



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ALAINE DE SOUSA PEREIRA

**PREDIÇÃO DAS VAZÕES FUTURAS NA BACIA DO RIO
CAPIBARIBE NO PERÍODO DE 2030 A 2060 UTILIZANDO
MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS E O SWAT+**

JOÃO PESSOA - PB

2026

ALAINE DE SOUSA PEREIRA

**PREDIÇÃO DAS VAZÕES FUTURAS NA BACIA DO RIO
CAPIBARIBE NO PERÍODO DE 2030 A 2060 UTILIZANDO
MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS E O SWAT+**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus I, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

JOÃO PESSOA – PB

2026

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P436p Pereira, Alaine de Sousa.

PREDIÇÃO DAS VAZÕES FUTURAS NA BACIA DO RIO
CAPIBARIBE NO PERÍODO DE 2030 A 2060 UTILIZANDO MODELOS
CLIMÁTICOS GLOBAIS E O SWAT+ / Alaine de Sousa Pereira.
- João Pessoa, 2026.
84 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. Mudanças climáticas. 2. Modelagem hidrológica. 3.
Projeções Climática Futura. I. Silva, Richarde Marques
da. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 628(043.2)

ALAINE DE SOUSA PEREIRA

**PREDIÇÃO DAS VAZÕES FUTURAS NA BACIA DO RIO
CAPIBARIBE NO PERÍODO DE 2030 A 2060 UTILIZANDO MODELOS
CLIMÁTICOS GLOBAIS E O SWAT+**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em sessão de defesa pública realizada em 13//02/2026,
perante a seguinte comissão julgadora:

Richarde Marques da Silva

Prof. Dr. Richarde Marques da Silva
Orientador
Departamento de Geociências/CCEN/UEPB

APROVADO (10,0)
(Aprovado/Reprovado)

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Membro Interno
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/CT/UEPB

Aprovado (10,0)
(Aprovado/Reprovado)

Vanine Elaine Menezes de Farias

Profa. Dra. Vanine Elaine Menezes de Farias
Membro Externo
Universidade Federal de Pernambuco

APROVADO (10,0)
(Aprovado/Reprovado)

Profa. Dra. Aline Nunes Remígio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, meu alicerce de amor incondicional, e à minha irmã e ao meu sobrinho, que sempre acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava, por aguentarem minhas ausências e meus silêncios. Vocês foram minha força motriz nos dias de desânimo, minha torcida incansável, minha motivação mais pura. Cada abraço, cada palavra de encorajamento, cada “vai dar certo” de que ouvi de vocês me carregou até o final. Sou imensamente grata por cada ensinamento, cada conselho e cada gesto de carinho que me impulsionou a seguir em frente.

Ao meu querido orientador, o Prof. Richarde Marques da Silva, minha imensa gratidão por todos os ensinamentos ao longo desses três anos. Obrigada por sua paciência infinita, por suas orientações que iam além do acadêmico e tocavam na minha essência, por acreditar no meu potencial, mesmo quando eu duvidava de mim mesmo. Você não foi somente um professor, mas um guia, um incentivador e foi uma pessoa que me ensinou a pensar com mais profundidade e coragem. Sem seu incentivo, estímulo e confiança em mim, este trabalho não teria sido realizado. Muito obrigada por tudo.

Aos meus amigos do Laboratório de Ensino, Projetos e Pesquisas em Análises Espaciais (LEPPAN), Cecília, Jeniffer, Antonio Marcos, Clara, Ana Paula, Vanine, Jorge Flávio, e Franklin, vocês foram minha família escolhida dentro da universidade. Obrigada pelas risadas nos cafés, que aliviavam o estresse durante a jornada, pelas discussões que me faziam crescer e por estarem comigo em todos os momentos em que precisei de um ombro ou de uma palavra amiga. Cada um de vocês trouxeram luz para esse caminho e fizeram com que o laboratório fosse mais do que um espaço de pesquisa, mas um lugar de afeto e apoio verdadeiro. Obrigada pela amizade de vocês.

