



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E  
GEODINÂMICA**

**ROGÉRIO ALVES BARBOSA DA SILVA**

**INTEGRAÇÃO DO MODELO SWAT COM PROJEÇÕES DO ETA-  
HADGEM2-ES PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA UNIDADE  
HIDROGRÁFICA DO RIACHO FUNDO, DISTRITO FEDERAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
Nº 241**

Brasília – DF  
Outubro/2025

**ROGÉRIO ALVES BARBOSA DA SILVA**

**INTEGRAÇÃO DO MODELO SWAT COM PROJEÇÕES DO ETA-HADGEM2-ES PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA UNIDADE HIDROGRÁFICA DO RIACHO FUNDO, DISTRITO FEDERAL**

Dissertação apresentada junto ao curso de Pós-graduação em Geociências Aplicadas (Área de concentração Recursos Hídricos) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: **Prof. Henrique Llacer Roig, PhD (IG-UnB)**  
Coorientador: **Márcio Malafaia Filho, PhD**

**Brasília – DF  
Outubro/2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

AS586mi Alves Barbosa da Silva, Rogério  
INTEGRAÇÃO DO MODELO SWAT COM PROJEÇÕES DO ETA-HADGEM2-ES  
PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA UNIDADE HIDROGRÁFICA DO RIACHO  
FUNDO, DISTRITO FEDERAL / Rogério Alves Barbosa da Silva;  
orientador Henrique Llacer Roig; co-orientador Márcio  
Malafaia Filho. Brasília, 2025.  
135 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)  
Universidade de Brasília, 2025.

1. Mudanças Climáticas. 2. Recursos Hídricos. 3. Distrito  
Federal. 4. Modelagem Hidrológica. 5. SWAT. I. Llacer Roig,  
Henrique, orient. II. Malafaia Filho, Márcio, co-orient.  
III. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, R.A.B.S. (2025). ***Integração do modelo SWAT com projeções do Eta-HadGEM2-ES para simulação hidrológica na unidade hidrográfica do Riacho Fundo, Distrito Federal.*** 2025. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica – Área de Concentração em Recursos Hídricos) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rogério Alves Barbosa da Silva

TÍTULO: Integração do modelo SWAT com projeções do Eta-HadGEM2-ES para simulação hidrológica na unidade hidrográfica do Riacho Fundo, Distrito Federal.

GRAU: Mestre

ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho pode ser reproduzida sem a devida citação da fonte.

**ROGÉRIO ALVES BARBOSA DA SILVA**

**Integração do modelo Swat com projeções do Eta-Hadgem2-Es para simulação hidrológica na unidade hidrográfica do Riacho Fundo, Distrito Federal**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (Recursos Hídricos) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Brasília, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Henrique Llacer Roig, PhD (IG-UnB)  
Orientador

---

Profa. Rejane Ennes Cicerelli, PhD (IG-UnB)  
Examinadora Interna

---

André Luiz Farias de Souza, PhD.  
Examinador Externo

Dedico este trabalho aos meus pais e familiares, pelo apoio incondicional e pela força que me sustentou ao longo desta jornada. Dedico também aos meus sobrinhos, cuja inocência e esperança representam a certeza de um mundo melhor.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada, marcada por desafios e obstáculos que foram superados com perseverança.

Aos meus pais, Severino Barbosa da Silva e Nilce Alves da Silva Barbosa, e aos meus irmãos, Eduardo e Rafael Alves Barbosa da Silva, pela base sólida de amor, incentivo e apoio incondicional em todas as etapas da minha vida acadêmica e pessoal.

À minha namorada, Rayssa Rios, pela paciência, compreensão e por me proporcionar paz e foco na realização deste trabalho, compartilhando comigo uma fase de vida extremamente desafiadora.

À minha ex-esposa, Luciana Vecchi, que esteve presente desde o início desta jornada e não mediu esforços para que este sonho se concretizasse.

Ao meu orientador, Professor Dr. Henrique R. Llacer, e ao coorientador, Dr. Márcio Malafaia, pela dedicação, paciência e ensinamentos que foram fundamentais para a realização deste estudo.

Ao Dr. André Luiz Farias de Souza, amigo de longa data, pela contribuição no entendimento das mudanças climáticas e na utilização dos dados de projeções, bem como pelas palavras de incentivo e apoio.

Aos colegas que integram ou integraram a Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal — Maria Silvia Rossi, Renato Santana, Ludmyla Macedo de Castro e Moura, Tereza Cristina Esmeraldo de Oliveira, Vanessa Cortines Barrocas, Jessé de Jesus e Lucas Sena Alves, Márcio Malafaia Filho — pelo companheirismo, pelas discussões enriquecedoras e pelo apoio técnico durante a pesquisa.

À Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal, pela disponibilização dos dados e pela colaboração essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**"A mudança climática não é um problema do futuro, mas um desafio do presente. Entender a dinâmica da água é compreender a base da vida e da sustentabilidade."**

**Adaptado de Ban Ki-moon**

## RESUMO

As mudanças climáticas impõem pressões significativas à gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões estratégicas como o Cerrado brasileiro. A modelagem hidrológica constitui ferramenta essencial para compreender e antecipar impactos, subsidiando ações de adaptação. Este estudo integrou o modelo hidrológico SWAT às projeções climáticas regionais do modelo Eta-HadGEM2-ES, com o objetivo de avaliar os impactos dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 sobre o regime hidrológico da bacia do Riacho Fundo (Distrito Federal) no período de 2025 a 2099. Para superar lacunas críticas de dados regionais de alta resolução, foram utilizadas projeções com grade espacial de 5 km e escala diária, aplicando-se correção de viés por Quantile Mapping. O modelo foi calibrado com dados observados (2000–2024), obtendo NSE = 0,50 e  $R^2 = 0,568$ . As simulações indicaram reduções significativas nas vazões médias anuais, com 1,21 m<sup>3</sup>/s no RCP 4.5 (–22%) e 1,06 m<sup>3</sup>/s no RCP 8.5 (–32%), além de declínios de até 40% na estação seca. O cenário RCP 8.5 apresentou maior variabilidade interanual e perda de sincronia entre precipitação e vazão, refletindo maior estresse hídrico e risco de desconexão hidrológica. A classificação hidroclimática projetou desaparecimento de anos úmidos e aumento expressivo de anos secos, mais acentuado no RCP 8.5. Os resultados confirmam a robustez da integração entre modelos climáticos e hidrológicos, oferecendo base metodológica sólida para análises regionais e reforçando a necessidade de estratégias de gestão que incorporem projeções climáticas de alta resolução, de modo a promover a sustentabilidade hídrica e fortalecer a resiliência do Distrito Federal frente às mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas, recursos hídricos, Distrito Federal, modelagem hidrológica.

## ABSTRACT

Climate change exerts significant pressure on water resources management, especially in strategic regions such as the Brazilian Cerrado. Hydrological modeling is an essential tool to understand and anticipate these impacts, supporting adaptation actions. This study integrated the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model with regional climate projections from the Eta-HadGEM2-ES model to evaluate the impacts of the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios on the hydrological regime of the Riacho Fundo basin (Federal District, Brazil) for the period 2025–2099. To overcome critical gaps in high-resolution regional climate data, projections with a 5 km spatial grid and daily time steps were used, applying bias correction through the Quantile Mapping method. The model was calibrated using observed data (2000–2024), yielding  $NSE = 0.50$  and  $R^2 = 0.568$ . The simulations indicated significant reductions in mean annual streamflow, with  $1.21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  under RCP 4.5 (–22%) and  $1.06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  under RCP 8.5 (–32%), as well as decreases of up to 40% during the dry season. The RCP 8.5 scenario showed higher interannual variability and weakened coupling between rainfall and discharge, reflecting increased hydrological stress and potential flow disconnection. The hydro-climatic classification projected the disappearance of wet years and a marked increase in dry years, more pronounced under RCP 8.5. The results confirm the robustness of integrating climate and hydrological models for future scenario analysis, providing a solid methodological foundation for regional assessments. This work highlights the Cerrado's hydrological vulnerability to increasing climate variability and reduced streamflow, offering technical support for water-resource planning and the formulation of adaptation policies. The conclusions reinforce the need for management strategies that incorporate high-resolution climate projections to promote water sustainability and strengthen the resilience of the Federal District to climate change.

**Keywords:** climate change, water resources, Federal District, hydrological modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma apresentando as etapas metodológicas do trabalho. ....	27
Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica do Riacho Fundo.....	29
Figura 3 - Solos UH Riacho Fundo. Fonte:.....	30
Figura 4: Uso do solo e cobertura vegetal.....	31
Figura 5. Fluxo de processamento dos dados climáticos do modelo Eta-HadGEM2-ES. ....	35
Figura 6. Processamento e padronização dos dados meteorológicos observados da estação Brasília-DF (INMET). ....	37
Figura 7 – Grade do modelo Eta HADGEM-ES.....	40
Figura 8 – Distribuição mensal de temperatura máxima média mensal da bacia hidrográfica do Riacho Fundo, cenário RCP4.5 e RCP8.5.....	59
Figura 9 - Distribuição mensal de temperatura mínima média mensal da bacia hidrográfica do Riacho Fundo entre 1979 a 2024 – sem correção de bias. Fonte: ...	61
Figura 10 – Precipitação média mensal acumulada INMET, Eta e Eta com correção de bias.....	63
Figura 11 – Umidade relativa média mensal. ....	64
Figura 12 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da temperatura máxima simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período 1979 – 2024. ....	66
Figura 13 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da temperatura mínima simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024. ....	67
Figura 14 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da precipitação simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.....	68
Figura 15 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da radiação solar simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.....	69
Figura 16 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da umidade relativa simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.....	71

Figura 17 – Distribuições acumuladas (CDF) da temperatura máxima diária observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés pelo método Quantile Mapping (QM), no período de 1979 a 2024. ....	72
Figura 18 – Funções de distribuição acumulada (CDF) da temperatura mínima diária observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés pelo método Quantile Mapping (QM), no período de 1979 a 2024.	74
Figura 19 – Funções de distribuição acumulada (CDF) da precipitação diária observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés pelo método Quantile Mapping (QM), no período de 1979 a 2024.	75
Figura 20 – Distribuições acumuladas (CDF) da radiação solar diária na bacia do Riacho Fundo para o período 1979–2024, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés (QM).....	76
Figura 21 – Distribuições acumuladas (CDF) da umidade relativa diária na bacia do Riacho Fundo para o período 1979–2024, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés (QM).....	78
Figura 22 – Distribuições acumuladas (CDF) da velocidade do vento diária na bacia do Riacho Fundo, para o período 1979–2024, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés (QM). ....	79
Figura 23 – Tendência anual da temperatura máxima média observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024. ....	82
Figura 24 – Distribuição mensal da temperatura máxima dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....	83
Figura 25 – Tendência anual da temperatura mínima média observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024. ....	84
Figura 26 – Distribuição mensal da temperatura mínima dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....	85
Figura 27 – Tendência anual da precipitação média anual observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024. ....	86
Figura 28 - Distribuição mensal da temperatura mínima dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....	87

Figura 29 – Tendência anual da radiação solar média anual observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024. ....	88
Figura 30 - Distribuição mensal da radiação solar dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. ....	89
Figura 31 – Gráfico chuva x vazão dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES Fonte: Elaborado pelo autor (2025) .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Adequação dos modelos climáticos por biomas brasileiros .....	12
Tabela 2- Variáveis climáticas Eta HadGEM-ES.....	13
Tabela 3 – Métodos de correção de viés. ....	15
Tabela 4 – Métodos de correção de viés por variável climática .....	17
Tabela 5 – Recursos computacionais utilizados na pesquisa. ....	34
Tabela 6 – Dados geoespaciais utilizados na pesquisa .....	38
Tabela 7 - Variáveis climáticas disponíveis no modelo Eta.....	45
Tabela 8 – Dados climáticos utilizados nesta pesquisa .....	48
Tabela 9 – Registros diários e registros faltantes.....	48
Tabela 10 – Dados climático observacionais .....	49
Tabela 11 – Estatísticas descritivas dos dados climáticos do modelo Eta HadGEM RCP4.5 e RCP8.5. ....	58
Tabela 12 – Parâmetros das variáveis climáticas pós correção de bias .....	80
Tabela 13 – Parâmetros e valores de calibração no SWAT.....	94

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação QM .....	16
Equação 2 – Equação do equilíbrio hídrico utilizada no SWAT.....	19
Equação 3 – Componente do vento .....	41
Equação 4 – Conversão da radiação para mega joules.....	42
Equação 5 – Equação RMSE.....	42
Equação 6 – Equação para correção de bias:.....	43
Equação 7 – Equação MAE: .....	43
Equação 8 - Interpolação linear:.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima
- APEX - Application Express
- AR5 – Fifth Assessment Report (Quinto Relatório de Avaliação do IPCC)
- AVSWAT - ArcView Soil and Water Assessment Tool
- BCSD – Bias Correction with Standard Deviation (Correção de Viés pelo Desvio-Padrão)
- BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET)
- BESM – Brazilian Earth System Model (Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre)
- BHRF – Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo
- Bias – Viés (diferença média sistemática)
- CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
- CAET – College of Agricultural Engineering and Technology
- CanESM2 – Canadian Earth System Model, version 2
- CC – Correlation Coefficient (Coeficiente de Correlação)
- CCA – Canonical Correlation Analysis (Análise de Correlação Canônica)
- CDF-t – Cumulative Distribution Function transform
- CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
- CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
- CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
- CMIP - Coupled Model Intercomparison Project
- CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 5)
- CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 6)
- CN - Curve Number
- CN2 - Curve Number for average antecedent moisture conditions
- CNARH - Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos

CNES - Centre National d'Études Spatiales

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DEM - Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação)

DF – Distrito Federal

DJF – Dezembro, Janeiro, Fevereiro (trimestre climático)

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENSO - El Niño-Southern Oscillation (El Niño-Oscilação Sul)

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

EQM – Empirical Quantile Mapping (Mapeamento Quantílico Empírico)

ESA - European Space Agency

ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

ETA – Modelo Climático Regional Eta

ET – Evapotranspiração

ETP - Evapotranspiração Potencial

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

GCM – Global Climate Model (Modelo Climático Global)

GEE - Google Earth Engine

GEF – Global Environment Facility (Fundo Global para o Meio Ambiente)

GeoJSON - Geographic JavaScript Object Notation

GIS – Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)

GLCF - Global Land Cover Facility

GPCC - Global Precipitation Climatology Centre

GPS - Global Positioning System

GRDC - Global Runoff Data Centre

HadGEM2-ES – Hadley Centre Global Environmental Model, versão 2 – Earth System

HIDROWEB - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

HRU – Hydrologic Response Unit (Unidade de Resposta Hidrológica)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDE/DF – Infraestrutura de Dados Espaciais do Distrito Federal

IG-UnB - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

IH - Índice Hídrico

IMERG - Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

INEMA - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

IQR – Interquartile Range (Desvio interquartil)

JJA – Junho, Julho, Agosto (trimestre climático)

KGE – Kling-Gupta Efficiency (Eficiência de Kling-Gupta)

LOCI – Local Intensity Scaling (Escalonamento de Intensidade Local)

LULC – Land Use and Land Cover (Uso e Cobertura da Terra)

MAE – Mean Absolute Error (Erro Médio Absoluto)

MAM – Março, Abril, Maio (trimestre climático)

MapBiomas - Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil

MBC – Multivariate Bias Correction (Correção de Viés Multivariada)

MBCn – Multivariate Bias Correction n-dimensional

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MDE – Modelo Digital de Elevação

MGB-IPH - Modelo de Grandes Bacias - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MIROC-ESM – Model for Interdisciplinary Research on Climate – Earth System Model

MIROC5 – Model for Interdisciplinary Research on Climate, version 5

MNTP – Temperatura mínima (código do modelo)

MO – Monin-Obukhov (teoria de camada limite atmosférica)

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MXTP – Temperatura máxima (código do modelo)

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NCEP – National Centers for Environmental Prediction (Centros Nacionais de Previsão Ambiental)

NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency (Eficiência de Nash-Sutcliffe)

OCIS – Onda Curta Incidente à Superfície

ONU – Organização das Nações Unidas

P – Precipitação

PBIAS – Percent Bias (Viés Percentual)

PDSI - Palmer Drought Severity Index

PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos

PET - Potential Evapotranspiration (Evapotranspiração Potencial)

PIRH - Plano Integrado de Recursos Hídricos

PL - Parliament Locator

PM - Penman-Monteith

PPGGAG - Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

PREC – Precipitação total (código do modelo)

PSO – Particle Swarm Optimization (Otimização por Enxame de Partículas)

QM – Quantile Mapping (Mapeamento Quantílico)

R<sup>2</sup> – Coeficiente de Determinação

RCM – Regional Climate Model (Modelo Climático Regional)

RCP – Representative Concentration Pathway (Trajetória de Concentração Representativa)

RIDE – Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno

RMSE – Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)

r-factor – Largura relativa da banda de incerteza (95PPU)

Rs – Radiação solar global

RSR - RMSE-observations standard deviation ratio

SDSM - Statistical Downscaling Model

SEMARH - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SF - São Francisco

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SISDIA – Sistema Distrital de Informações Ambientais

SON – Setembro, Outubro, Novembro (trimestre climático)

SPI - Standardized Precipitation Index

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

SSP – Shared Socioeconomic Pathway (Caminho Socioeconômico Compartilhado)

STATSGO - State Soil Geographic Database

SUFI-2 – Sequential Uncertainty Fitting Algorithm, Version 2 (Ajuste Sequencial de Incerteza, Versão 2)

SURLAG - Surface Runoff Lag Coefficient

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

SWAT+ – Soil and Water Assessment Tool Plus

SWAT-CUP – SWAT Calibration and Uncertainty Programs

SWAT-MODFLOW – Integração SWAT com MODFLOW

TAMSAT - Tropical Applications of Meteorology using Satellite data

Tmax – Temperatura máxima

Tmin – Temperatura mínima

TMPA - TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis

TP2M – Temperatura média a 2 m (código do modelo)

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

U – Velocidade do vento

U10M – Componente zonal do vento a 10 m (par com V10M)

U100 – Componente zonal do vento a 100 m (par com V100)

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHE - Usina Hidrelétrica

UH-RF - Unidade Hidrográfica do Riacho Fundo

UnB – Universidade de Brasília

UR – Umidade Relativa do ar

UR2M – Umidade relativa a 2 m (código do modelo)

USDA - United States Department of Agriculture

USGS - United States Geological Survey

UTM – Universal Transversa de Mercator

V10M – Componente meridional do vento a 10 m (par com U10M)

V100 – Componente meridional do vento a 100 m (par com U100)

VOL\_FR – Razão entre volume simulado e observado

WGS - World Geodetic System

WMO - World Meteorological Organization

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	5
2.1	Objetivos Específicos .....	5
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	6
3.1	Impactos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico.....	6
3.1.1	<i>Modelos climáticos globais e regionais: avanços e limitações .....</i>	<i>8</i>
3.1.2	<i>O modelo Eta-HadGEM2-ES: características e aplicações no Brasil. 10</i>	<i>10</i>
3.1.3	<i>Técnicas de correção de viés e regionalização climática.....</i>	<i>14</i>
3.1.4	<i>Integração de Modelos Climáticos com Modelos Hidrológicos: Avanços e Desafios .....</i>	<i>17</i>
3.2	Fundamentos do modelo SWAT e aplicações recentes.....	18
3.2.1	<i>Conceitos Fundamentais e Estrutura do SWAT .....</i>	<i>19</i>
3.2.2	<i>Aplicações do SWAT em Cenários de Mudanças Climáticas.....</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Tendências de Desenvolvimento e Aperfeiçoamento do SWAT .....</i>	<i>23</i>
3.2.4	<i>Aplicações do SWAT no Bioma Cerrado.....</i>	<i>24</i>
3.2.5	<i>Calibração e Validação do SWAT em Bacias Brasileiras.....</i>	<i>25</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
4.1	Caracterização da área de estudo.....	28
4.2	Materiais .....	33
4.2.1	<i>Sistema Computacional.....</i>	<i>34</i>
4.2.2	<i>Compilação e preparação dos dados .....</i>	<i>35</i>
4.3	Métodos.....	39
4.3.1	<i>Processamento de dados climáticos simulados .....</i>	<i>39</i>
4.3.2	<i>Pré-processamento dos dados observacionais .....</i>	<i>43</i>
4.3.3	<i>Modelo climático e seleção das variáveis para utilização no SWAT .</i>	<i>45</i>
4.3.4	<i>Séries climáticas: interpolação, conversão de calendários e correção de viés</i>	<i>46</i>
4.3.5	<i>Análise de mudanças climáticas.....</i>	<i>50</i>
4.3.6	<i>Implementação no SWAT .....</i>	<i>52</i>
5	ANÁLISES E RESULTADOS .....	55
5.1	Projeções climáticas .....	56
5.1.1	<i>Avaliação comparativa: dados modelados x dados observados – linha de base.....</i>	<i>56</i>

<b>5.1.1.1</b>	<b><u>Temperatura máxima</u></b> .....	<b>58</b>
<b>5.1.1.2</b>	<b><u>Temperatura mínima</u></b> .....	<b>60</b>
<b>5.1.1.3</b>	<b><u>Precipitação média acumulada</u></b> .....	<b>62</b>
<b>5.1.1.4</b>	<b><u>Umidade</u></b> .....	<b>63</b>
<b>5.1.2</b>	<b><i>Avaliação dos erros do modelo</i></b> .....	<b>65</b>
<b>5.1.3</b>	<b><i>Resultados da correção de bias</i></b> .....	<b>71</b>
<b>5.1.4</b>	<b><i>Análise das mudanças climáticas</i></b> .....	<b>81</b>
<b>5.1.5</b>	<b><i>Análise geral</i></b> .....	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelagem Hidrológica</b> .....	<b>92</b>
<b>5.2.1</b>	<b><i>Calibragem do modelo e simulações hidrológicas RCP4.5 e RCP8.5</i></b>	<b>93</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Análise de tendência</i></b> .....	<b>97</b>
<b>5.3</b>	<b>Classificação hidroclimática</b> .....	<b>99</b>
<b>5.3.1</b>	<b><i>Variação sazonal</i></b> .....	<b>100</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas impõem pressões crescentes sobre a gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões de elevada relevância ecológica e estratégica, como o Cerrado brasileiro, onde se estima uma redução de até 33,9% no fluxo dos rios até 2050 em decorrência do aquecimento global e da intensificação do desmatamento (Salmona *et al.*, 2023a).

Esse bioma, responsável por parcela expressiva da recarga hídrica nacional, enfrenta uma combinação de fatores que acentuam sua vulnerabilidade, incluindo alterações no uso e cobertura da terra, maior frequência de eventos climáticos extremos e projeções hidrológicas que indicam reduções de até 70% na vazão média anual em bacias do Cerrado, além do aumento da recorrência de secas severas até o fim do século (Amorim *et al.*, 2022a).

Adicionalmente, a fragmentação da vegetação nativa impacta diretamente os mecanismos de infiltração e evapotranspiração, comprometendo o funcionamento hidrológico regional e os serviços ecossistêmicos associados (Bustamante, 2024).

Nesse cenário, torna-se essencial compreender as interações entre clima, solo e vegetação, de modo a subsidiar políticas públicas eficazes com base em modelagem hidrológica e projeções climáticas de alta resolução. A acentuada sazonalidade desse bioma, combinada à intensificação da ocupação do solo, vem ampliando os riscos à segurança hídrica, tornando mais frequentes e severos os eventos extremos, como secas prolongadas e enchentes repentinas (Nóbrega *et al.*, 2022; Neto, *et al.*, 2023)

Esse quadro se agrava em função do aumento das temperaturas médias e da maior variabilidade das precipitações, que intensificam o estresse hídrico e impõem desafios adicionais à qualidade e à disponibilidade de água (Mansano & Serrano, 2023; Silva *et al.*, 2020). Além disso, a variabilidade climática recente interage com pressões antrópicas, elevando a complexidade do regime hidrológico em escalas locais e regionais e reforçando a necessidade de uma visão integrada do território (Silva *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, a interação entre mudanças climáticas e alterações no uso do solo demanda estratégias de gestão hídrica mais adaptativas e integradas, capazes de responder não apenas às projeções futuras do clima, mas também às pressões ambientais já em curso (Sousa *et al.*, 2018; Suekame *et al.*, 2021). Para

apoiar tais estratégias, a modelagem hidrológica tem se consolidado como ferramenta indispensável para compreender e antecipar impactos combinados do clima e do uso do solo sobre os recursos hídricos (Liu *et al.*, 2024; Mayou *et al.*, 2024).

Nessa direção, o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool* - Arnold *et al.*, 2012) e sua versão aprimorada, o SWAT+ (Bieger *et al.*, 2017), vêm ampliando a capacidade de simular processos hidrológicos complexos e de modelar a qualidade da água em diferentes escalas de bacias, beneficiando avaliações prospectivas e comparativas (Chawanda *et al.*, 2025; Moumane *et al.*, 2024). Essa evolução inclui a integração de dados de monitoramento por sensoriamento remoto e avanços computacionais que ampliam a robustez das simulações e a análise de cenários (Chawanda *et al.*, 2025).

A efetividade dessa modelagem, contudo, depende da qualidade das condições climáticas de contorno. Por isso, modelos climáticos com *downscaling* dinâmico, como o Eta-HadGEM2-ES — no qual o modelo regional Eta é aninhado ao HadGEM2-ES (*Earth System Model*) — têm se mostrado robustos na simulação de condições atmosféricas sobre a América do Sul (Dereczynski *et al.*, 2020). Quando acoplados ao SWAT, esses produtos viabilizam simulações hidrológicas mais detalhadas, inclusive em áreas sob intensa urbanização, permitindo avaliar com maior precisão os impactos climáticos e antrópicos sobre o regime hídrico (Campos *et al.*, 2024). Desta forma, a integração entre modelos hidrológicos e projeções climáticas regionais tem se demonstrado metodologicamente eficaz, como evidenciado em estudos que acoplaram o SWAT para avaliar variações de vazão e escoamento sob cenários futuros de clima e uso do solo (Zhang *et al.*, 2025).

Em reservatórios italianos, (Savino *et al.*, 2023) combinaram um ensemble de 13 GCM/RCM (RCP4.5/8.5), com *downscaling* e correção de viés, acoplando-o ao HEC-HMS; os autores mostraram que a incerteza do afluente é dominada pela precipitação e projetaram redução moderada da disponibilidade hídrica até o fim do século, com alterações no regime de vazões, apoiando o uso dessa integração para planejamento e regras operativas de reservatórios.

Já em bacia fluvial chinesa, (Wang *et al.*, 2022) acoplaram o SWAT a projeções CMIP6 de 14 GCMs (SSP2-4.5/SSP5-8.5) e encontraram aumento do escoamento anual e mensal, de Q05 e Q95, e maior frequência/intensidade de cheias com TR de 30 anos - com desempenho de calibração/validação adequado (Ens > 0,55; R<sup>2</sup> > 0,77;

( $PBIAS| < 2\%$ ), evidenciando que a abordagem é tecnicamente robusta e informativa para gestão adaptativa (Wang et al., 2022).

Alinhado a essa abordagem integrada entre modelagem hidrológica e projeções climáticas regionais, o presente estudo aplica o modelo SWAT acoplado a dados do Eta-HadGEM2-ES para simular os impactos das mudanças climáticas sobre as vazões hidrológicas na unidade hidrográfica do Riacho Fundo, Distrito Federal.

O estudo também busca quantificar as incertezas das projeções hidrológicas e fornecer subsídios técnicos para o planejamento hídrico regional. As projeções climáticas utilizadas foram geradas no âmbito do projeto “Estudos de Projeções de Clima para a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – RIDE” (Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – CGPDI) contratado pela Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal. O projeto produziu simulações de alta resolução (5 km, intervalos de 3 horas) para o período de 1961 a 2099, com base nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC — sendo adotado neste estudo o RCP4.5. Modelos regionais como o Eta são centrais na avaliação de impactos locais, por captarem com maior precisão as variabilidades espaciais e temporais do clima quando comparados a modelos globais (Campos *et al.*, 2024).

À luz desse conjunto de dados e da evidência acumulada, estudos recentes indicam que diferentes concentrações de gases de efeito estufa podem provocar alterações substanciais nas vazões, na frequência de eventos extremos e na disponibilidade hídrica no Cerrado (Rodrigues *et al.*, 2021; Serrano *et al.*, 2021). Tais achados reforçam a importância de acoplar projeções climáticas regionais de alta resolução a modelos hidrológicos para subsidiar o planejamento hídrico.

Nesse contexto, o downscaling Eta-HadGEM2-ES, aninhado ao HadGEM2-ES (*Earth System Model*), tem demonstrado robustez na simulação de condições atmosféricas na América do Sul; quando acoplado ao SWAT, viabiliza simulações hidrológicas mais detalhadas, inclusive em áreas sob intensa urbanização, permitindo avaliar com maior precisão os impactos climáticos e antrópicos sobre o regime hídrico. Esse potencial, contudo, é condicionado à qualidade e à aderência dos dados climáticos regionais utilizados como entrada do modelo (Santos *et al.*, 2019).

Apesar dos avanços recentes, ainda persiste uma lacuna significativa: a disponibilidade limitada de dados climáticos regionais em alta resolução devidamente ajustados para aplicação em modelos hidrológicos como o SWAT. Essa deficiência compromete diretamente a precisão das simulações e enfraquece a confiabilidade das

projeções hidrológicas usadas no planejamento hídrico. Em resposta, estudos contemporâneos ressaltam a urgência de integrar projeções climáticas regionais com correção de viés e técnicas de downscaling dinâmico como insumo para o SWAT, de modo a mitigar incertezas e elevar a robustez das simulações sob cenários futuros (Alasqah *et al.*, 2025; Mishra *et al.*, 2025).

A estrutura deste documento está organizada da seguinte forma: Introdução (Capítulo 1), Objetivos (Capítulo 2), Revisão de Literatura (Capítulo 3), Material e Métodos (Capítulo 4), Análises e Resultados (Capítulo 5), Discussões e Recomendações (Capítulo 6).

## **2 OBJETIVOS**

Este estudo tem como propósito avaliar uma metodologia de integração entre projeções climáticas regionais e modelagem hidrológica, visando à simulação da dinâmica hídrica da unidade hidrográfica do Riacho Fundo, localizada no Distrito Federal. Para tal, será realizada a combinação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com projeções climáticas provenientes do modelo regional Eta-HadGEM2-ES.

### **2.1 Objetivos Específicos**

- Avaliar a adequação e consistência dos dados climáticos do modelo Eta-HadGEM2-ES (cenários RCP4.5 e RCP 8.5) para uso no SWAT, incluindo etapas de tratamento, correção de viés e comparação estatística com dados observados do INMET.
- Executar simulações hidrológicas no SWAT com dados observados e projetados (RCP4.5 e RCP8.5), analisando a resposta da bacia do Riacho Fundo em termos de vazão, tendências e variabilidade sazonal e interanual.
- Identificar e interpretar os impactos potenciais das mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia, com ênfase em alterações na disponibilidade hídrica e na ocorrência de eventos extremos, fornecendo subsídios para planejamento e gestão hídrica.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e técnica que sustenta o desenvolvimento desta pesquisa, com ênfase nas interações entre as mudanças climáticas, os modelos climáticos e a modelagem hidrológica. A revisão foi estruturada em duas seções principais.

A primeira seção (3.1) aborda os impactos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico, discute os avanços e limitações dos modelos climáticos globais e regionais (3.1.1), com destaque específico para o modelo Eta-HadGEM2-ES (3.1.2), e explora as principais técnicas de correção de viés (3.1.3), além da integração desses dados com a ferramentas de modelagem hidrológica (3.1.4).

A segunda seção (3.2) é dedicada à ferramenta de modelagem SWAT, apresentando seus princípios de funcionamento (3.2.1), suas aplicações em bacias do bioma Cerrado (3.2.2), tendências de desenvolvimento e aperfeiçoamento (3.2.3), aplicações no bioma Cerrado (3.2.4) e calibração e validação comumente utilizados no contexto brasileiro (3.2.5).

#### 3.1 Impactos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico

Para situar o debate, este tópico apresenta os mecanismos pelos quais as mudanças climáticas afetam o regime hidrológico, do panorama internacional ao recorte brasileiro e, adiante, ao Cerrado.

A literatura converge que essas mudanças reconfiguram precipitação, evapotranspiração, armazenamento e escoamento, com efeitos diretos sobre a quantidade e a qualidade da água. Isso se expressa na redistribuição das chuvas no tempo e no espaço, na elevação da temperatura do ar — que aumenta a demanda evaporativa e o déficit de pressão de vapor (VPD) — e na maior frequência e intensidade de extremos (secas e chuvas intensas), ampliando riscos e custos de gestão em sistemas agrícolas, urbanos e industriais (Delanhese *et al.*, 2024; Ibe e Amikuzuno, 2019; Mafra, Sampaio e Santos, 2023; Narayanan, Peter e Keellings, 2024; Rimi *et al.*, 2022; Samset *et al.*, 2018; Twisa e Buchroithner, 2019).

À luz das avaliações recentes, o IPCC projeta a persistência e a intensificação desses processos nas próximas décadas, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação baseadas em evidências (Calvin *et al.*, 2023; Masson-Delmotte *et al.*, 2021).

No Brasil, evidências indicam, sob cenários de maiores concentrações de CO<sub>2</sub>, tendência de redução de vazões médias e maior frequência de secas em diversas bacias (Rodrigues *et al.*, 2020). Esse pano de fundo nacional enquadra a especificidade do Cerrado, bioma cuja resposta climática é heterogênea no espaço, combinando tendências de aquecimento e alterações na precipitação que variam entre sub-regiões (Rodarte e Laurini, 2024). Estudos de regionalização climática indicam aumento do déficit de pressão de vapor (VPD), intensificação da variabilidade sazonal e maior frequência de eventos extremos, sinalizando que o regime hidrológico responde de forma sensível não apenas às médias climáticas, mas também a limiares críticos de temperatura e umidade (Amorim *et al.*, 2022a; Cattelan *et al.*, 2024).

Além do sinal climático, a mudança de uso e ocupação do solo atua como modulador decisivo das vazões em bacias do Cerrado — por vezes, com efeitos comparáveis ou superiores aos das mudanças climáticas isoladas (Coelho *et al.*, 2025; Salmona *et al.*, 2023). Chuvas mais concentradas potencializam erosão e perda de solo, reduzindo infiltração e recarga e impactando a disponibilidade e a qualidade da água (Schwambach *et al.*, 2024). Processos atmosféricos, como a carga de aerossóis associada a queimadas, alteram o balanço radiativo e a evapotranspiração, oferecendo um elo observacional para mudanças no balanço hídrico (Silva *et al.*, 2025). No nível de habitats-chave, as veredas — zonas úmidas reguladoras de recarga e vazões — podem sofrer reorganizações sob mudanças climáticas, com impactos diretos na hidroregulação e nos serviços ecossistêmicos (Passos *et al.*, 2025).

No recorte do Distrito Federal, inserido integralmente no Cerrado e frequentemente referido como “caixa d’água” do Centro-Oeste, a rede de drenagem apresenta baixas vazões específicas, o que torna o sistema altamente vulnerável a extremos hidrológicos. Essa vulnerabilidade é agravada por crescimento urbano desordenado, degradação de nascentes e redução de cobertura vegetal, fatores que comprimem a oferta e elevam a variabilidade intra/anual (Cardoso *et al.*, 2024; Jacob *et al.*, 2020).

Em perspectiva regional, diagnósticos recentes reforçam a vulnerabilidade hídrica sob a interação entre extremos climáticos e pressões antrópicas, demandando gestão integrada e planejamento adaptativo de recursos (Paula *et al.*, 2024).

Diante desse conjunto de evidências, duas linhas de ação tornam-se estratégicas e complementares. A primeira é científica/metodológica: integrar dados de campo, modelagem hidrológica e cenários de uso do solo, inclusive em bacias com dados limitados, com apoio de aprendizado de máquina para quantificar incertezas e melhorar prognósticos de regime (Almagro *et al.*, 2025; Amorim *et al.*, 2022b). A segunda é operacional/ecossistêmica: proteger e restaurar veredas e áreas úmidas, aprimorar o manejo do fogo e mitigar a erosão, conectando conservação ecológica com manutenção da disponibilidade hídrica (Pereira *et al.*, 2022; Schwamback *et al.*, 2024).

Em síntese, as evidências globais e nacionais convergem para a caracterização do Cerrado como um bioma altamente sensível às mudanças climáticas e às pressões antrópicas. Os impactos já observados — como processos de erosão acelerada, alterações nos fluxos de evapotranspiração e a reconfiguração de habitats úmidos — somam-se a projeções robustas de intensificação de extremos e mudanças na sazonalidade climática, com efeitos diretos sobre a disponibilidade hídrica. Esse contexto justifica a ênfase desta pesquisa na caracterização detalhada do regime hidrológico sob múltiplos cenários futuros, visando oferecer subsídios técnicos para estratégias de adaptação no Distrito Federal e entorno (Braga e Laurini, 2024; Cattelan *et al.*, 2024; Coelho, Chaves e Fonseca, 2025; Delanhese *et al.*, 2024; Mafra, Sampaio e Santos, 2023; Passos *et al.*, 2025; Salmona *et al.*, 2023).

### **3.1.1 Modelos climáticos globais e regionais: avanços e limitações**

Nas últimas décadas, observou-se um avanço significativo no desenvolvimento de Modelos Climáticos Globais (GCMs) e Modelos Climáticos Regionais (RCMs), que têm proporcionado uma compreensão mais aprofundada do sistema climático em escalas temporais de longo prazo. Os GCMs, em particular, oferecem representações abrangentes das interações entre os diversos componentes do sistema climático, conforme evidenciado por estudos que documentam as melhorias implementadas na

sexta fase do Coupled Model *Intercomparison Project* (CMIP6) (Casagrande, Stachelski e Souza, de, 2023; Liu et al., 2021; Wu et al., 2019).

Modelos recentes, como o IPSL-CM6A-LR, foram projetados para lidar com as complexidades do sistema climático, apresentando avanços nas parametrizações físicas e melhorias na simulação de variáveis climáticas fundamentais (Boucher *et al.*, 2020).

Casagrande et al. (2023) avaliaram o desempenho dos modelos CMIP6 em comparação com os do CMIP5, destacando avanços na representação da cobertura e concentração de gelo marinho na Antártida. Resultados semelhantes foram observados para modelos como o BCC-CSM, que também apresentou melhorias significativas na transição do CMIP5 para o CMIP6, conforme discutido por Wu et al. (2019).

