT, J.; KLUTSE, N.A.B.; ZHANG, Z.; KUNSTMANN, H.; OGUNTUNDE, P.G. **Potential of the Coupled Wrf/Wrf-Hydro Modeling System for Flood Forecasting in the Ouémé River (West Africa).** *Water*, v. 14, n. 8, p. 1192, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14081192>.
- REIS, L. C.; SILVA, C. M.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. **Caracterização da Variabilidade da Precipitação no MATOPIBA, Região Produtora de Soja.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 04, p. 1425-1441, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1425-1441>.
- ROZANTE, J.R.; GUTIERREZ, E.R.; FERNANDES, A.D.A.; VILA, D.A. **Performance of Precipitation Products Obtained from Combinations of Satellite and Surface Observations.** *International Journal of Remote Sensing*, v. 41, n. 19, p. 7585-7604, 2020. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1763504>.
- ROZANTE, J.R.; MOREIRA, D.S.; GONÇALVES, L.G.G.; VILA, D.A. **Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America.** *Weather and Forecasting*, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.
- RUMMLER, T.; ARNAULT, J.; GOCHIS, D.; KUNSTMANN, H. **Role of Lateral Terrestrial Water Flow on the Regional Water Cycle in a Complex Terrain Region: Investigation with a Fully Coupled Model System.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 124, n. 2, p. 507-529, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029004>.

- RYU, Y.; LIM, Y.J.; JI, H.S.; PARK, H.H.; CHANG, E.C.; KIM, B.J. **Applying a Coupled Hydrometeorological Simulation System to Flash Flood Forecasting Over the Korean Peninsula**. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, v. 53, p. 421-430, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0045-0>.
- SALAS, F. R.; SOMOS-VALENZUELA, M. A.; DUGGER, A.; MAIDMENT, D. R.; GOCHIS, D. J.; DAVID, C. H.; NOMAN, N. **Towards real-time continental scale streamflow simulation in continuous and discrete space**. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 54, n. 1, p. 7-27, 2018. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12586>.
- SALES, D. S.; JUNIOR, J. L.; DE OLIVEIRA, V. D. P. S.; FERREIRA, N. S.; NETO, A. J. S. **Sensitivity analysis of atmospheric phenomena models for precipitation assessment on the Paraíba do Sul River watershed**. *Ciência e Natura*, v. 44, p. e55-e55, 2022. <https://doi.org/10.5902/2179460X66757>.
- SAMPSON, K.; GOCHIS, D. **WRF Hydro GIS Pre-Processing Tools, Version 5.0, Documentation**. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research, Research Applications Laboratory, 2018. Disponível em: [https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRFHydro\\_GIS\\_Preprocessor\\_v5.pdf](https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRFHydro_GIS_Preprocessor_v5.pdf) Último acesso em 26 de janeiro de 2024.
- SANTOS, F. M.; OLIVEIRA, R. P.; MAUAD, F. F. Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 29, p. 100685, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100685>.
- SCHEIDEGGER, J. M., JACKSON, C. R., MUDDU, S., TOMER, S. K., FILGUEIRA, R. **Integration of 2D Lateral Groundwater Flow into the Variable Infiltration Capacity (VIC) Model and Effects on Simulated Fluxes for Different Grid Resolutions and Aquifer Diffusivities**. *Water*, v. 13, n. 5, p. 663, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13050663>.
- SENATORE, A.; FURNARI, L.; MENDICINO, G. **Impact of high-resolution sea surface temperature representation on the forecast of small Mediterranean catchments' hydrological responses to heavy precipitation**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 1, p. 269-291, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-269-2020>.
- SENATORE, A.; MENDICINO, G.; GOCHIS, D. J.; YU, W.; YATES, D. N.; KUNSTMANN, H. **Fully Coupled Atmosphere-Hydrology Simulations for the Central Mediterranean: Impact of Enhanced Hydrological Parameterization for Short and Long Time Scales**. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 7, n. 4, p. 1693-1715, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015MS000510>.
- SHIN, H. H.; HONG, S. **Representation of the Subgrid-Scale Turbulent Transport in Convective Boundary Layers at Gray-Zone Resolutions**. *Monthly Weather Review*, v. 143, n. 1, p. 250-271, 2015. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00116.1>.