Aos meus amigos da UFPB, Tuany, Marta, Rikelme, Bia, Manuela, Marcelo, Heloísa, Ivânia, José Arnaldo e Arthur, que compartilharam comigo não só as aulas, mas as angústias e as pequenas vitórias desse caminho árduo, meu agradecimento imenso. Um carinho especial ao meu trio inseparável (Tuany, Marta e Rikelme), que esteve comigo desde o início da jornada acadêmica. Obrigada por me ouvirem sem julgamento, por me motivarem nos dias de desânimo, por dividirem lanches, músicas e desabafos sinceros. Vocês transformaram esses anos em memórias inesquecíveis e provaram que a amizade verdadeira resiste a qualquer prova. Amo cada um de vocês e levo esse laço para sempre no coração – vocês tornaram minha vida acadêmica mais leve, divertida e plena.

Aos colegas do Projeto Cooperar, meu agradecimento sincero por todas as experiências transformadoras, aprendizados profundos e contribuições que enriqueceram não só minha experiência profissional, mas visão de mundo. Vocês me mostraram o verdadeiro valor da cooperação, da empatia e do impacto real que podemos gerar na sociedade. Obrigada por abrirem portas, por me acolherem com tanto carinho e por fazerem parte essencial desta conquista. Agradeço imensamente à equipe GPMA (Flávio Luna, Neuma e Eduardo), ao pessoal da TI (Ricardo e Túlio), à copa (Madalena, André e Simone), e a Ronaldo, Nalfra, Elania, Marciano, Wilson, Jailson, Heloísa e Paulo Pinto. Vocês não foram apenas colegas: foram parte essencial nessa trajetória. Gratidão eterna por tudo!

Por fim, agradeço a Deus, com todo o meu coração e gratidão, por ter me dar forças quando eu achava que não aguentava mais, por colocar anjos na minha vida e por permitir que eu chegasse até aqui. Sem a Tua presença constante, nada disso seria possível. Obrigada por cada oração atendida, por cada lágrima enxugada e por me sustentar com amor infinito.

“Dedico este trabalho à minha família, meu alicerce inabalável de amor e força; ao pessoal do laboratório LEPPAN; aos meus amigos queridos da UFPB; e à equipe do Projeto Cooperar. Vocês não mediram esforços para me apoiar nessa etapa tão crucial da minha vida, e essa conquista é, acima de tudo, de vocês”.

RESUMO

As mudanças climáticas representam uma das maiores ameaças aos recursos hídricos, pois alteram o ciclo hidrológico e aumentam as incertezas na ocorrência de eventos extremos, como secas prolongas, chuvas intensas em curtos períodos, elevação da temperatura do ar e o aumento da evapotranspiração. Essas alterações representam desafios para gestão dos recursos hídricos, sobretudo em regiões semiáridas, onde apresenta grande variabilidade climática. Assim, o presente estudo teve como objetivo estimar as vazões mediante cenários climáticos futuros para a bacia do Rio Capibaribe por meio de modelagem hidrológica para o período de 2030 a 2060. A metodologia adotada envolveu a utilização do modelo SWAT+ e dados de modelos de circulação globais. O modelo foi calibrado e validado com base em séries históricas mensais de vazão, e o desempenho da modelagem foi avaliada com base nas seguintes métricas estatísticas: coeficiente de Pearson (r), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), percentual de viés (PBIAS), raiz do erro médio quadrático (RMSE), e o índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE). Além disso, foi realizada análise de sensibilidade dos parâmetros para identificar aquele que mais influência no comportamento hidrológico. As projeções futuras de precipitação e temperatura foram obtidas a partir dos modelos climáticos globais ACCESS-CM2, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6, considerando os cenários climáticos SSP2-4.5 (intermediário) e SSP5-8.5 (pessimista), para o período prospectivo de 2030 a 2060. Resultados iniciais sem calibração mostraram superestimação de vazões, com NSE negativo. Após calibração e validação do modelo apresentaram desempenho satisfatório nas áreas de contribuição de Toritama e Vitória de Santo Antão, entretanto Limoeiro e Paudalho apresentaram desempenhos insatisfatórios. As projeções climáticas dos modelos indicaram aumento gradual da temperatura em toda a bacia, mas acentuada no SSP5-8.5, com picos mensais próximos a 35°C. cenários futuro de precipitação mostrou uma superestimação dos modelos em relação aos dados observados. As vazões futuras estimadas pelos modelos mostram uma redução significativa da vazão no cenário pessimista. No cenário intermediário apresentou picos elevados no posto de Toritama, no entanto, no posto de Vitória de Santo Antão apresentou valores baixos de vazão (menor que 2,5 m³/s).