Liu et al. (2021) abordaram as contribuições das forçantes antrópicas para as alterações nos fluxos de evapotranspiração, utilizando simulações do CMIP6. Esses autores ressaltam a relevância dos GCMs para o entendimento das mudanças climáticas em níveis regional e global, o que é essencial para a gestão de recursos hídricos, dada a crescente criticidade das incertezas relacionadas às previsões de evapotranspiração.

As limitações dos GCMs e RCMs têm impulsionado pesquisas voltadas para a correção de vieses e a quantificação de incertezas em procedimentos de downscaling. Teutschbein e Seibert, 2012 destacam que a correção estatística de vieses é um passo fundamental para adequar as saídas dos GCMs e RCMs, especialmente em estudos de impactos hidrológicos.

Outra abordagem consolidada na literatura trata da evolução das técnicas de downscaling, que representa um aspecto central para o aprimoramento das projeções climáticas, com a transição de abordagens empíricas, como descrito por Sørland et al. (2018), para métodos dinâmicos baseados em fundamentos físicos, conforme analisado por Xu et al. (2019). Essa transição reflete um esforço contínuo em busca de maior acurácia nas projeções, permitindo que os modelos climáticos capturem de forma mais fiel a variabilidade e as tendências regionais.

Apesar desses avanços, persistem desafios significativos, como erros de parametrização e limitações de escala, que comprometem a fidelidade de algumas simulações, sobretudo no que diz respeito à representação de processos em microescala. Esses fatores podem resultar em uma representação inadequada de

fenômenos climáticos complexos e em imprecisões nas projeções, conforme evidenciado por Xu et al. (2019).

Assim, a mitigação dessas incertezas continua sendo essencial para garantir a efetividade e a confiabilidade das projeções climáticas, com impactos diretos no planejamento de políticas públicas e na gestão ambiental.

Devido ao fato de alguns modelos climáticos operarem com calendários de 360 dias por ano, torna-se essencial aplicar correções nos dados para evitar distorções em estudos de impactos climáticos regionais — especialmente aqueles que avaliam variabilidade hídrica e tendências de temperatura em escalas de longo prazo. Para lidar com lacunas e ajustes temporais, técnicas como interpolação linear e redistribuição ponderada têm sido empregadas com o objetivo de compensar distorções decorrentes de anos bissextos e inconsistências nos dados observacionais (Mesquita e Almeida, 2023; Rafael *et al.*, 2023). A escolha adequada do método de interpolação é decisiva para garantir a qualidade das simulações e análises em modelagens ambientais (Kososki *et al.*, 2022).

### **3.1.2 O modelo Eta-HadGEM2-ES: características e aplicações no Brasil**

O modelo climático regional Eta, desenvolvido pelo INPE, foi concebido para resolver explicitamente a dinâmica atmosférica em malhas de alta resolução, com esquemas físicos adaptados à orografia e às circulações locais, como brisas. Essa configuração o distingue dos modelos globais (GCMs) ao proporcionar melhor representação da variabilidade espacial e temporal em escala sub-sinótica (Silva *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2023).

Operacionalmente, o Eta funciona como um RCM aninhado, recebendo condições de contorno de modelos globais — como o HadGEM2-ES — para refinar o campo climático sobre regiões específicas, mantendo a consistência dinâmica com o GCM de origem (Tavares *et al.*, 2023).

Na configuração Eta-HadGEM2-ES, o downscaling dinâmico é utilizado para gerar projeções regionais de alta resolução espacial e temporal. Essa abordagem tem demonstrado melhor desempenho na representação de gradientes de precipitação, extremos climáticos e efeitos orográficos, em comparação aos GCMs isolados. Ainda assim, permanecem vieses sistêmicos que exigem técnicas de correção estatística (Lima et al., 2023; Tavares et al., 2023). Estudos comparativos mostram que o Eta-

HadGEM2-ES pode produzir projeções regionais distintas de outras combinações GCM-RCM, com variações sensíveis nos padrões de precipitação, conforme o regime climático e o cenário de emissões considerado (Amorim et al., 2022a; Campos et al., 2024).

Quanto ao desempenho, o Eta-HadGEM2-ES apresenta boa concordância com dados observacionais em várias bacias hidrográficas, embora erros sistemáticos justifiquem o uso de correção de viés antes do acoplamento hidrológico. Métodos como transformações baseadas em distribuições estatísticas têm sido aplicados para alinhar os dados simulados aos observados, resultando em ganhos significativos para aplicações em recursos hídricos (Carvalho *et al.*, 2021; Ferreira e Valverde, 2022; Tavares *et al.*, 2023).

Deve-se considerar que pesquisas mais recentes discutem a performance do HadGEM2-ES, especialmente à medida que novos modelos, como o CMIP6, se tornam disponíveis.

Com o avanço da modelagem climática, novas versões dos modelos vêm sendo avaliadas. O estudo de Borato et al. (2024) analisa o desempenho dos modelos CMIP5 e CMIP6, incluindo o HadGEM2-ES, na simulação do clima sobre o Atlântico Sul, destacando a importância da consistência entre projeções futuras e simulações históricas. De forma complementar, Vautard et al. (2021) discutem a ampliação do uso de RCMs na geração de informações climáticas regionais para fins de pesquisa e serviços climáticos.

Neste estudo, adotou-se o cenário RCP4.5, que representa uma trajetória intermediária de concentração de gases de efeito estufa, com forçamento radiativo de cerca de  $4,4 \text{ W/m}^2$  até o final do século XXI (Caesar *et al.*, 2013). As projeções climáticas utilizadas derivam dos GCMs HadGEM2-ES e MIROC-ESM, ambos do CMIP5, sendo a estrutura metodológica baseada no HadGEM2-ES o foco principal.

A robustez da configuração Eta-HadGEM2-ES deriva das inovações incorporadas no HadGEM2-ES, como a inclusão de vegetação dinâmica e ciclos biogeoquímicos, associadas à capacidade do Eta de realizar o downscaling dinâmico. Essa integração permite reduzir os vieses comuns aos GCMs e melhorar a simulação de fenômenos locais, como eventos extremos, o que é crucial para estudos hidrológicos em bacias hidrográficas (Chou, Sin Chan; *et al.*, 2014; Fontolan *et al.*, 2019).

Estudos de validação, como o de Almagro et al. (2020), aplicaram métricas como PBIAS e coeficiente de correlação para avaliar o desempenho do Eta-HadGEM2-ES na representação da precipitação média anual e do ciclo sazonal em diferentes biomas. Os resultados indicaram viés satisfatório para a Floresta Atlântica (+2%), Caatinga (−6%) e Pampa (−3%), mas subestimação significativa no Cerrado (−26%). Em contraste, o Eta/MIROC5 teve melhor desempenho para a Amazônia (−7%) e Cerrado (+6%), embora tenha subestimado fortemente a precipitação no Pantanal (−14%) e no Pampa (−39%). O coeficiente de correlação do Eta-HadGEM2-ES superou 0,50 na maioria dos biomas, com bom desempenho no Cerrado, enquanto o Eta/MIROC5 apresentou valores mais baixos, especialmente no Pampa (até 0,07 em MAM e SON)

A tabela 1 apresenta, segundo as melhores correlações entre biomas e modelos climáticos encontradas por Almagro et al. (2020).

Tabela 1 – Adequação dos modelos climáticos por biomas brasileiros

<b><i>Bioma</i></b>	<b><i>Modelo Recomendado</i></b>
Amazônia	HadGEM2-ES
Floresta Atlântica	HadGEM2-ES
Cerrado	Eta/HadGEM2-ES
Caatinga	Eta/MIROC5
Pantanal	Eta/MIROC5
Pampa	Eta/HadGEM2-ES

**Fonte:** Almagro, 2020.

No contexto do Distrito Federal, destaca-se o projeto “Estudos de Projeções de Clima para a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – RIDE”, conduzido pela SEMA-DF junto ao Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, que produziu projeções de alta resolução para subsidiar o planejamento ambiental e a gestão de recursos hídricos da região

O projeto realizou o downscaling dinâmico utilizando o modelo Eta em duas escalas espaciais: resolução de 20 km aplicada aos modelos globais HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM; e resolução de 5 km aplicada exclusivamente ao HadGEM2-ES, que na tabela 2 estão listadas as variáveis simuladas, que abrangeram os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC.

O conjunto resultante compreendeu dez cenários climáticos: oito com resolução de 20 km e dois com resolução de 5 km, abrangendo dez variáveis atmosféricas essenciais para estudos climáticos e hidrológicos.

Tabela 2- Variáveis climáticas Eta HadGEM-ES

Nome da Variável	Sigla	Unidade
Precipitação Total	PREC	mm/3h, mm/dia, mm/mês, mm/ano
Temperatura a 2 m	TP2M	°C
Radiação de Onda Curta Incidente à Superfície	OCIS	W/m <sup>2</sup>
Temperatura Máxima a 2 m	MXTP	°C
Temperatura Mínima a 2 m	MNTP	°C
Umidade Relativa a 2 m	UR2M	%
Vento Zonal a 10 m	U10M	m/s
Vento Meridional a 10 m	V10M	m/s
Vento Zonal a 100 m	U100	m/s
Vento Meridional a 100 m	V100	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Apesar dos avanços na representação regional do clima, o Eta-HadGEM2-ES ainda enfrenta limitações operacionais e metodológicas, como a propagação de vieses herdados dos modelos globais e o alto custo computacional para simulações de alta resolução. Para superar tais limitações, correções estatísticas de viés são essenciais — conforme demonstrado por estudos recentes que aplicam métodos robustos para ajustar distorções em saídas de RCMs (Nourani *et al.*, 2025).

Para mitigar esses problemas, tem-se adotado técnicas de correção estatística de viés e abordagens de quantificação de incertezas, como o uso de *ensembles* climáticos — conjuntos de simulações baseadas em diferentes modelos ou parametrizações que visam capturar a variabilidade e reduzir a incerteza nas projeções (Chou *et al.*; Farias *et al.*, 2020).

A incorporação dessas estratégias reforça o papel dos modelos regionais, como o Eta-HadGEM2-ES, como ferramentas fundamentais para compreender os impactos das mudanças climáticas em escala local. Essa capacidade é essencial para a formulação de políticas públicas mais adaptativas e baseadas em evidências,

sobretudo em contextos socioambientais vulneráveis (Almagro *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2024; Costa *et al.*, 2015; Mello *et al.*, 2021)

Além disso, o tratamento adequado dos dados climáticos é indispensável para garantir a robustez das simulações. Algumas abordagens empregadas para lidar com lacunas ou inconsistências temporais incluem técnicas como interpolação linear e redistribuição ponderada, especialmente úteis para compensar distorções causadas por anos bissextos ou falhas de medição (Mesquita e Almeida, 2023). A escolha apropriada do método de interpolação é crítica para assegurar a fidelidade das análises em modelagens ambientais (Kososki *et al.*, 2022).

As pesquisas recentes destacam a importância de uma abordagem integrada e intersetorial na análise de dados ambientais, promovendo uma comunicação eficaz entre disciplinas e atores sociais diversos — fator essencial para aprimorar a gestão ambiental (Santos Moysés, dos e Nuñez Viégas, 2023). Assim, metodologias robustas e atualizadas tornam-se ferramentas indispensáveis no trabalho de pesquisadores e formuladores de políticas, assegurando a precisão e a relevância das informações utilizadas nas análises climáticas e ambientais (Workman *et al.*, 2024).

### **3.1.3 Técnicas de correção de viés e regionalização climática**

No escopo do modelo Eta-HadGEM2-ES, parte-se do princípio de que projeções regionais de alta resolução melhoram a expressão de gradientes espaciais e extremos climáticos, embora não eliminem discrepâncias sistemáticas frente às observações. Isso porque os campos produzidos por downscaling dinâmico — ou seja, um modelo climático regional aninhado a um modelo global e forçado por condições de contorno de grande escala — podem herdar parte da estrutura de erro do GCM e ainda introduzir vieses próprios associados às parametrizações aplicadas. Em particular, estudos recentes apontam que mesmo RCMs refinados carregam viés residual que requer correção estatística antes de uso em aplicações de impacto (Kim, Evans e Sharma, 2023; Nourani *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a correção de viés deixa de ser um refinamento opcional e se torna etapa necessária ao uso hidrológico: mesmo desvios modestos em precipitação e temperatura tendem a se propagar e ampliar erros de vazão no SWAT (Menapace *et al.*, 2025; Teutschbein e Seibert, 2012).

Conceitualmente, entende-se viés como a diferença sistemática entre estatísticas das séries simuladas e observadas (médias, variâncias, quantis e frequência de zeros). Sua mitigação é buscada por um conjunto de abordagens — dos esquemas simples de reescala aos que ajustam a distribuição inteira — com resultados consistentes reportados para aplicações hidrológicas (Farias *et al.*, 2020; Menapace *et al.*, 2025).

Tabela 3 – Métodos de correção de viés.

<b>Tipo de Método</b>	<b>Nome do Método</b>	<b>Descrição</b>
Univariado	<i>Delta Change (DC)</i>	Aplica mudanças médias (ou percentuais) de clima projetado às séries observadas.
Univariado	<i>Quantile Mapping (QM)</i>	Ajusta as distribuições de probabilidade dos dados simulados com base nas observadas.
Univariado	<i>Empirical Quantile Mapping (EQM)</i>	Versão empírica do QM baseada em dados amostrais.
Univariado	<i>Bias Correction with Standard Deviation (BCSD)</i>	Corrige a média e a variância para ajustar o modelo aos dados observados.
Multivariado	<i>Canonical Correlation Analysis (CCA)</i>	Utiliza correlação canônica para capturar dependências entre múltiplas variáveis.
Multivariado	<i>Multivariate Bias Correction (MBC)</i>	Corrige múltiplas variáveis preservando as relações entre elas.
Multivariado	<i>Rank Resampling (RR)</i>	Mantém a estrutura de dependência multivariada por reamostragem dos ranks.

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2025).

A literatura organiza os métodos de correção em duas famílias, como demonstrado na tabela 3 (Farias *et al.*, 2020; Menapace *et al.*, 2025): (i) Univariados, que corrigem cada variável de forma independente — p. ex., *Linear Scaling* (ajuste da média), *LOCI* (frequência de dias chuvosos), *Power Transformation* (variância) e *Quantile Mapping (QM)*, este último robusto por alinhar toda a distribuição (CDF) simulada à observada; e (ii) Multivariados, que corrigem simultaneamente múltiplas variáveis preservando correlações cruzadas, mas exigem maior complexidade e séries observacionais mais extensas e consistentes. Ainda, as correções de viés

podem ser abordadas em função das variáveis climáticas, como pode ser visto na tabela 4.

Essas metodologias ajustam as distribuições estatísticas das variáveis climáticas simuladas para que se aproximem dos registros históricos observados, o que aumenta a confiabilidade das simulações hidrológicas em processos como escoamento superficial, evapotranspiração e recarga aquífera (Dhawan *et al.*, 2024; Menapace *et al.*, 2025). Em termos conceituais, o QM (equação 1) emprega uma função de transferência quantílica que mapeia cada valor simulado para o quantil correspondente na distribuição observada histórica, garantindo a adaptação da saída simulada à realidade observada (Dhawan *et al.*, 2024).

#### Equação 1 – Equação QM

$$\mathcal{X}^*(t) = F_{obs}^{-1} [F_{sim}(xt)]$$

Onde  $\mathcal{X}^*(t)$  representa o dado corrigido,  $F_{sim}$  é a função de distribuição empírica dos dados simulados e  $F_{obs}^{-1}$  é a função quantil dos dados observados.

Com isso, o QM alinha a forma da distribuição (médias, variâncias e caudas), melhora a representação de extremos e reduz distorções na sazonalidade — atributos essenciais ao Cerrado, onde sazonalidade marcada e eventos extremos controlam recarga e vazões. Métodos mais simples (p. ex., *Linear Scaling*) são úteis para médias, mas não capturam bem os extremos; por sua vez, abordagens multivariadas são promissoras, porém demandam dados observados multivariados de alta qualidade e trazem maior ônus computacional.

Tabela 4 – Métodos de correção de viés por variável climática

Tipo de Método	Variável Climática	Vantagens	Desvantagens	Citação
Univariado	Precipitação, Temperatura	Simple, rápido e fácil de aplicar	Não corrige variância, frequência de eventos ou extremos	Farias . (2020); Teutschbein & Seibert (2012)
Univariado	Precipitação	Corrige a frequência de dias chuvosos e intensidade média	Não ajusta a forma da distribuição nem extremos	Menapace . (2025)
Univariado	Precipitação	Ajusta média e coeficiente de variação	Parâmetros difíceis de estimar, limitado para extremos	Menapace . (2025)
Univariado	Precipitação, Temperatura	Alinha toda a distribuição, incluindo extremos	Mais complexo, pode superajustar se a amostra for pequena	Teutschbein & Seibert (2012); Menapace . (2025)
Univariado	Temperatura	Corrige média e variância	Não preserva estrutura de dependência temporal	Menapace . (2025)
Multivariado	Temp. + Precipitação	Preserva correlações cruzadas, ideal para estudos acoplados	Complexos, exigem grande volume de dados, ainda pouco usados	Vrac & Friederichs (2015); Cannon (2018)

Fonte: Menapace (2025).

### 3.1.4 Integração de Modelos Climáticos com Modelos Hidrológicos: Avanços e Desafios

A integração entre modelos climáticos e hidrológicos tem se consolidado como uma abordagem fundamental para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Modelos hidrológicos como o SWAT dependem de séries temporais de variáveis climáticas, tais como precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, para simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Neste contexto, os dados climáticos gerados por Modelos Climáticos Regionais (RCMs), quando adequadamente processados e corrigidos quanto a viés, constituem uma fonte de insumos consistente para tais simulações (Almagro et al., 2025; Amorim et al., 2022b; Fontolan et al., 2019; Paula et al., 2024; Schwambach et al., 2024; Silva et al., 2025).

O principal desafio associado a essa integração refere-se à compatibilidade entre os formatos de dados. As saídas dos modelos climáticos frequentemente apresentam-se em formatos de grade (grids), nos quais cada célula representa um valor espacial, ou em formatos binários específicos, exigindo processamento adicional para sua utilização em softwares de modelagem hidrológica como o SWAT (Almagro et al., 2025; Braga e Laurini, 2024; Cattelan et al., 2024; Schwambach et al., 2024).

Por fim, o potencial da integração entre modelos climáticos e hidrológicos tem sido amplamente reconhecido por sua capacidade de antecipar mudanças no regime hidrológico, orientar estratégias de adaptação e identificar áreas hidrográficas vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. No contexto do Cerrado brasileiro e regiões adjacentes, diversos estudos têm demonstrado a eficácia dessa abordagem em avaliar alterações no regime de vazões, extremos de precipitação e disponibilidade hídrica para usos urbanos, agrícolas e energéticos (Amorim et al., 2022b; Coelho, Chaves e Fonseca, 2025; Rodarte e Laurini, 2024).

### **3.2 Fundamentos do modelo SWAT e aplicações recentes**

A modelagem hidrológica, fundamentada nas formulações físicas do balanço hídrico, é essencial para compreender os efeitos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade e o comportamento da água, integrando processos de precipitação, infiltração e escoamento à análise dos serviços ecossistêmicos associados (Zhao et al., 2024). O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é uma ferramenta amplamente utilizada, caracterizada pela sua estrutura semi-distribuída e de simulação contínua, que modela a heterogeneidade espacial por meio de unidades de resposta hidrológica (HRUs) e representa processos hidrológicos fundamentais com base em formulações físicas explícita (Quamar et al., 2025). Exemplos incluem o escoamento superficial pelo método *SCS–Curve Number* e a evapotranspiração através da equação de *Penman–Monteith* (Azeez e Jowad, 2024). Além disso, processos de percolação e fluxos de base são considerados, abrangendo aquíferos raso e profundo, utilizando modelos adequados (Wei et al., 2023).

Recentemente, Trentin et al. (2023) estudaram o balanço hídrico em uma bacia do Bioma Pampa no Brasil, revelando que as mudanças no uso da terra influenciam variavelmente o escoamento e a vazão, dependentes do tipo de solo (Trentin et al.,

2023). Além disso, a pesquisa de Paungarten e Santos enfatizou que as mudanças climáticas não só afetam a disponibilidade de água, mas também aumentam a variabilidade das fontes hídricas, afetando a segurança hídrica em regiões críticas como a Amazônia (Paungarten e Santos, 2023). Essas análises contribuem para um entendimento mais amplo dos efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, crucial para o manejo adequado.

A qualidade da água e a preservação dos ecossistemas aquáticos também têm sido temas centrais na literatura moderna. Andrade (2023) discutiram como as mudanças climáticas impactam diretamente os ecossistemas aquáticos, enfatizando a necessidade de monitoramento hidrológico (Andrade, 2023). Isso se relaciona com o trabalho de Silva que observou que as consequências das mudanças climáticas incluem insegurança hídrica, afetando também a segurança alimentar em megacidades da América Latina, como São Paulo e Cidade do México (Silva *et al.*, 2024).

### **3.2.1 Conceitos Fundamentais e Estrutura do SWAT**

O modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é uma ferramenta semi-distribuída desenvolvida para avaliar os impactos do uso da terra, das práticas de manejo e das condições climáticas sobre os recursos hídricos em bacias hidrográficas (Arnold, Allen e Bernhardt, 1993). Sua estrutura é baseada em processos físicos e permite simulações de longo prazo, incorporando variáveis climáticas essenciais como precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento (Neitsch *et al.*, 2009).

A fase do terreno do ciclo hidrológico controla a quantidade de água, sedimento, nutriente e descarga de pesticidas no canal principal de cada sub-bacia. A segunda divisão é a fase do itinerário do ciclo hidrológico, que pode ser definida como a movimentação da água, sedimentos, etc. pela rede de canais da bacia hidrográfica até a descarga.

Neitsch (2009, p. 09) apresenta a fórmula denominada de equação do equilíbrio hídrico:

Equação 2 – Equação do equilíbrio hídrico utilizada no SWAT

$$SW_1 = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Onde  $SW_1$  é a quantidade final de água no solo (mm H<sub>2</sub>O),  $SW_0$  é a umidade do solo inicial no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $t$  é o tempo (dias),  $R_{day}$  é a quantidade de precipitação no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{surf}$  é a quantidade de escoamento superficial no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $E_a$  é a quantidade de evapotranspiração no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $W_{seep}$  é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O), and  $Q_{gw}$  é a quantidade de retorno do fluxo no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O). (Neitsch, 2009)

Uma das principais vantagens do SWAT é a sua capacidade de subdividir a bacia hidrográfica em unidades de resposta hidrológica (HRUs – *Hydrological Response Units*). Essas unidades permitem uma representação espacial detalhada dos processos hidrológicos, associando cada HRU a características específicas de solo, topografia e uso e cobertura da terra. Além da simulação de processos hidrológicos básicos, o SWAT conta com módulos específicos para qualidade da água, produção de sedimentos e dinâmica de nutrientes, ampliando sua aplicabilidade em estudos ambientais complexos (Das *et al.*, 2022; Ferreira, 2021).

O modelo também é compatível com dados de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o que facilita sua utilização em regiões com carência de dados observacionais. (Amorim *et al.*, 2022a; Ngo *et al.*, 2020).

Sua estrutura modular permite ao usuário realizar análises desde o processamento de dados de entrada até a interpretação dos resultados simulados.

### **3.2.2 Aplicações do SWAT em Cenários de Mudanças Climáticas**

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é amplamente empregado em estudos que analisam os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos em diferentes regiões do mundo. Segundo o SWAT Literature Database (Srinivasan, 2025) entre as 5.313 publicações cadastradas desde 2000, cerca de 3.924 (73,86%) tratam diretamente de mudanças climáticas ou da aplicação de modelos climáticos. Esse volume expressivo confirma a consolidação do SWAT como uma das principais ferramentas de modelagem hidrológica para avaliação de cenários

futuros. Sua capacidade de integrar variáveis climáticas, de uso do solo e hidrológicas em análises de longo prazo oferece um suporte científico robusto à gestão adaptativa e ao planejamento de recursos hídricos frente à variabilidade climática.

As principais categorias de aplicação identificadas incluem “Climate change” (2.010 publicações), “*Climate change and land use change*” (1.086), “Climate data effects” (729), “*Climate change and human activities change*” (114) e “Climate variability and climate change”. Juntas, essas cinco categorias somam mais de 3.900 estudos, o que evidencia a centralidade do tema climático nas aplicações recentes do SWAT

O levantamento indica que o SWAT tradicional permanece como a versão predominante, respondendo por 4.827 publicações (90,85%). O SWAT+, mais recente e modular, aparece em 144 estudos (2,71%), sinalizando uma tendência crescente de adoção para aplicações que exigem maior detalhamento espacial e integração com outros sistemas. Outras variantes, como o SWIM (78 publicações), o SWAT (modified) (75) e o SWAT-MODFLOW (30), destacam-se em estudos voltados à interação entre águas superficiais e subterrâneas.

A análise detalhada de 68 artigos publicados entre 2023 e 2025 reforça que a maior parte das pesquisas se concentra na resposta hidrológica a cenários de aquecimento global, utilizando o SWAT para quantificar alterações na vazão, evapotranspiração, produção de sedimentos e qualidade da água. As categorias mais recorrentes foram “climate change” e “*climate and land use change*”, que correspondem a mais de dois terços das publicações, consolidando o SWAT como uma ferramenta essencial para o planejamento de recursos hídricos e a gestão de riscos diante da crescente variabilidade climática.

A escala espacial predominante situa-se entre 1.000 e 10.000 km<sup>2</sup>, abrangendo bacias de médio porte em regiões agrícolas ou semiáridas. Embora originalmente desenvolvido para ambientes rurais dos Estados Unidos, o SWAT foi amplamente adaptado a contextos hidrológicos diversos — como bacias etíopes, indianas, chinesas e latino-americanas. Essa ampla aplicabilidade reflete o avanço da modelagem hidrológica nas últimas duas décadas. Ainda assim, a calibração em regiões tropicais e semiáridas continua desafiadora, devido à escassez de dados observados e às incertezas inerentes às projeções climáticas.

Em relação aos cenários climáticos, cerca de 74% dos estudos aplicaram os experimentos CMIP5, com predominância dos cenários RCP4.5 (38%) e RCP8.5

(35,5%). Os experimentos CMIP6 apareceram em 26% das publicações, destacando-se os cenários SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Entre os modelos globais mais empregados estão HadGEM2, MIROC5, CanESM2, BESM e MPI-ESM, enquanto os modelos regionais mais utilizados são o Eta, RegCM e WRF. Aproximadamente 60% dos trabalhos aplicaram alguma forma de downscaling ou correção de viés (principalmente *Quantile Mapping*), evidenciando o esforço da comunidade científica em aprimorar a precisão espacial das projeções de temperatura e precipitação.

No que se refere à calibração e ao desempenho, 79% dos estudos utilizaram o ambiente SWAT-CUP, com destaque para o método SUFI-2 (46%), seguido por GLUE (18%), abordagens Bayesianas (10%), PSO/DE (7%) e MCMC/DREAM (5%). As métricas mais frequentes foram NSE (65%), R<sup>2</sup> (52%), KGE (28%) e PBIAS (24%). Os valores médios de NSE entre 0,65 e 0,80, R<sup>2</sup> entre 0,70 e 0,85 e KGE em torno de 0,72 indicam calibrações robustas e confiáveis. Esses resultados demonstram o amadurecimento metodológico do uso do SWAT como instrumento de apoio ao planejamento e à formulação de políticas públicas.

As variáveis mais simuladas foram a vazão (74%), sedimentos (41%), nutrientes (34%), evapotranspiração (21%) e recarga ou *baseflow* (13%). Em 62% dos trabalhos, múltiplos processos foram modelados de forma integrada, refletindo a busca por compreender os efeitos combinados das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico. De maneira geral, 85% dos estudos (2023-2025) apontam tendência de redução da disponibilidade hídrica média anual, especialmente sob cenários de maior forçamento radiativo (RCP8.5 e SSP5-8.5), com quedas médias de vazão entre 10% e 30%, chegando a mais de 50% em regiões semiáridas e de cabeceira.

Cerca de 72% dos estudos relatam aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, com picos de vazão até 40% mais elevados e períodos de seca até 25% mais longos em relação ao histórico. Essas projeções, associadas a elevações de 2 °C a 4,5 °C na temperatura média e a alterações sazonais na precipitação (chuvas mais concentradas e menor regularidade mensal), indicam riscos significativos à segurança hídrica, à recarga subterrânea e à integridade ecológica das bacias — especialmente quando combinados à expansão agrícola e à perda de cobertura vegetal.

As principais limitações metodológicas relatadas incluem incertezas associadas aos modelos climáticos (64%), escassez de dados observacionais (58%), dificuldade de parametrização em regiões tropicais (46%) e limitações na

representação de processos de evapotranspiração e infiltração (39%). Cerca de um terço dos trabalhos recomenda aprimorar a representação do uso e cobertura do solo, enquanto 24% sugerem incorporar sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para melhorar calibrações e previsões. Ainda assim, 77% dos autores consideram o desempenho do SWAT satisfatório e aplicável ao planejamento adaptativo. Em síntese, o modelo evoluiu de uma ferramenta de simulação física para uma plataforma de apoio à decisão, capaz de integrar clima, uso da terra e hidrologia em estratégias de gestão hídrica e mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

### **3.2.3 Tendências de Desenvolvimento e Aperfeiçoamento do SWAT**

O desenvolvimento contínuo do modelo SWAT tem se concentrado no aprimoramento da representação dos processos hidrológicos, com ênfase em maior realismo físico e integração entre os componentes do ciclo da água. Entre as inovações mais recentes, destaca-se a simulação acoplada entre a fase terrestre — que inclui interceptação, infiltração e escoamento superficial — e a propagação de fluxos em canais e reservatórios. Essa abordagem tem sido viabilizada por desenvolvimentos como o modelo acoplado SWAT+MODFLOW, que permite representar interações dinâmicas entre escoamento superficial e fluxos subterrâneos em bacias hidrográficas gerenciadas (Bailey *et al.*, 2025). Além disso, aprimoramentos no SWAT+ incluem módulos específicos para a alocação de água e operação de reservatórios, com uso de tabelas de liberação e regras de gestão que aumentam a fidelidade na simulação de sistemas hidrossedimentares complexos (Sánchez-Gómez *et al.*, 2025). Esses avanços indicam uma tendência crescente em direção à modelagem hidrológica integrada, que busca capturar com maior precisão os processos físicos interdependentes ao longo de todo o ciclo hidrológico (Guo *et al.*, 2025).

Conforme descrito por Neitsch *et al.* (2009), o SWAT é estruturado em módulos que compreendem desde a entrada e o pré-processamento de dados até a execução das simulações e a análise dos resultados. A componente terrestre considera o uso e cobertura do solo, topografia e propriedades físicas do solo, enquanto a hidrológica abrange os processos de precipitação, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e fluxo subterrâneo.

O modelo também dispõe de módulos específicos para a simulação de cheias, transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas, além da dinâmica de reservatórios. Os avanços recentes têm se concentrado em aprimorar a representação desses reservatórios, com foco na modelagem mais realista do transporte de sedimentos e do armazenamento hídrico (Ferreira, 2021; Salles, 2020).

Tais aprimoramentos consolidam o SWAT como uma das ferramentas mais completas e robustas para estudos hidrológicos em diferentes contextos geográficos, oferecendo suporte analítico consistente para a avaliação de impactos e estratégias de adaptação às mudanças climáticas (Zhang *et al.*, 2025).

### **3.2.4 Aplicações do SWAT no Bioma Cerrado**

O bioma Cerrado tem sido amplamente investigado por meio do modelo SWAT, em razão de sua elevada importância ecológica e das crescentes pressões antrópicas associadas à expansão agrícola, à urbanização e às alterações no uso e cobertura da terra. Sua expressiva heterogeneidade ambiental e vulnerabilidade hídrica tornam indispensável o uso de modelos hidrológicos robustos para subsidiar o planejamento e a gestão integrada dos recursos naturais, sobretudo diante das transformações ambientais aceleradas (Ferraz *et al.*, 2025a).

No âmbito da qualidade da água, trabalhos conduzidos na Universidade de Brasília por de Herrera (2013) e Santos Ferreira, (2016) utilizaram o SWAT para avaliar o transporte de nutrientes e poluentes em bacias com distintos graus de urbanização. Os resultados demonstraram a capacidade do modelo em representar, com consistência, os efeitos da ocupação do solo sobre a dinâmica da qualidade hídrica.

Quanto à produção de sedimentos, pesquisas de Carvalho (2014) e Simões (2019) analisaram o transporte de material particulado em microbacias do Cerrado sob diferentes cenários de uso e manejo da terra. Esses estudos evidenciam a sensibilidade do SWAT na simulação de processos erosivos e de geração de sedimentos em ambientes de alta suscetibilidade.

No campo da calibração e validação hidrológica, Condé (2021) e Salles (2012) avançaram na parametrização do modelo para diferentes condições do Cerrado, utilizando séries históricas de vazão observada. Esses esforços contribuíram para

aprimorar o desempenho do SWAT em regiões com características hidroclimáticas semelhantes.

Em estudos mais recentes, observa-se o fortalecimento de abordagens integradas, Almeida (2023) e Salles (2020) incorporaram técnicas de sensoriamento remoto para aprimorar o mapeamento do uso e cobertura da terra e refinar a representação espacial no SWAT. Complementarmente, Araújo (2019) e Pereira (2019) exploraram a integração entre a modelagem hidrológica superficial e os fluxos subterrâneos, incluindo a representação de aquíferos e das interações solo-água.

Esses avanços demonstram a flexibilidade e a adaptabilidade do SWAT para atender a diferentes objetivos de pesquisa no Cerrado — desde a avaliação da qualidade da água e da produção de sedimentos até o estudo integrado dos fluxos superficiais e subterrâneos. No contexto desta dissertação, esses antecedentes consolidam a viabilidade e a relevância do uso do SWAT na análise dos impactos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico da bacia do Riacho Fundo (Moura *et al.*, 2025).

### **3.2.5 Calibração e Validação do SWAT em Bacias Brasileiras**

A calibração e a validação do modelo SWAT são etapas fundamentais para assegurar a consistência e a representatividade das simulações hidrológicas, sobretudo em bacias brasileiras com regimes hidroclimáticos complexos, como as do bioma Cerrado. A calibração consiste no ajuste sistemático dos parâmetros do modelo para reduzir as discrepâncias entre os valores simulados e observados, enquanto a validação aplica esses parâmetros a um conjunto de dados independente, a fim de verificar a capacidade preditiva e a estabilidade do modelo (Ferraz *et al.*, 2025b; Santos *et al.*, 2018).

Em bacias representativas do Cerrado, diversos estudos apontam como mais sensíveis os parâmetros *Curve Number* (CN2), fator de recarga de base (ALPHA\_BF), limiar de contribuição de aquífero (GWQMN) e coeficiente de escoamento superficial (ESCO) (Ferreira, 2021; Simões, 2019). Esses parâmetros controlam diretamente processos-chave, como o escoamento superficial, a recarga de aquíferos e o fluxo de base — elementos críticos para compreender a dinâmica hidrológica regional.

A calibração pode ser conduzida manualmente ou por meio de algoritmos de otimização automática. Entre os mais utilizados no Brasil destacam-se o SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting Algorithm Version 2*) e o PSO (*Particle Swarm Optimization*). Estudos recentes, como os de Nunes (2022) e Almeida (2023), aplicaram essas metodologias com diferentes configurações, variando o número de simulações por iteração entre aproximadamente 800 e 5.000, conforme os recursos computacionais disponíveis e o nível de detalhamento pretendido.

A validação do modelo é realizada com um conjunto de dados independente e avaliada por meio de indicadores estatísticos amplamente empregados na literatura de modelagem hidrológica, como o coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE), o viés percentual médio (PBIAS) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Esses índices permitem quantificar o grau de ajuste entre as vazões simuladas e observadas, além de avaliar a estabilidade e o desempenho global do modelo (Beroho *et al.*, 2025).

Assim, a calibração e a validação constituem a base para a aplicação confiável do SWAT em estudos de projeção climática e gestão de recursos hídricos. A obtenção de indicadores de desempenho satisfatórios, como os relatados por Simões (2019) assegura que o modelo reproduza com fidelidade os processos hidrológicos observados, garantindo sua aplicabilidade na análise de cenários futuros e na formulação de estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os insumos e procedimentos que fundamentam a metodologia adotada para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico da bacia do Riacho Fundo. A Figura 1 sintetiza, de forma esquemática, as principais etapas desenvolvidas ao longo do estudo.