- SILVA, P. R.; VIANNA, J. N. S. **A Região de MATOPIBA (Brasil) e o Nexus Água-Energia-Alimentos**. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 59, p. 338-353, 2022. <https://doi.org/10.5380/dma.v59i0.78325>.
- SILVER, M.; KARNIELI, A.; GINAT, H.; MEIRI, E.; FREDJ, E. **An Innovative Method for Determining Hydrological Calibration Parameters for the WRF-Hydro Model in Arid Regions**. *Environmental Modeling and Software*, p. 47-69, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.010>.
- SOUZA, L. P.; ALVES, R. D. C. M.; MUNCHOW, G. B. **Avaliação da previsibilidade do modelo WRF-Hydro em modelagens hidrometeorológicas com diferentes resoluções na Bacia do Taquari-Antas**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 05, p. 1872-1890, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.5.p1872-1890>.
- SOUSA, N.; SILVA, A.; FISCH, G.; JUNIOR, J.; LYRA, R.; SILVA, E. **Avaliação de Parametrizações de Camada Limite Planetária do Modelo WRF na Costa Norte do Nordeste do Brasil**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, p. 9-21, 2019. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334019>.
- STERGIOU, I.; TAGARIS, E. SOTIROPOULOU, R. P. **Sensitivity Assessment of WRF Parameterizations over Europe**. *Proceedings*, p. 119, 2017. <https://doi.org/10.3390/ecas2017-04138>.
- STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. **Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation**. *Journal of Hydrology*, v. 414, p. 413-424, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.014>.
- SUN, M.; LI, Z.; YAO, C.; LIU, Z.; WANG, J.; HOU, A.; LIU, M. **Evaluation of Flood Prediction Capability of the WRF-Hydro Model Based on Multiple Forcing Scenarios**. *Water*, v. 12, n. 3, p. 874, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030874>.
- TAN, M. L.; IBRAHIM, A. L.; YUSOP, Z.; DUAN, Z.; LING, L. **Impacts of land-use and climate variability on hydrological components in the Johor River basin, Malaysia**. *Hydrological Sciences Journal*, v. 60, n. 5, p. 873-889, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124816>.
- TEWARI, M.; CHEN, F.; WANG, W.; DUDHIA, J.; LEMONE, M.; MITCHELL, K.; GAYNO G.; WEGIEL J.; CUENCA, R. H. **Implementation and verification of the unified Noah land surface model in the WRF model**. *20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction*, 11–15 January, 2004. Disponível em: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/LAND\\_SURFACE/noah.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/LAND_SURFACE/noah.pdf). Último acesso em 28 de outubro de 2023.
- TIAN, J.; LIU, J.; WANG, J.; LI, C.; YU, F.; & CHU, Z. **A Spatio-Temporal Evaluation of the WRF Physical Parameterisations for Numerical Rainfall Simulation in Semi-Humid and Semi-Arid Catchments of Northern China**. *Atmospheric Research*, v. 191, p. 141-155, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.012>.

- TIAN, J.; LIU, J.; YAN, D.; LI, C.; YU, F. **Numerical Rainfall Simulation with Different Spatial and Temporal Evenness by Using a WRF Multiphysics Ensemble**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 17, n. 4, p. 563-579, 2017b. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-563-2017>.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- UCAR. Website of University Corporation for Atmospheric Research, 2024. **WRF-Hydro Output Variable Matrix**. NCAR, 2024b. Disponível em: [https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRFHydroV5\\_OutputVariableMatrix\\_V5.pdf](https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRFHydroV5_OutputVariableMatrix_V5.pdf). Último acesso em 19 de janeiro de 2024.
- UCAR. Website of University Corporation for Atmospheric Research. **Weather Research and Forecasting Model (WRF)**. *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, 2024a. Disponível em: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>. Último acesso em 19 de janeiro de 2024.
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change**. Paris, 2020. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>. Último acesso em 19 de março de 2022.
- VARLAS, G.; ANAGNOSTOU, M. N.; SPYROU, C.; PAPADOPOULOS, A.; KALOGIROS, J.; MENTZAFΟΥ, A.; KATSAFADOS, P. **A Multi-Platform Hydrometeorological Analysis of the Flash Flood Event of 15 November 2017 in Attica, Greece**. *Remote Sensing*, v. 11, n. 1, p. 45, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs11010045>.
- VERRI, G.; PINARDI, N.; GOCHIS, D.; TRIBBIA, J.; NAVARRA, A.; COPPINI, G.; VUKICEVIC, T. **A Meteo-Hydrological Modelling System for the Reconstruction of River Runoff: The Case of the Ofanto River Catchment**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 17, n. 10, p. 1741-1761, 2017. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1741-2017>.
- VINAGRE, M. V. A.; LIMA, A. C. M.; JUNIOR, D. L. L. **Estudo do Comportamento Hidráulico da Bacia do Paracuri em Belém (PA) Utilizando o Programa Storm Water Management Model**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, p. 361-368, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000106515>.
- WANG, J.; WANG, C.; RAO, V.; ORR, A.; YAN, E.; KOTAMARTHI, R. **A Parallel Workflow Implementation for PEST Version 13.6 in High-Performance Computing for WRF-Hydro Version 5.0: A Case Study over the Midwestern United States**. *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 8, p. 3523-3539, 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3523-2019>.
- WANG, W.; LIU, J.; LI, C.; LIU, Y.; YU, F. **Data Assimilation for Rainfall-Runoff Prediction Based on Coupled Atmospheric-Hydrologic Systems with Variable Complexity**. *Remote Sensing*, v. 13, n. 4, p. 595, 2021a. <https://doi.org/10.3390/rs13040595>.