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Modelagem hidrológica, Projeções Climática Futura.

ABSTRACT

Climate change represents one of the greatest threats to water resources, as it alters the hydrological cycle and increases uncertainty in the occurrence of extreme events, such as prolonged droughts, intense rainfall over short periods, rising air temperatures, and increased evapotranspiration. These changes pose significant challenges to water resources management, especially in semi-arid regions, which are characterized by high climatic variability. Therefore, this study aimed to estimate river discharge under future climate scenarios for the Capibaribe River Basin through hydrological modeling using meteorological data for the period from 2030 to 2060. The adopted methodology involved the use of the SWAT+ model and outputs from global climate models. The model was calibrated and validated based on historical monthly streamflow series, and model performance was evaluated using the following statistical metrics: Pearson correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), percent bias (PBIAS), root mean square error (RMSE), and the Kling–Gupta efficiency (KGE). In addition, a parameter sensitivity analysis was conducted to identify the parameters with the greatest influence on hydrological behavior. Future projections of precipitation and temperature were obtained from the global climate models ACCESS-CM2, HadGEM3-GC31-LL, and MIROC6, considering the SSP2-4.5 (intermediate) and SSP5-8.5 (pessimistic) climate scenarios for the prospective period from 2030 to 2060. Initial uncalibrated results showed an overestimation of streamflow, with negative NSE values. After calibration and validation, the model showed satisfactory performance in the contributing areas of Toritama and Vitória de Santo Antão, whereas unsatisfactory performance was observed in Limoeiro and Paudalho. Climate projections indicated a gradual increase in temperature across the entire basin, with more pronounced increases under the SSP5-8.5 scenario, reaching monthly peaks close to 35 °C. Future precipitation scenarios showed an overestimation by the models compared to observed data. Estimated future streamflows indicate a significant reduction in discharge under the pessimistic scenario. Under the intermediate scenario, high discharge peaks were projected at the Toritama gauging station, while low flow values (below 2.5 m³ s⁻¹) were projected at the Vitória de Santo Antão station.

Keywords: Climate change; Hydrological modeling; Future climate projections

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico	20
Figura 2 - Localização geográfica da bacia do rio Capibaribe, PE	30
Figura 3 - Fluxograma de etapas de execução do modelo.....	33
Figura 4 - Delimitação da bacia hidrográfica de Rio Capibaribe	35
Figura 5 - Declividade bacia hidrográfica de Rio Capibaribe	36
Figura 6 - Uso e ocupação da bacia hidrográfica rio Capibaribe	37
Figura 7 - Tipos de solos da bacia hidrográfica bacia hidrográfica rio Capibaribe.....	38
Figura 8 - Localização dos postos fluviométricos, pluviométricos e reservatórios.....	41
Figura 9 - Localização dos pontos de grade	48
Figura 10 - Comportamento da vazão simulada pelo modelo hidrológico, antes da calibração, nos postos fluviométricos: a) Toritama, b) Limoeiro, c) Paudalho, d) Vitória de Santo Antão	51
Figura 11 - Hidrogramas das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Toritama.....	54
Figura 12 - Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Limoeiro.	55
Figura 13 - Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Paudalho.	57
Figura 14 - Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validadas e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Vitória de Santo Antão.	58
Figura 15 - projeções de precipitação anuais para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll, c) MIROC6.....	60
Figura 16 - Variação anual da precipitação utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2060, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6 SSP2-4.5, d) Access-cm2, e) Hadgem3-gc31-ll e f) MIROC6 SSP5-8.5	61
Figura 17 - projeções de precipitação mensais para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6	62
Figura 18 - projeções de temperatura anuais máxima e mínima para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	64