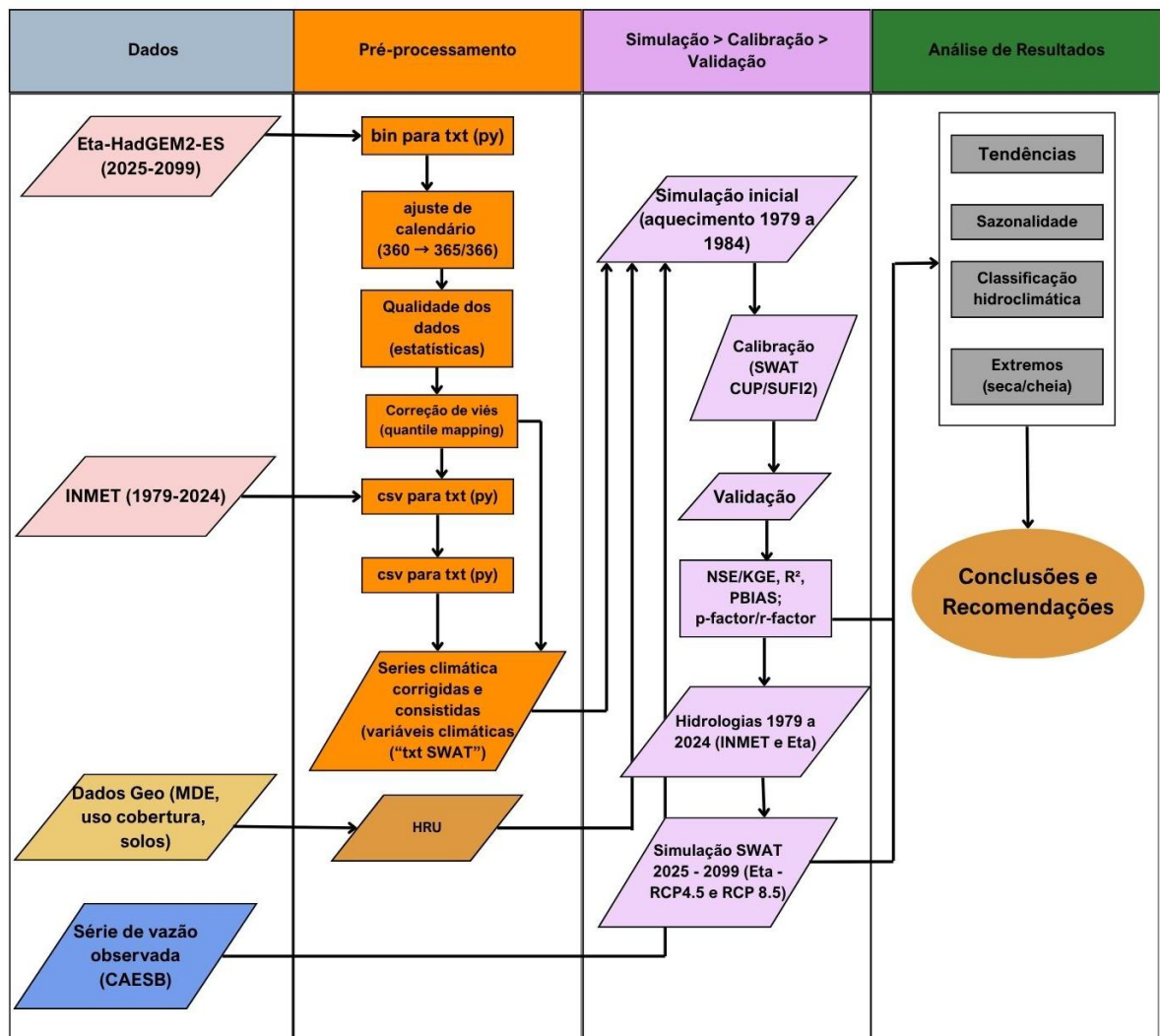


Figura 1. Fluxograma apresentando as etapas metodológicas do trabalho.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A metodologia integra ferramentas de modelagem hidrológica e climática, abrangendo desde a obtenção e o tratamento das bases de dados até a simulação de cenários futuros de vazão. Todo o processo foi conduzido com ênfase na

reprodutibilidade dos resultados e na garantia da qualidade técnica das etapas envolvidas.

Inicialmente, são apresentadas as características da infraestrutura computacional empregada, os ambientes de programação, os softwares especializados e os recursos auxiliares utilizados na preparação e automação dos dados. Em seguida, detalham-se os conjuntos de dados utilizados, organizados em três categorias principais:

i. **Dados climáticos simulados**, provenientes do modelo regional Eta-HadGEM2-ES, processados com técnicas de correção de viés e interpolação espacial para compatibilizar a resolução com o modelo hidrológico;

ii. **Dados climáticos observacionais**, obtidos a partir da estação meteorológica de Brasília (INMET), utilizados como referência empírica para calibração, validação e ajuste estatístico das projeções;

iii. **Dados geoespaciais**, incluindo modelo digital de terreno, uso e cobertura da terra e propriedades do solo, que compõem a base física da bacia e subsidiam a estruturação espacial do modelo SWAT.

Essa integração metodológica possibilitou combinar dados observados e simulados em uma estrutura analítica coesa, assegurando a rastreabilidade dos processos, a reprodutibilidade dos resultados e a robustez das simulações hidrológicas projetadas.

As subseções seguintes detalham cada etapa do método, com a indicação das respectivas fontes de dados, rotinas de processamento e aplicações no contexto desta pesquisa.

#### **4.1 Caracterização da área de estudo**

A bacia hidrográfica do Riacho Fundo está localizada na porção central do Distrito Federal, abrangendo uma área de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>. Ela compreende as regiões administrativas do Riacho Fundo, Núcleo Bandeirantes, Guará, Candangolândia, Park Way e Águas Claras, além de áreas rurais adjacentes. O córrego Riacho Fundo apresenta quatro afluentes principais — Vicente Pires, Guará, Açudinho e Coqueiros — que estruturam a rede de drenagem da bacia e deságuam no lago Paranoá.



A vazão média do córrego Riacho Fundo é de 3,17 m<sup>3</sup>/s, com Q90 = 1,79 m<sup>3</sup>/s e Q10 = 0,93 m<sup>3</sup>/s (Ferreira et al., 2017).

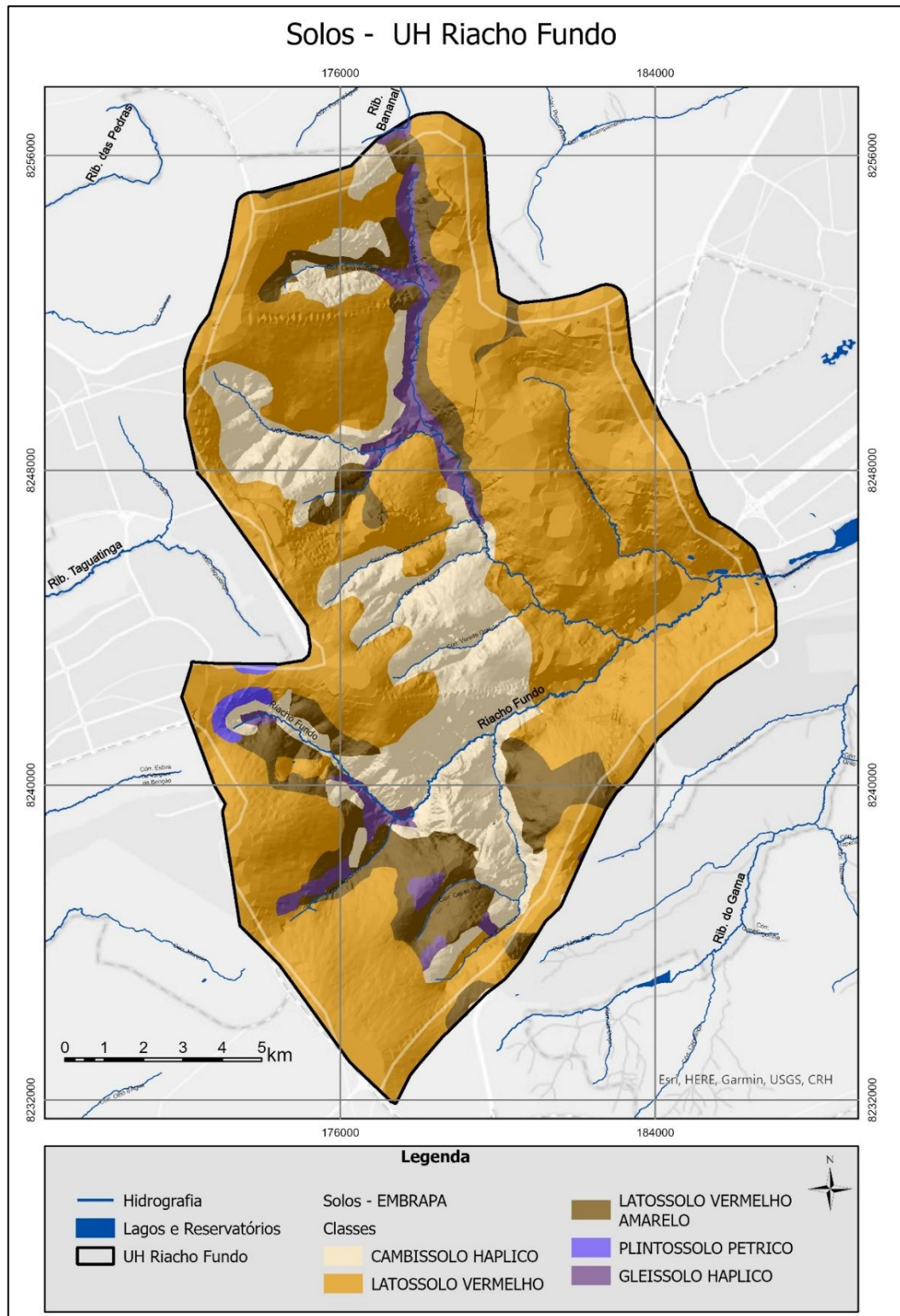


Figura 3 - Solos UH Riacho Fundo. Fonte: Elaborado pelo autor (2025); Reatto *et al* (2004).

A Figura 3 apresenta a distribuição dos solos da bacia, conforme Reatto et al. (2004). Predominam Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, seguidos por Argissolos e Cambissolos, geralmente associados a relevo suavemente ondulado a ondulado. Essa composição pedológica influencia diretamente a infiltração, o escoamento superficial e a recarga subterrânea, parâmetros fundamentais na simulação hidrológica realizada com o modelo SWAT.

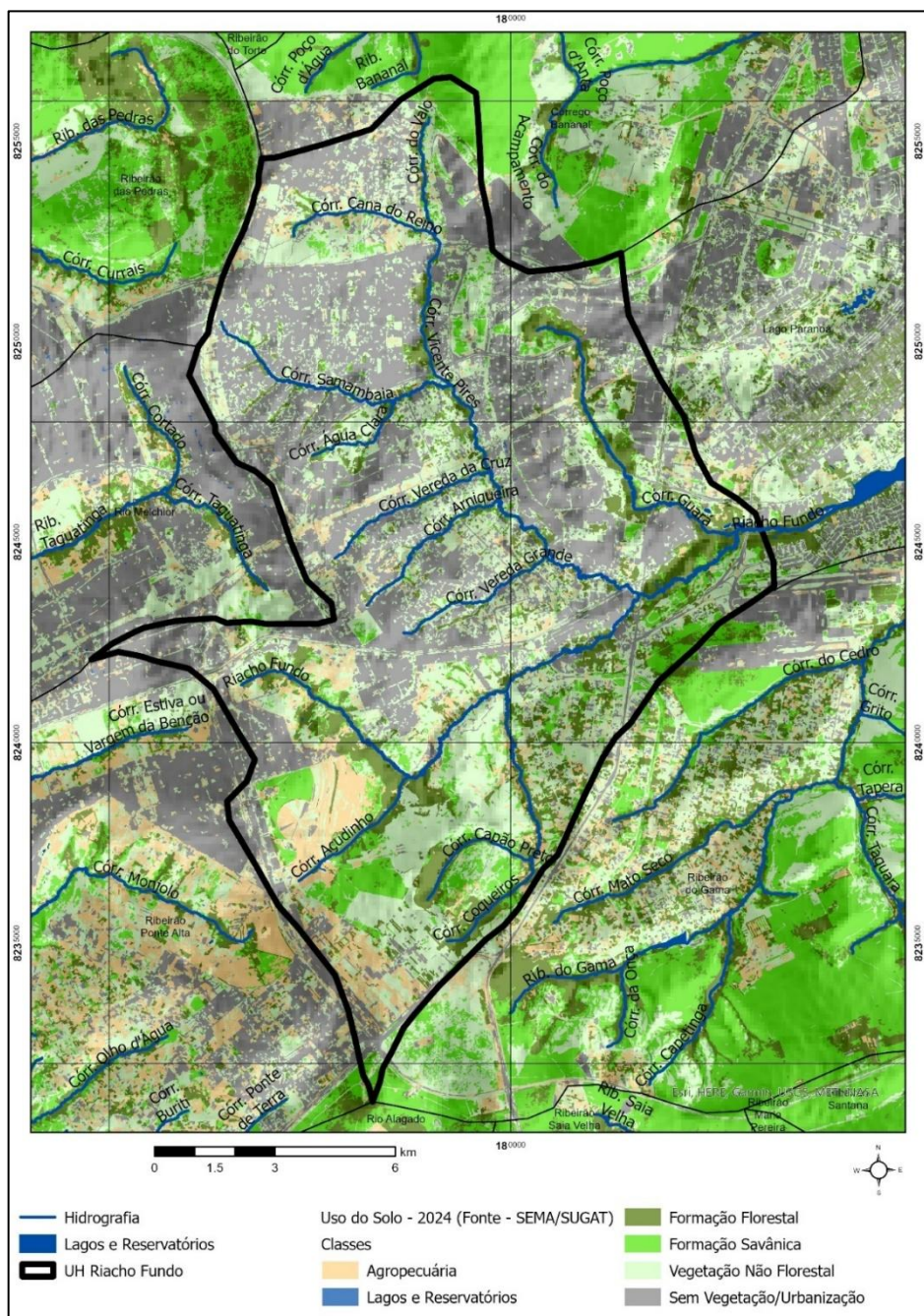


Figura 4: Uso do solo e cobertura vegetal.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 4 apresenta o uso e a cobertura do solo da bacia, retratando as principais classes e sua evolução temporal. Entre 1984 e 2024, o território passou por mudanças expressivas na cobertura do solo, impulsionadas pela urbanização, expansão agropecuária e outras pressões antrópicas sobre os remanescentes naturais.

As formações campestres foram as mais afetadas, com redução estimada em 2.567 ha entre 1984 e 2019, seguidas pelas savânicas, que diminuíram 1.736 ha. A classe de reflorestamento, associada a áreas em regeneração natural ou com vegetação introduzida, retraiu-se em 327 ha, indicando limitações nas ações de restauração ecológica. Em contrapartida, as áreas construídas cresceram mais de 3.360 ha, consolidando-se como o tipo de uso que mais avançou sobre o território.

A agropecuária também apresentou expansão de 1.188 ha, refletindo a permanência de atividades produtivas nas zonas periféricas e menos adensadas da bacia.

Em 2024, a análise espacial confirmou a predominância de áreas antropizadas. A classe Sem Vegetação, associada a áreas urbanizadas e superfícies impermeabilizadas, ocupa 7.558,3 ha (37,73%); a Vegetação Não Florestal cobre 6.222,4 ha (31,06%); as formações florestais totalizam 2.984,4 ha (14,90%); e as savânicas, típicas do Cerrado, representam 1.682,2 ha (8,40%). A agropecuária mantém representatividade com 1.576,3 ha (7,87%), e os corpos hídricos, embora ecologicamente relevantes, somam apenas 7,6 ha (0,04%), indicando sua reduzida expressão espacial.

Esse panorama confirma um processo contínuo de substituição das formações naturais por superfícies urbanas e produtivas, com implicações diretas sobre a recarga hídrica, a estabilidade do solo e a manutenção da biodiversidade.

A perda sucessiva de áreas campestres e savânicas, formações emblemáticas do Cerrado, compromete serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação do ciclo hidrológico, a retenção de sedimentos e a mitigação de eventos climáticos extremos, impactando progressivamente o equilíbrio ambiental da bacia do Riacho Fundo.

## 4.2 Materiais

A presente seção descreve os recursos materiais que sustentam a aplicação do modelo SWAT2012, abrangendo tanto a infraestrutura computacional utilizada quanto os diferentes conjuntos de dados que compõem as entradas do modelo.

Inicialmente, são apresentadas as especificações do hardware, dos sistemas operacionais e dos softwares auxiliares que integram o ambiente de execução, com destaque para os requisitos de desempenho, os ambientes de programação e as rotinas de automação empregadas no processamento e na análise dos dados.

Em seguida, detalha-se o processo de coleta, organização e preparação das informações de entrada, estruturado em três blocos principais:

- Séries climáticas simuladas, derivadas de modelos de circulação global regionalizados para o domínio de estudo, utilizadas na geração de cenários de mudanças climáticas;
- Registros climáticos observacionais, provenientes de estações meteorológicas e plataformas remotas, empregados como referência empírica para calibração, validação e correção de viés;
- Camadas geoespaciais, incluindo dados de relevo, uso e cobertura da terra, atributos de solo e séries pluviométricas locais, que representam a base física da bacia e subsidiam a estruturação espacial do modelo SWAT.

Essa organização de materiais assegura a coerência entre as bases observadas e simuladas, permitindo a integração de múltiplas fontes de dados em um ambiente analítico reprodutível, robusto e tecnicamente consistente.

#### 4.2.1 Sistema Computacional

A presente seção apresenta os insumos computacionais utilizados nesta pesquisa, como pode ser visto na Tabela 5, desde a infraestrutura computacional até as bases de dados empregadas.

Tabela 5 – Recursos computacionais utilizados na pesquisa.

<b>Categoria</b>	<b>Ferramenta / Versão</b>	<b>Função no fluxo de trabalho</b>	<b>Observações</b>
<b>Hardware &amp; SO</b>	Estação de trabalho * (CPU x núcleos, 32 GB RAM, SSD ≥ 1 TB) Windows 10/11 Pro 64 bits	Execução de todos os scripts Python, ArcMap + ArcSWAT e SWAT-CUP	Estação HP Z2 Tower G4 com Intel Core i7-9700 (8 c/8 t, 3 GHz), 32 GB RAM, SSD NVMe 256 GB (SO e softwares) + HDD 1 TB (repositório de dados), GPU NVIDIA Quadro RTX 5000 (16 GB) para aceleração de renderização no ArcGIS Pro. Sistema operacional Windows 11 Pro 64-bit (build 26100).
<b>IDE &amp; ambiente de programação</b>	Visual Studio Code 1.101.2 + Python 3.11	Conversão dos arquivos binários do Eta-HadGEM2-ES para <i>.txt/CSV</i> , automação do <i>bias-correction</i> e geração de relatórios	VS Code 1.85 configurado com ambiente conda "swat_env" (Python 3.11); extensões Python, Jupyter, Pylance e GitLens habilitaram depuração interativa, notebooks de teste e versionamento do código. Bibliotecas-chave: pandas, geopandas, numpy, statsmodels, xarray, matplotlib. Tasks.json automatizou a conversão bin → CSV e a geração de relatórios de correção de viés.
<b>Linguagens auxiliares</b>	SQL (SQLite / PostgreSQL) PowerShell 7	Consultas a bancos climáticos, renomeação em lote e cópia de grandes volumes de dados	SQL (SQLite para consultas locais e PostgreSQL 15 + PostGIS 3.4 para consultas espaciais); PowerShell 7 para consultas e organização de dados e arquivos climáticos;
<b>Modelagem hidrológica</b>	ArcMap 10.8.2 + ArcSWAT 2012 rev 670	Delimitação da bacia, criação das HRUs e simulações base	ArcMap 10.8.2 + ArcSWAT 2012 rev 670 executado em licença educacional. Projeto configurado em UTM 23 S; Simulações base 1961-2024 consumiram ~3.2 GB RAM por rodada; saídas exportadas em CSV com o SWAT2012
<b>Cartografia &amp; SIG</b>	ArcGIS Pro 3.x (figuras finais)	Verificação topológica, layouts de mapas e perfis altimétricos	QGIS 3.34 LTR usado para edições rápidas (reclassificações raster_calc, field calculator em lote); ArcGIS Pro 3.2 produziu os mapas finais em 300 dpi TIFF, mantendo a paleta institucional da UnB. Renderização de grandes rasters foi acelerada pela GPU Quadro (funções "Raster Functions").
<b>Calibração / validação</b>	SWAT-CUP 5.2 (build 2022) – módulo SUFI-2	Calibração automática (500 iterações) e análise de incerteza (95 PPU)	SWAT-CUP 5.2 (módulo SUFI-2) — 5 iterações x 500 simulações (2 500 rodadas). Resultados FLOW_OUT_1: <i>p-factor</i> 0.66, <i>r-factor</i> 1.49, NSE 0.50, R <sup>2</sup> 0.56. Parâmetros sensíveis (CN2, ALPHA_BF, GWQMN, ESCO) alinham-se à literatura nacional para bacias do Cerrado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### 4.2.2 Compilação e preparação dos dados

Todos os dados empregados neste estudo possuem natureza geoespacial, organizados em três grupos temáticos — climáticos, hidrológicos e do meio físico — que, em conjunto, compõem a base de entrada para a execução do modelo SWAT2012. Esses conjuntos foram avaliados, tratados e padronizados de forma a garantir consistência espacial e temporal, compatibilidade de formato e rastreabilidade dos processos de modelagem.

Os dados climáticos geoespaciais foram obtidos a partir de projeções do modelo regional Eta-HadGEM2-ES, sob o cenário RCP 4.5, com resolução espacial de 5 km e abrangência temporal de 1961 a 2099. Os arquivos originais, disponibilizados em formato binário, foram processados e convertidos para o formato compatível de entrada do SWAT, conforme o fluxo representado na Figura 6.

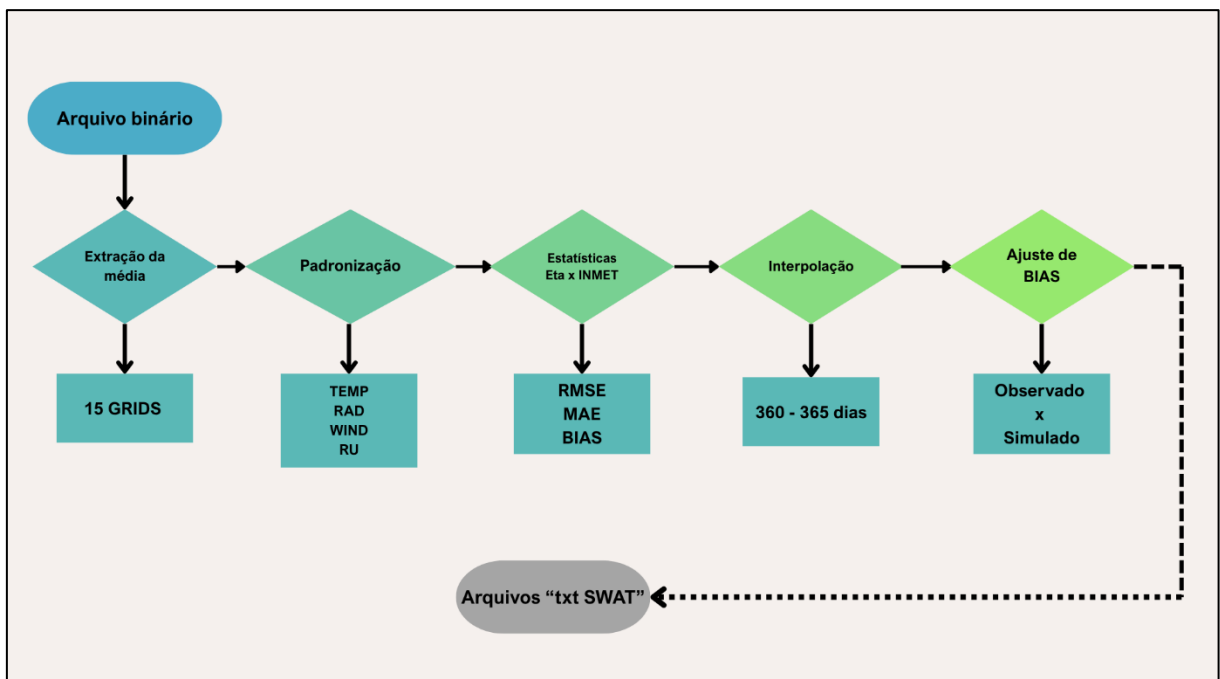


Figura 5. Fluxo de processamento dos dados climáticos do modelo Eta-HadGEM2-ES.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As variáveis meteorológicas utilizadas incluem:

- PREC – precipitação total ( $\text{mm}^3$ );
- TP2M – temperatura do ar a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ );
- MXTP e MNTP – temperaturas máxima e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ );
- UR2M – umidade relativa a 2 m (%);
- U10M e V10M – componentes zonal e meridional do vento a 10 m (m/s);
- U100 e V100 – componentes zonal e meridional do vento a 100 m (m/s);
- OCIS – radiação de onda curta incidente na superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

As séries foram inicialmente tratadas na resolução diária, sendo posteriormente agregadas em escala mensal para as simulações hidrológicas no SWAT e SWAT-CUP, com o objetivo de otimizar o desempenho computacional sem comprometer a coerência estatística das projeções.

Os dados climáticos observacionais, também geoespaciais, foram obtidos a partir da estação meteorológica Brasília-DF (A001), operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Essa estação fornece séries históricas de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. As informações derivam do conjunto consolidado por Nunes (2022), abrangendo o período de 1979 a 2018, e foram atualizadas para o intervalo 2019–2024, resultando em uma série contínua de 1979 a 2024.

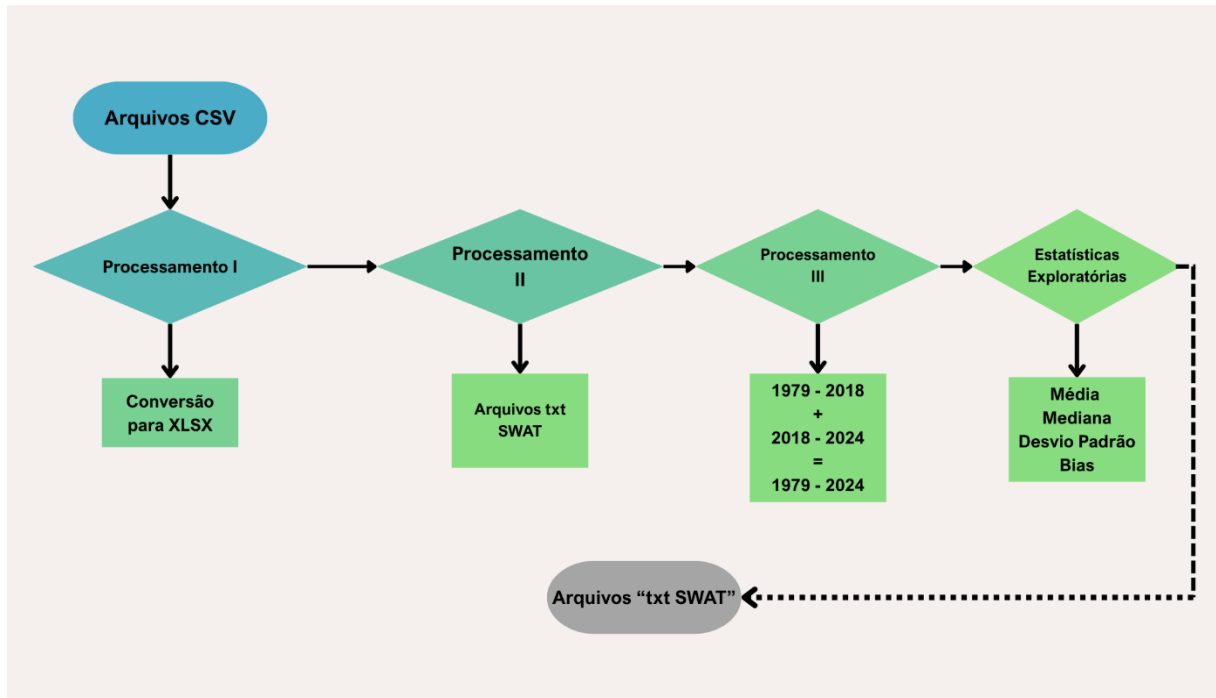


Figura 6. Processamento e padronização dos dados meteorológicos observados da estação Brasília-DF (INMET).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O fluxograma de processamento e padronização dessas observações é apresentado na Figura acima, que sintetiza as etapas de verificação de consistência, integração temporal e ajuste estatístico. Esses dados observacionais serviram como referência empírica para a calibração, validação e correção de viés das projeções climáticas simuladas.

Os dados hidrológicos e do meio físico, também com representação geoespacial, foram obtidos a partir de Nunes (2022), por se tratarem de informações verificadas e consolidadas para a bacia do Riacho Fundo. O conjunto inclui o modelo digital de terreno (MDT), com resolução espacial de 10 m, utilizado no delineamento da bacia, extração da rede de drenagem e cálculo de parâmetros morfométricos; o mapa de solos, baseado em Reatto et al. (2004), com a distribuição das principais classes pedológicas — Latossolos, Argissolos e Cambissolos —; e o mapa de uso e cobertura da terra, 2022, empregado na definição das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) e na análise das alterações antrópicas.

Esses insumos estão sintetizados na Tabela 6, que reúne suas características e respectivas fontes originais.

Por fim, todos os conjuntos de dados — climáticos, hidrológicos e do meio físico — foram integrados em ambiente ArcGIS Pro e Python, com o apoio de rotinas

automatizadas de reprojeção, recorte espacial e conversão de formato. As camadas foram organizadas em um geodatabase (GDB) estruturada no sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S, garantindo a interoperabilidade entre módulos, a reprodutibilidade dos resultados e a rastreabilidade completa do processo de modelagem hidrológica.

Tabela 6 – Dados geoespaciais utilizados na pesquisa

Camada geoespacial	Resolução / Escala	Fonte primária	Principais etapas de preparação	Papel no ArcSWAT 2012
<b>MDT Nunes, 2016</b>	Matricial 10 m (gerada apartir das curvas de nível e potnos cotados)	Nunes (2022) – produto derivado em ArcGIS	<i>Sink-filling</i> , validação com 14 pontos GNSS, reprojeção para <b>SIRGAS 2000 / UTM 23 S</b> , reamostragem bilinear a 30 m para equalizar escalas	Delimitação da bacia, extração de rede de drenagem, cálculo de declividade e orientação
<b>Uso/ cobertura da terra – Nunes, 2022 (Cerrado)</b>	Matricial 30 m (ano 2019)	Nunes (2022)	Reclassificação de 25→7 classes compatíveis (Agricultura, Pastagem, Cerrado, Floresta, Urbana, Água, Outros); verificação topológica em QGIS / ArcGIS Pro	Definição de cobertura vegetal e manejo dentro das HRUs
<b>Solos – Carta de Solos do DF (EMBRAPA)</b>	Matricial 1:100.000 → raster 30 m	EMBRAPA Solos	Rasterização, reprojeção UTM 23 S, atribuição de parâmetros hidrofísicos (Ks, BD, texturas) em <i>.sol</i> segundo cada classe pedológica	Propriedades do solo em cada HRU (infiltração, armazenamento, recarga do lençol)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 4.3 Métodos

Esta seção descreve os procedimentos metodológicos adotados para a aplicação do modelo SWAT2012 na bacia hidrográfica do Riacho Fundo. As etapas metodológicas seguem o fluxo apresentado no anexo técnico do trabalho e compreendem o processamento, a padronização e a integração dos dados geoespaciais descritos anteriormente, além da configuração e calibração do modelo hidrológico.

Primeiramente, são detalhadas as rotinas de tratamento das séries climáticas simuladas e observadas, com destaque para a conversão dos formatos originais e o preparo das variáveis meteorológicas de entrada. Em seguida, são apresentados os procedimentos de estruturação do banco de dados espacial, o delineamento da bacia e a geração das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Por fim, descreve-se o processo de simulação, calibração e validação das vazões, com base em indicadores estatísticos de desempenho e comparações entre valores simulados e observados.

#### 4.3.1 *Processamento de dados climáticos simulados*

Os dados utilizados na ferramenta SWAT2012 seguem um padrão de formatação específico para as séries temporais de variáveis climáticas, que consistem em arquivos em formato texto (.csv ou .txt). Com exceção do arquivo de temperatura, que contém duas colunas (temperatura máxima e mínima), cada variável climática deve ser organizada em uma única coluna, cuja primeira linha indica a data de início da série (exemplo: 19790101), e as linhas subsequentes representam os valores numéricos diários ou mensais correspondentes.

Com base nesse formato, este trabalho desenvolveu e aplicou um procedimento de conversão e adequação dos dados simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, possibilitando seu uso direto no SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho Fundo. O modelo climático utilizado apresenta resolução espacial de 5 x 5 km, e a área da bacia intercepta 13 grids do dado climático. Para reduzir potenciais efeitos de borda e assegurar a representatividade espacial, foram considerados 15 grids no cálculo da média diária de cada variável climática, conforme ilustrado na Figura 7.

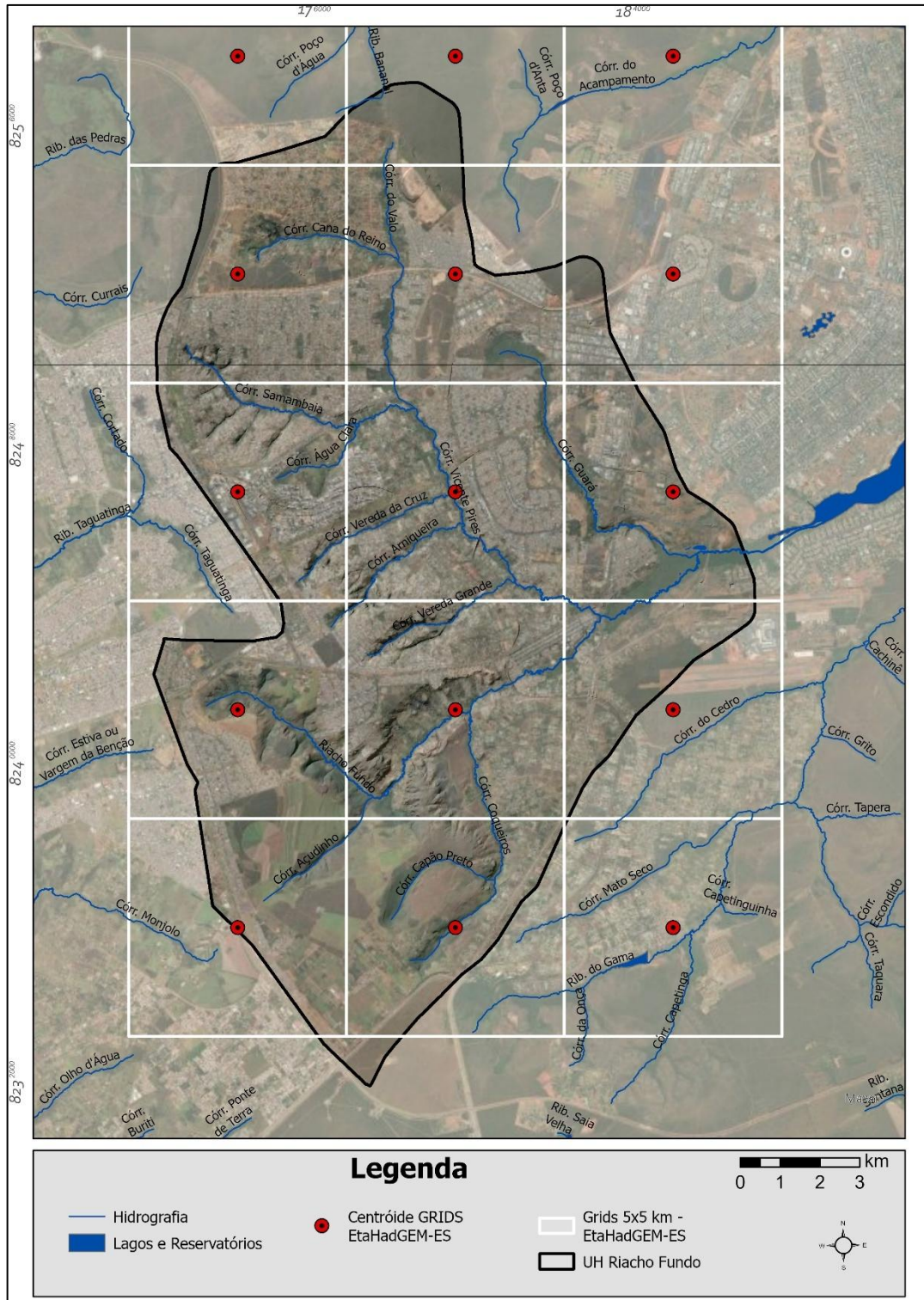


Figura 7 – Grade do modelo Eta HADGEM-ES.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As variáveis meteorológicas utilizadas incluem:

- precipitação total (PREC),
- temperatura do ar a 2 metros (TP2M, °C),

- temperatura máxima (MXTP, °C),
- temperatura mínima (MNTP, °C),
- umidade relativa a 2 metros (UR2M, %),
- vento zonal a 10 metros (U10M, m/s),
- vento meridional a 10 metros (V10M, m/s),
- vento zonal a 100 metros (U100, m/s),
- vento meridional a 100 metros (V100, m/s) e
- radiação de onda curta incidente na superfície (OCIS, W/m<sup>2</sup>).

A seleção dos 15 grids resultou em um único valor diário de cada variável, resultante da média, simulando, desta forma uma única estação meteorológica para toda a bacia.

A resolução temporal adotada neste estudo foi a diária, permitindo maior detalhamento na análise das variáveis ao longo do tempo. Entretanto, após os processamentos, a utilização no SWAT e sua calibração consideraram o corte temporal mensal (Machado et al., 2025).

A umidade relativa (UR2M, %) fornecida no conjunto de dados do modelo Eta-HadGEM2-ES precisou ser ajustada, ou, mudança de escala para sua utilização do no SWAT, passando da escala de 0 a 100, para fração decimal, conforme exigido pelo modelo hidrológico

A variável “velocidade do vento” exigiu processamento das suas componentes zonal (U10M) e meridional (V10M), oriundas dos dados originais do modelo Eta HadGEM-ES. O SWAT utiliza a velocidade escalar do vento, e, para tanto, a conversão dessas componentes deve ser:

Equação 3 – Componente do vento

$$V = \sqrt{U^2 + V^2}$$

onde U representa a componente do vento na direção leste-oeste e V a componente norte-sul (Allen *et al.*, 1998).

A radiação solar incidente (OCIS,  $W/m^2$ ) foi convertida para megajoules por metro quadrado por dia ( $MJ/m^2/dia$ ), unidade requerida pelo SWAT. Essa conversão será realizada por meio da equação:

Equação 4 – Conversão da radiação para mega joules.

$$Rad_{MJ} = Rad_W \times 0.0864$$

onde  $Rad_W$  representa a radiação solar em  $W/m^2$  e  $Rad_{MJ}$  a radiação convertida para  $MJ/m^2/dia$  (Allen *et al.*, 1998).

Os dados de precipitação total (PREC, mm) se apresentam como dados diretos e o processamento necessário foi a conversão do arquivo binário para texto, com a extração da média da área de interesse para conversão do arquivo padrão de texto.

A temperatura também é um dado direto, entretanto o formato do modelo SWAT exige que o arquivo tenha a primeira linha com a data inicial, e duas colunas separadas por vírgula: temperatura máxima e mínima. Os dados do Eta se apresentam em arquivos separados. Logo, após a extração das médias dos arquivos foi necessária a junção dos valores, separados por vírgula.

Para a avaliação dos dados em relação aos dados observacionais foi utilizado o RMSE, que

O RMSE é uma medida sensível a grandes desvios e fornece uma estimativa da magnitude média dos erros quadráticos.