- WANG, W.; LIU, J.; LI, C.; LIU, Y.; YU, F.; & YU, E. **An Evaluation Study of the Fully Coupled Wrf/Wrf-Hydro Modeling System for Simulation of Storm Events with Different Rainfall Evenness in Space and Time.** *Water*, v. 12, n. 4, p. 1209, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12041209>.
- WANG, W.; LIU, J.; XU, B.; LI, C.; LIU, Y.; YU, F. **A WRF/WRF-Hydro Coupling System with an Improved Structure for Rainfall-Runoff Simulation with Mixed Runoff Generation Mechanism.** *Journal of Hydrology*, v. 612, p. 128049, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128049>.
- WANG, X.; TOLKSDORF, V.; OTTO, M.; SCHERER, D. **WRF-based Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis Data for High Mountain Asia: Towards a New Version of the High Asia Refined Analysis.** *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 1, p. 743-762, 2021b. <https://doi.org/10.1002/joc.6686>.
- WEHBE, Y.; TEMIMI, M.; WESTON, M.; CHAOUCH, N.; BRANCH, O.; SCHWITALLA, T.; MANDOUS, A. **Analysis of an Extreme Weather Event in a Hyper-Arid Region Using WRF-Hydro Coupling, Station, and Satellite Data.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 19, n. 6, p. 1129-1149, 2019. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1129-2019>.
- WEILAND, F. C. S.; VRUGT, J. A.; WEERTS, A. H.; BIERKENS, M. F. **Significant uncertainty in global scale hydrological modeling from precipitation data errors.** *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 1095-1115, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.061>.
- WRIGHT, D.; YU, G.; ENGLAND, J. **Six decades of rainfall and flood frequency analysis using stochastic storm transposition: Review, progress, and prospects.** *Journal of Hydrology*, v. 585, p. 124816, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124816>.
- XIANG, X.; LI, Q.; KHAN, S.; KHALAF, O. I. **Urban Water Resource Management for Sustainable Environment Planning Using Artificial Intelligence Techniques.** *Environmental Impact Assessment Review*, v. 86, p. 106515, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106515>.
- YANG, Q.; YU, Z.; WEI, J.; YANG, C.; GU, H.; XIAO, M.; KUNSTMANN, H. **Performance of the WRF Model in Simulating Intense Precipitation Events over the Hanjiang River Basin, China—A Multi-Physics Ensemble Approach.** *Atmospheric Research*, v. 248, p. 105206, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105206>.
- YANG, T.; SUN, F.; GENTINE, P.; LIU, W.; WANG, H.; YIN, J.; DU, M.; LIU, C. **Evaluation and Machine Learning Improvement of Global Hydrological Model-Based Flood Simulations.** *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 11, p. 114027, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4d5e>.
- YANG, Y.; YUAN, H.; YU, W. **Uncertainties of 3D soil hydraulic parameters in streamflow simulations using a distributed hydrological model system.** *Journal of hydrology*, v. 567, p. 12-24, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.042>.