Figura 19 - Variação anual da temperatura utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2060, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6 SSP2-4.5, d) Access – cm2, e) Hadgem3-gc31-ll e f) MIROC6 SSP5-8.5 65

Figura 20 - projeções de temperatura mensais para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6 68

Figura 21 - comparação entre os dados observado mensais com os modelos climáticos estimados 69

Figura 22 - Comparação entre as vazões médias mensais entre os modelos, a) Toritama, b) Limoeiro, c) Paudalho, d) Vitoria de Santo Antônio – SSP2-4.5, e) Toritama, f) Limoeiro, g) Paudalho, h) Vitoria de Santo Antônio – SSP5-8.5, 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Associação dos usos de solo existentes na área de estudo com o banco de dados do SWAT+.....	37
Tabela 2 - Tipos de solos existentes na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe	39
Tabela 3 - Postos pluviométricos usado na modelagem da bacia do Rio Capibaribe.	40
Tabela 4 - Postos Fluviométricos usado na modelagem da bacia do Rio Capibaribe.	41
Tabela 5 - Descrições dos parâmetros e limites usados na calibração do modelo.	44
Tabela 6 - Classificação da eficiência da modelagem pelo SWAT.....	47
Tabela 7 - Modelos Climáticos Globais utilizados na pesquisa.	48
Tabela 8 - Desempenho estatístico do modelo.	52
Tabela 9 – Valores da calibração dos parâmetros do SWAT+ para as áreas de contribuição das estações.....	52
Tabela 10 - Desempenho estatístico do modelo para estação fluviométrica de Toritama. .	53
Tabela 11 - Desempenho estatístico do modelo para a estação fluviométrica de Limoeiro.	56
Tabela 12 - Desempenho estatístico do modelo para a estação fluviométrica de Paudalho.	57
Tabela 13 - Desempenho estatístico do modelo para a estação fluviométrica de Vitória de Santo Antão.	58
Tabela 14 - Tendencia significativa de precipitação	61
Tabela 15 - Tendencia significativa de temperatura.....	65
Tabela 16 - Média da precipitação e da vazão.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator
AGRL	Agriculture Land-Generic
ALPHA	Fator de recessão de escoamento de base (dias)
ALPHA_BF	Fator de recessão de escoamento de base (dias)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
AR6	Sexto Relatório de Avaliação
AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm H ₂ O/mm)
BF_MAX	Taxa máxima de fluxo de base (mm)
BHRC	Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe
CALSI	Calibration by Latin-hypercube Sampling Iterations
CANMX	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm/H ₂ O)
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CHK	Condutividade hidráulica efetiva no canal tributário aluvial (mm/h)
CLIMBra	Climate Change Dataset for Brazil
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CN2	SCS Curva Número / valor da curva número para a condição de solo úmido
CN3_SWF	Fator de água do solo para CN3
CX	Cambissolo Háplico
DDS	Dynamically Dimensioned Search
DREAM	Differential Evolution Adaptive metropolis
EPCO	Fator de compensação de evaporação do solo
ESCO	Fator de compensação de retirada de água pelos vegetais
ESK	Espodossolo Ferri-humiluvico
FLO_MIN	Profundidade limite da superfície ao lençol freático para que ocorra o fluxo de águas subterrâneas (m)
FRSD	Forest deciduous
FRSE	Forest Evergreen
FRST	Forest Mixed
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW_DELAY	Tempo de recarga do aquífero (dias)
GWQMN	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (mm)
GW_REVAP	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas
GX	Gleissolo Háplico
HadGEM3-GC31-LL	Hadley Centre Global Environment Model in the Global Coupled configuration 3.1