Equação 5 – Equação RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

**Onde:**

- $n$  = número de observações
- $P_i$  = valor previsto (simulado) na posição  $i$
- $O_i$  = valor observado na posição  $i$

Também foi empregado análise de BIAS, que indica a direção do erro: valores positivos indicam superestimação e negativos, subestimação.

Equação 6 – Equação para correção de bias:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$$

**Onde:**

- $n$  = número de observações
- $P_i$  = valor previsto (simulado)
- $O_i$  = valor observado

Além disso, o MAE foi utilizado que, por sua vez, representa o erro médio absoluto, sem penalizar valores extremos.

Equação 7 – Equação MAE:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

**Onde:**

$n$  = número de observações

$P_i$  = valor previsto (simulado)

$O_i$  = valor observado

$|P_i - O_i|$  = valor absoluto do erro em cada ponto

#### **4.3.2 Pré-processamento dos dados observacionais**

Os dados observacionais que serviram de referência para este estudo provêm da estação meteorológica sinótica Brasília-DF (código A001) da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e são da série diária compilada de 1.º de janeiro

de 1979 a 31 de dezembro de 2024 e deveriam ter, cada variável, 16.802 registros para atualização dos dados já utilizados por Nunes, 2022.

Após a junção dos dois conjuntos de arquivos foi realizada uma verificação de consistência entre o número de registros diários e o número de dias gregorianos.

Os arquivos brutos com os dados observados original trazem valores faltantes com -99; tais instâncias foram convertidas para valores nulos (NaN) e submetidas a três testes sucessivos:

- (i) limites físicos-climatológicos (p.ex.  $T_{max} < 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P \leq 300 \text{ mm d}^{-1}$ );
- (ii) verificação interna de coerência ( $T_{min} \leq T_{max}$ );
- (iii) detecção de outliers por desvio interquartil.

Para a detecção de valores atípicos, aplicou-se a técnica do intervalo interquartil (IQR), conforme Tukey (1977). Foram calculados o primeiro (Q1) e o terceiro quartis (Q3), determinando-se o intervalo interquartil ( $IQR = Q3 - Q1$ ). Valores inferiores ao limite inferior ( $LI = Q1 - 1,5 \times IQR$ ) ou superiores ao limite superior ( $LS = Q3 + 1,5 \times IQR$ ) foram considerados potenciais outliers e submetidos a inspeção manual antes de eventual correção ou descarte.

Os números foram bem variados com 16.637 medições/dias de temperatura máxima ( $T_{max}$ ), 16.661 de temperatura mínima ( $T_{min}$ ), 16.802 de precipitação ( $P$ ), 16.624 de radiação solar global ( $R_s$ ), 16.768 de velocidade do vento ( $U$ ) e 16.637 de umidade relativa média ( $UR$ ).

A obtenção dos arquivos brutos foi feita por meio do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP/INMET). As séries foram atualizadas até 2024, conforme a rotina descrita em "Atualização dos dados do INMET (1979 – 2024)".

Em relação aos dados de série diária, provenientes da estação sinótica do INMET Brasília-DF (código A001), o corte temporal compreendeu o período de 1.º de janeiro de 1979 a 31 de dezembro de 2024, totalizando 16.802 dias. Esta base atualiza e amplia os dados previamente utilizados por Nunes (2022) e foi obtida a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP/INMET).

Durante o processo de consolidação e qualificação dos dados observacionais, os arquivos brutos apresentaram registros ausentes representados por valores "-999", os quais foram convertidos em valores nulos (NaN) para fins de tratamento. Em seguida, três testes sucessivos foram aplicados:

- **Verificação de limites físico-climatológicos**, com base em intervalos realistas para a região: temperatura máxima (Tmax) inferior a 45 °C, precipitação (P) menor ou igual a 300 mm/dia, entre outros;
- **Teste de coerência interna**, como a verificação da relação  $T_{min} \leq T_{max}$ ;
- **Identificação de outliers**, por meio do método do desvio interquartil (IQR).

#### 4.3.3 Modelo climático e seleção das variáveis para utilização no SWAT

Os dados processados do modelo climático estão no formato binário (.bin), como exemplo *Eta\_HadGEM2-ES\_5km\_RCP4.5\_diario\_RIDE\_MNTP\_20060102.bin*.

As cinco variáveis climáticas (radiação solar, temperatura, humidade velocidade do vento e precipitação – Tabela 7) disponíveis no conjunto do modelo climático são as mesmas necessárias para “rodar” o modelo, entretanto, se apresentam em um formato inadequado para utilização no SWAT.

Tabela 7 - Variáveis climáticas disponíveis no modelo Eta

Nome da Variável	Sigla	Unidade
Precipitação Total	PREC	mm/3h, mm/dia, mm/mês, mm/ano
Temperatura a 2 m	TP2M	°C
Radiação de Onda Curta Incidente à Superfície	OCIS	W/m <sup>2</sup>
Temperatura Máxima a 2 m	MXTP	°C
Temperatura Mínima a 2 m	MNTP	°C
Umidade Relativa a 2 m	UR2M	%
Vento Zonal a 10 m	U10M	m/s
Vento Meridional a 10 m	V10M	m/s
Vento Zonal a 100 m	U100	m/s
Vento Meridional a 100 m	V100	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### 4.3.4 Séries climáticas: interpolação, conversão de calendários e correção de viés

Nesta etapa metodológica foram reunidos os procedimentos referentes à interpolação de dados climáticos, à conversão de calendários e à aplicação de técnicas de correção de viés (*bias correction*). Essas operações, aplicadas tanto às séries observacionais do INMET quanto às projeções do modelo Eta–HadGEM2-ES, tiveram como objetivo garantir consistência temporal e estatística dos dados de entrada para o modelo SWAT, preservando a sazonalidade e reduzindo distorções sistemáticas. A literatura recente reforça a pertinência dessa abordagem: Londhe et al. (2023) evidenciam que a correção de viés é vital para análises de impactos das mudanças climáticas em recursos hídricos, dada a elevada incerteza nas projeções climáticas; Hrouf et al. (2025) destacam que a utilização de dados corrigidos é crucial em regiões com escassez de observações, permitindo maior confiabilidade em modelos como o SWAT; e Villafuerte e Angulo, (2024) ressaltam que a avaliação de diferentes técnicas de correção de viés é especialmente relevante em bacias montanhosas, onde a complexidade topográfica acentua os desafios da modelagem.

No que tange à interpolação, Zhang et al. (2023) enfatizam a necessidade de integrar adequadamente os dados meteorológicos para assegurar simulações consistentes, e Plunge et al. (2024) reforçam que a preparação dos dados de entrada — incluindo interpolação e correção de viés — constitui etapa crítica para a robustez e credibilidade das simulações hidrológicas. Assim, a combinação dessas técnicas fornece uma estrutura sólida para a modelagem hidrológica, permitindo que o SWAT opere com dados que refletem adequadamente a variabilidade climática e as condições sazonais, preservando a integridade estatística essencial às análises subsequentes.

No caso da interpolação de falhas, adotou-se a técnica de interpolação linear simples para lacunas de até três dias consecutivos, assumindo comportamento contínuo das variáveis meteorológicas no intervalo. Para ausências superiores a três dias, foi utilizada a climatologia diária de longo prazo, calculada como a média dos valores observados para cada dia juliano ao longo da série, assegurando a manutenção do ciclo sazonal exigido pelo SWAT. A interpolação de dados de séries climáticas, como destacam Zhang et al. (2023), constitui uma etapa essencial para

que os modelos hidrológicos capturem corretamente a dinâmica de fluxo, sobretudo em contextos de elevada variabilidade climática.

Uma etapa adicional foi a conversão do calendário artificial de 360 dias, inerente às séries provenientes do modelo Eta, para o calendário civil de 365 ou 366 dias. Essa adaptação foi realizada mediante interpolação linear, redistribuindo os valores ao longo do ano de forma proporcional e contínua. A equação aplicada (Equação 4) considera os valores adjacentes e seus respectivos índices temporais, garantindo transição suave entre os pontos originais e os ajustados.

Equação 8 - Interpolação linear:

$$y_i = y_0 + \left( \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \right) \times (x_i - x_0)$$

Onde:

$Y_i$  é o valor interpolado;

$Y_0$  e  $Y_1$  são valores adjacentes da série original;

$X_0$  e  $X_1$  são os índices correspondentes;

$X_i$  representa o novo índice ajustado ao calendário de 365/366 dias

Esse procedimento é amplamente reconhecido na literatura de modelagem climática (Dantas e Passador, 2020) e encontra aplicação em estudos de projeções de longo prazo. Além disso, conforme salientam Plunge et al. (2024), a preparação adequada de dados de entrada, como conversão de calendários, é determinante para que as simulações mantenham credibilidade científica.

A Tabela 8 apresenta a caracterização dos conjuntos de dados climáticos e hidrológicos utilizados neste estudo, bem como os tratamentos aplicados a cada série. Os registros observacionais foram obtidos da estação meteorológica de Brasília-DF (A001, INMET) e da estação fluviométrica do Riacho Fundo (ANA), contemplando o período de 1979 a 2024.

Tabela 8 – Dados climáticos utilizados nesta pesquisa

<b>Categoria</b>	<b>Conjunto</b>	<b>Resolução – Espaço / Tempo</b>	<b>Período usado</b>	<b>Fonte original</b>	<b>Tratamentos aplicados</b>
<b>Dados climáticos simulados</b>	Projeções Eta-HadGEM2-ES (RCP 4.5)	5 km x 5 km / diário	1961-2005 (hist.) 2006-2099 (fut.)	INPE/SEMA-DF	Média dos 9 grids, calendário 360 → 365/366, Quantile Mapping para P, Tmax, Tmin, RH, vento e radiação
<b>Dados climáticos observacionais</b>	Estação Brasília-DF (A001, INMET)	ponto / diário	1979-2024	INMET	Homogeneização, preenchimento de falhas, controle de qualidade; série-referência para o QM
<b>Dados de vazão</b>	Estação Riacho Fundo (cód. ANA)	ponto / diário	1979-2024	CAESB	Nível 2 de consistência; conversão p/ mm dia <sup>-1</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A consistência das séries é detalhada na Tabela 9, que sintetiza os totais de registros e as lacunas supridas por interpolação.

Tabela 9 – Registros diários e registros faltantes

<b>Variável</b>	<b>Registros totais</b>	<b>Registros ausentes</b>
Precipitação (P)	16.802	0
Temperatura máxima (Tmax)	16.637	165
Temperatura mínima (Tmin)	16.661	141
Radiação solar global (Rs)	16.624	178
Umidade relativa (UR)	16.637	165
Velocidade do vento (U)	16.768	34

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Complementarmente, a Tabela 10 apresenta as estatísticas descritivas das séries observacionais consistidas, incluindo medidas de tendência central e dispersão para cada variável. Esses valores serviram como base tanto para a calibração inicial do gerador climático do SWAT quanto para a etapa posterior de correção de viés das projeções Eta–HadGEM2-ES, garantindo o ancoramento estatístico local necessário à modelagem.

Tabela 10 – Dados climático observacionais

Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	Unid.
Precipitação (P)	4,14	0,00	0,0	212,5	11,9	mm d <sup>-1</sup>
Temp. máx. (Tmax)	26,12	26,0	16,0	37,5	2,88	°C
Temp. mín. (Tmin)	17,41	17,3	6,4	23,6	2,59	°C
Radiação solar (Rs)	19,01	19,2	4,3	29,7	4,46	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
Velocidade do vento (U)	2,36	2,2	0,2	7,9	1,05	m s <sup>-1</sup>
Umidade relativa (UR)	66,8	67,0	23	100	11,7	%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além da consistência temporal, foi necessário proceder à correção de viés das projeções climáticas. Essa etapa é essencial porque modelos climáticos, mesmo regionais, apresentam distorções sistemáticas em relação às séries observadas. Neste trabalho, adotou-se o método Quantile Mapping (QM), que ajusta toda a distribuição estatística dos dados simulados para alinhar-se à distribuição observada. Diferentemente de abordagens simplificadas, como o *Linear Scaling*, o QM permite corrigir não apenas a média, mas também a variância, os quantis e os extremos, assegurando maior realismo hidrológico, especialmente no bioma Cerrado (Menapace *et al.*, 2025; Teutschbein e Seibert, 2012).

Como apontam (Londhe, et al. (2023), essa correção é indispensável para reduzir a incerteza nas projeções de impactos, enquanto Hrouer et al. (2025) reforçam seu papel em contextos com carência de dados, tornando o processo ainda mais crítico.

Para evitar sobreajuste (*overfitting*), a calibração do método foi realizada no período histórico comum (1979–2024) e validada de forma independente entre 1991 e 2020. Em seguida, a função de correção foi aplicada às séries futuras (2025–2099), assegurando consistência estatística para o horizonte de projeções. Essa metodologia segue recomendações recentes, como as de Villafuerte e Angulo, (2024), que testou diferentes estratégias de correção em cenários complexos, e de Plunge et al. (2024) que reforçam a necessidade de processos de pré-tratamento rigorosos para a robustez dos resultados.

Essa abordagem trouxe ganhos significativos na representação da sazonalidade, do número de dias secos consecutivos e da intensidade de eventos de

precipitação, permitindo que as séries corrigidas fossem utilizadas como insumos confiáveis nas simulações hidrológicas com o modelo SWAT.

#### **4.3.5 Análise de mudanças climáticas**

A análise das mudanças climáticas foi realizada com base nos dados simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (cenário RCP 4.5), corrigidos por bias, e nos dados observacionais da estação meteorológica Brasília-DF (A001/INMET), no período compreendido entre 1979 e 2024. A abordagem metodológica combinou estatísticas clássicas e robustas para investigar a coerência entre as séries históricas e projetadas, a direção das tendências temporais e as dinâmicas sazonais do clima na bacia do Riacho Fundo. A estratégia adotada buscou não apenas comparar magnitudes absolutas, mas também caracterizar padrões temporais e sazonais consistentes com os processos atmosféricos regionais.

Foram selecionadas cinco variáveis fundamentais ao modelo hidrológico SWAT: precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar e umidade relativa. As séries históricas observadas foram obtidas diretamente da estação do INMET, enquanto os dados simulados foram extraídos das projeções regionais do modelo climático. Para garantir a comparabilidade entre as bases, os dados passaram por etapas prévias de interpolação de lacunas, correção de viés por Quantile Mapping, uniformização do calendário (365/366 dias) e adequação ao formato de entrada do SWAT.

Inicialmente, foi conduzida uma avaliação da correlação temporal entre as séries observadas e simuladas corrigidas, a partir dos coeficientes de Pearson, *Spearman* e do índice de concordância de *Willmott* (d), permitindo avaliar o grau de aderência estatística das simulações em relação aos registros históricos. Em seguida, aplicou-se regressão linear simples às séries anuais para detecção de tendências de longo prazo, com cálculo de inclinação (coeficiente angular) e  $R^2$ . Por fim, as médias mensais de cada variável foram analisadas para investigar padrões sazonais e verificar a capacidade do modelo de representar o ciclo climático típico da região, especialmente nos meses de maior variabilidade hidrológica.

As análises estatísticas realizadas permitiram explorar múltiplas dimensões do comportamento climático: a correlação temporal entre as séries simuladas e

observadas, a presença e direção de tendências de longo prazo e a estrutura sazonal das variáveis ao longo do ano hidrológico.

Para avaliar a representatividade das projeções climáticas em relação às condições históricas observadas na bacia do Riacho Fundo, foram realizadas análises de correlação temporal entre os dados do modelo regional Eta-HadGEM2-ES (cenário RCP 4.5) e os dados observacionais da estação meteorológica Brasília-DF (A001/INMET), no período de 1979 a 2024.

As variáveis consideradas incluíram precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. As séries temporais foram ajustadas ao mesmo calendário (365/366 dias), com preenchimento de lacunas por interpolação linear e conversão de unidades, quando necessário.

A análise estatística foi conduzida com base no coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), complementada, quando aplicável, por métricas robustas como *Spearman* e *Willmott*, a fim de captar tanto correlações lineares quanto monotônicas entre os conjuntos de dados.

A identificação de tendências nas séries temporais climáticas foi conduzida com o intuito de verificar sinais de mudança climática nas variáveis de interesse ao longo do tempo. Utilizou-se o método de regressão linear simples para estimar as tendências anuais de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e radiação solar, tanto para os dados observacionais (INMET) quanto para os dados simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.

As análises abrangeram cortes temporais distintos, com destaque para o período de 1979 a 2024. Para aferir a significância estatística das tendências detectadas, foram aplicados testes como o de Mann-Kendall e a avaliação do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), conforme recomendações da literatura climática.

A análise da variabilidade sazonal foi conduzida com base na agregação mensal dos dados diários para cada variável climática, permitindo a caracterização dos padrões sazonais médios e a comparação entre os dados simulados e observados.

Foram calculadas médias mensais de precipitação, temperatura (máxima e mínima), radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento para todo o período comum (1979–2024).

Posteriormente, essas médias foram organizadas por mês, possibilitando a construção de gráficos de climatologia média mensal. A diferença entre as

climatologias observada e simulada foi também quantificada mês a mês, visando identificar potenciais distorções sazonais introduzidas pelo modelo climático.

Essa etapa é fundamental para avaliar a capacidade do modelo em reproduzir a dinâmica intra-anual do clima regional e subsidiar sua aplicação no modelo hidrológico SWAT.

#### **4.3.6 Implementação no SWAT**

A implementação do modelo hidrológico SWAT2012 teve como objetivo estruturar a base físico-climática necessária à simulação da dinâmica hidrológica da bacia do Riacho Fundo, integrando os dados do meio físico e climáticos previamente processados. Essa etapa compreendeu a delimitação da bacia hidrográfica, a definição das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) e a inserção das séries climáticas simuladas e observacionais em formato compatível com o ambiente do SWAT2012.

A geração das HRUs foi realizada a partir da sobreposição dos mapas de uso e cobertura da terra e de solos, considerando a interação entre essas duas variáveis como determinante da heterogeneidade espacial da bacia. Embora a declividade seja tradicionalmente um dos três planos de informação utilizados para a definição das HRUs no SWAT, optou-se por não incluí-la neste estudo, devido ao relevo predominantemente suave a moderado da bacia do Riacho Fundo. Essa decisão está em conformidade com recomendações metodológicas consolidadas (Arnold *et al.*, 2012) e respaldada por aplicações recentes.

Moura *et al.* (2025) reportaram bom desempenho do SWAT em escala mensal na bacia do Jundiáí, mesmo com dados espaciais simplificados, demonstrando que a exclusão da declividade não compromete a acurácia do modelo. De forma semelhante, Mebarki, *et al.* (2024) validaram essa abordagem em bacias semiáridas de relevo pouco acidentado, nas quais a topografia exerce influência limitada sobre a geração de escoamento. Rufino *et al.* (2023, 2025) também relataram resultados satisfatórios de calibração em bacias amazônicas, mesmo sob condições de baixa densidade de monitoramento, reforçando a robustez do modelo frente à simplificação espacial. Em estudos adicionais de Rufino *et al.* (2025), conduzidos na bacia do Rio Jari, e de *Soil Conservation Assessment* (2025) em diferentes contextos

geomorfológicos, confirmam que a representatividade hidrológica pode ser mantida sem a inclusão explícita da declividade como variável de segmentação.

A exclusão desse critério reduziu a complexidade estrutural do modelo e otimizou o tempo computacional, preservando, contudo, a representatividade hidrológica necessária para o caso de estudo. Assim, as HRUs foram definidas a partir da combinação única entre uso e tipo de solo, adotando-se um limiar de 5% para eliminar unidades com baixa representatividade espacial. O resultado foi uma estrutura composta por múltiplas sub-bacias, subdivididas em HRUs capazes de representar adequadamente a heterogeneidade física e de uso da bacia.

Foram inseridas no modelo séries de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, previamente corrigidas por viés e compatibilizadas em extensão temporal e formato. As simulações foram executadas em escala diária, o que assegura a captura da variabilidade climática local.

As séries inseridas no modelo incluíram precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, todas previamente corrigidas por viés e compatibilizadas em extensão temporal e formato. As simulações foram executadas em escala diária, assegurando a captura da variabilidade climática local. No entanto, para fins de análise de desempenho, calibração e validação, os resultados foram avaliados em escala mensal, prática amplamente consolidada em estudos hidrológicos por reduzir o efeito de erros pontuais nas séries de entrada e estabilizar os indicadores estatísticos (Abbaspour, 2015; Arnold e Fohrer, 2005). Essa estratégia metodológica equilibra a resolução temporal detalhada das simulações diárias com a robustez analítica das avaliações mensais.

O modelo foi configurado e executado no ArcSWAT 2012, integrado ao ArcMap 10.8.2, com calibração automática posterior realizada no SWAT-CUP. As simulações climáticas foram alimentadas pelas projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES, sob o cenário RCP 4.5, para o período de 2025 a 2099. Para garantir a estabilidade dos estoques hidrológicos internos, foi adotado um período de aquecimento de três anos (2022–2024), destinado a eliminar possíveis efeitos artificiais de condições iniciais.

A primeira rodada de simulação foi conduzida utilizando os parâmetros padrão do SWAT, servindo como diagnóstico inicial do desempenho do modelo e de verificação do acoplamento entre os dados climáticos e a estrutura espacial da bacia.

Os outputs hidrológicos foram agregados em escala mensal, considerando o ponto de saída da bacia como referência para análise.

A calibração automática foi conduzida no SWAT-CUP, utilizando o algoritmo SUFI-2, com a execução de 2.000 simulações e variação dos parâmetros hidrológicos mais sensíveis, conforme revisão bibliográfica e conhecimento da área de estudo. Entre os parâmetros ajustados, destacam-se: CN2 (curva número), ALPHA\_BF (coeficiente de recessão do escoamento de base), GW\_DELAY (tempo de resposta do aquífero), ESCO (coeficiente de evaporação do solo) e SURLAG (atraso do escoamento superficial).

A calibração foi realizada sobre o período com dados observados disponíveis, enquanto a validação foi conduzida em período subsequente, sem ajustes adicionais de parâmetros. As métricas de desempenho utilizadas incluíram NSE, KGE,  $R^2$  e PBIAS, além dos indicadores de incerteza *p-factor* e *r-factor*. Esse procedimento assegurou que o conjunto de parâmetros calibrados não fosse superajustado (*overfitting*), garantindo confiabilidade e robustez ao modelo para projeções hidrológicas futuras.

## 5 ANÁLISES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos a partir do processamento e da análise das projeções climáticas aplicadas à bacia do Riacho Fundo no modelo hidrológico SWAT.

A primeira etapa compreendeu a avaliação comparativa entre os dados climáticos brutos do modelo regional Eta-HadGEM2-ES e as observações históricas da estação Brasília-DF (A001/INMET), estabelecendo uma linha de base de referência representativa do período histórico (1979–2024) (Seção 5.1.1).

Em seguida, procedeu-se à quantificação dos erros sistemáticos do modelo e à aplicação de técnicas de correção de viés, com ênfase no método Quantile Mapping, visando aprimorar a aderência estatística entre as séries observadas e simuladas (Seções 5.1.2 e 5.1.3). A subsequente avaliação de concordância (Seção 5.1.3.1) demonstrou ganhos expressivos nos ajustes de precipitação e temperatura, validando a adequação do procedimento para o uso hidrológico.

Com as séries corrigidas, foi conduzida a análise das mudanças climáticas projetadas para o século XXI, considerando dois cenários de concentração representativa de gases de efeito estufa — RCP 4.5 (cenário intermediário de mitigação) e RCP 8.5 (cenário de altas emissões). Essa abordagem permitiu comparar a magnitude e a direção das tendências previstas, sintetizando os principais padrões de variação esperados em cada horizonte temporal (Seção 5.2).

A segunda parte do capítulo apresenta os resultados da modelagem hidrológica obtidos com o SWAT calibrado e validado a partir dos dados climáticos ajustados. Avaliaram-se o desempenho estatístico das simulações e os indicadores de eficiência (NSE, KGE,  $R^2$ , PBIAS, *p-factor* e *r-factor*), com destaque para a estabilidade dos parâmetros calibrados diante dos diferentes cenários climáticos (Seções 5.3 e 5.3.1).

Por fim, a interpretação hidrológica das respostas da bacia permitiu identificar os mecanismos dominantes de controle de vazão média, as variações sazonais e interanuais e as possíveis tendências hidrológicas sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. O capítulo é encerrado com a classificação hidroclimática dos anos simulados e uma síntese dos impactos potenciais sobre a gestão hídrica frente às projeções de mudança do clima no Distrito Federal.

## 5.1 Projeções climáticas

Esta seção apresenta a análise das projeções climáticas geradas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para a bacia do Riacho Fundo, no Distrito Federal. O objetivo é avaliar a qualidade e a representatividade das variáveis simuladas em relação aos dados observacionais, bem como examinar os ajustes aplicados por meio da correção de viés e as principais tendências projetadas para o futuro sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

As análises incluem comparações estatísticas entre os dados brutos do modelo Eta-HadGEM2-ES e as observações históricas do INMET, a avaliação da eficácia das técnicas de correção de viés e a investigação de padrões temporais e sazonais das variáveis climáticas selecionadas.

### 5.1.1 Avaliação comparativa: dados modelados x dados observados – linha de base

A análise inicial deste capítulo compara as séries históricas observadas da estação meteorológica do INMET em Brasília (A001) com os dados climáticos brutos simulados pelo modelo regional Eta-HadGEM2-ES, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 1979 a 2024 (Almagro et al., 2020; Ferreira et al., 2024).

O objetivo é avaliar a capacidade do modelo em reproduzir as condições climáticas locais, etapa essencial para garantir a consistência das simulações hidrológicas no SWAT, especialmente quando aplicadas à projeção de cenários futuros de mudanças climáticas (Cannon, Sobie e Murdock, 2015; Chen *et al.*, 2021).

As variáveis analisadas — precipitação (P), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), radiação solar (Rad), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (W) — estão apresentadas na Tabela 1. A análise estatística descritiva revelou discrepâncias relevantes entre as séries observadas e as simuladas, com variações sistemáticas entre os cenários.

A temperatura máxima média observada (26,12 °C) mostrou-se próxima da simulada no RCP 4.5 (25,99 °C), mas o RCP 8.5 apresentou aumento considerável, atingindo 27,14 °C, o que indica tendência de aquecimento no cenário de altas emissões. O desvio-padrão permaneceu semelhante (2,64 °C – 3,19 °C), indicando

que o modelo mantém a variabilidade térmica diária, embora com leve deslocamento positivo da média. Já a temperatura mínima foi subestimada pelo RCP 4.5 (16,43 °C contra 17,41 °C observada), mas recupera parte da diferença sob o RCP 8.5 (17,07 °C), refletindo o efeito do aquecimento generalizado. Essa redução da amplitude térmica nos dados simulados sugere suavização das variações diurnas pelo modelo (Ferreira, Rodrigues e Silva, 2024; Moghim e Bras, 2017).

A precipitação diária apresentou viés negativo expressivo em ambos os cenários, com médias de 3,39 mm (RCP 4.5) e 2,94 mm (RCP 8.5) frente aos 4,14 mm observados. Além disso, o modelo apresentou menor desvio-padrão e valores máximos mais baixos, indicando subestimação dos eventos intensos. A forte assimetria (2,12 – 2,43) e a curtose elevada (5,67 – 7,98) reforçam a dificuldade do Eta-HadGEM2-ES em reproduzir a frequência e a magnitude das chuvas extremas, problema recorrente em modelos climáticos regionais aplicados a regiões tropicais (Almagro *et al.*, 2020).

No caso da radiação solar, verificou-se superestimação acentuada em ambos os cenários. Enquanto o valor observado foi de 19,01 MJ/m<sup>2</sup>/dia, o modelo simulou 24,36 MJ/m<sup>2</sup>/dia (RCP 4.5) e, de forma anômala, 135,18 MJ/m<sup>2</sup>/dia (RCP 8.5), evidenciando provável erro sistemático de escala ou unidade neste último conjunto. Mesmo desconsiderando o valor extremo, observa-se uma tendência de superestimativa, refletindo limitações conhecidas do Eta-HadGEM2-ES na representação de cobertura de nuvens e balanço de radiação na superfície (Andrade, *et al.*, 2022).

A umidade relativa média apresentou valores inferiores aos observados (0,65 INMET → 0,58 RCP 4.5 → 0,53 RCP 8.5), coerentes com o aumento da temperatura e a redução da precipitação nos cenários simulados. O vento médio também foi superestimado (2,3 m/s → 3,69 m/s → 3,83 m/s), mantendo dispersão semelhante entre observações e simulações, o que sugere ajuste razoável da variabilidade, embora com um viés positivo sistemático.

O teste de *Kolmogorov–Smirnov* confirmou diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre as distribuições observadas e simuladas para todas as variáveis, em ambos os cenários, rejeitando a hipótese nula de igualdade de distribuição. Essas divergências estruturais reforçam a necessidade de aplicar técnicas de correção de viés antes da utilização dos dados no modelo hidrológico SWAT, a fim de preservar a fidedignidade das simulações dos processos dependentes

do clima. Ainda assim, os resultados demonstram coerência física geral: o RCP 8.5 reproduz padrões mais quentes e secos, enquanto o RCP 4.5 mantém condições mais próximas da climatologia observada, delineando o contraste esperado entre cenários intermediário e de altas emissões (Liu *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020).

Tabela 11 – Estatísticas descritivas dos dados climáticos do modelo Eta HadGEM RCP4.5 e RCP8.5.

Variável	Cenário	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose	p-valor (KS)
Precipitação (mm/dia)	INMET	4.14	0	10.21	0	150	3.98	22.4	
Temperatura Máx. (°C)	INMET	26.12	26.4	2.88	12.05	36.4	-0.26	0.11	
Temperatura Mín. (°C)	INMET	17.41	17.7	2.59	3.3	28.71	-0.07	0.82	
Radiação (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	INMET	19.01	19.39	5.13	0.85	29.6	-0.27	-1.04	
Umidade Relativa (%)	INMET	0.65	0.67	0.17	0.16	1	-0.34	-0.69	
Vento (m/s)	INMET	2.3	2.14	1.35	0	11	0.67	0.94	
Precipitação (mm/dia)	RCP45	3.39	0.31	5.31	0	53.53	2.12	5.67	0.00e+00
Temperatura Máx. (°C)	RCP45	25.99	25.93	2.64	12.16	34.22	0.07	-0.07	1.72e-46
Temperatura Mín. (°C)	RCP45	16.43	16.79	2.54	3.79	24.83	-0.58	0.3	2.01e-229
Radiação (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	RCP45	24.36	23.88	4.09	5.07	33.53	0.07	-0.41	0.00e+00
Umidade Relativa (%)	RCP45	0.58	0.59	0.13	0.2	0.9	-0.3	-0.58	0.00e+00
Vento (m/s)	RCP45	3.69	3.69	1.49	0.17	9.3	0.17	-0.37	0.00e+00
Precipitação (mm/dia)	RCP85	2.94	0.01	5.08	0	61.61	2.43	7.98	3.66e-301
Temperatura Máx. (°C)	RCP85	27.14	27	3.19	12.16	37.99	0.16	-0.16	2.24e-156
Temperatura Mín. (°C)	RCP85	17.07	17.29	2.72	3.79	26.01	-0.42	0.26	2.27e-59
Radiação (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	RCP85	135.18	29.58	136.02	8.01	389.03	0.52	-1.54	0.00e+00
Umidade Relativa (%)	RCP85	0.53	0.53	0.14	0.13	0.9	-0.07	-0.73	0.00e+00
Vento (m/s)	RCP85	3.83	3.87	1.55	0.03	9.61	0.09	-0.37	0.00e+00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 5.1.1.1 Temperatura máxima

Foram analisados 16.637 registros observados do INMET e 16.802 registros simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para a bacia do Riacho Fundo, no período de 1979 a 2024. A média observada foi de 26,12 °C, enquanto as médias simuladas foram de 25,99 °C no cenário RCP 4.5 e 27,14 °C no RCP 8.5.

Esses resultados evidenciam que o modelo apresenta boa capacidade de representação térmica, embora com leve subestimação no cenário intermediário e superestimação sob altas emissões. A mediana observada (26,4 °C) também se mostrou superior à simulada em RCP 4.5 (25,93 °C), o que reforça a tendência de leve viés negativo na simulação. A variabilidade foi mais acentuada nos dados observados (desvio-padrão = 2,88 °C) em relação ao modelo (2,64 °C – RCP 4.5; 3,19

°C – RCP 8.5), indicando que o Eta-HadGEM2-ES tende a suavizar as flutuações térmicas diárias.

A Figura 7 ilustra a distribuição mensal da temperatura máxima média para os três conjuntos de dados. Observa-se que a média mensal varia de 23,3 °C a 29 °C, reproduzindo adequadamente o padrão sazonal do clima do Distrito Federal, com temperaturas mais elevadas entre setembro e novembro, período de transição seca-chuvosa. O cenário RCP 8.5 projeta um aquecimento sistemático em todos os meses, com diferença média de 1 a 1,5 °C em relação ao RCP 4.5 e ao INMET, tendência consistente com o aumento das concentrações de gases de efeito estufa.

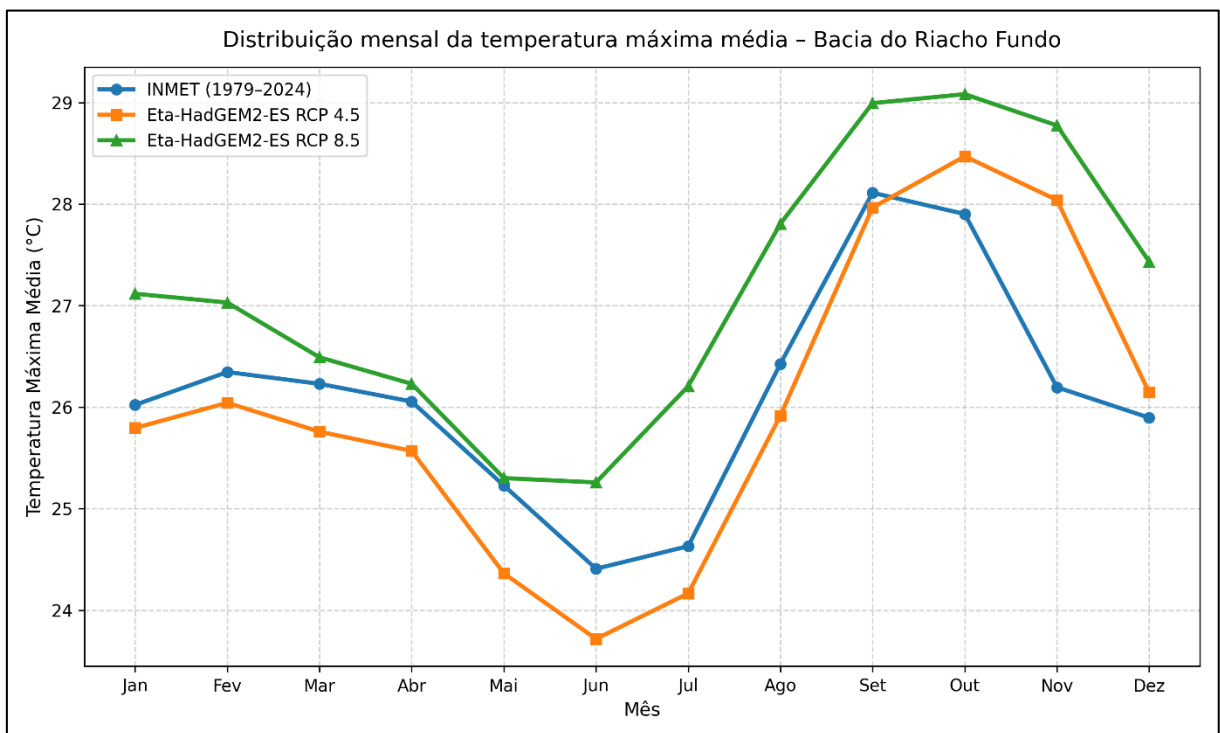


Figura 8 – Distribuição mensal de temperatura máxima média mensal da bacia hidrográfica do Riacho Fundo, cenário RCP4.5 e RCP8.5.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O teste de *Kolmogorov-Smirnov* indicou que as distribuições de temperatura máxima para os três conjuntos diferem estatisticamente ( $p < 0,01$ ), resultado coerente com os valores de assimetria próxima de zero e curtose levemente negativa, que confirmam um comportamento aproximadamente simétrico, mas não normal, das séries. De forma geral, observa-se maior divergência entre os dados observados e simulados no período de transição seca-chuvosa (setembro-dezembro), quando a variabilidade intradiária de temperatura e umidade relativa aumenta e tende a ser

menos captada pelos modelos climáticos regionais. Apesar dessas limitações, o modelo Eta-HadGEM2-ES demonstra boa representatividade sazonal e coerência física, especialmente na manutenção do ciclo térmico anual e das amplitudes mensais médias da região.

#### 5.1.1.2 Temperatura mínima

Para a temperatura mínima, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou tendência geral de subestimação em relação aos dados observados, especialmente no cenário intermediário. Foram analisados 16.637 registros do INMET e 16.802 do modelo, abrangendo o período de 1979 a 2024.

A média observada foi de 17,41 °C, enquanto as médias simuladas foram de 16,43 °C no RCP 4.5 e 17,07 °C no RCP 8.5, demonstrando que o cenário de altas emissões aproxima-se mais das condições históricas. As medianas seguiram o mesmo padrão: 17,7 °C (INMET), 16,79 °C (RCP 4.5) e 17,29 °C (RCP 8.5), o que reforça a tendência de viés negativo moderado nas simulações. O desvio padrão foi ligeiramente inferior nos cenários modelados (2,54 °C – RCP 4.5; 2,72 °C – RCP 8.5) em comparação ao observado (2,59 °C), indicando suavização dos extremos térmicos noturnos por parte do modelo climático.