- YU, E.; LIU, X.; LI, J.; TAO, H. **Calibration and Evaluation of the WRF-Hydro Model in Simulating the Streamflow over the Arid Regions of Northwest China: A Case Study in Kaidu River Basin.** *Sustainability*, v. 15, n. 7, p. 6175, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15076175>.
- YU, G.; WRIGHT, D. B.; HOLMAN, K. D. **Connecting Hydrometeorological Processes to Low-Probability Floods in the Mountainous Colorado Front Range.** *Water Resources Research*, v. 57, n. 4, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021WR029768>.
- YUCEL, I., ONEN, A., YILMAZ, K. K., GOCHIS, D. J. **Calibration and Evaluation of a Flood Forecasting System: Utility of Numerical Weather Prediction Model, Data Assimilation and Satellite-Based Rainfall.** *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 49-66, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.042>.
- ZHANG, Cheng-Yao; OKI, Taikan. **Water Pricing Reform for Sustainable Water Resources Management in China's Agricultural Sector.** *Agricultural Water Management*, v. 275, p. 108045, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108045>.
- ZHANG, J.; LIN, P.; GAO, S.; FANG, Z. **Understanding the Re-Infiltration Process to Simulating Streamflow in North Central Texas using the WRF-Hydro Modeling System.** *Journal of Hydrology*, v. 587, p. 124902, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124902>.
- ZHANG, Y.; BOCQUET, M.; MALLET, V.; SEIGNEUR, C.; BAKLANOV, A. **Real-Time Air Quality Forecasting, Part I: History, Techniques, and Current Status.** *Atmospheric Environment*, v. 60, p. 632-655, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.031>.
- ZHANG, Z.; ARNAULT, J.; WAGNER, S.; LAUX, P.; AND KUNSTMANN, H. **Impact of Lateral Terrestrial Water Flow on Land-Atmosphere Interactions in the Heihe River Basin in China: Fully Coupled Modeling and Precipitation Recycling Analysis.** *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 124, p. 8401-8423, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD030174>.
- ZHOU, W.; ZHU, Z.; XIE, Y.; CAI, Y. **Impacts of rainfall spatial and temporal variabilities on runoff quality and quantity at the watershed scale.** *Journal of Hydrology*, v. 603, p. 127057, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127057>.

## PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA

- JÚNIOR, J. R. D.; SOUZA, F. M.; SILVA, D. G.; FERRAZ, P. S.; MOARES, M. R.; SCHÄFER, A. G.; NASCIMENTO, E. G.; MOREIRA, D. M. **Feasibility Analysis on the Construction of a Solution for Monitoring and Hydrometeorological Forecasting.** *Blucher Engineering Proceedings*, p. 585-593, 2020. <https://doi.org/10.5151/siintec2020-FEASIBILITYANALYSIS>.
- SILVA, D. G.; RAMOS, D. N.; SOUZA, F. M.; SILVA JÚNIOR, J. R. D.; KITAGAWA, Y. K. L.; MOREIRA, D. M. **Precipitation Simulation Using the WRF-Hydro Model in the Matopiba Region.** *Blucher Engineering Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 130-135, 2021. <https://doi.org/10.5151/siintec2021-208739>.
- VIEIRA, C. S.; JÚNIOR, J. R. D.; SILVA, D. G.; SOUZA, F. M.; RAMOS, D. N.; KITAGAWA, Y. K. L.; MOREIRA, D. M. **Modeling of an Extreme Flooding Event in the Amazon Basin Using the WRF-Hydro Model.** *Blucher Engineering Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 123-129, 2021. <https://doi.org/10.5151/siintec2021-208770>.
- JÚNIOR, J. R. D.; PEDRUZZI, R.; SOUZA, F. M.; FERRAZ, P. S.; SILVA, D. G.; VIEIRA, C. S.; MORAES, M. R.; NASCIMENTO, E. G.; MOREIRA, D. M. **Feasibility Analysis on the Construction of a Web Solution for Hydrometeorological Forecasting Considering Water Body Management and Indicators for the SARS-COV-2 Pandemic.** *AI Perspectives*, v. 3, n. 1, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1186/s42467-021-00011-0>.
- VIEIRA, C. S.; SILVA, D. G.; JÚNIOR, J. R. D.; SOUZA, F. M.; PEDRUZZI, R.; KITAGAWA, Y. K. L.; RAMOS, D. N.; MOREIRA, D. M. **Evaluation of the Physical Sensitivity of the WRF-Hydro Model in the Simulation of Rainfall in Manaus-AM Using Different Sets of Parametrizations.** *Blucher Engineering Proceedings*, p. 166-173, 2022. <https://doi.org/10.5151/siintec2022-241066>.
- SILVA, D. G.; VIEIRA, C. S.; SILVA JUNIOR, J. R. D.; SOUZA, F. M.; RAMOS, D. N. S.; MOREIRA, D. M. **Estudo da Vazão na Bacia dos Rios Tocantins-Araguaia Utilizando o Modelo WRF-Hydro.** In: XXII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2022, Bauru-SP. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2022. p. 603-615.
- SILVA, D. G.; JUNIOR, J. R. D.; SOUZA, F. M.; RAMOS, D. N. S.; SILVA, A. R.; SANTOS, T. S.; MOREIRA, D. M. **WRF-Hydro for Streamflow Simulation in the MATOPIBA Region within the Tocantins/Araguaia River Basin-Brazil: Implications for Water Resource Management.** *Water*, v. 15, n. 22, p. 3902, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15223902>.