HRUs	Unidades de Resposta Hidrológica
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
KGE	Eficiência de Kling Gupta
K	Condutividade hidráulica (mm/h)
LA	Latossolo Amarelo
LAT_TTIME	Tempo de viagem do fluxo lateral
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo
MARE	Erro Relativo Absoluto Médio
MIROC6	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MCGs	Modelos Climáticos Globais
MCRs	Modelos Climáticos Regionais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MSE	Erro Quadrático Médio
NSE	Nash–Sutcliffe Efficiency
PA	Argissolo Amarelo
PAST	Pasture
PERCO	Coefficiente de percolação do solo
PBIAS	Percentual de viés
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo
PV	Argissolo Vermelho
QGIS	Quantum GIS
QSWAT+	Interface do SWAT+ para o Quantum GIS
REVAP_CO	Coefficiente de revitalização das águas subterrâneas (adimensional)
REVAP_MIN	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada (m)
RL	Neossolo Litólico
RNGB	Range Brush
RNGE	Range Grasses
RQ	Neossolo Quartzarenico
RMSE	Raiz do erro médio quadrático
r	coeficiente de Pearson
R ²	Coefficiente de Determinação
RR	Neossolo Regolítico
RY	Neossolo Flúvico
SAVA	Savanna
SN	Planossolo Nátrico
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSPs	The Shared Socioeconomic Pathways
SWAT+	Soil and Water Assessment Tool
SX	Planossolo Háplico
TC	Luvissolo Crômico
URB	Área urbana

URBN	Residential
USGS	United States Geological Survey
VOL	Volume do reservatório (m ³ /s)
VX	Vertissolo Háplico
WATR	Water

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 – Objetivos.....	19
1.1.1 – Objetivo geral	19
1.1.2 – Objetivos específicos	19
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 – Modelagem hidrológica.....	20
2.1.1 – Modelos hidrológicos	21
2.1.2 – O SWAT+ e suas aplicações	22
2.2 – Mudanças climáticas futuras	26
3 – METODOLOGIA.....	29
3.1 – Área de estudo	29
3.1.1 - Reservatórios do Capibaribe	31
3.2 Etapas de execução do modelo.....	33
3.2.1 – O modelo SWAT+.....	34
3.2.2 – Modelo digital de elevação e declividade.....	34
3.2.3 – Uso e ocupação do solo e tipos de solos.....	36
3.2.4 – Dados meteorológicos e dados hidrológicos	39
3.2.4.1 – Precipitação	39
3.2.4.2 – Vazão	40
3.3 – Simulação hidrológica	42
3.3.1– Calibração e validação do modelo SWAT+	42
3.3.2 – Análise do desempenho estatístico do modelo	44
3.4 – Cenários futuros e os modelos climáticos	47
3.5 Análise de tendências	49
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 – Modelagem hidrológica.....	51
4.1.1 Modelagem inicial	51

4.1.2 Calibração e validação do modelo.....	52
4.1.2.1 Calibração e validação da área de contribuição de Toritama	53
4.1.2.2 Calibração e validação da área de contribuição de Limoeiro	55
4.1.2.3 Calibração e validação da área de contribuição de Paudalho	56
4.1.2.4 Calibração e validação da área de contribuição de Vitória de Santo Antão	57
4.2 – Cenários futuros de precipitação na bacia do rio Capibaribe para o período de 2030 a 2060	59
4.3 – Cenários futuros de temperatura na bacia do rio Capibaribe para o período de 2030 a 2060	63
4.4 – Projeções futuras de vazão em diferentes cenários climáticos para o período de 2030 a 2060	66
5 - CONCLUSÕES	71
6 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
7 - REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm ocasionado modificações no ciclo hidrológico, intensificando a ocorrência de eventos climáticos extremos, como aumento das temperaturas, chuvas mais intensas em curto período, e secas prolongadas (Taye et al., 2015; Brasil Neto et al., 2026). As modificações no clima acarretam impactos em todas as regiões do mundo, gerando insegurança hídrica (enchentes, secas extremas, diminuição do fluxo dos rios, e redução da quantidade de água disponível nos aquíferos e lagos) ou desastres naturais (movimento de massa, onda de calor, e onda de frio) (Trenberth et al., 2015; Easterling et al., 2016; Arnell, 2019).

Diante das mudanças climáticas que estamos vivenciando neste momento histórico, especialmente nas últimas décadas, como o aumento da temperatura, as alterações no regime de chuvas e em sua distribuição espacial, estudar projeções de cenários climáticos futuros nas vazões em escala de bacia hidrográfica é vital para subsidiar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos, antecipar impactos sobre a disponibilidade de água, reduzir vulnerabilidades socioambientais, apoiar estratégias de adaptação às mudanças climáticas e orientar a tomada de decisão em setores dependentes da água, como abastecimento humano, agricultura, geração de energia e conservação dos ecossistemas aquáticos (IPCC, 2021; Tenagashaw et al., 2022; Silva et al., 2024).