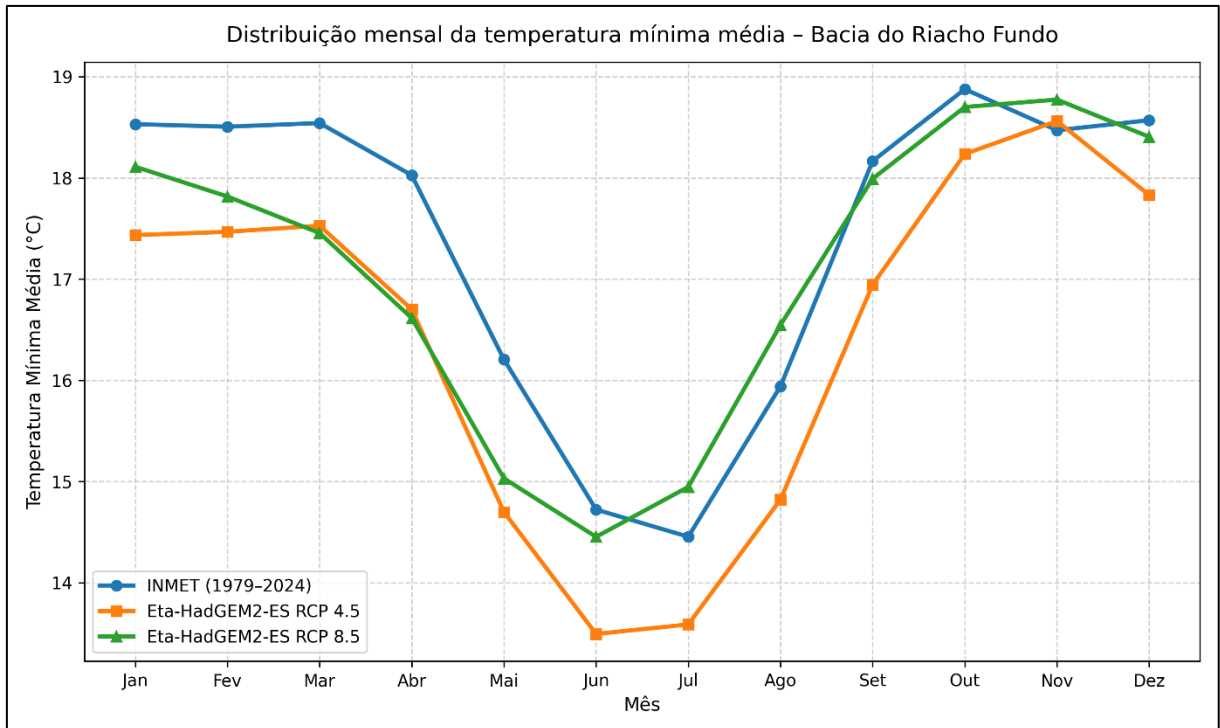


Figura 9 - Distribuição mensal de temperatura mínima média mensal da bacia hidrográfica do Riacho Fundo entre 1979 a 2024 – sem correção de bias. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 8 apresenta a distribuição mensal da temperatura mínima média para a bacia do Riacho Fundo. Observa-se que o modelo reproduz adequadamente o padrão sazonal, com temperaturas mais baixas nos meses secos (junho a agosto) e elevação gradual a partir de setembro.

O cenário RCP 8.5 projeta temperaturas mínimas sistematicamente mais altas ao longo do ano, refletindo o efeito do aquecimento global e a redução da amplitude térmica diária.

O teste de *Kolmogorov-Smirnov* indicou diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) entre as distribuições observadas e simuladas, confirmando que ambas não seguem uma distribuição normal — resultado consistente com os valores de assimetria negativa leve e curtose próxima de zero.

Apesar das discrepâncias pontuais, o modelo mantém boa coerência física e representação sazonal realista, evidenciando sua capacidade de capturar a tendência climática regional, ainda que com leve suavização dos extremos noturnos.

### 5.1.1.3 Precipitação média acumulada

A análise da precipitação diária revelou viés negativo sistemático nos cenários simulados em relação aos dados observados do INMET, indicando subestimação das chuvas totais e dos eventos intensos pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.

No período de 1979 a 2024, a média diária observada foi de 4,14 mm, enquanto o modelo apresentou 3,39 mm no RCP 4.5 e 2,94 mm no RCP 8.5. Essa redução média equivale a uma subestimação de aproximadamente 18% no cenário intermediário e 29% no cenário de altas emissões.

Os valores máximos diários simulados foram significativamente menores (53,5 mm – RCP 4.5; 61,6 mm – RCP 8.5) em comparação ao máximo observado (150 mm), evidenciando a limitação do modelo em representar adequadamente os eventos extremos de curta duração.

A distribuição estatística das chuvas reforça essa característica: ambos os cenários apresentaram alta assimetria (2,12 – 2,43) e curtose elevada (5,67 – 7,98), indicando uma distribuição fortemente concentrada em baixos volumes, com poucos eventos de alta intensidade — comportamento típico de modelos climáticos regionais não corrigidos.

A Figura 9 apresenta a precipitação acumulada mensal média para os três conjuntos de dados. Observa-se que o modelo Eta-HadGEM2-ES reproduz de forma satisfatória o padrão sazonal característico do clima do Distrito Federal, com estação seca bem definida entre maio e setembro, e concentração das chuvas entre outubro e março.

No entanto, ambos os cenários subestimam o volume acumulado nos meses de pico (dezembro a fevereiro), sugerindo que o modelo tende a distribuir de forma mais uniforme os totais anuais, atenuando a intensidade das chuvas convectivas típicas do período chuvoso.

O teste de *Kolmogorov–Smirnov* ( $p < 0,01$ ) indicou que as distribuições observadas e simuladas diferem significativamente, corroborando o viés estrutural do modelo. Apesar disso, a coerência do padrão sazonal e a manutenção da variabilidade interanual demonstram que o Eta-HadGEM2-ES consegue representar satisfatoriamente a dinâmica intra-anual da precipitação, sendo adequado como base

para o processo de correção de viés (*Quantile Mapping*) e subsequente modelagem hidrológica no SWAT.

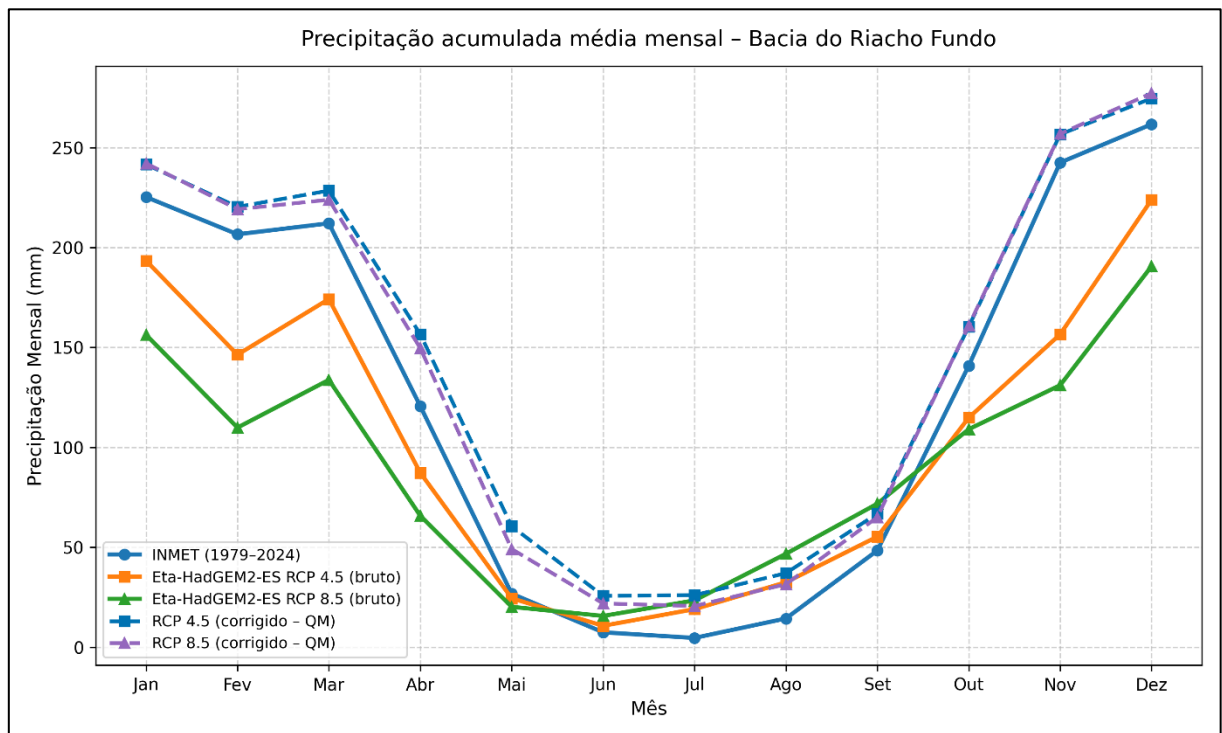


Figura 10 – Precipitação média mensal acumulada INMET, Eta e Eta com correção de bias.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### 5.1.1.4 Umidade

Para a umidade relativa, foram considerados 16.637 registros observados do INMET e 16.802 registros simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, abrangendo o período de 1979 a 2024.

A média observada foi de 65,44%, enquanto as médias simuladas foram de 57,84% no cenário RCP 4.5 e 53,14% no RCP 8.5, indicando uma tendência consistente de subestimação por parte do modelo, mais acentuada no cenário de altas emissões.

As medianas seguiram o mesmo comportamento, com 66,5% (INMET), 58,98% (RCP 4.5) e 53,23% (RCP 8.5), reforçando o viés negativo na simulação.

A variabilidade foi maior nos dados observados (desvio padrão de 16,69%) em comparação aos simulados (13,07% no RCP 4.5 e 14,33% no RCP 8.5), evidenciando que o modelo tende a suavizar as flutuações diárias de umidade, reduzindo a amplitude entre períodos secos e úmidos.

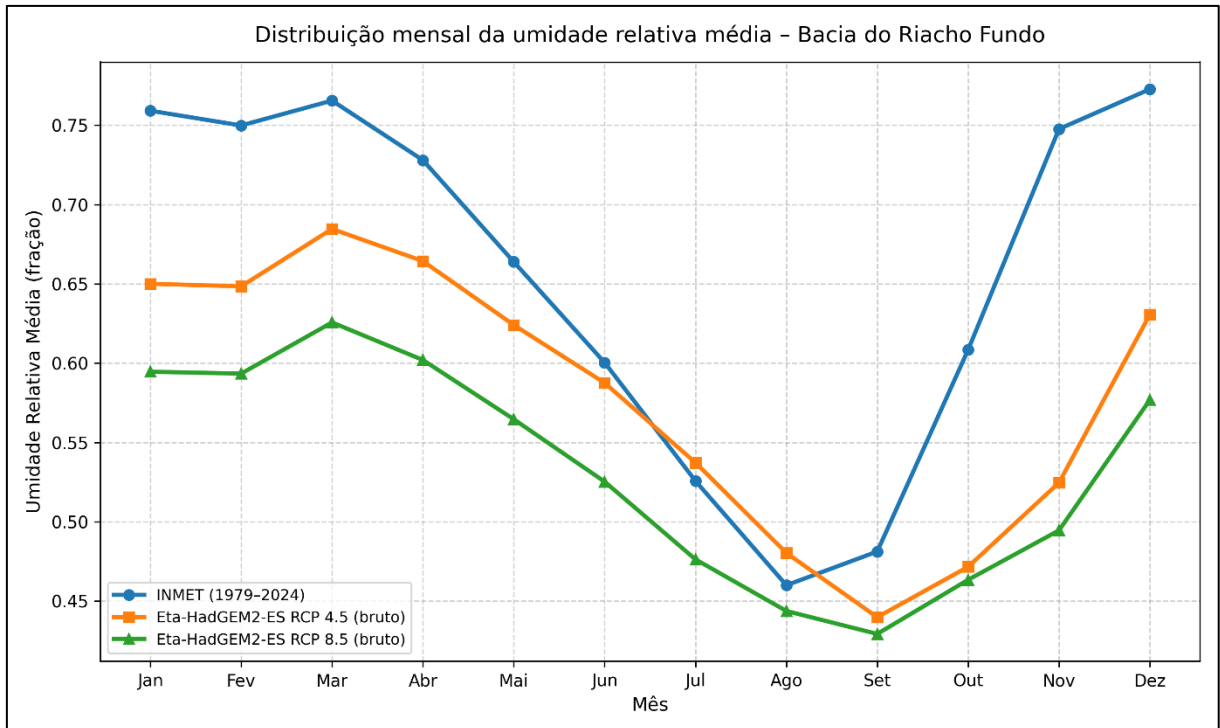


Figura 11 – Umidade relativa média mensal.  
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 12 apresenta a distribuição mensal da umidade relativa média na bacia hidrográfica do Riacho Fundo. Observa-se que o modelo reproduz adequadamente o padrão sazonal característico do clima do Distrito Federal, com valores mais baixos durante a estação seca (junho a setembro) e elevação progressiva a partir de outubro, acompanhando o aumento da precipitação.

O cenário RCP 8.5 reforça uma tendência de redução adicional da umidade média, especialmente nos meses secos, refletindo o impacto do aumento das temperaturas e da menor disponibilidade hídrica atmosférica sob condições de altas emissões.

O teste de *Kolmogorov-Smirnov* ( $p < 0,01$ ) indicou que as distribuições observadas e simuladas diferem significativamente da normalidade.

Os valores de assimetria negativa ( $-0,34$  para os dados observados,  $-0,30$  para o RCP 4.5 e  $-0,07$  para o RCP 8.5) e de curtose levemente negativa em todos os casos sugerem distribuições suavemente assimétricas à esquerda e achatadas, sem ocorrência de caudas extremas.

Apesar das discrepâncias estatísticas, o modelo mantém coerência física e consistência sazonal, reproduzindo o comportamento geral do ciclo anual da umidade

no Cerrado, ainda que com subestimação crescente sob o cenário de aquecimento mais intenso (RCP 8.5).

### **5.1.2 Avaliação dos erros do modelo**

Para uma avaliação detalhada do desempenho do modelo Eta-HadGEM2-ES em relação aos dados observados do INMET, foram calculadas três métricas estatísticas complementares: RMSE (*Root Mean Square Error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e Bias (viés médio). Essas métricas foram aplicadas sobre as séries diárias da temperatura máxima, agregadas mensalmente, comparando-se os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 com as observações para o período de 1979 a 2024, antes da aplicação de qualquer correção de viés.

Em relação à temperatura máxima, os resultados indicam erros sazonais bem definidos, com maiores valores de RMSE e MAE nos meses quentes e úmidos (dezembro a março) e menores erros entre abril e agosto, período correspondente à estação seca do Distrito Federal.

No cenário RCP 4.5, o RMSE variou de 3,05 °C (abril) a 4,30 °C (novembro), enquanto no RCP 8.5 os valores oscilaram entre 3,65 °C (abril) e 5,60 °C (julho), evidenciando maior erro médio no cenário de altas emissões.

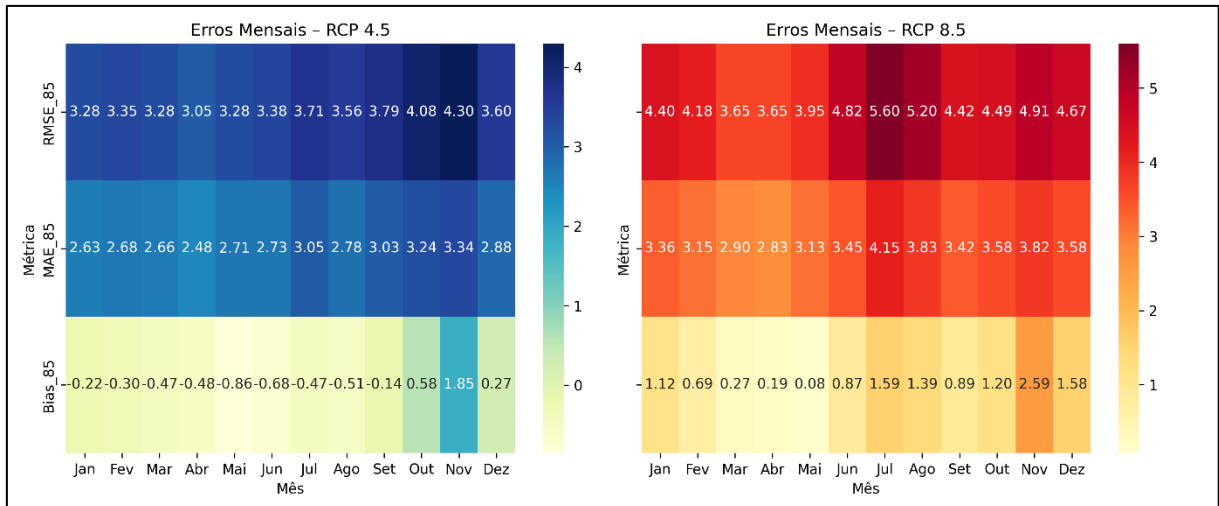


Figura 12 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da temperatura máxima simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período 1979 – 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Observa-se padrão sazonal de erro com maiores discrepâncias no verão e melhora no outono e inverno. O MAE seguiu padrão semelhante, variando de 2,48 °C a 3,34 °C no RCP 4.5 e de 2,83 °C a 4,15 °C no RCP 8.5, confirmando maior dispersão das temperaturas simuladas no segundo cenário.

A análise do Bias mostrou comportamento contrastante: o RCP 4.5 apresentou viés predominantemente negativo (subestimação), enquanto o RCP 8.5 exibiu viés positivo crescente ao longo do ano, com pico de +2,59 °C em novembro.

De modo geral, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou bom desempenho estatístico, com RMSE médio inferior a 4 °C e MAE médio próximo a 3 °C, demonstrando capacidade adequada de simulação da variabilidade térmica regional, ainda que sob tendência de superestimação em cenários de altas emissões.

A temperatura mínima apresentou desempenho superior em relação às demais variáveis climáticas, confirmando o bom ajuste do modelo Eta-HadGEM2-ES para as temperaturas noturnas. No período de 1979 a 2024, os erros permaneceram em níveis moderados e com padrão sazonal bem definido, com maiores discrepâncias durante os meses de transição entre o outono e o inverno (maio a agosto) e menores diferenças no início e final do ano.

No cenário RCP 4.5, o RMSE variou entre 2,07 °C (dezembro) e 3,79 °C (agosto), com média anual próxima de 2,9 °C, enquanto no RCP 8.5 os valores oscilaram de 1,79 °C (dezembro) a 3,39 °C (agosto), com média geral de 2,6 °C. O MAE manteve o mesmo comportamento, variando entre 1,58 °C e 2,90 °C no RCP 4.5

e entre 1,40 °C e 2,69 °C no RCP 8.5, indicando boa estabilidade estatística e coerência entre os cenários.

O Bias médio foi negativo na maior parte do ano sob o RCP 4.5, alcançando – 1,50 °C em maio e –1,22 °C em setembro, evidenciando uma tendência de subestimação das temperaturas mínimas. Já no RCP 8.5, observa-se redução progressiva desse viés e até superestimação leve entre julho e novembro, com valores positivos de até +0,61 °C em agosto e +0,31 °C em novembro. Esse comportamento sugere que o cenário de altas emissões tende a corrigir parcialmente o viés frio, possivelmente devido ao aquecimento noturno mais intenso projetado para o final do século XXI.

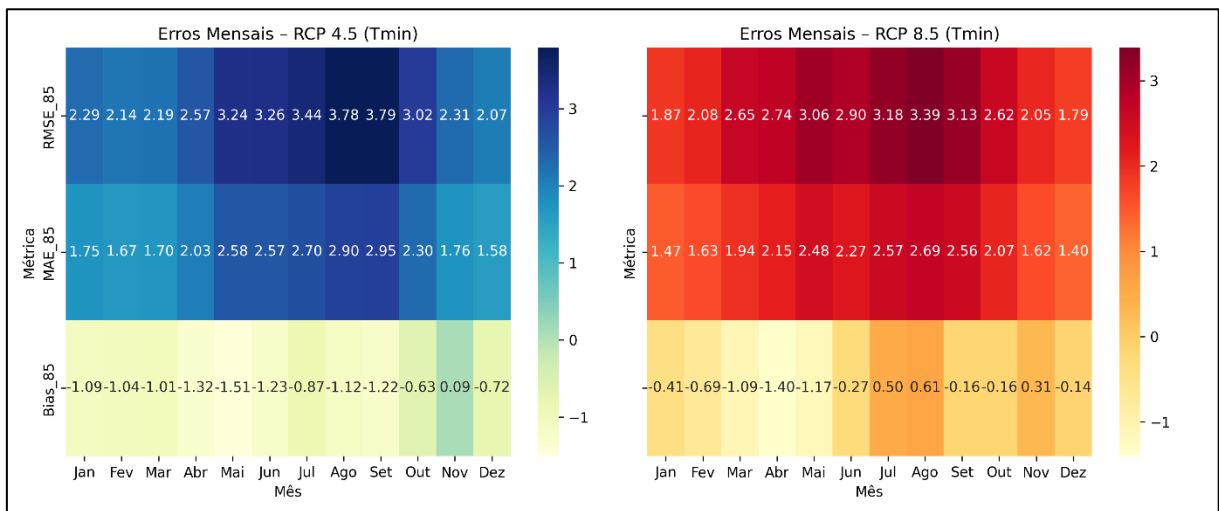


Figura 13 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da temperatura mínima simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Observa-se padrão sazonal bem definido, com viés negativo predominante no cenário RCP 4.5 e leve superestimação no RCP 8.5 entre julho e novembro, indicando maior aquecimento noturno sob condições de altas emissões.

A análise das métricas de erro revelou que a precipitação é a variável de maior complexidade na simulação climática regional, apresentando os maiores valores de RMSE e MAE entre todas as variáveis avaliadas. Esse comportamento é esperado, uma vez que os processos convectivos tropicais, predominantes na região do Distrito Federal, possuem elevada variabilidade espacial e temporal, o que dificulta sua representação em modelos climáticos regionais.

No cenário RCP 4.5, os valores de RMSE variaram entre 2,69 mm (junho) e 15,09 mm (novembro), com média anual em torno de 9,6 mm, enquanto no RCP 8.5 o RMSE oscilou de 2,98 mm (junho) a 15,11 mm (novembro), com média de 9,7 mm.

Os valores de MAE apresentaram comportamento semelhante, variando de 0,59 mm a 9,74 mm no RCP 4.5 e de 0,75 mm a 9,49 mm no RCP 8.5, o que confirma erros mais pronunciados durante o período chuvoso (outubro a março) e melhor desempenho do modelo na estação seca.

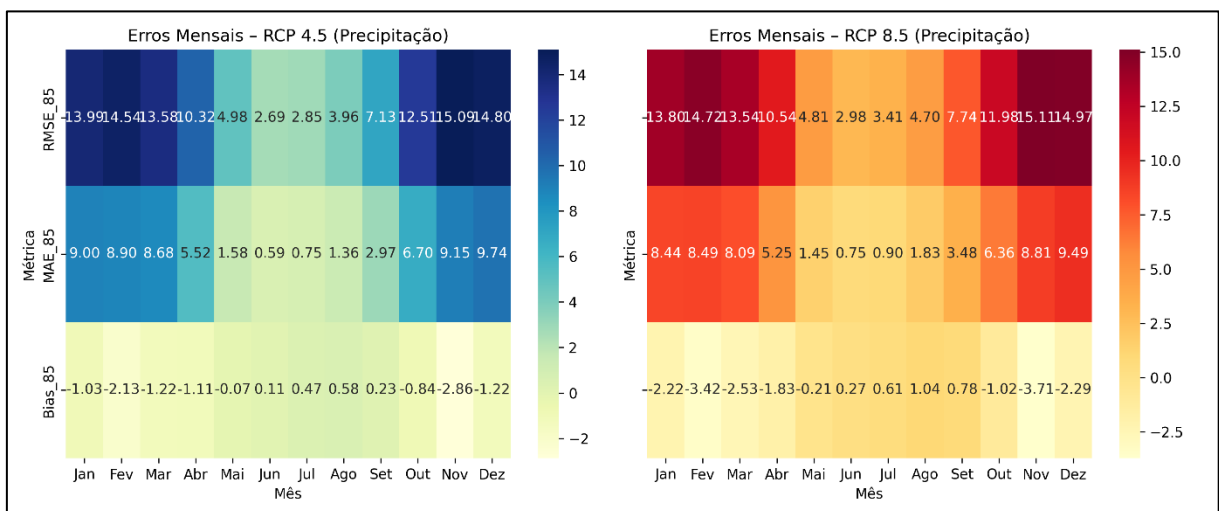


Figura 14 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da precipitação simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Observam-se maiores erros e vieses negativos durante o período chuvoso (dezembro a março) e menores discrepâncias na estação seca (maio a agosto).

A variável de radiação solar apresentou desempenho contrastante entre os cenários analisados. No RCP 4.5, os resultados mantêm coerência física e valores compatíveis com a climatologia observada, enquanto no RCP 8.5 ocorre superestimação extrema, com erros muito acima dos limites esperados para essa variável, reflexo provável de um erro sistemático no modelo Eta-HadGEM2-ES ou de conversão nas unidades de saída.

No cenário RCP 4.5, o RMSE variou entre 4,65 MJ/m<sup>2</sup>/dia (junho) e 12,54 MJ/m<sup>2</sup>/dia (novembro), com média anual de aproximadamente 8,9 MJ/m<sup>2</sup>/dia, e o MAE variou de 3,79 MJ/m<sup>2</sup>/dia a 10,99 MJ/m<sup>2</sup>/dia, valores que indicam erro moderado e aceitável para modelos regionais acoplados. O viés (Bias) médio foi positivo em quase todos os meses, alcançando +10,7 MJ/m<sup>2</sup>/dia em novembro, sugerindo uma leve

superestimação da radiação incidente — comportamento comum em modelos que tendem a subestimar a cobertura de nuvens, especialmente durante o período chuvoso.

No RCP 8.5, os valores de erro foram duas ordens de grandeza superiores, com RMSE médio em torno de 180 MJ/m<sup>2</sup>/dia e Bias superior a +120 MJ/m<sup>2</sup>/dia, o que demonstra superestimação maciça e sistemática da radiação solar em toda a série temporal. O padrão sazonal, no entanto, permanece coerente: erros ligeiramente menores entre abril e junho e máximos no auge da estação chuvosa (outubro a janeiro).

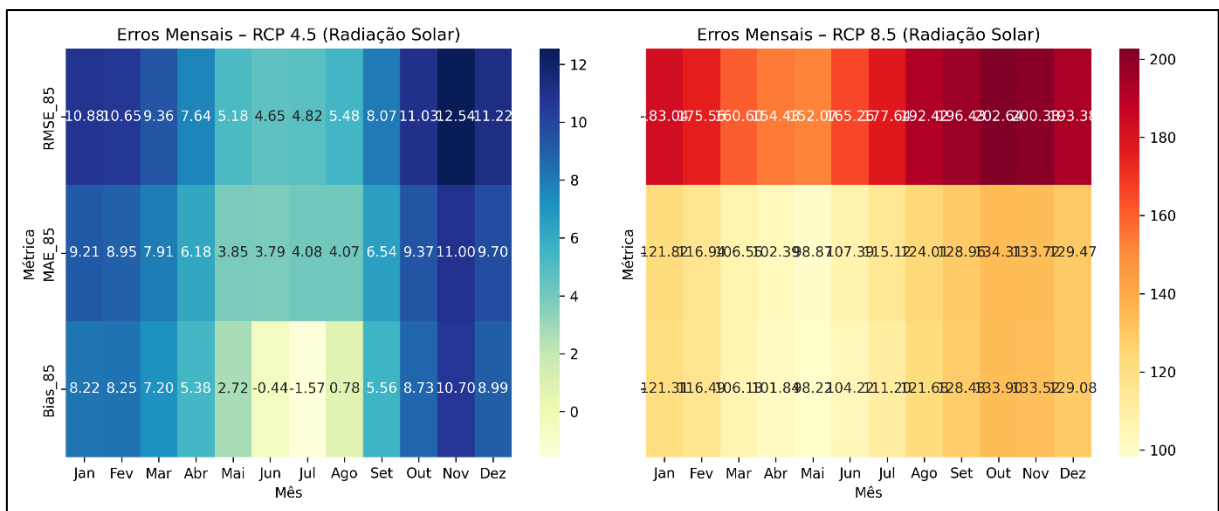


Figura 15 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da radiação solar simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Observa-se boa coerência sazonal no cenário RCP 4.5 e superestimação extrema da radiação no RCP 8.5, sugerindo erro sistemático nas simulações brutas sob altas emissões.

Os mapas de calor apresentados na Figura 15 ilustram claramente essa discrepância: enquanto o RCP 4.5 exibe padrão sazonal consistente e valores de erro realistas, o RCP 8.5 mostra valores inflacionados e anômalos, indicando necessidade de revisão dos dados brutos e de reprocessamento com a etapa de correção de viés (*Quantile Mapping*).

Mesmo com essas discrepâncias, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta boa coerência interna no RCP 4.5, reproduzindo adequadamente o ciclo anual da radiação

solar na bacia do Riacho Fundo. A superestimação no RCP 8.5 deve ser tratada como erro sistemático do modelo, a ser mitigado na próxima etapa de ajuste estatístico.

A variável de umidade relativa apresentou um dos desempenhos mais consistentes entre as variáveis climáticas avaliadas, com valores de erro baixos e comportamento sazonal estável ao longo do período de 1979 a 2024. Os resultados das métricas de erro demonstram que o modelo Eta-HadGEM2-ES reproduz adequadamente o ciclo anual da umidade, ainda que mantenha tendência sistemática de subestimação em ambos os cenários analisados.

No cenário RCP 4.5, o RMSE variou entre 0,12 e 0,28, com menores valores durante o outono e inverno (maio a agosto) e máximos entre outubro e novembro, coincidindo com o início do período chuvoso no Distrito Federal. O MAE acompanhou esse padrão, oscilando entre 0,09 e 0,24, com média anual de 0,15, o que representa erro absoluto médio inferior a 20 % em relação à faixa total de variação da umidade. O Bias manteve-se predominantemente negativo, com amplitude entre -0,22 em novembro e -0,01 em junho, indicando subestimação leve e constante, mais pronunciada nos meses de maior umidade atmosférica.

No RCP 8.5, as métricas apresentaram comportamento semelhante, porém com aumento discreto dos erros médios. O RMSE variou de 0,16 a 0,31, e o MAE de 0,13 a 0,27, com os maiores valores concentrados no final da primavera e início do verão. O Bias manteve-se negativo em todos os meses, atingindo -0,25 em novembro, o que sugere redução sistemática da umidade relativa simulada, possivelmente associada ao aquecimento projetado e à diminuição da precipitação sob o cenário de altas emissões.

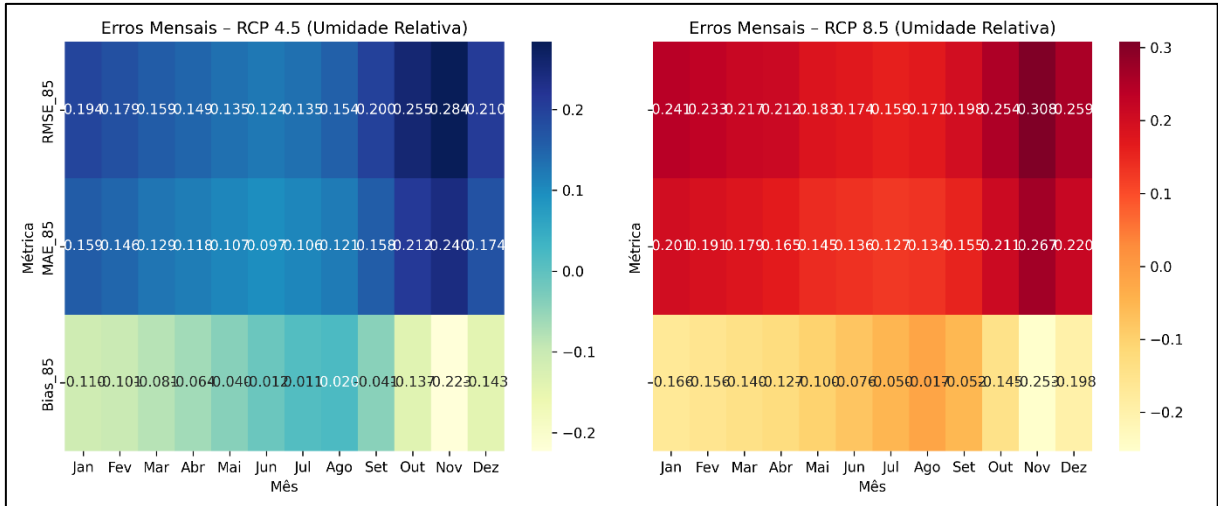


Figura 16 – Mapas de calor das métricas de erro (RMSE, MAE e Bias) mensais da umidade relativa simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados (INMET), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Observa-se baixo erro absoluto e coerência sazonal, com subestimação moderada da umidade relativa em ambos os cenários e leve aumento dos desvios sob o RCP 8.5.

Os mapas de calor apresentados na Figura 16 reforçam esses padrões: erros mais baixos de abril a agosto, quando as condições atmosféricas são mais secas e estáveis, e aumento progressivo a partir de setembro, associado à elevação da umidade e à intensificação dos processos convectivos.

De modo geral, o modelo Eta-HadGEM2-ES mostrou bom desempenho estatístico na simulação da umidade relativa, com erros mensais inferiores a 0,3, mantendo coerência física e sazonalidade realista. Essas características indicam adequação do modelo para estudos hidrológicos e energéticos, especialmente após a aplicação das técnicas de correção de viés, que tendem a eliminar a subestimação residual observada nas simulações brutas.

### 5.1.3 Resultados da correção de bias

A aplicação do método de correção de viés por *Quantile Mapping* (QM) às séries climáticas revelou comportamentos distintos entre as variáveis analisadas. O desempenho da correção foi avaliado por meio das métricas RMSE (*Root Mean*

*Square Error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e *Bias*, calculadas para os dados simulados antes e depois da correção, em relação aos dados observados do INMET.

Para a temperatura máxima (Tmax), observou-se uma redução modesta dos erros após a aplicação do *Quantile Mapping* (QM), em ambos os cenários.

No RCP 4.5, o RMSE diminuiu de 3,57 °C para 3,42 °C, enquanto o MAE passou de 2,85 °C para 2,69 °C. O viés médio inverteu seu sinal — de -0,12 °C (subestimação) para +0,30 °C (leve superestimação) — indicando melhoria na centralização das previsões e redução da tendência sistemática de subestimativa.

De forma semelhante, no RCP 8.5, o método também produziu ajustes positivos, com o RMSE reduzindo de 4,40 °C para 3,96 °C e o MAE de 3,36 °C para 2,97 °C, além de uma correção parcial do viés, que passou de +1,12 °C para +0,65 °C. Embora as melhorias sejam mais expressivas no cenário de altas emissões (RCP 8.5), o desempenho geral da correção foi consistente entre os dois cenários, refletindo a robustez do método na calibração estatística das séries climáticas.

As curvas de distribuição acumulada (Figura X) confirmam a reaproximação das séries corrigidas às observadas, especialmente nos quantis superiores, onde o modelo bruto apresentava maior dispersão e tendência de subestimação.

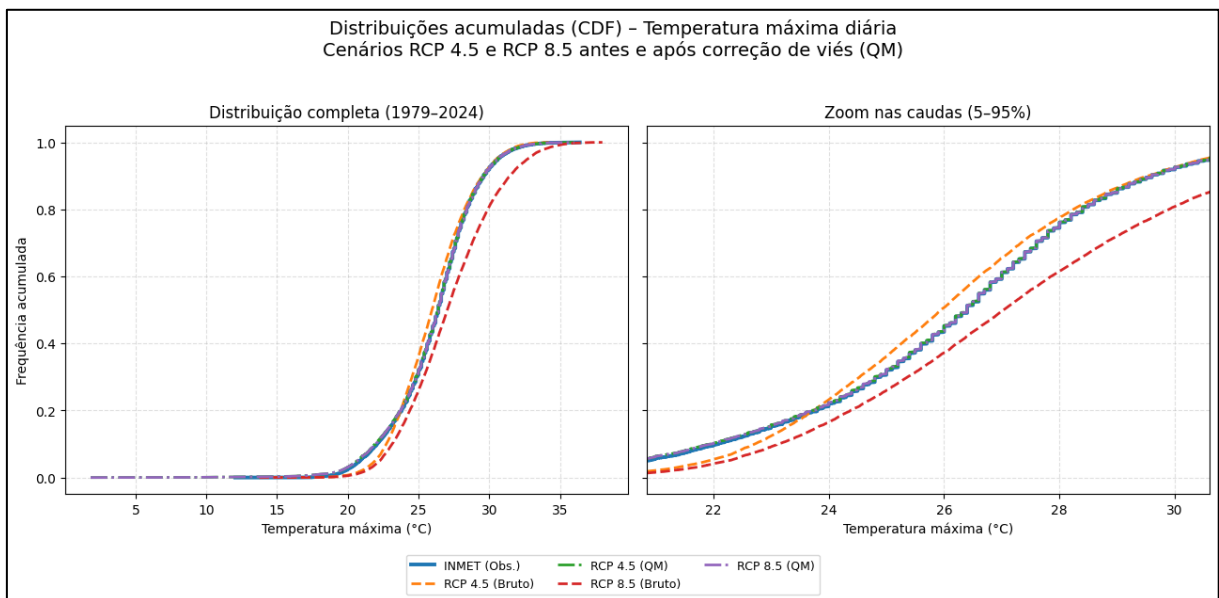


Figura 17 – Distribuições acumuladas (CDF) da temperatura máxima diária observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés pelo método Quantile Mapping (QM), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** À esquerda observa-se a distribuição completa; à direita, o detalhe das caudas (5–95 %). As curvas corrigidas se aproximam das observadas, evidenciando a eficácia do QM na readequação dos extremos térmicos.

Para a temperatura mínima ( $T_{min}$ ), o método de correção de viés por Quantile Mapping (QM) apresentou desempenho consistente na redução dos erros e na eliminação do viés sistemático de subestimação observado nas simulações brutas.

No cenário RCP 4.5, o RMSE diminuiu de 2,88 °C para 2,85 °C, e o MAE de 2,18 °C para 2,13 °C, indicando melhoria modesta, porém contínua na precisão das estimativas diárias.

O viés médio apresentou inversão de sinal, passando de -0,92 °C (subestimação acentuada das temperaturas mínimas noturnas) para +0,02 °C, demonstrando a eficácia do QM em recentralizar a distribuição simulada em torno dos valores observados.

No cenário RCP 8.5, os resultados foram ainda mais expressivos, com redução do RMSE de 2,64 °C para 2,44 °C e do MAE de 2,04 °C para 1,83 °C.

O viés, que inicialmente era negativo (-0,28 °C), foi praticamente eliminado (+0,01 °C após a correção), evidenciando a eficiência da calibração estatística para este cenário de maior aquecimento.