No Brasil, eventos hidrometeorológicos extremos serão mais intensos e frequentes, como secas prologadas, inundações, enchentes e movimento de massa. Esses eventos impactam diretamente a disponibilidade hídrica e a produção agrícola (Brasil, 2013). Na região Nordeste do Brasil, eventos extremos tendem a ser mais severos, com chuvas mais intensas e frequentes em períodos curtos, ocasionando flutuação no escoamento superficial (Koch et al., 2020). Essa situação é ainda mais agravada pelas condições climáticas dessa região, onde grande porção do seu território está inserido na região Semiárida, apresentando distribuição espacial e temporal irregulares da precipitação, altas temperaturas, e evapotranspiração potencial superior a precipitação pluvial, comprometendo a disponibilidade hídrica (Angelotti et al., 2012).

Nesse contexto, entender a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica é essencial para embasar decisões estratégicas na gestão e no planejamento dos recursos hídricos. Diante da complexidade dos fenômenos que constituem o ciclo hidrológico e suas múltiplas interações, somada às variabilidades temporais e espaciais relacionadas, os modelos

hidrológicos emergem como ferramenta crucial para auxiliar na resolução dos problemas associados aos recursos hídricos (Sell et al., 2022).

Os modelos hidrológicos são utilizados com a finalidade de avaliar os impactos das mudanças climáticas e compreender os processos hidrológicos em bacia hidrográfica. Existem diversos modelos, entre esse, destaca-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT+), que é uma versão reestruturada do SWAT (Bieger et al., 2017). Esse modelo é de domínio público e atualmente é amplamente utilizado para simular escoamento superficial, evapotranspiração e produção de sedimentos (Gassman et al., 2007; Bressiani et al., 2015a; Magalhães et al., 2018). Além disso, esse modelo é capaz de representar diversos processos hidrológicos e físico da bacia, permitindo simular e prever os efeitos das mudanças no uso e cobertura do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo (Neitsch et al., 2011).

Essa problemática também é sentida em bacias hidrográficas localizadas em zonas de transição entre as regiões húmida e semiárida, como é o caso da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, em Pernambuco. Essa bacia possui grande importância ambiental, social e econômica para o estado de Pernambuco, pois abastece milhões de pessoas e sustenta atividades agrícolas, industriais e de serviços. O rio atravessa áreas com distintos níveis de urbanização, incluindo a Região Metropolitana do Recife, desempenhando papel central na dinâmica hídrica regional. Além disso, a bacia abriga ecossistemas relevantes e é altamente sensível às variações climáticas e ao uso do solo, o que torna seu estudo fundamental para o planejamento hídrico, a mitigação de riscos e a adaptação às mudanças climáticas (Farias et al., 2025).

A bacia do Rio Capibaribe exerce um papel essencial na estratégia de segurança hídrica estadual, uma vez que abastece cerca de 36% da população do estado e grande parte da região metropolitana do Recife e sustenta importantes atividades econômicas, como o polo têxtil do Agreste (Pernambuco, 2010). Além disso, essa bacia possui grande relevância histórica, social e econômica para o desenvolvimento de Pernambuco, onde a capital Recife tem 50 % da sua área inserida na bacia, na qual, em grande parte, está situado na região semiárida. Contudo, a bacia enfrenta sérios desafios ambientais devidos as atividades desenvolvidas ao longo de seu curso.

Mais recentemente, a intensificação do uso e ocupação do solo, impulsionado pela expansão urbana, atividades agrícolas, agropecuária e indústrias, tem acarretado impactos significativos no ecossistema (Pernambuco, 2010; Ferreira, 2020). Além disso, diversas regiões da bacia sofrem periodicamente com episódios de inundações, que são agravadas com

as mudanças climáticas e pela impermeabilização do solo (Ferreira, 2020). Assim, neste estudo avaliamos as condições das vazões futuras frente aos impactos das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe.

Nesse contexto, esse estudo visa contribuir para o avanço científico para gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas em regiões semiáridas. Além de apresentar uma metodologia para analisar as condições hidrológicas da bacia em frente às alterações climáticas, considerando cenários futuros em diferentes horizontes (médio e longo prazo). Assim, possibilitar identificar e caracteriza os impactos das mudanças climáticas para próximas décadas, de modo a fornecer subsídios para o planejamento hídricos.

1.1 – Objetivos

1.1.1 – Objetivo geral

Estimar as vazões mediante cenários climáticos futuros para a bacia do Rio Capibaribe por meio de modelagem hidrológica para o período de 2030 a 2060.

1.1.2 – Objetivos específicos

- Realizar a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe.
- Analisar cenários climáticos futuros intermediário e pessimista na bacia do Rio Capibaribe para o período de 2030 a 2060.
- Analisar projeções futuras das vazões mediante diferentes cenários climáticos futuros intermediário e pessimista para o período de 2030 a 2060.

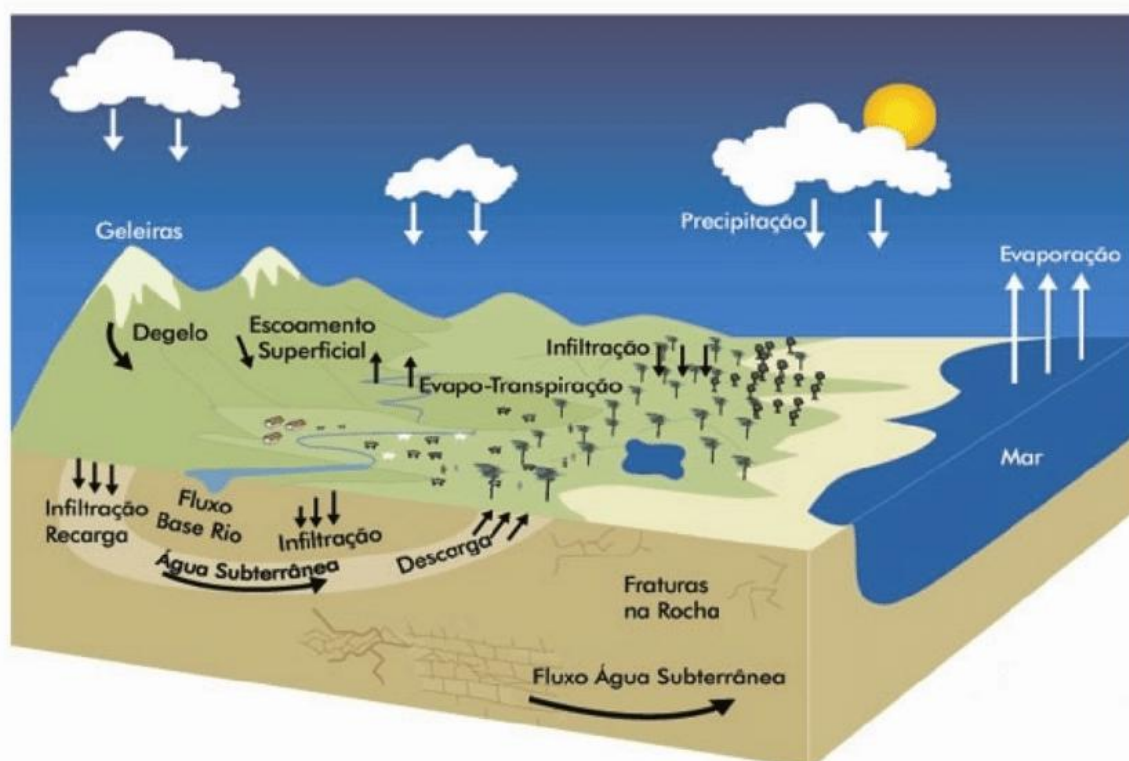
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresentar os conceitos importantes encontrados na literatura, que servem de base teórica para o entendimento do trabalho. Abordando os seguintes tópicos: modelagem hidrológica e mudanças climáticas futuras.