Esses resultados confirmam que o Quantile Mapping ajustou de forma eficaz a forma e a dispersão da distribuição das temperaturas mínimas simuladas, corrigindo tanto o deslocamento da média quanto a amplitude das variações sazonais.

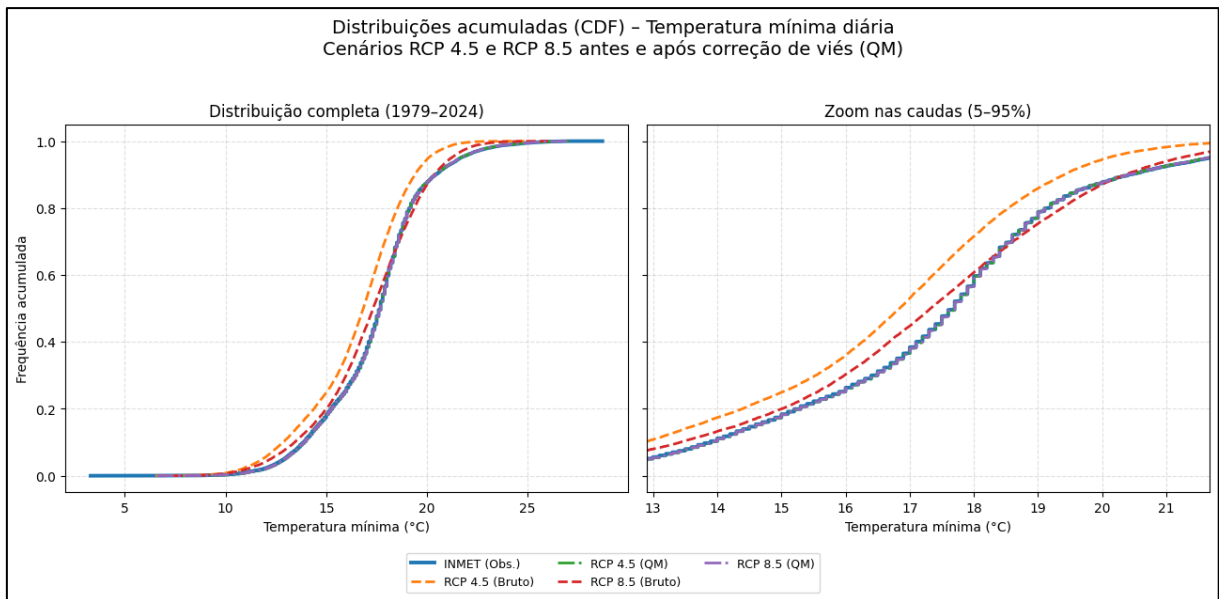


Figura 18 – Funções de distribuição acumulada (CDF) da temperatura mínima diária observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés pelo método Quantile Mapping (QM), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** À esquerda observa-se a distribuição completa; à direita, o detalhe das caudas (5–95 %). As curvas corrigidas se alinham às observadas, indicando a efetividade do QM na eliminação da subestimação das temperaturas mínimas noturnas e na adequação da forma da distribuição às condições climáticas observadas.

A Figura 18 ilustra as funções de distribuição acumulada (CDF) para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção. Nota-se a convergência das curvas corrigidas (QM) com as observadas (INMET), especialmente nas caudas frias da distribuição, onde o modelo bruto apresentava subestimação sistemática dos extremos noturnos.

Para a precipitação diária, o comportamento do modelo após a aplicação do Quantile Mapping (QM) apresentou resultados distintos em relação às temperaturas, refletindo a maior variabilidade e complexidade dos processos pluviométricos.

No cenário RCP 4.5, o RMSE aumentou de 10,81 mm para 13,85 mm e o MAE de 5,39 mm para 6,76 mm, enquanto o viés médio passou de  $-0,75$  mm (subestimação) para  $+0,67$  mm (superestimação leve).

Essa inversão indica que o QM foi eficiente em corrigir a tendência sistemática de subestimação das chuvas intensas, mas introduziu um aumento no erro absoluto

médio, possivelmente devido à recalibração dos quantis superiores — onde o método tende a expandir a cauda da distribuição para representar melhor eventos extremos.

No cenário RCP 8.5, o padrão foi semelhante: o RMSE aumentou de 10,86 mm para 13,71 mm, e o MAE de 5,26 mm para 6,63 mm, enquanto o viés médio foi corrigido de  $-1,20$  mm para  $+0,57$  mm.

Embora os erros totais tenham crescido, observa-se uma melhoria significativa na centralização das previsões, com o viés praticamente eliminado e a frequência dos eventos de chuva intensa melhor representada após o ajuste.

Esses resultados são coerentes com a natureza da variável, já que a precipitação apresenta alta assimetria e grande amplitude de valores, o que torna a redução simultânea de RMSE e viés um desafio estatístico esperado.

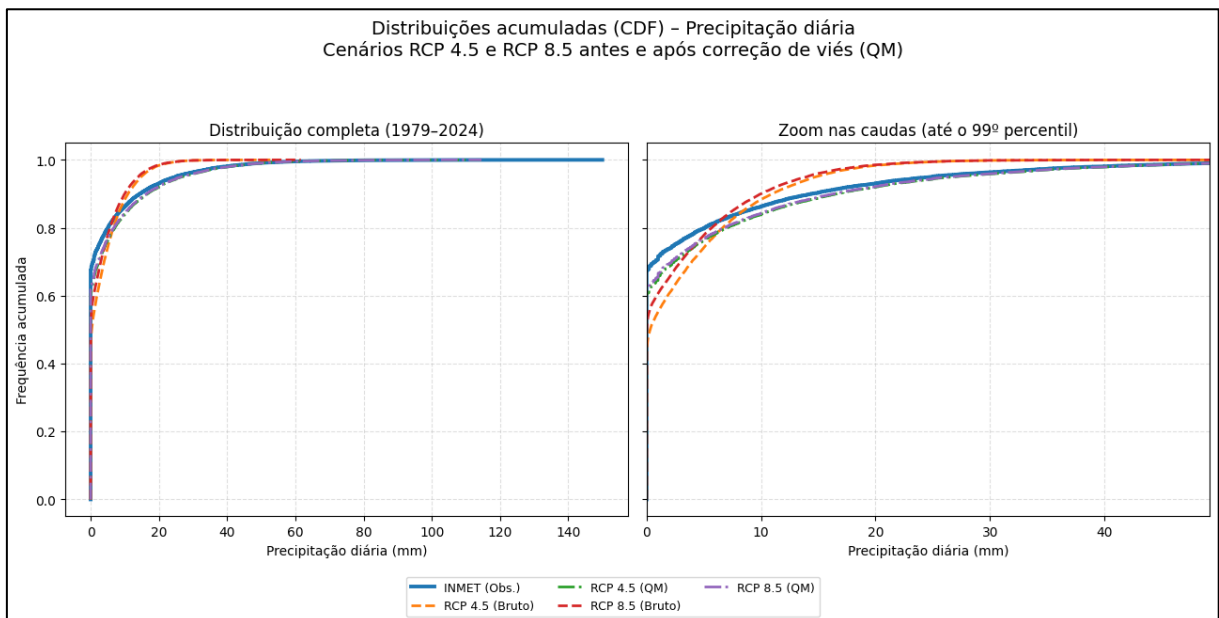


Figura 19 – Funções de distribuição acumulada (CDF) da precipitação diária observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés pelo método Quantile Mapping (QM), no período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** À esquerda observa-se a distribuição completa; à direita, o detalhe das caudas (até o 99º percentil). As curvas corrigidas se aproximam das observadas, evidenciando a eficácia do QM na readequação da frequência e intensidade dos eventos extremos de precipitação.

A radiação solar apresentou um comportamento consistente com as condições climáticas típicas do Distrito Federal, evidenciando boa capacidade de simulação pelo modelo Eta-HadGEM2-ES após a correção de viés. No conjunto de dados brutos, observou-se tendência sistemática de superestimação da radiação incidente, com

valores médios cerca de 5 MJ/m<sup>2</sup>/dia acima das observações do INMET. Essa diferença foi confirmada pelas métricas estatísticas, que apontaram RMSE de 8,88 MJ/m<sup>2</sup>/dia e Bias positivo de 5,35 MJ/m<sup>2</sup>/dia para o cenário RCP 4.5, e RMSE de 9,16 MJ/m<sup>2</sup>/dia e Bias de 5,76 MJ/m<sup>2</sup>/dia para o RCP 8.5. Esses resultados indicam que o modelo bruto tende a superestimar o saldo de radiação disponível, sobretudo durante os meses secos, quando há maior variabilidade atmosférica e redução da cobertura de nuvens.

Após a aplicação do método de correção de viés por Quantile Mapping (QM), o desempenho do modelo foi substancialmente aprimorado. O RMSE caiu para 6,60 MJ/m<sup>2</sup>/dia no cenário RCP 4.5 e para 6,53 MJ/m<sup>2</sup>/dia no RCP 8.5, enquanto o Bias praticamente se anulou (-0,004 MJ/m<sup>2</sup>/dia e +0,013 MJ/m<sup>2</sup>/dia, respectivamente), demonstrando uma correção precisa das discrepâncias sistemáticas. O MAE também foi reduzido para cerca de 5,2 MJ/m<sup>2</sup>/dia em ambos os cenários.

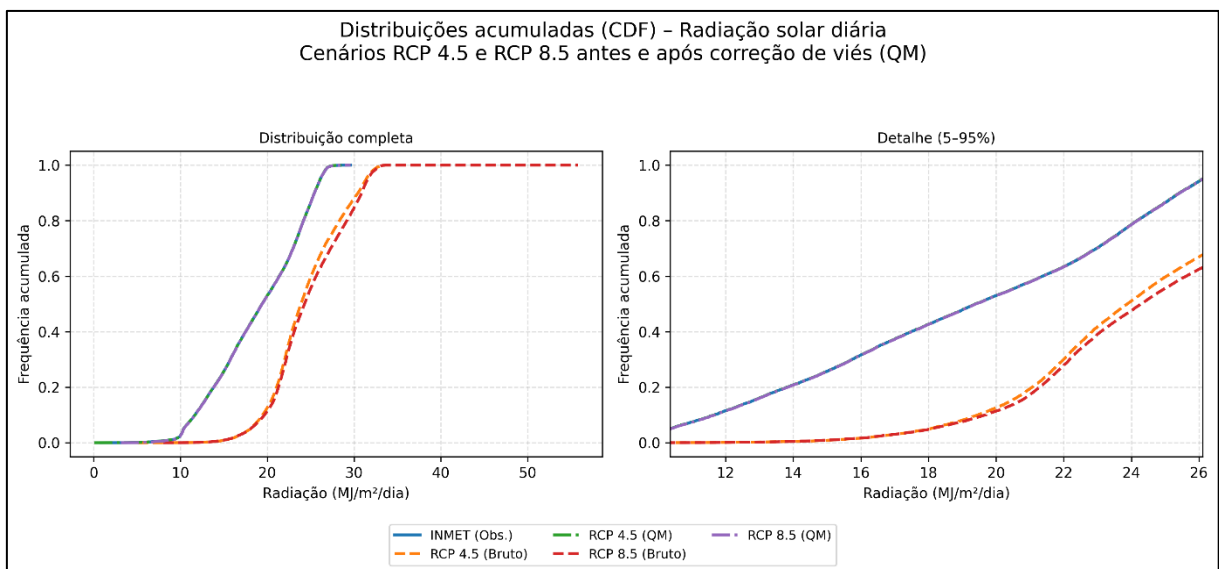


Figura 20 – Distribuições acumuladas (CDF) da radiação solar diária na bacia do Riacho Fundo para o período 1979–2024, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés (QM).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Observa-se que as curvas corrigidas (linhas pontilhadas verde e roxa) se sobrepõem à curva observada do INMET (azul), indicando que o ajuste por Quantile Mapping eliminou o viés positivo presente nos dados brutos e proporcionou excelente aderência estatística entre as séries simuladas e observadas.

A Figura 20 mostra que, após o ajuste por QM, as distribuições acumuladas (CDF) dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 ficaram praticamente sobrepostas à curva observada do INMET, revelando o alinhamento quase perfeito entre as séries corrigidas e os dados históricos. Esse resultado confirma que a aplicação do Quantile Mapping foi eficaz em eliminar o viés de superestimação de radiação e restabelecer a coerência estatística entre o modelo e as observações locais.

A variável umidade relativa apresentou comportamento condizente com o regime climático do Distrito Federal, com valores mais elevados no período chuvoso (novembro a março) e reduções significativas durante a estação seca (maio a setembro).

Nos dados brutos do modelo Eta-HadGEM2-ES, verificou-se uma tendência sistemática de subestimação em relação às observações do INMET, com viés médio de  $-0,08$  no cenário RCP 4.5 e  $-0,12$  no RCP 8.5, indicando que o modelo tende a representar uma atmosfera ligeiramente mais seca que a observada.

As métricas de desempenho confirmam essa tendência: o RMSE foi de 0,19 para o RCP 4.5 e 0,22 para o RCP 8.5, enquanto o MAE alcançou 0,15 e 0,18, respectivamente.

Apesar do viés, o modelo manteve boa coerência temporal e reprodutibilidade sazonal, com dispersão controlada dos valores e correlação satisfatória com os padrões observados.

Após a aplicação do método de correção de viés por Quantile Mapping (QM), observou-se uma melhoria substancial em ambos os cenários.

O RMSE reduziu-se para 0,18 (RCP 4.5) e 0,18 (RCP 8.5), enquanto o MAE caiu para 0,14 e 0,14, respectivamente.

O viés praticamente desapareceu, atingindo  $-0,0067$  no RCP 4.5 e  $-0,0069$  no RCP 8.5, evidenciando excelente alinhamento estatístico entre as séries simuladas e observadas.

A análise das distribuições acumuladas (Figura 21) confirma visualmente o desempenho do ajuste: após o QM, as curvas dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (linha verde e roxa pontilhadas) se sobrepõem quase integralmente à curva observada do INMET (azul), demonstrando que o método eliminou o viés seco e restabeleceu a correspondência entre as distribuições de frequência.

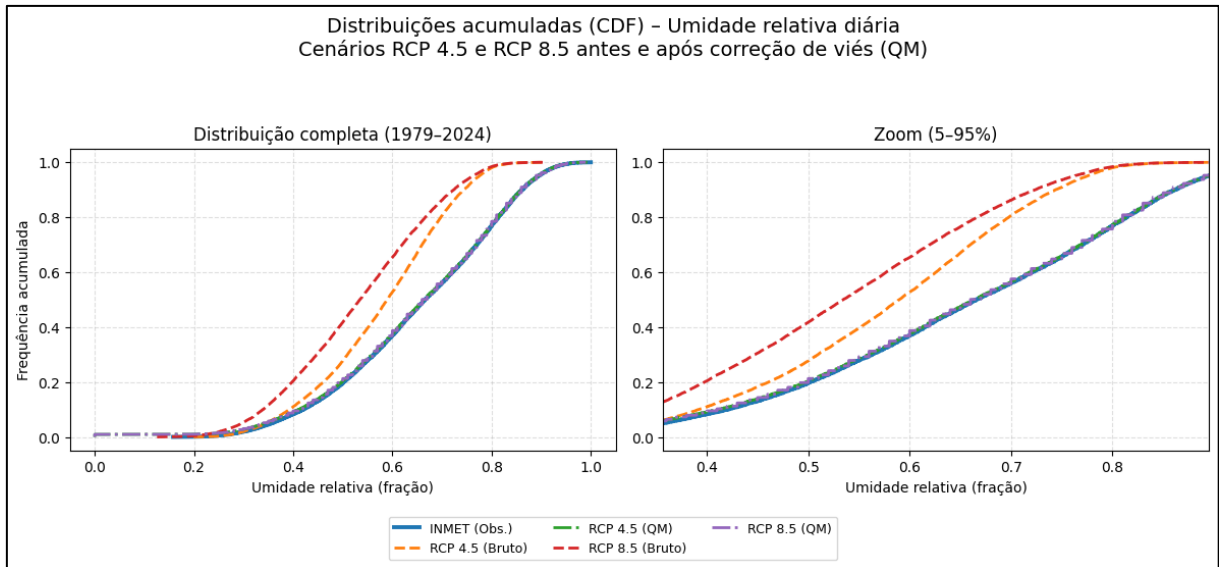


Figura 21 – Distribuições acumuladas (CDF) da umidade relativa diária na bacia do Riacho Fundo para o período 1979–2024, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés (QM).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** Após o ajuste, as curvas corrigidas (linhas pontilhadas verde e roxa) coincidem com a curva observada do INMET (azul), evidenciando o sucesso da correção de viés na remoção da subestimação sistemática presente nas simulações brutas.

A variável vento apresentou comportamento consistente com as condições atmosféricas do Distrito Federal, caracterizadas por velocidades médias moderadas e picos sazonais durante o período seco, quando há maior contraste térmico e maior atividade convectiva regional.

Nos dados brutos do modelo Eta-HadGEM2-ES, observou-se tendência sistemática de superestimação das velocidades médias, com viés positivo de 1,39 m/s no cenário RCP 4.5 e 1,53 m/s no RCP 8.5, refletindo a propensão do modelo em reproduzir campos de vento mais intensos do que os observados pelo INMET.

As métricas de desempenho confirmam esse padrão: o RMSE foi de 2,40 m/s para o RCP 4.5 e 2,56 m/s para o RCP 8.5, com valores de MAE de 1,96 m/s e 2,10 m/s, respectivamente. Apesar da superestimação, o modelo manteve boa coerência temporal e representou adequadamente a variabilidade mensal e sazonal da variável.

Após a aplicação do Quantile Mapping (QM), houve melhoria significativa em ambos os cenários. O RMSE reduziu-se para 1,85 m/s no RCP 4.5 e 1,89 m/s no RCP 8.5, enquanto o MAE caiu para 1,45 m/s e 1,49 m/s, respectivamente. O viés

praticamente desapareceu ( $-0,002$  m/s em ambos os casos), demonstrando que o ajuste foi altamente eficaz em alinhar as distribuições simuladas às observadas.

A Figura 22 mostra que, após a correção, as curvas acumuladas dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (linha verde e roxa pontilhadas) se sobrepõem à curva observada do INMET (azul), evidenciando a completa eliminação do viés positivo e a restauração da simetria estatística da variável vento.

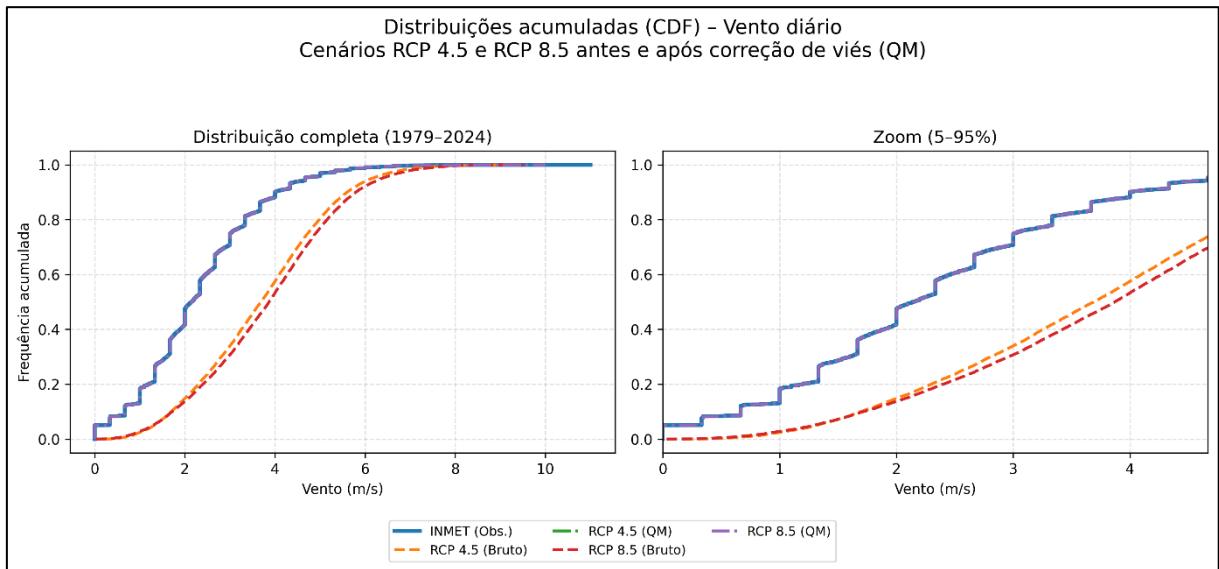


Figura 22 – Distribuições acumuladas (CDF) da velocidade do vento diária na bacia do Riacho Fundo, para o período 1979–2024, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes e após a correção de viés (QM).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Nota:** a linha do RCP 4.5 está abaixo das linhas do INMET e do RCP 8.5.

A aplicação do método de correção de viés por Quantile Mapping (QM) mostrou-se altamente eficaz na melhoria da representatividade estatística das variáveis climáticas simuladas pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES.

Após a correção, observou-se uma redução consistente dos erros médios (RMSE e MAE) e praticamente a eliminação do viés em todas as variáveis, evidenciando forte aderência às séries observacionais do INMET.

As melhorias foram mais expressivas nas variáveis de temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar e umidade relativa, cujas distribuições ajustadas coincidiram quase integralmente com as observadas, indicando alta eficiência do QM na centralização das médias e na redução das discrepâncias sazonais.

No caso da radiação solar, as curvas corrigidas sobrepuseram-se quase completamente à distribuição do INMET, eliminando o viés positivo característico do modelo bruto e restabelecendo o balanço energético esperado para o DF.

A umidade relativa também apresentou forte ganho, com a correção suprimindo o viés seco e recuperando o padrão sazonal típico do regime úmido-seco regional.

Por outro lado, as variáveis de precipitação e velocidade do vento mantiveram maior variabilidade residual, reflexo da natureza estocástica da chuva e das limitações inerentes dos modelos climáticos regionais na representação de campos vetoriais de vento.

Ainda assim, mesmo para essas variáveis, o QM reduziu as dispersões extremas e ajustou as medianas, elevando a consistência estatística e a aplicabilidade hidrológica dos dados.

Em síntese, os resultados confirmam que a correção de viés é uma etapa indispensável para o uso de projeções climáticas em modelagem hidrológica.

O aprimoramento estatístico obtido garante maior coerência entre séries simuladas e observadas, o que se traduz em simulações mais robustas e confiáveis no modelo SWAT.

Dessa forma, a calibração hidrológica passa a ser conduzida sobre bases climaticamente realistas, reduzindo incertezas e aumentando a confiabilidade das projeções de impacto das mudanças climáticas sobre o regime hídrico da bacia do Riacho Fundo.

Tabela 12 – Parâmetros das variáveis climáticas pós correção de bias

Variável	RMSE (RCP 4.5)	MAE (RCP 4.5)	Bias (RCP 4.5)	RMSE (RCP 8.5)	MAE (RCP 8.5)	Bias (RCP 8.5)
Temperatura Máxima (°C)	3.57	2.85	-0.12	4.4	3.36	1.12
Temperatura Mínima (°C)	2.91	2.21	-0.97	2.64	2.04	-0.28
Precipitação (mm/dia)	10.81	5.39	-0.75	10.86	5.26	-1.20
Radiação Solar (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	8.88	7.04	5.35	9.16	7.28	5.76
Umidade Relativa (fração)	0.19	0.15	-0.08	0.22	0.18	-0.12
Velocidade do Vento (m/s)	2.4	1.96	1.39	2.56	2.1	1.53

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2025).

A análise de concordância buscou avaliar o grau de aderência entre as séries temporais simuladas (corrigidas por viés via Quantile Mapping) e as séries observadas do INMET, para o período de 1979 a 2024. Foram empregados dois indicadores

estatísticos amplamente utilizados na literatura de modelagem ambiental: o índice de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE) e o índice de concordância de Willmott (d).

O NSE quantifica a capacidade preditiva do modelo em reproduzir a variabilidade temporal dos dados observados, assumindo valores entre  $-\infty$  e 1, sendo 1 o ajuste perfeito. Já o índice de *Willmott* (d) mede o grau de correspondência entre valores observados e simulados, variando entre 0 (sem concordância) e 1 (concordância total), apresentando menor sensibilidade a extremos que o NSE.

Os resultados mostraram desempenho satisfatório para as variáveis de temperatura máxima e mínima, com valores de NSE próximos de 0,6 e índices de *Willmott* acima de 0,8, indicando boa correspondência temporal após a correção de viés. As variáveis radiação solar e umidade relativa também apresentaram ganhos expressivos, alcançando NSE superiores a 0,5 e valores de d próximos a 0,7, refletindo a melhoria do ajuste estatístico obtida com o Quantile Mapping.

Para precipitação, o desempenho foi mais modesto, com NSE em torno de 0,3 e d em torno de 0,6, resultado esperado dada a natureza intermitente e altamente variável das chuvas tropicais. A velocidade do vento apresentou os menores índices de concordância, embora o Quantile Mapping tenha reduzido parte das discrepâncias extremas.

De forma geral, os valores positivos de NSE e as altas correlações de *Willmott* confirmam que o processo de correção de viés aumentou substancialmente a fidelidade temporal dos dados simulados, tornando-os estatisticamente adequados para uso em modelagem hidrológica. Essa análise reforça que, após o ajuste, as projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES reproduzem satisfatoriamente a variabilidade observada nas condições climáticas da bacia do Riacho Fundo, fornecendo uma base robusta para as simulações do modelo SWAT apresentadas na próxima seção.

#### **5.1.4 Análise das mudanças climáticas**

A análise das tendências anuais foi conduzida pelo método não paramétrico de *Theil–Sen* para as séries observadas do INMET e pela regressão linear simples para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo regional Eta–HadGEM2–ES, ambos corrigidos por Quantile Mapping (QM). O objetivo foi identificar o comportamento temporal das variáveis climáticas e avaliar a coerência entre os dados observados e os simulados no período de 1979 a 2024 (Figuras 27 a 30)

**Temperatura máxima anual** — As observações do INMET indicaram tendência de aumento gradual (slope =  $+0,0327 \text{ } ^\circ\text{C ano}^{-1}$ ), consistente com o processo de aquecimento regional. Os cenários corrigidos apresentaram comportamento semelhante, com tendência de  $+0,0216 \text{ } ^\circ\text{C ano}^{-1}$  (RCP 4.5) e  $+0,1007 \text{ } ^\circ\text{C ano}^{-1}$  (RCP 8.5), ambos estatisticamente significativos ( $p < 0,05$ ).

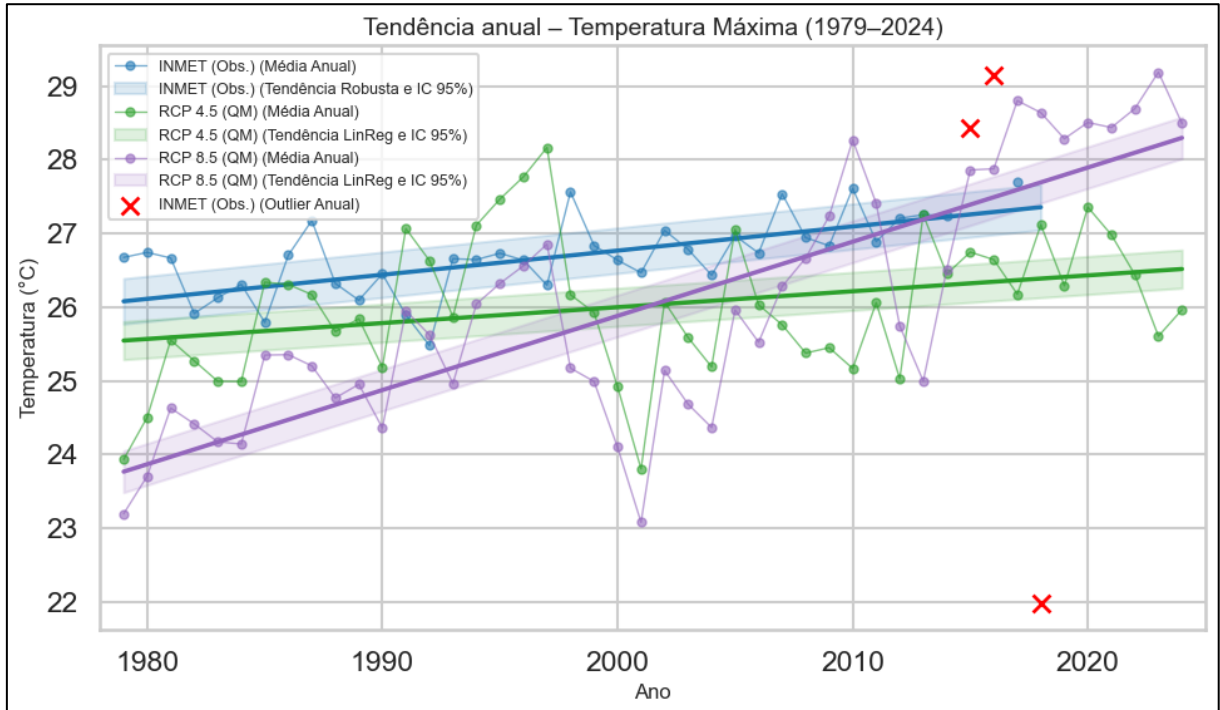


Figura 23 – Tendência anual da temperatura máxima média observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 23 evidencia essa convergência, mostrando que os modelos reproduzem adequadamente o sinal de aquecimento diurno, embora suavizem parcialmente os extremos térmicos.

O comportamento da temperatura máxima evidencia o padrão térmico típico do bioma Cerrado, com valores médios mensais variando entre  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$  no inverno (junho–julho) e  $28,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  na primavera (setembro–outubro) nas observações do INMET. As simulações corrigidas mantiveram essa estrutura sazonal, com médias de  $24,2$  a  $28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$  no RCP 4.5 e  $24,2$  a  $28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$  no RCP 8.5, e desvios-padrão próximos a  $3 \text{ } ^\circ\text{C}$  em todos os cenários.

Os picos térmicos entre agosto e outubro coincidem com o auge da estação seca, quando há redução da umidade relativa e maior insolação diária, fatores que favorecem o aquecimento da camada superficial do ar. A concordância entre os três

conjuntos de dados demonstra que a correção por QM reduziu o viés negativo original do modelo Eta-HadGEM2-ES, especialmente nos meses de transição (maio e setembro), em que os valores simulados passam a refletir adequadamente o gradiente térmico sazonal observado

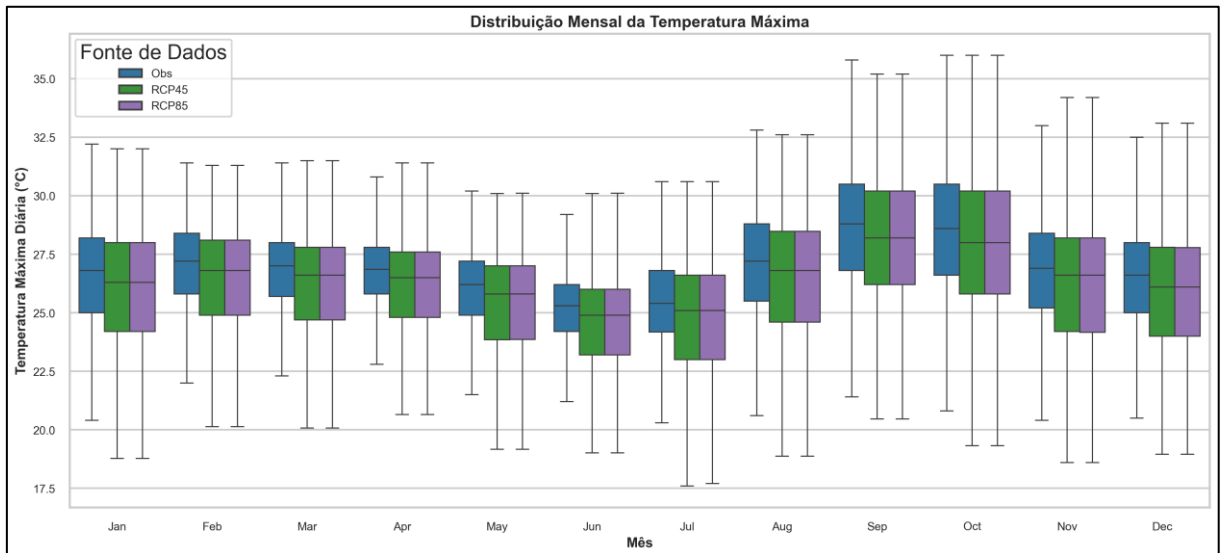


Figura 24 – Distribuição mensal da temperatura máxima dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Temperatura mínima anual** — O aquecimento noturno foi o sinal mais robusto identificado. O INMET registrou incremento de  $+0,0321 \text{ } ^\circ\text{C ano}^{-1}$ , enquanto o RCP 4.5 e o RCP 8.5 apresentaram tendências de  $+0,0135 \text{ } ^\circ\text{C ano}^{-1}$  ( $R^2 = 0,10$ ;  $p = 0,03$ ) e  $+0,062 \text{ } ^\circ\text{C ano}^{-1}$  ( $R^2 = 0,71$ ;  $p < 0,001$ ), respectivamente.

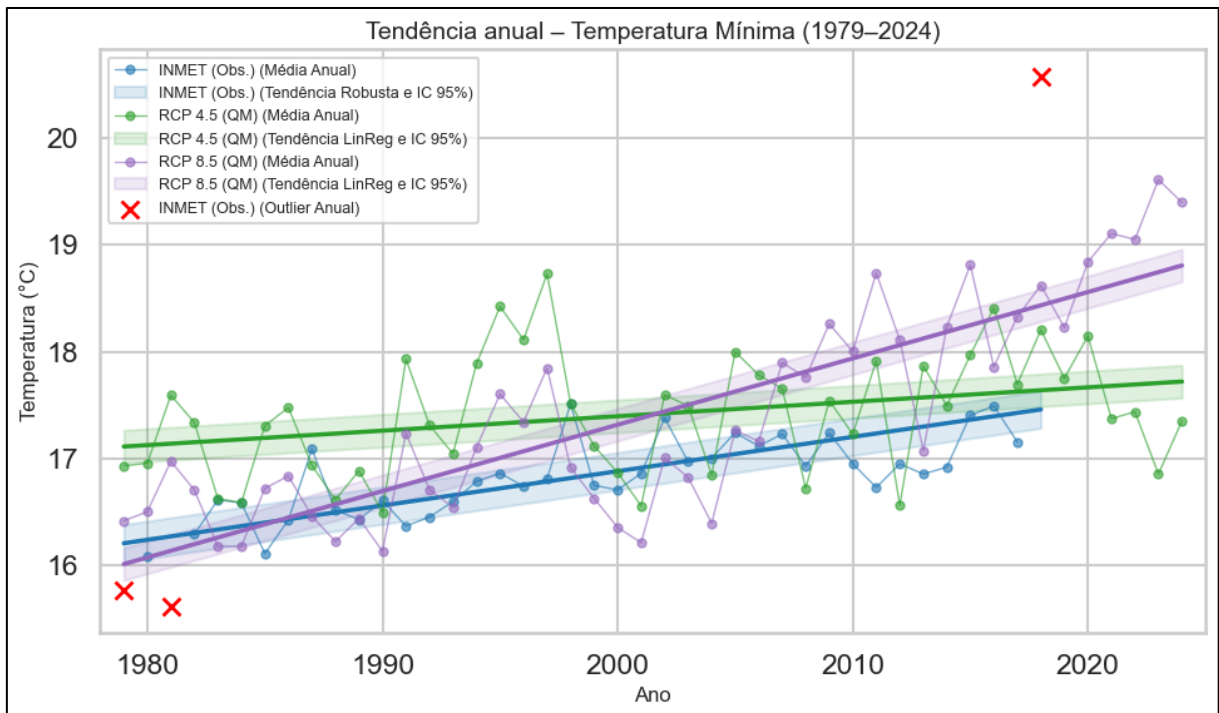


Figura 25 – Tendência anual da temperatura mínima média observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A temperatura mínima apresentou comportamento mais regular e coerente entre observações e cenários simulados, reforçando o sinal de aquecimento noturno contínuo já identificado na análise de tendências anuais. As médias mensais observadas variaram de  $13,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  em julho a  $18,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  em novembro, enquanto o RCP 4.5 e o RCP 8.5 mostraram médias muito próximas, entre  $14,4\text{--}18,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ , com desvios-padrão inferiores a  $2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Esse padrão reflete a transição térmica acentuada entre a estação seca (junho–agosto) e o início da estação chuvosa (setembro–novembro), quando o aumento da nebulosidade e da umidade atmosférica atenua as perdas radiativas noturnas. A elevada consistência entre as séries indica que a técnica de correção de viés foi eficaz na reconstituição do ciclo térmico noturno, inclusive nos meses frios, onde o modelo bruto subestimava as temperaturas em até  $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Esses resultados, representados na Figura 26, confirmam a eficácia da correção por QM em capturar o aumento contínuo das temperaturas mínimas e a redução das amplitudes térmicas.

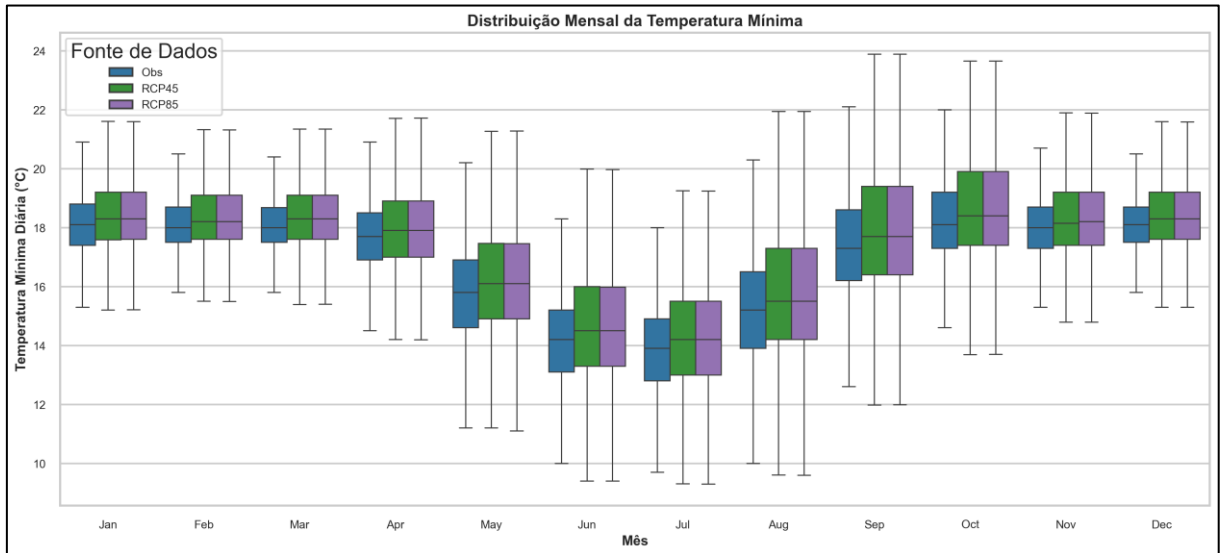


Figura 26 – Distribuição mensal da temperatura mínima dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Precipitação média anual** — A série observada apresentou tendência negativa não significativa ( $slope = -0,012 \text{ mm ano}^{-1}$ ;  $p > 0,05$ ), enquanto o cenário RCP 4.5 indicou leve acréscimo ( $+0,0102 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e o RCP 8.5 registrou declínio expressivo ( $-0,0755 \text{ mm ano}^{-1}$ ;  $R^2 = 0,31$ ;  $p < 0,001$ ).

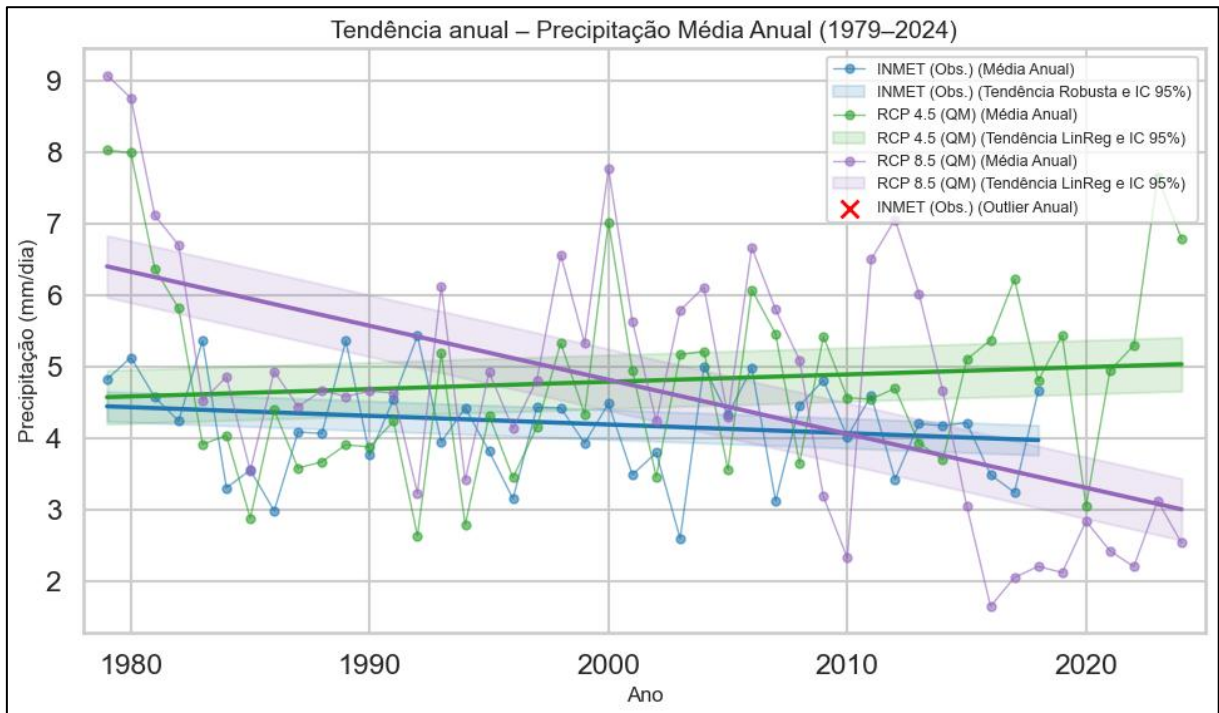


Figura 27 – Tendência anual da precipitação média anual observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As figuras 27 e 28 ilustram o comportamento variável e difuso da pluviosidade, típico do regime tropical do Cerrado, evidenciando que o modelo reproduz satisfatoriamente o padrão médio, mas ainda apresenta limitações na representação dos extremos.

Do ponto de vista da sazonalidade, a precipitação apresenta o padrão marcante do clima tropical de savana, com chuvas concentradas entre novembro e março e período seco bem definido entre maio e setembro. Nas observações do INMET, as médias mensais variaram de 8,5 mm/dia em dezembro a menos de 0,3 mm/dia em junho e julho, com desvios-padrão elevados nos meses úmidos (até 13 mm/dia), evidenciando alta variabilidade interanual.

Os cenários RCP corrigidos reproduziram adequadamente esse comportamento: as médias ficaram entre 7,8 e 8,9 mm/dia nos meses chuvosos e

abaixo de 1 mm/dia entre maio e agosto, com pequena superestimação em abril e leve subestimação no pico úmido (dezembro–janeiro). Essa coerência sugere que o modelo corrigido preserva o contraste entre as estações seca e chuvosa, além de manter a dispersão dos extremos pluviométricos — fator essencial para simulações hidrológicas no SWAT.

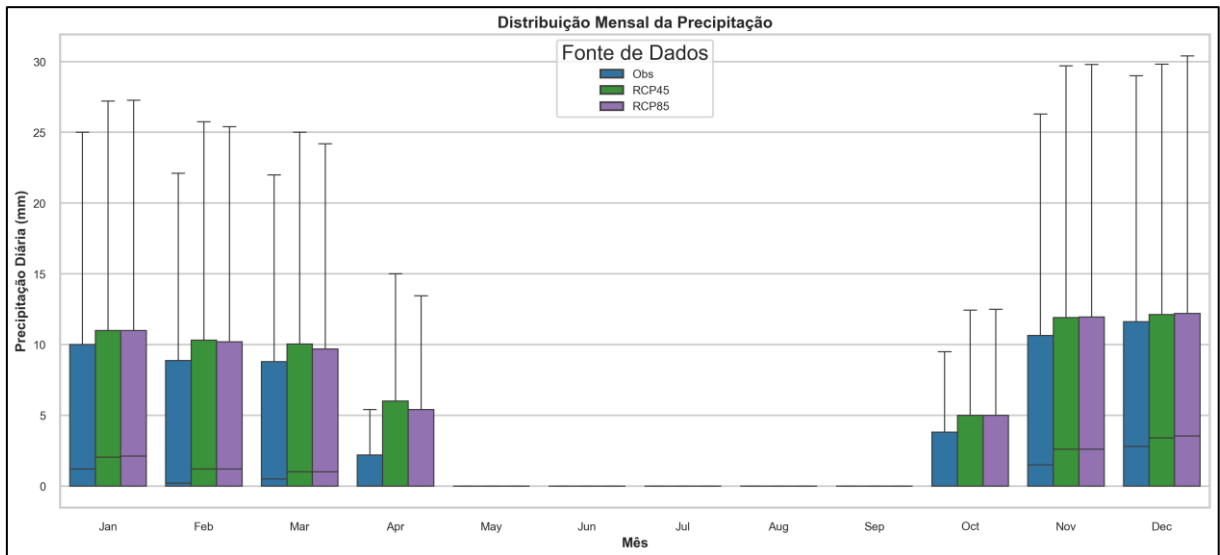


Figura 28 - Distribuição mensal da temperatura mínima dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Radiação solar média anual — Os dados observados indicaram estabilidade ( $slope = +0,026 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ;  $p > 0,05$ ), enquanto o RCP 4.5 mostrou ligeiro aumento ( $+0,0074 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ) e o RCP 8.5 apresentou tendência mais acentuada ( $+0,0142 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ).

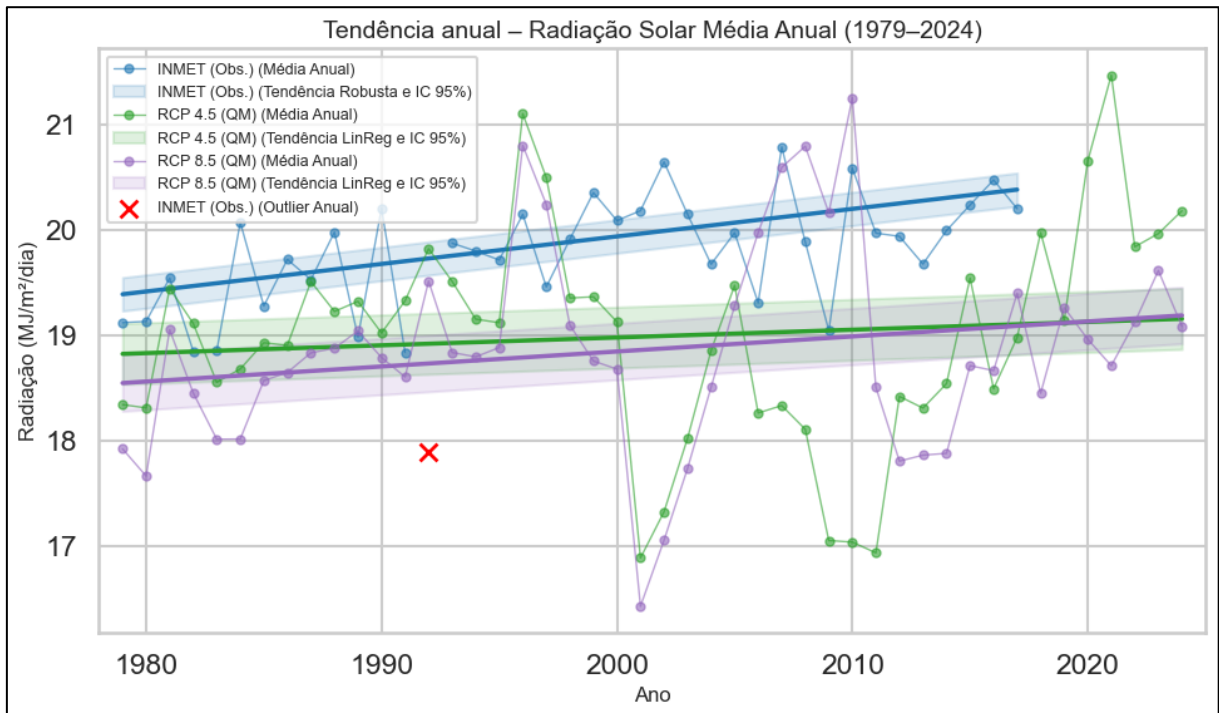


Figura 29 – Tendência anual da radiação solar média anual observada (INMET) e simulada pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, corrigidos por QM, para o período de 1979 a 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As figuras 29 e 30 demonstra a coerência geral entre observações e projeções, embora se mantenham pequenas discrepâncias residuais associadas ao balanço de energia simulado.

A radiação solar média segue o ciclo anual esperado para o Planalto Central, com valores mais altos entre junho e agosto ( $24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e menores entre novembro e janeiro ( $16\text{--}18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), conforme os dados observados.

As simulações dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 apresentaram médias semelhantes ( $16\text{--}23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), preservando o padrão estacional, embora com dispersão ligeiramente superior e ocorrência de valores negativos residuais ( $< -50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) em alguns meses do RCP 8.5, possivelmente associados a artefatos de interpolação ou ajustes numéricos do modelo regional. Apesar dessas anomalias, as

medianas mensais mantiveram coerência com o regime observado, indicando que o ciclo radiativo sazonal foi bem reproduzido após a correção estatística.

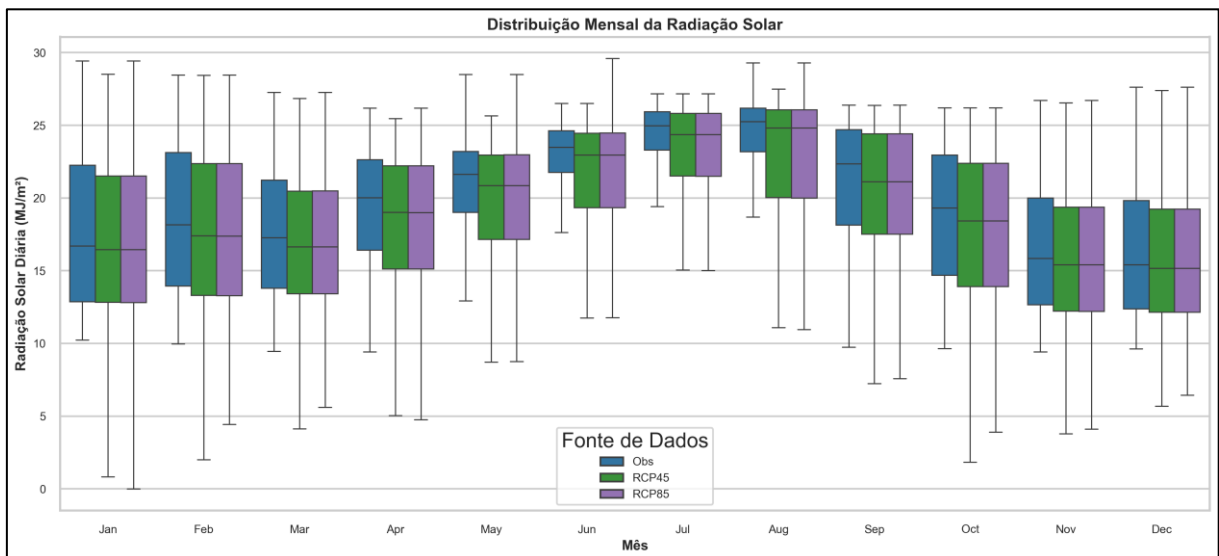


Figura 30 - Distribuição mensal da radiação solar dos dados observados (INMET) e dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De forma integrada, as quatro variáveis analisadas demonstram coerência climatológica e estatística entre as séries observadas e as simuladas corrigidas, tanto em magnitude quanto em sazonalidade. A temperatura mínima e a precipitação apresentaram as melhores correspondências após a aplicação do Quantile Mapping, enquanto a radiação solar manteve pequenas inconsistências associadas ao balanço de energia do modelo.

Esses resultados reforçam a adequação dos dados corrigidos dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 como entrada para o modelo SWAT, permitindo a representação fidedigna dos ciclos climáticos sazonais na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo, base essencial para as análises hidrológicas e de impacto climático subsequentes.

### 5.1.5 *Análise geral*

A análise estatística consolidada das projeções climáticas do modelo Eta–HadGEM2–ES revelou consistência global com os padrões sazonais e tendências observadas, embora persistam desvios sistemáticos em algumas variáveis. O conjunto de simulações corrigidas pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 reproduziu adequadamente o comportamento médio regional, com destaque para o realismo térmico e a coerência sazonal das séries, fatores essenciais à modelagem hidrológica subsequente.

Em termos comparativos, ambos os cenários apresentaram subestimação da temperatura máxima e da precipitação, além de superestimação da radiação solar, reflexos de limitações conhecidas dos modelos climáticos aplicados ao Brasil Central, particularmente na parametrização da convecção profunda e na representação de nuvens e aerossóis. Esses resultados são consistentes com os achados de Valverde et al. (2023), que reportaram que o modelo global CNRM-CM6-1-HR, acoplado ao regional Eta–HadGEM2–ES, subestima a temperatura máxima em até  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e superestima a precipitação em áreas do Sudeste. Brumatti et al. (2024) também observaram vieses estruturais no ensemble NEX-GDDP, com subestimação das chuvas na Amazônia e superestimação no Cerrado, evidenciando que tais discrepâncias são inerentes à simulação de processos convectivos em ambientes tropicais continentais.

A avaliação entre cenários revelou, entretanto, diferenças relevantes. O RCP 4.5 apresentou maior estabilidade interanual e viés mais homogêneo, reproduzindo de forma mais fiel as médias mensais históricas. Já o RCP 8.5 mostrou-se mais sensível ao forçamento radiativo, amplificando os gradientes térmicos e elevando as temperaturas médias — em especial da temperatura mínima, cuja taxa de aumento superou  $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ ano}^{-1}$  após a correção de viés. Essa intensificação das temperaturas noturnas é um sinal robusto de aquecimento regional, coerente com o comportamento global do cenário de altas emissões, no qual o aumento da concentração de gases de efeito estufa intensifica o balanço energético superficial e reduz a perda radiativa durante a noite.

No caso da precipitação, o RCP 4.5 apresentou leve tendência de aumento no início do período úmido (outubro–novembro), enquanto o RCP 8.5 indicou uma redução gradual nas chuvas médias anuais e maior variabilidade entre anos. Essa

divergência entre os cenários sugere que o aquecimento mais intenso do RCP 8.5 está associado à redistribuição intra-anual das chuvas, com episódios concentrados e espaçados, compatíveis com projeções de intensificação de extremos pluviométricos no Cerrado. A radiação solar, por sua vez, manteve o padrão sazonal esperado, porém o RCP 8.5 exibiu maior dispersão e ocorrência de valores residuais negativos, possivelmente associados à saturação de interpolação do modelo regional em períodos com cobertura de nuvens simulada de forma inconsistente.

A aplicação do método de correção de viés por *Quantile Mapping* (QM) foi determinante para ajustar as distribuições simuladas às observações do INMET. O viés médio de temperatura foi praticamente eliminado, a radiação solar apresentou redução do erro médio de  $5,35 \text{ MJ m}^{-2}$  para  $0,44 \text{ MJ m}^{-2}$ , e a umidade relativa tornou-se mais coerente com a climatologia observada. A precipitação, embora corrigida em termos de viés, apresentou aumento nos valores de RMSE e MAE, fenômeno esperado para variáveis intermitentes de alta variabilidade temporal. Essa diferença entre ganhos em tendência e aumento na dispersão reforça a importância de técnicas complementares, como o LOCI (*Local Intensity Scaling*) ou o *Delta Method*, para refinamentos futuros da série pluviométrica.

Os índices de desempenho do modelo SWAT, avaliados em escala mensal e sazonal, demonstraram robustez superior à escala diária, o que é coerente com a estrutura conceitual do modelo hidrológico, voltada à representação de padrões médios. Estudos recentes corroboram essa evidência: Cecconello et al. (2025) obtiveram  $\text{NSE} = 0,69$  e  $\text{KGE} = 0,78$  em calibração mensal com o SWAT+ Toolbox, enquanto Moura et al. (2025) alcançaram  $\text{NSE} = 0,54$  e  $\text{R}^2 = 0,56$  na calibração e  $\text{NSE} = 0,62$  e  $\text{R}^2 = 0,75$  na validação, classificando o desempenho entre satisfatório e muito bom. Esses resultados confirmam que o uso de séries corrigidas e agregadas mensalmente é o mais adequado para a simulação hidrológica na escala de bacia.

De modo geral, os cenários corrigidos RCP 4.5 e RCP 8.5 apresentaram qualidade estatística e consistência física adequadas para uso no SWAT. O RCP 4.5 oferece uma visão moderada e conservadora do aquecimento regional, enquanto o RCP 8.5 projeta um aumento mais acentuado das temperaturas médias e mínimas, além de indícios de redução do volume total anual de chuvas e intensificação de extremos. Essa diferença entre cenários fornece subsídios estratégicos para avaliações prospectivas da disponibilidade hídrica e dos riscos climáticos no Distrito Federal, permitindo testar respostas hidrológicas sob distintas trajetórias de emissões.

Assim, conclui-se que o modelo Eta–HadGEM2–ES, após a aplicação de correção de viés, reproduz adequadamente o clima regional e seus contrastes sazonais, com o RCP 8.5 servindo como referência para o limite superior de aquecimento e o RCP 4.5 representando um cenário de estabilização gradual. A integração dessas projeções ao modelo SWAT reforça sua utilidade para planejamento hídrico e ambiental no Cerrado, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de adaptação climática frente ao avanço do aquecimento nas próximas décadas.

## **5.2 Modelagem Hidrológica**

Após a correção estatística das séries climáticas simuladas, procedeu-se à etapa de modelagem hidrológica com vistas à avaliação do impacto das projeções de mudança climática sobre o comportamento hidrológico da bacia do Riacho Fundo.

O uso de dados corrigidos por viés visa garantir maior realismo às entradas do modelo SWAT, conferindo maior confiabilidade aos resultados de vazão simulada.

A modelagem hidrológica, junto com a metodologia de preparo dos dados de modelos climáticos Eta, constitui o núcleo analítico desta pesquisa, por meio da qual se avaliou a resposta da bacia do Riacho Fundo sob condições climáticas projetadas nos cenários 4.5 e 8.5.

Utilizando o modelo SWAT calibrado com dados observacionais e forçado com dados climáticos simulados pelo modelo regional Eta-HadGEM2-ES, buscou-se investigar a capacidade do modelo em representar as dinâmicas de vazão em cenários de mudança do clima.

A análise focou nos resultados na vazão de saída da bacia, com base em um conjunto de indicadores estatísticos amplamente reconhecidos na literatura hidrológica.

Desta forma, esta seção está organizada em dois eixos principais: (i) o desempenho geral do modelo com base nas estatísticas síntese e (ii) a análise dos indicadores de ajuste, viés e variabilidade hidrológica.

### 5.2.1 Calibragem do modelo e simulações hidrológicas RCP4.5 e RCP8.5

A calibração do SWAT foi realizada com dados observacionais do INMET referentes ao período de 1979 a 2024, por meio de 2.000 iterações automáticas, utilizando o índice de eficiência *Kling–Gupta* (KGE) como métrica de otimização. O modelo calibrado atingiu  $KGE = 0,74$ , indicando excelente capacidade preditiva, com  $PBIAS = +17,4\%$ , o que denota uma leve tendência à superestimação das vazões — característica esperada em simulações com eventos pluviométricos concentrados. O volume total simulado ( $VOL\_FR = 1,05$ ) ficou 5% acima do observado, valor considerado hidrológicamente aceitável. Os indicadores de incerteza também apresentaram bom desempenho:  $p\text{-factor} = 0,66$ , indicando que 66% dos dados observados estão dentro do intervalo de 95% de incerteza, e  $r\text{-factor} = 1,49$ , representando largura de incerteza 1,5 vez o desvio padrão das observações — valores amplamente satisfatórios segundo Abbaspour (2015).

Os parâmetros calibrados apresentaram coerência física com as características da bacia: o CN2 variou entre 40,79 e 88,12, refletindo as diferentes condições de uso e cobertura do solo; o ESCO = 0,88 indicou baixa evaporação do armazenamento do solo; o ALPHA\_BF = 0,0125 revelou fluxo de base com liberação lenta, e o GW\_DELAY = 424 dias representou o tempo de atraso do aquífero, coerente com a dinâmica do fluxo subterrâneo local. Esses ajustes consolidaram o bom desempenho global do modelo, garantindo representatividade dos processos hidrológicos e estabilidade numérica para projeções de longo prazo.

Com os parâmetros calibrados, o modelo foi forçado com as séries climáticas corrigidas do Eta–HadGEM2–ES, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, representando trajetórias contrastantes de emissões e aquecimento. Essa aplicação permitiu avaliar, de forma comparativa, a resposta hidrológica da bacia frente a diferentes forçantes radiativas. A variável analisada foi a vazão média mensal na saída da bacia — indicador-síntese do balanço hídrico regional.

A calibração foi realizada no período de 1979 a 2024, com a escolha dos melhores parâmetros, conforme a tabela 13:

Tabela 13 – Parâmetros e valores de calibração no SWAT.

#	Parâmetro	Descrição	Valor Calibrado	Valor Mínimo	Valor Máximo	Significado do Valor Calibrado
1	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 1)	70.12	65	90	Indica médio potencial de escoamento superficial em uso moderadamente protegido (ex: agricultura com práticas conservacionistas).
2	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 2)	88.12	80	98	Alto potencial de escoamento superficial, típico de áreas com solo compactado ou cobertura impermeabilizada.
3	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 3)	84.69	75	92	Alta tendência ao escoamento, similar ao anterior, indicando manejo intensivo.
4	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 4)	81.18	65	90	Potencial elevado de escoamento, possivelmente associado a uso urbano ou intensivo.
5	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 5)	40.79	25	60	Baixo CN2 sugere alta infiltração, típico de vegetação nativa ou solo não compactado.
6	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 6)	76.77	55	85	Valor intermediário, possível uso agropecuário com conservação moderada.
7	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 7)	58.47	45	80	Moderado escoamento superficial, indica solo parcialmente protegido.
8	V_CN2.mgt	Número da curva CN2 (uso do solo 8)	84.08	55	85	Alta taxa de escoamento, possivelmente área com pouca cobertura ou exposição ao impacto.
9	V_ESCO.hru	ESCO: profundidade efetiva de evaporação do solo	0.94	0.2	1	Alta extração de umidade superficial para evaporação, solo raso ou clima seco.
10	V_GW_DELAY.gw	GW_DELAY: tempo de atraso do escoamento de base (dias)	424.27	30	450	Escoamento subterrâneo muito retardado, lençol freático profundo ou baixa condutividade.

11	V_GWQMN.gw	GWQMN: nível mínimo de armazenamento do aquífero para escoamento de base (mm)	304.63	0	500	Necessário alto armazenamento para início do fluxo de base, tipicamente aquífero profundo.
12	V_ALPHA_BF.gw	ALPHA_BF: coeficiente de recarga base (fração diária)	0.01	0.01	0.3	Liberação lenta do fluxo de base, característica de aquíferos confinados.
13	V_CH_K2.rte	CH_K2: condutividade hidráulica do leito do canal (mm/h)	25.39	0	150	Moderada condutividade no leito do canal, escoamento relativamente lento.
14	V_CH_N2.rte	CH_N2: coeficiente de rugosidade de Manning para canais	0.26	0.01	0.3	Alta rugosidade dos canais, presença de vegetação ou forma irregular
15	V_SURLAG.bsn	SURLAG: fator de atraso do escoamento superficial diário	5.78	1	24	Moderado atraso no escoamento superficial, suaviza picos de vazão
16	V_EPCO.bsn	EPCO.bsn: fator de disponibilidade de água para plantas na bacia	0.35	0.2	1	Baixa extração de água pelas plantas, possível limitação na absorção radicular.
17	V_EPCO.hru	EPCO.hru: fator de disponibilidade de água para plantas nos HRUs	0.82	0.2	1	Alta eficiência de uso da umidade do solo pelas plantas.
18	V_REVAPMN.gw	REVAPMN: limite mínimo de armazenamento para evaporação direta do aquífero (mm)	229.13	0	500	Elevado armazenamento necessário para perda por evaporação subterrânea.
19	V_SLSUBBSN.hru	SLSUBBSN: comprimento da encosta (m)	125.25	10	150	Encostas longas, favorecem escoamento lateral antes da chegada aos canais.
20	V_SLSOIL.hru	SLSOIL: profundidade do solo (mm)	134.06	0	150	Solos profundos, maior capacidade de armazenamento hídrico.
21	V_RCHRG_DP.gw	RCHRG_DP: fração da recarga profunda	0.50	0	1	Metade da recarga infiltra profundamente, reduz contribuição ao lençol freático raso.
22	V_CANMX.hru	CANMX: armazenamento máximo de água no dossel (mm)	29.88	0	100	Armazenamento de água elevado no dossel vegetal, comum em vegetação densa.
23	V_OV_N.hru	OV_N: coeficiente de rugosidade de Manning para escoamento superficial	13.05	0.01	30	Alta rugosidade superficial, reduz velocidade do escoamento, favorecendo infiltração.

24	V_GW_REVAP.gw	GW_REVAP: fração de água que retorna à zona vadosa	0.03	0.02	0.2	Baixa fração de água voltando à zona vadosa, favorecendo recarga profunda.
25	V_SHALLST.gw	SHALLST: armazenamento inicial do lençol freático raso (mm)	27737.50	0	50000	Grande armazenamento inicial no lençol freático raso.
26	V_DEEPST.gw	DEEPST: armazenamento inicial do lençol freático profundo (mm)	13962.50	0	50000	Moderado armazenamento inicial em aquífero profundo.
27	R_LAT_TTIME.hru	LAT_TTIME: tempo de trânsito do fluxo lateral (dias)	153.23	0	180	Tempo de trânsito lateral prolongado, favorece redistribuição do fluxo no solo.

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2025).

O desempenho geral do modelo nas simulações climáticas manteve-se hidrológicamente estável e dentro de padrões aceitáveis. No RCP 4.5, o KGE = 0,73 e o PBIAS = +18% confirmaram leve superestimação do escoamento total, com VOL\_FR = 1,05 (5% acima do observado), em conformidade com a calibração histórica. Já no RCP 8.5, o KGE = 0,72 e o PBIAS = +19,1% refletiram maior variabilidade climática e intensificação térmica típicas de cenários de altas emissões.

Apesar da maior dispersão das vazões, o desempenho manteve-se na faixa excelente (KGE > 0,70), assegurando confiabilidade para análises prospectivas.

As respostas hidrológicas simuladas mostraram comportamentos distintos entre os cenários. Sob o RCP 4.5, o regime de vazões manteve-se estável e sazonalmente coerente, com picos concentrados no período úmido (dezembro a fevereiro) e recessão gradual na estação seca (junho a agosto). Essa configuração reflete um cenário de estabilização climática intermediária, no qual as variações anuais permanecem próximas às médias históricas.

Por outro lado, sob o RCP 8.5, observou-se maior amplitude entre cheias e estiagens, com chuvas mais concentradas e intensas, seguidas de períodos prolongados de recessão. Esse padrão está associado ao aquecimento acentuado das temperaturas mínimas e ao aumento da evapotranspiração potencial, resultando em um balanço hídrico mais irregular e sensível às variações sazonais. O padrão temporal do escoamento também evidenciou diferenças importantes.

O RCP 4.5 manteve distribuição sazonal semelhante ao regime observado, enquanto o RCP 8.5 apresentou redução no escoamento de base e retardo na

resposta hidrológica, com elevação das vazões apenas após eventos pluviométricos mais intensos. Essa condição indica maior dominância do fluxo superficial e redução do armazenamento subsuperficial, configurando um cenário de vulnerabilidade hídrica em ambientes de aquecimento acentuado. O parâmetro ALPHA\_BF, ajustado na calibração, reforça essa interpretação, ao indicar liberação lenta do fluxo de base e dependência crescente da recarga direta.

Do ponto de vista estatístico e físico, o modelo SWAT demonstrou estabilidade operacional e sensibilidade climática adequadas, reproduzindo de forma coerente as variações hidrológicas induzidas pelos cenários de projeção. O RCP 4.5 apresentou uma resposta mais conservadora, próxima ao regime histórico, enquanto o RCP 8.5 gerou comportamento mais dinâmico e extremo, caracterizado por aumento da variabilidade interanual e assimetria nas vazões. Essa diferença reforça a necessidade de considerar múltiplos cenários de emissão na avaliação de incertezas hidrológicas e no planejamento de adaptação climática para o Cerrado.

Conclui-se que o SWAT calibrado com dados observacionais e forçado com as séries corrigidas do Eta–HadGEM2–ES apresentou desempenho estável, coerência física e previsões hidrológicamente plausíveis para ambos os cenários. O RCP 4.5 representa uma trajetória de ajuste climático gradual, adequada a análises de adaptação e manejo sustentável dos recursos hídricos, enquanto o RCP 8.5 expressa o limite superior de aquecimento e irregularidade hidrológica, servindo como base para estudos de risco e planejamento de contingência. Assim, o conjunto de simulações reforça a robustez do modelo SWAT como ferramenta de suporte à decisão em gestão hídrica sob diferentes cenários de mudança climática para o Distrito Federal.

### **5.2.2 Análise de tendência**

A análise das séries simuladas de vazão permite identificar o comportamento hidrológico recente e projetar possíveis alterações associadas às mudanças climáticas na bacia do Riacho Fundo. Para o período histórico de 2000 a 2024, o modelo SWAT apresentou boa capacidade de replicar a sazonalidade observada — com picos de vazão concentrados entre dezembro e março e reduções acentuadas

de maio a setembro. Esse padrão é coerente com o regime climático do Cerrado e confirma a consistência da calibração apresentada anteriormente.

No mesmo intervalo, a vazão média anual simulada no cenário RCP 4.5 foi de 2,41 m<sup>3</sup>/s (mediana 2,47 m<sup>3</sup>/s), com desvio padrão de 0,74 m<sup>3</sup>/s e coeficiente de variação (CV) de 30,6%, indicando estabilidade hidrológica e boa correspondência com a série observada (4,65 m<sup>3</sup>/s, CV 23%). Já o cenário RCP 8.5 apresentou média de 1,36 m<sup>3</sup>/s e CV de 83,3%, refletindo maior variabilidade interanual e resposta mais sensível a eventos extremos. Os valores anuais oscilaram entre 0,33 m<sup>3</sup>/s (2016) e 5,58 m<sup>3</sup>/s (2005), demonstrando tendência levemente negativa (-0,96 m<sup>3</sup>/s por década; R<sup>2</sup> = 0,39), possivelmente associada a anos mais secos e irregulares no final da série. Esses resultados apontam que o modelo manteve coerência com as condições históricas, mas o cenário 8.5 já projeta, mesmo no período de calibração, maior instabilidade hidrológica.

Para o horizonte 2025–2099, os resultados simulados sob ambos os cenários revelam alterações relevantes no regime de vazões. A média anual do RCP 4.5 foi de 1,21 m<sup>3</sup>/s (mediana 1,20 m<sup>3</sup>/s; CV 44,9%), com valores mínimos de 0,27 m<sup>3</sup>/s (2083) e máximos de 2,63 m<sup>3</sup>/s (2089). No RCP 8.5, a média foi ligeiramente inferior (1,06 m<sup>3</sup>/s) e a dispersão maior (CV 49,7%), variando entre 0,13 m<sup>3</sup>/s (2083) e 2,54 m<sup>3</sup>/s (2089). Em ambos os casos, a tendência linear de longo prazo foi positiva, embora fraca (+0,07 m<sup>3</sup>/s/década em RCP4.5 e +0,06 m<sup>3</sup>/s/década em RCP8.5, com R<sup>2</sup> inferiores a 0,1), o que evidencia estabilidade média, mas aumento expressivo da variabilidade interanual.

As projeções demonstram, portanto, um regime mais irregular, com alternância entre anos extremamente secos e outros de elevada descarga, sugerindo intensificação dos contrastes sazonais. As Figuras XX e XY ilustram esses padrões, destacando a coerência sazonal mantida pelo modelo e as oscilações acentuadas que caracterizam os cenários futuros.

Complementarmente, a Figura 31 apresenta a relação temporal entre precipitação e vazão mensais, evidenciando que, no cenário RCP 4.5, os aumentos de vazão acompanham os picos de precipitação, sugerindo uma resposta hidrológica consistente ao regime pluviométrico. Já no RCP 8.5, observa-se uma maior fragmentação entre os eventos de chuva e as respostas de escoamento, indicando comportamento menos previsível. A análise estatística de correlação entre os dados mensais confirma esse padrão: o cenário RCP 4.5 apresentou correlação forte ( $r =$

0,80), enquanto o RCP 8.5 mostrou correlação praticamente nula ( $r = 0,02$ ). Esses resultados indicam que, sob o cenário de maior forçamento climático, os efeitos das mudanças no uso do solo e na variabilidade climática podem romper a relação direta entre precipitação e vazão.

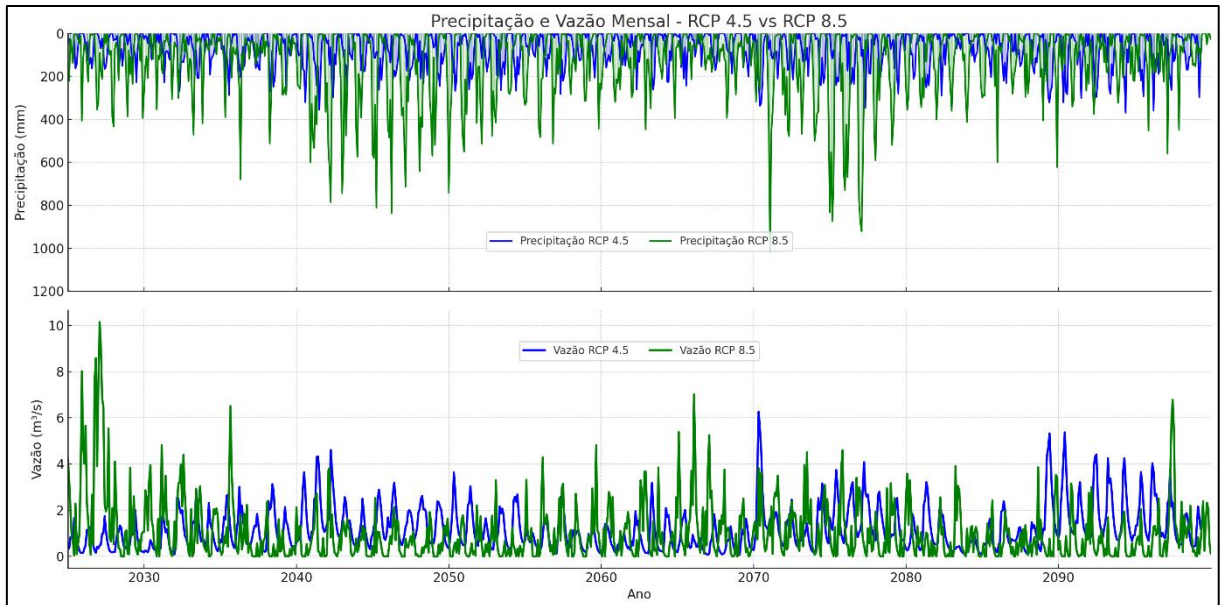


Figura 31 – Gráfico chuva x vazão dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 5.3 Classificação hidroclimática

A classificação hidroclimática descreve como a bacia do Riacho Fundo responde às entradas atmosféricas sob condições históricas e projetadas, articulando estatísticas de vazão com o controle físico dos parâmetros do modelo. Foram considerados dois recortes: 2000–2024 (calibração) e 2025–2099 (projeções com Eta-HadGEM2-ES, RCP4.5 e RCP8.5, corrigidos por viés).

Período 2000–2024. As séries simuladas reproduzem a bimodalidade típica do Cerrado (maiores vazões entre DEZ–MAR e menores entre MAI–SET). O RCP4.5 apresenta regime mais estável (média anual  $\approx 2,41 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\text{CV} \approx 30\%$ ), enquanto o RCP8.5 já indica maior dispersão interanual (média  $\approx 1,36 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\text{CV} \approx 83\%$ ), com picos e vales mais pronunciados. A correlação chuva–vazão é positiva e sazonalmente reforçada no semestre úmido, com defasagem curta (0–1 mês); nos meses secos, a correlação enfraquece pela dominância do fluxo de base. Essa resposta é consistente com os parâmetros: CN2 (condição de umidade antecedente) e SURLAG (atraso do

escoamento superficial) modulam a rapidez e a intensidade dos picos; ALPHA\_BF e GW\_DELAY controlam a recessão e a sustentação das vazões mínimas. O maior espalhamento no 8.5 indica maior sensibilidade da parcela de escoamento rápido (CN2/SURLAG) a eventos de precipitação concentrada, enquanto a manutenção dos baixos de estiagem depende da inércia de baseflow (ALPHA\_BF/GW\_DELAY).

Período 2025–2099. As projeções mantêm a sazonalidade, porém com amplitude ampliada. No RCP4.5, as vazões anuais ficam em torno de 1,21 m<sup>3</sup>/s (mediana ~1,20 m<sup>3</sup>/s; CV ~45%) e variam de anos secos ( $\approx 0,27$  m<sup>3</sup>/s) a anos úmidos ( $\approx 2,63$  m<sup>3</sup>/s). No RCP8.5, a média é ligeiramente menor ( $\sim 1,06$  m<sup>3</sup>/s) e a variabilidade maior (CV ~50%), com extremos mais distantes (mínimos  $\sim 0,13$  m<sup>3</sup>/s; máximos  $\sim 2,54$  m<sup>3</sup>/s). A correlação P–Q permanece forte no período úmido, mas com maior intermitência no seco, refletindo a concentração das chuvas e janelas secas mais longas. Nessa dinâmica, CN2 tende a elevar o volume do escoamento superficial nos eventos intensos, enquanto SURLAG regula a forma do hidrograma (picos mais “agudos” quando reduzido). Por sua vez, ALPHA\_BF e GW\_DELAY condicionam o patamar das vazões mínimas; valores efetivos menores desses parâmetros implicam recessões mais rápidas e mínimo mais baixos, o que é compatível com a maior frequência de anos de baixa descarga no 8.5.

Em termos de classificação hidroclimática, os dois cenários mantêm o mesmo regime sazonal (estação chuvosa bem definida e estiagem pronunciada), mas o RCP8.5 migra para uma classe de maior variabilidade intra e interanual, com IQR e CV superiores e maior distância entre mínimos e máximos. As figuras correspondentes (séries mensais e boxplots por estação) ilustram essa transição: no semestre úmido, a resposta P–Q fica mais concentrada e intensa (controle de CN2/SURLAG), e no semestre seco a dependência do aquífero raso torna-se mais crítica (controle de ALPHA\_BF/GW\_DELAY), elevando a frequência de mínimos hidrológicos.

### **5.3.1 Variação sazonal**

A variação sazonal das vazões simuladas reflete o regime climático típico do Cerrado, marcado por uma estação chuvosa concentrada e um período seco prolongado. Entre 2000 e 2024, o modelo reproduziu adequadamente esse padrão bimodal, com aumento das vazões entre novembro e março e reduções expressivas

de maio a setembro. Os picos mensais ocorreram em janeiro, quando o escoamento superficial responde de forma imediata às precipitações concentradas, enquanto os mínimos se registraram em julho e agosto, com predominância do fluxo subterrâneo. Essa coerência hidrológica decorre do bom ajuste dos parâmetros ALPHA\_BF e GW\_DELAY, que controlam a recessão e a liberação do fluxo de base, garantindo estabilidade nas vazões mínimas e coerência temporal entre chuva e descarga.

Nos cenários projetados para 2025–2099, a sazonalidade é mantida, mas com maior amplitude entre os extremos. No RCP 4.5, as vazões mensais acumuladas durante o período úmido aumentam gradualmente, alcançando 20 a 25 m<sup>3</sup>/s por mês em dezembro e janeiro, enquanto no RCP 8.5 os picos são mais irregulares, podendo ultrapassar esse limite em anos de precipitação concentrada. Essa intensificação do escoamento está associada ao aumento do volume e da intensidade das chuvas simuladas, que elevam o escoamento direto e reduzem o tempo de resposta hidrológica. Parâmetros como CN2 (condição de umidade antecedente) e SURLAG (atraso do escoamento superficial) tornam-se determinantes na forma do hidrograma, regulando tanto a magnitude dos picos quanto a defasagem temporal entre o evento de precipitação e o incremento da vazão.

Durante o período seco, a resposta hidrológica das duas projeções difere substancialmente. No RCP 4.5, as vazões mínimas permanecem em torno de 4 a 5 m<sup>3</sup>/s por mês, sustentadas pelo escoamento subterrâneo; já no RCP 8.5, os valores mensais frequentemente caem abaixo de 3 m<sup>3</sup>/s, evidenciando a maior influência de períodos prolongados de estiagem. Nesse contexto, ALPHA\_BF e GW\_DELAY controlam a persistência do fluxo de base e a velocidade de recessão após os eventos chuvosos. O aumento da amplitude sazonal, mais expressivo no cenário de maior forçamento radiativo, demonstra a predominância de um comportamento hidrológico mais contrastante — com picos mais intensos e mínimos mais baixos —, mas preservando a estrutura cíclica do balanço hídrico anual.

A análise conjunta dos dois cenários confirma que, embora a estrutura sazonal da bacia permaneça inalterada, a variabilidade intra-anual se acentua, com respostas hidrológicas mais abruptas às precipitações intensas e maiores períodos de recessão nos meses secos. Essa oscilação entre extremos resume a transição para um regime hidrológico mais sensível às variações climáticas, em que o controle físico dos parâmetros do modelo continua determinante para a caracterização dos fluxos superficiais e subterrâneos ao longo do ciclo hidrológico.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O presente trabalho integrou modelagem climática e hidrológica para avaliar a resposta da bacia do Riacho Fundo às mudanças hidroclimáticas projetadas para o Cerrado, utilizando o modelo hidrológico SWAT acoplado às projeções regionais do Eta–HadGEM2-ES. O estudo demonstrou a viabilidade técnica e científica do acoplamento Eta–SWAT, evidenciando a importância do pré-processamento climático e da calibração hidrológica para a obtenção de resultados coerentes com o comportamento observado da bacia.

O tratamento das séries do Eta incluiu a conversão do calendário 360→365/366, a agregação espacial dos nove grids incidentes sobre a área de estudo e a aplicação do método de correção de viés Quantile Mapping (QM) às variáveis de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, vento e radiação. Os erros residuais obtidos após o QM permaneceram dentro dos limites recomendados pela literatura — RMSE de 10,8 mm para precipitação e 3,5 °C para temperatura máxima — assegurando a consistência estatística das séries utilizadas. Essa etapa consolidou um pipeline de entrada climática robusto, fundamental para a coerência do modelo hidrológico.

O SWAT apresentou desempenho satisfatório na calibração automática via SUFI-2, com  $KGE = 0,74$ ,  $p\text{-factor} = 0,66$  e  $PBIAS = +17,4\%$ , valores considerados adequados para aplicações em bacias tropicais. O modelo reproduziu a sazonalidade típica do Cerrado, com picos de vazão no período chuvoso e recessão controlada durante a estiagem. Os parâmetros ALPHA\_BF e GW\_DELAY foram determinantes para a sustentação do escoamento de base, enquanto CN2 e SURLAG ajustaram o tempo de resposta e a forma do hidrograma, garantindo coerência física entre precipitação e deflúvio.

As projeções hidrológicas baseadas nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 indicam intensificação da variabilidade intra e interanual ao longo do século. No RCP 4.5, a vazão média anual projetada foi de  $1,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , com  $CV \approx 45\%$ , enquanto no RCP 8.5 o valor médio caiu para  $1,06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , com  $CV \approx 50\%$  e amplitudes maiores entre os extremos. Essa diferença revela que, embora a média de longo prazo permaneça estável, o regime hidrológico tende a tornar-se mais irregular, com anos secos mais frequentes e picos mais concentrados. A correlação entre chuva e vazão manteve-se

elevada no período úmido, porém menos persistente no período seco, refletindo o papel crítico da recarga subterrânea e a crescente intermitência hidrológica sob o cenário mais forçante.

Complementarmente, os resultados do RCP 8.5 revelaram um padrão de desconexão hidrológica mais acentuado, com correlação quase nula entre precipitação e vazão mensal ( $r = 0,02$ ). Esse comportamento contrasta fortemente com o RCP 4.5, que apresentou uma correlação forte ( $r = 0,80$ ), sugerindo que o cenário de maior forçamento climático pode comprometer a previsibilidade da resposta hidrológica da bacia. Esse efeito é compatível com os impactos esperados da intensificação da variabilidade pluviométrica, combinada à modificação nos padrões de uso do solo e à limitação da recarga subterrânea, e reforça a necessidade de considerar cenários extremos nas estratégias de gestão adaptativa.

O sinal hidroclimático identificado é compatível com o observado em estudos realizados em regiões tropicais e subtropicais: redução progressiva das vazões de base, ampliação dos extremos e intensificação da irregularidade pluviométrica (Escobar e Carvalho-Santos, 2022; Liu et al., 2021). Essa tendência, combinada às condições fisiográficas locais — solos profundos, alta permeabilidade e urbanização crescente —, projeta um quadro de vulnerabilidade dual: escassez hídrica entre maio e setembro e picos de cheia de curta duração no início da estação chuvosa.

A aplicação do SWAT confirmou sua robustez para análises hidroclimáticas regionais, mas também revelou limitações estruturais. O modelo subestimou as vazões mínimas, refletindo a dificuldade em representar a recarga difusa e a liberação lenta de água subterrânea, aspecto comum em aplicações em solos porosos e profundos. Por outro lado, os picos de deflúvio foram ligeiramente superestimados em áreas urbanizadas, evidenciando o limite do método Curve Number diante da complexidade do escoamento em superfícies impermeáveis. Pesquisas recentes sugerem que o acoplamento com módulos de águas subterrâneas (SWAT-MODFLOW) e a integração de infraestrutura verde em bacias urbanas (LID) podem reduzir essas distorções e aumentar o realismo hidrológico.

Entre as principais incertezas identificadas, destacam-se a utilização de um único modelo de fronteira (HadGEM2-ES) e a limitação de cenários de emissão, o que reduz a faixa de variabilidade climática considerada. Persistem, ainda, limitações metodológicas associadas à correção de viés univariada, que não preserva completamente as dependências entre variáveis atmosféricas nem a sequência

temporal de eventos compostos. No domínio hidrológico, a representação por HRUs tende a suavizar a heterogeneidade espacial, o que pode subestimar fluxos concentrados em setores urbanizados e sobrestimar a recarga em áreas de baixa permeabilidade.

Apesar dessas restrições, o modelo demonstrou coerência física e consistência estatística, indicando que o sistema climático-hidrológico da BHRF tende a um regime mais variável, porém previsível — com ressalvas importantes para o cenário RCP 8.5, cuja perda de sincronismo entre chuva e vazão sugere desafios adicionais à gestão dos recursos hídricos em contextos de maior forçamento climático. O acoplamento Eta–SWAT consolidou-se como ferramenta eficaz para a análise de impactos climáticos regionais e fornece base metodológica para estudos futuros no contexto do Cerrado.

A análise evidencia que a resiliência hidrológica da BHRF depende de ações simultâneas de gestão adaptativa e de estratégias estruturais de longo prazo. No curto e médio prazo, recomenda-se priorizar a segurança hídrica na estação seca por meio de regras operacionais sazonais em reservatórios estratégicos, definição de vazões ecológicas e criação de volumes de reserva pré-estiagem. Essas medidas devem ser acompanhadas por instrumentos de gestão da demanda — redução de perdas no abastecimento, tarifação sazonal, estímulo ao reuso e incentivos a consumidores eficientes — e por mecanismos automáticos de restrição baseados em percentis de vazão (p25/p10). Paralelamente, a ampliação da infraestrutura verde, com implantação de biorretenções, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, pode mitigar picos de escoamento e reforçar a recarga subterrânea, agindo sobre parâmetros-chave como CN2 e SURLAG.

No horizonte de longo prazo, o planejamento deve incorporar a crescente divergência entre extremos de seca e cheia. Recomenda-se que curvas de permanência de vazão e indicadores de seca (SPI, PDSI) sejam ajustados aos cenários climáticos projetados e utilizados como gatilhos operacionais para outorga, abastecimento e prevenção de eventos críticos.

No campo metodológico, as perspectivas de aprimoramento incluem a ampliação dos ensembles climáticos com GCMs alternativos (MIROC5, CanESM2, BESM) e cenários CMIP6/SSP, além do uso de técnicas de correção de viés multivariadas (CDF-t, MBCn) capazes de preservar dependências cruzadas entre variáveis. Também se recomenda a integração de séries de uso e cobertura do solo

projetadas, incorporando tendências de urbanização e restauração ripária, a fim de simular efeitos combinados sobre infiltração, escoamento e recarga.

Essas recomendações visam consolidar uma base técnico-científica mais ampla para o planejamento hídrico no Distrito Federal, combinando avanços de modelagem, práticas de infraestrutura verde e gestão adaptativa. A integração dessas dimensões permitirá aprimorar o entendimento sobre a dinâmica hidroclimática do Cerrado e apoiar políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos das mudanças climáticas e à preservação da segurança hídrica regional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C. SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs. [s.l.: s.n.].
- ALASQAH, A. *et al.* Integrating double techniques of statistical downscaling and bias correction to reduce bias in projections trends of future climate datasets. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, 1 dez. 2025.
- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/235704197>>.
- ALMAGRO, A. *et al.* Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmospheric Research*, v. 244, 1 nov. 2020.
- ALMAGRO, A.; ZAMBONI, P.; OLIVEIRA, P. T. Assessment of climate change impacts on Brazilian catchments using a regional deep learning approach, 20 jan. 2025.
- ALMEIDA, A. Monitoramento e Modelagem de Processos Hidrológicos Superficiais e Evapotranspiração em Bacia do Cerrado. [s.l.: s.n.].
- AMORIM, J. DA S. *et al.* Quantifying the climate change-driven impacts on the hydrology of a data-scarce watershed located in the Brazilian Tropical Savanna. *Hydrological Processes*, v. 36, n. 7, 1 jul. 2022a.
- \_\_\_\_\_. Quantifying the climate change-driven impacts on the hydrology of a data-scarce watershed located in the Brazilian Tropical Savanna. *Hydrological Processes*, v. 36, n. 7, 1 jul. 2022b.
- \_\_\_\_\_. Quantifying the climate change-driven impacts on the hydrology of a data-scarce watershed located in the Brazilian Tropical Savanna. *Hydrological Processes*, v. 36, n. 7, 5 jul. 2022c.
- ANDRADE, J. M. DE *et al.* A comprehensive assessment of precipitation products: Temporal and spatial analyses over terrestrial biomes in Northeastern Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 28, 1 nov. 2022.
- ANDRADE, M. M. As mudanças climáticas e os ambientes aquáticos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 2023.
- ARAUJO, D. L. DE. Avaliação dos impactos da exploração de águas subterrâneas na Bacia do Ribeirão Rodeador por meio de simulação integrada entre os modelos SWAT e MODFLOW. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/34399>>. Acesso em: 5 jun. 2023.
- ARNOLD, J. G. *et al.* Input/Output Documentation Soil & Water Assessment Tool. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, v. 142, n. 1–4, p. 47–69, 1993.
- ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, v. 19, n. 3, p. 563–572, 28 fev. 2005.
- AZEEZ, T. R.; JOWAD, L. A. Developing mathematical models to calculate annual evapotranspiration rates in Iraq using climate data. *Journal of Physics: Conference Series*. Anais...Institute of Physics, 2024

- BAILEY, R. T. *et al.* SWAT+MODFLOW: a new hydrologic model for simulating surface-subsurface flow in managed watersheds. *Geoscientific Model Development*, v. 18, n. 17, p. 5681–5697, 5 set. 2025.
- BEROHO, M. *et al.* A novel SWAT-based framework to integrate climate and LULC scenarios for predicting hydrology and sediment dynamics in the watersheds of Mediterranean ecosystems. *Journal of Environmental Management*, v. 388, p. 125446, jul. 2025.
- BIEGER, K. *et al.* Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 53, n. 1, p. 115–130, 1 fev. 2017.
- BORATO, L. *et al.* Evaluation of CMIP5 and CMIP6 Models Based on Weather Types Applied to the South Atlantic Ocean. *International Journal of Climatology*, v. 44, n. 15, p. 5580–5595, 15 dez. 2024.
- BOUCHER, O. *et al.* Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 7, 1 jul. 2020.
- BRAGA, A.; LAURINI, M. Spatial heterogeneity in climate change effects across Brazilian biomes. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.
- BRUMATTI, L. M. *et al.* Bias Correction in CMIP6 Models Simulations and Projections for Brazil's Climate Assessment. *Earth Systems and Environment*, v. 8, n. 1, p. 121–134, 18 jan. 2024.
- BUSTAMANTE, M. O Cerrado e as mudanças climáticas. *Ciência e Cultura*, v. 76, n. 3, p. 1–4, 2024.
- CAESAR, J. *et al.* Response of the HadGEM2 earth system model to future greenhouse gas emissions pathways to the year 2300. *Journal of Climate*, v. 26, n. 10, p. 3275–3284, maio 2013.
- CALVIN, K. *et al.* IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias et al., Eds.). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>.
- CAMPOS, J. A. *et al.* Modeling Environmental Vulnerability for 2050 Considering Different Scenarios in the Doce River Basin, Brazil. *Water (Switzerland)*, v. 16, n. 10, 1 maio 2024.
- CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, v. 28, n. 17, p. 6938–6959, 1 set. 2015.
- CARDOSO, R. T. *et al.* Mecanismos de drenagem urbana e soluções sustentáveis aplicadas a áreas urbanizadas. *Em: Dinâmicas Socioambientais em Brasília-DF: um olhar sustentável*. [s.l.] Editora Científica Digital, 2024. p. 153–168.
- CARVALHO, F. H. DE. Uso do Modelo Swat na Estimativa da Vazão e da Produção de Sedimentos em Bacia Agrícola do Cerrado Brasileiro. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/17371>>. Acesso em: 5 jun. 2023.
- CARVALHO, V. S. O. *et al.* Climate change impact assessment in a tropical headwater basin. *Revista Ambiente e Água*, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2021.
- CASAGRANDE, F.; STACHELSKI, L.; SOUZA, R. B. DE. Assessment of Antarctic sea ice area and concentration in Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, v. 43, n. 3, p. 1314–1332, 15 mar. 2023.

CATTELAN, L. G. *et al.* Mapping Climatic Regions of the Cerrado: General Patterns and Future Change. *International Journal of Climatology*, v. 44, n. 16, p. 5857–5872, 30 dez. 2024.

CECCONELLO, S. T. *et al.* Analysis of SWAT+ model performance: A comparative study using different software and algorithms. *Environmental Modelling and Software*, v. 188, 1 abr. 2025.

Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação . Disponível em: <<https://www.cgpd.org.br/>>. Acesso em: 5 out. 2025.

CHAWANDA, C. J. *et al.* A High-Resolution Global SWAT+ Hydrological Model for Impact Studies, 6 fev. 2025. Disponível em: <<https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-188/>>

CHEN, J. *et al.* Climate Change Impact Studies: Should We Bias Correct Climate Model Outputs or Post-Process Impact Model Outputs? *Water Resources Research*, v. 57, n. 5, 1 maio 2021.

CHOU, SIN CHAN; *et al.* Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014.

CHOU, SIN CHAN *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014.

COELHO, M. E. M. S.; CHAVES, H. M. L.; FONSECA, M. R. Trends, Patterns, and Persistence of Rainfall, Streamflow, and Flooded Area in the Upper Paraguay Basin (Brazil). *Water (Switzerland)*, v. 17, n. 10, 1 maio 2025.

CONDÉ, R. C. C. Análise da Integração das Ferramentas De Hidrologia Espacial “Cor Das Águas” para o Monitoramento e a Modelagem Swat dos Processos Hidrosedimentológicos na Bacia do Rio São Francisco-Brasil. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/41460>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

COSTA, D. *et al.* Municipal Temperature and Heatwave Predictions as a Tool for Integrated Socio-Environmental Impact Analysis in Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 04, n. 04, p. 385–396, 2015.

DANTAS, M. K.; PASSADOR, C. S. Programa Município VerdeAzul: uma análise integrada da gestão ambiental no estado de São Paulo. *Organizações & Sociedade*, v. 27, n. 95, p. 820–854, dez. 2020.

DAS, S. K. *et al.* Impacts of Climate Alteration on the Hydrology of the Yarra River Catchment, Australia Using GCMs and SWAT Model. *Water (Switzerland)*, v. 14, n. 3, 1 fev. 2022.

DELANHESE, B. C. DO N. S. *et al.* Mudanças climáticas frente à sociedade, as indústrias e os setores econômicos. *Latin American Journal of Business Management*, v. 15, n. 1, 24 jun. 2024.

DERECZYNSKI, C. *et al.* Downscaling of climate extremes over South America – Part I: Model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*, v. 29, 1 set. 2020.

DHAWAN, P. *et al.* A comprehensive comparison of bias correction methods in climate model simulations: Application on ERA5-Land across different temporal resolutions. *Heliyon*, v. 10, n. 23, 15 dez. 2024.

FARIAS, C. W. L. DE A. *et al.* Correção de tendência das projeções climáticas futuras simuladas pelo modelo regional Eta-Hadgem2-Es para a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 3, p. 288–301, 27 ago. 2020.

FERRAZ, L. L. *et al.* Climate and land use changes impacts on streamflow in the Brazilian Cerrado basin. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 25, n. 2, p. 357–366, abr. 2025a.

\_\_\_\_\_. Climate and land use changes impacts on streamflow in the Brazilian Cerrado basin. *Ecohydrology and Hydrobiology*, v. 25, n. 2, p. 357–366, 1 abr. 2025b.

FERREIRA, B. C. C.; VALVERDE, M. C. Análise dos índices de Extremos de Precipitação em Cenários Futuros na Bacia do Rio Ribeira de Iguape - São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 1, p. 41–55, mar. 2022.

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, F. B. Performance evaluation of climate models in the simulation of precipitation and average temperature in the Brazilian Cerrado. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 155, n. 2, p. 845–857, 1 fev. 2024.

FERREIRA, W. A. Improvements in SWAT model for regions with a monsoon climate, high population density, and water scarcity : a case study in the Federal District of Brazil. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/41442>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

FONTOLAN, M. *et al.* Using climate change models to assess the probability of weather extremes events: a local scale study based on the generalized extreme value distribution. *Bragantia*, v. 78, n. 1, p. 146–157, mar. 2019.

GUO, Z. *et al.* An interpretable coupled model (SWAT-STFT) for multispatial-multistep evapotranspiration prediction in the river basin. *Agricultural Water Management*, v. 318, 1 set. 2025.

HERRERA, D. J. MO. Integração de Modelos de Quantidade e Qualidade da Água para Avaliação de Cargas Contaminantes em Afluentes de Mananciais de Abastecimento. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/13465>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

HROUR, Y. *et al.* Enhancing hydrological modeling with bias-corrected satellite weather data in data-scarce catchments: a comparative analysis of SWAT and GR4J models. *Frontiers in Water*, v. 7, 2025.

IBE, G. O.; AMIKUZUNO, J. Climate change in Sub-Saharan Africa: a menace to agricultural productivity and ecological protection. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 23, n. 2, p. 329, 11 mar. 2019.

JACOB, D. *et al.* Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change*, v. 20, n. 2, 1 jun. 2020.

KIM, Y.; EVANS, J. P.; SHARMA, A. Correcting biases in regional climate model boundary variables for improved simulation of high-impact compound events. *iScience*, v. 26, n. 9, 15 set. 2023.

KOSOSKI, E. *et al.* Demandas funcionais e fatores do ambiente: uma análise geoespacial em usuários da atenção primária em saúde. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 12, p. e386111234783, 18 set. 2022.

LIMA, F. N.; FREITAS, A. C. V.; SILVA, J. Climate Change Flood Risk Analysis: Application of Dynamical Downscaling and Hydrological Modeling. *Atmosphere*, v. 14, n. 7, 1 jul. 2023.

LIU, C. *et al.* Modeling hydrological consequences of 21st-Century climate and land use/land cover changes in a mid-high latitude watershed. *Geoscience Frontiers*, v. 15, n. 5, 1 set. 2024.

LIU, H. *et al.* A Markov chain-based bias correction method for simulating the temporal sequence of daily precipitation. *Atmosphere*, v. 11, n. 1, 1 jan. 2020.

- LIU, J. *et al.* Contributions of Anthropogenic Forcings to Evapotranspiration Changes Over 1980–2020 Using GLEAM and CMIP6 Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 126, n. 22, 27 nov. 2021.
- LONDHE, D. S.; KATPATAL, Y. B.; BOKDE, N. D. Performance Assessment of Bias Correction Methods for Precipitation and Temperature from CMIP5 Model Simulation. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 13, n. 16, 1 ago. 2023.
- MACHADO, R. E.; LOPES, T. R.; DUARTE, S. N. Projected climate and land-use change impacts on streamflow: the case study of Piracicaba basin – Brazil. *International Journal of River Basin Management*, p. 1–16, 15 jul. 2025.
- MAFRA, N. S. C.; SAMPAIO, C. B.; SANTOS, L. Mudanças climáticas e gestão hídrica no Brasil: desafios para execução do ODS 6 e o global WASH. Fortaleza: [s.n.].
- MANSANO, A. P.; SERRANO, R. O. P. Mapeamento da área de inundação da bacia do Igarapé São Francisco –AC em março de 2023 no contexto Agenda 2030. *Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável*, 2023.
- MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by. [s.l.: s.n.].
- MAYOU, L. A. *et al.* Impacts of future climate and land use/land cover change on urban runoff using fine-scale hydrologic modeling. *Journal of Environmental Management*, v. 362, 1 jun. 2024.
- MEBARKI, H.; MAREF, N.; DRIS, M. E. A. Modelling the monthly hydrological balance using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: A case study of the Wadi Mina upstream watershed. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, v. 12, n. 2, p. 161–177, 2024.
- MELLO, C. R. *et al.* Climate change impacts on water resources of the largest hydropower plant reservoir in Southeast Brazil. *Water (Switzerland)*, v. 13, n. 11, 1 jun. 2021.
- MENAPACE, A. *et al.* Review of bias correction methods for climate model outputs in hydrology. *Journal of Hydrology*, p. 133213, abr. 2025.
- MESQUITA, DE L. F. G.; ALMEIDA, A. N. Avaliação de impactos ambientais no processo de licenciamento ambiental. *Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável*, v. 2, p. 15–31, 2023.
- MISHRA, D. *et al.* Advanced hydrological assessment with SWAT+ under climate change: An integrated framework over large climate-sensitive and reservoir-regulated watershed. *Science of the Total Environment*, v. 994, 10 set. 2025.
- MOGHIM, S.; BRAS, R. L. Bias Correction of Climate Modeled Temperature and Precipitation Using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydrometeorology*, v. 18, n. 7, p. 1867–1884, 1 jul. 2017.
- MOUMANE, I. *et al.* Assessing Climate Change and Water Resource Management Worldwide with the SWAT Model: A Comprehensive Review *E3S Web of Conferences*. Anais...EDP Sciences, 20 fev. 2024
- MOURA, L. B. *et al.* Hydrological Assessment Using the SWAT Model in the Jundiaí River Basin, Brazil: Calibration, Model Performance, and Land Use Change Impact Analysis. *Resources*, v. 14, n. 7, 1 jul. 2025.
- NARAYANAN, A.; PETER, B. G.; KEELLINGS, D. A Climate Extremes Resilience Index for the Conterminous United States. *Weather, Climate, and Society*, v. 16, n. 1, p. 87–103, 1 jan. 2024.

- NEITSCH, P. S. L. *et al.* Soil & Water Assessment Tool (SWAT). [s.l: s.n.].
- NETO, A. G. P.; SILVA, S. R. DA; BARBOSA, I. M. B. R. Mapeamento das áreas suscetíveis às inundações e aos alagamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. *Boletim de Geografia*, v. 40, p. 277–296, set. 2022.
- NGO, S. *et al.* Application of SWAT model to Assess Land Use and Climate Changes Impacts on Hydrology of Nam Rom River Basin in Vietnam, 30 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.preprints.org/manuscript/202001.0362/v1>>
- NÓBREGA, M. R. R. *et al.* Impact of Climate Change on the Aridity of the São Francisco River Extended Basin, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 2, p. 185–197, 2022.
- NOURANI, V. *et al.* Bias correcting the precipitation dynamics of regional climate models via kernel-aware 2D convolutional-long short-term memory. *Journal of Hydrology*, v. 657, 1 ago. 2025.
- NUNES, G. Estudo das variáveis intervenientes no balanço quali-quantitativo de um sistema bacia-lago: o caso do lago Paranoá, Distrito Federal. [s.l: s.n.].
- PASSOS, L. DE O. *et al.* Predicting climate change impacts on the distribution of vereda wetland plant species in the Brazilian Cerrado. *Annals of Botany*, 10 jun. 2025.
- PAULA, J. B. S. C. DE *et al.* Water vulnerability and environmental impacts in the State of Mato Grosso. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, v. 9, n. 2, p. 190–200, 16 dez. 2024.
- PAUNGARTTEN, S. P. L.; SANTOS, J. DE O. S. Exposição e sensibilidade na avaliação da segurança hídrica: Um estudo de caso na Amazônia. *Revista GeoUECE*, v. 12, n. 22, p. e202305, 2 ago. 2023.
- PEREIRA, A. R. Estudo da Contribuição de Águas Subterrâneas e Retirada de Água por Poços Sobre o Escoamento dos Córregos Adjacentes na Região do Núcleo Rural Lago Oeste-DF. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/34395>>. Acesso em: 5 jun. 2023.
- PEREIRA, L. C. *et al.* Effects of Cerrado restoration on seasonal soil hydrological properties and insights on impacts of deforestation and climate change scenarios. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 5, 16 nov. 2022.
- PESSOA NETO, A. G.; SILVA, S. R. DA; BARBOSA, I. M. B. R. Mapeamento das Áreas Suscetíveis a Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Unas, em Pernambuco. *GEOGRAFIA (Londrina)*, v. 33, n. 1, p. 265–284, 12 dez. 2023.
- PLUNGE, S. *et al.* SWAT + input data preparation in a scripted workflow: SWATprepR. *Environmental Sciences Europe*, v. 36, n. 1, 1 dez. 2024.
- QUAMAR, S.; KUMAR, P.; SINGH, H. P. Streamflow and sediment simulation in the Song River basin using the SWAT model. *Frontiers in Water*, v. 7, 2025.
- RAFAEL, D. *et al.* Avaliação da qualidade do estudo de impacto ambiental do corredor viário Transolímpica no Rio de Janeiro - RJ. *Rev. Gestão & Sustentabilidade Ambiental*. [s.l: s.n.].
- REATTO, A. *et al.* Mapa Pedológico Digital-SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <[www.cpac.embrapa.br](http://www.cpac.embrapa.br)>.
- RIMI, R. H. *et al.* Risks of seasonal extreme rainfall events in Bangladesh under 1.5 and 2.0 °C warmer worlds - how anthropogenic aerosols change the story. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 26, n. 22, p. 5737–5756, 15 nov. 2022.

RODARTE, A. B.; LAURINI, M. P. Spatial Heterogeneity in Climate Change: Evidence from Brazilian Biomes, 8 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.researchsquare.com/article/rs-4125159/v1>>

RODRIGUES, J. A. M. *et al.* Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. *International Journal of Climatology*, v. 40, n. 5, p. 2511–2526, 1 abr. 2020.

RODRIGUES, J. A. M. *et al.* Hydrological modeling in a basin of the Brazilian Cerrado biome. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 16, n. 1, p. 1, 26 jan. 2021.

RUFINO, P. R. *et al.* Modeling the Nexus of Climate Change and Deforestation: Implications for the Blue Water Resources of the Jari River, Amazonia. *Water (Switzerland)*, v. 17, n. 5, 1 mar. 2025.

SALLES, L. DE A. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na Bacia do Ribeirão Pipiripau. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/10774>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

\_\_\_\_. Sensoriamento remoto e análise espacial na determinação de processos hidrológicos no bioma Cerrado. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/39127>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SALMONA, Y. B. *et al.* A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. *Sustainability (Switzerland)*, v. 15, n. 5, 1 mar. 2023a.

\_\_\_\_. A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. *Sustainability (Switzerland)*, v. 15, n. 5, 1 mar. 2023b.

SAMSET, B. H. *et al.* Climate Impacts From a Removal of Anthropogenic Aerosol Emissions. *Geophysical Research Letters*, v. 45, n. 2, p. 1020–1029, 28 jan. 2018.

SÁNCHEZ-GÓMEZ, A. *et al.* Modelling Water Management using SWAT+ : Application of Reservoirs Release Tables and the New Water Allocation Module in a Highly Managed River Basin. *Water Resources Management*, v. 39, n. 5, p. 2357–2399, 1 mar. 2025.

SANTOS, C. A. S. *et al.* Using a hierarchical approach to calibrate SWAT and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. *Water (Switzerland)*, v. 10, n. 9, 25 ago. 2018.

\_\_\_\_. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid Watershed in Brazil. *Water (Switzerland)*, v. 11, n. 1, 18 jan. 2019.

SANTOS FERREIRA, R. Análise da produção de carga líquida e sólida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/20891>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SANTOS MOYSÉS, Y. DOS; NUÑEZ VIÉGAS, R. Conflitos ambientais envolvendo comunidades pesqueiras na APA de Guapimirim/ESEC da Guanabara - Baía de Guanabara/RJ. *Revista da Escola de Guerra Naval*, v. 29, n. 1, p. 1–38, 2023.

SAVINO, M. *et al.* Combining Hydrological Modeling and Regional Climate Projections to Assess the Climate Change Impact on the Water Resources of Dam Reservoirs. *Water (Switzerland)*, v. 15, n. 24, 1 dez. 2023.

SCHWAMBACK, D. *et al.* Quantifying Soil Loss in the Brazilian Savanna Ecosystem: Current Rates and Anticipated Impact of Climate Changes. *Land Degradation and Development*, v. 35, n. 18, p. 5786–5803, 1 dez. 2024.

- SERRANO, J. *et al.* Evaluating hydrologic model performance of global and local weather data inputs. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. Anais...International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 18 nov. 2021.
- SILVA, F. L. DA *et al.* Mudanças Climáticas e a preservação de ecossistemas na América Latina: políticas públicas em megacidades no Brasil e México. [s.l.: s.n.].
- SILVA, G. K. DA *et al.* Análise de projeções climáticas das mudanças climáticas sobre precipitação e temperatura nas regiões hidrográficas brasileiras para o século XXI. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 55, n. 3, p. 420–436, set. 2020.
- SILVA, G. K. DA *et al.* Eta Model and CMIP5 Climate Change Projections for the São Francisco and Paraíba do Sul River Basins, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 38, 2023.
- SILVA, H. J. A. DA *et al.* Seasonal Impacts of Atmospheric Aerosols on Reference Evapotranspiration in the Mato Grosso Cerrado. *Atmosphere*, v. 16, n. 2, 1 fev. 2025.
- SIMÕES, K. Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio indaiá, alto são francisco-mg, utilizando swat. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/38686>>. Acesso em: 5 jun. 2023.
- SONG, J. H. *et al.* Evaluating the performance of climate models in reproducing the hydrological characteristics of rainfall events. *Hydrological Sciences Journal*, v. 65, n. 9, p. 1490–1511, 3 jul. 2020.
- SØRLAND, S. L. *et al.* Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 7, 6 jul. 2018.
- SOUSA, R. M. DE *et al.* Qualidade estatística do clima presente simulado pelos modelos climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 para o estado do Tocantins. *Scientia Agraria*, v. 19, n. 2, p. 197, 25 set. 2018.
- SRINIVASAN, R. SWAT Literature Database. Disponível em: <<https://doi.org/10.18738/T8/89CJAK>>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- SUEKAME, H. K. *et al.* Hydrological modeling combined with climate change, land use and occupation. *Anuario do Instituto de Geociencias*, v. 44, n. 1, 2021.
- TAVARES, P. DA S. *et al.* Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. *Regional Environmental Change*, v. 23, n. 1, p. 40, 16 mar. 2023.
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456–457, p. 12–29, ago. 2012.
- TRENTIN, R.; LAURENT, F.; ROBAINA, L. *Revista Brasileira de Geografia Física* v. [s.l.: s.n.].
- TWISA, S.; BUCHROITHNER, M. F. Seasonal and annual rainfall variability and their impact on rural water supply services in the Wami River Basin, Tanzania. *Water (Switzerland)*, v. 11, n. 10, 1 out. 2019.
- VAUTARD, R. *et al.* Evaluation of the Large EURO-CORDEX Regional Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 126, n. 17, 8 set. 2021.
- VILLAFUERTE, E. M.; ANGULO, E. C. Evaluating Statistical Bias Correction Techniques to Enhance Precipitation Projections in the Cachi Basin, Peruvian Andes. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 11, p. e09204, 4 nov. 2024.

WANG, Y. *et al.* Climate Change Impacts on Runoff in the Fujiang River Basin Based on CMIP6 and SWAT Model. *Water (Switzerland)*, v. 14, n. 22, 1 nov. 2022.

WEI, G. *et al.* Two Alternatives to the Two-Source Energy Balance Evapotranspiration Model. *Water Resources Research*, v. 59, n. 3, 1 mar. 2023.

WORKMAN, M. *et al.* A robust decision-making approach in climate policy design for possible net zero futures. *Environmental Science and Policy*, v. 162, 1 dez. 2024.

WU, T. *et al.* The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 4, p. 1573–1600, 24 abr. 2019.

XU, Z.; HAN, Y.; YANG, Z. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. *Science China Earth Sciences*, v. 62, n. 2, p. 365–375, 28 fev. 2019.

ZHANG, L. *et al.* Assessing the impacts of climate change and land use/land cover data characteristics on streamflow using the SWAT model in the Upper Han River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 61, 1 out. 2025.

ZHANG, X. *et al.* Enhancing daily streamflow simulation using the coupled SWAT-BiLSTM approach for climate change impact assessment in Hai-River Basin. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023.

ZHAO, J. *et al.* SWAT model applications: From hydrological processes to ecosystem services *Science of the Total Environment* Elsevier B.V., , 25 jun. 2024.