2.1 – Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica pode ser compreendida como a representação matemática de um sistema ou processo hidrológico, com a finalidade compreendê-lo, descrever e simular seu comportamento em frente as diferentes condições de entrada e saída no sistema, de modo a prever respostas a distintas condições simuladas (Tucci, 2005). Sendo assim, uma bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema, em que uma variável de entrada, como a precipitação, é transformada em uma variável de saída, como a vazão, através dos diferentes processos do ciclo hidrológico (infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial, entre outros), conforme esquematizado na figura 1 (Cabral, 2014).

Figura 1 - Ciclo hidrológico



Fonte: Dionata (2013).

Nesse contexto, os modelos hidrológicos surgem com a finalidade compreender o comportamento da bacia hidrográfica e fornecer respostas a distintas questões práticas e

científicas. Primeiramente, buscou-se explicar a relação precipitação-vazão, por meio de componentes como infiltração, escoamento superficial, entre outras variáveis, posteriormente buscou integrar os diversos componentes da natureza e dos fatores antrópicos que influenciam a simulação (Tucci, 2005). Assim, os modelos passaram a representar as fases do ciclo hidrológico, a quantificar a precipitação que incide na bacia por meio dos diferentes processos físicos até geração do escoamento numa seção de um rio (Tucci, 2005; Beskow et al., 2016). Dessa maneira, os modelos hidrológicos integram todas as etapas desses processos, permitindo estimar as variáveis intermediárias (infiltração, armazenamento de água no solo etc.) e de saída da bacia hidrográfica, sendo a vazão um das principais (Tucci, 2005).

2.1.1 – Modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos exercem um papel essencial na análise e no entendimento dos processos hidrológico que ocorrem em bacia hidrográficas, possibilitando uma representação quantitativo desses processos físicos. Esses instrumentos computacionais, fundamentadas em formulações matemáticas, possibilitam simular de forma detalhada do comportamento hidrológico da bacia, tornando-se uma ferramenta importante para previsão, manejo e planejamento futuro dos recursos hídricos (Beskow et al., 2016).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes critérios, como os tipos de variáveis usadas na modelagem (estocásticas e determinístico), o tipo de relação entre as variáveis (empíricos e conceituais), a forma de representação dos dados (discretos e contínuo), consideração ou não da variabilidade espacial (concentrado ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (Moreira, 2005).

Modelos contínuo ou discreto: o modelo é considerado como contínuo quando os fenômenos analisados são apresentados de forma contínua ao longo do tempo. Por outro lado, o modelo é considerado discreto a quando as mudanças acontecem um intervalo de tempo especificado, por exemplo, quando a finalidade da modelagem seja isolar, determinado período de uma série temporal, de modo a mostrar o comportamento hidrológico desse período específico (Tucci, 2005; Christofolletti, 1999; Vertessy et al., 1993).

Modelos concentrados ou distribuídos: o modelo é classificado como concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros dentro do processo hidrológico, considerando no processo somente valores médios. Assim, o

processo é analisado em apenas em função do tempo, tendo como exemplo o modelagem chuva-vazão de uma bacia hidrográfica, onde considera que toda a área responde de forma uniforme aos dados hidrológicos (Tucci, 2005; Fayal, 2008). O modelo é considerado distribuído quando variáveis e parâmetros do sistema variar tanto no espaço como no tempo, permitido maior detalhamento na representação dos processos físicos, ou seja, consideram a variabilidade espacial e temporal das características de uma bacia hidrográfica (Tucci, 2005; Cunha, 2004).

Modelos estocásticos ou determinísticos: o modelo é dito como determinístico quando para a mesma entrada do sistema, o modelo produz a mesma saída, mostrando uma relação previsível, e não envolvem componentes probabilístico ou estatístico. Em contrapartida, o sistema é considerado estocástico quando o relacionamento entre a entrada e saída é estatístico, isto é, quando algum das variáveis ou parâmetros do sistema apresentam algum comportamento aleatório. Por exemplo, a previsão do nível futuro de um reservatório, que depende da vazão afluente, sendo uma variável aleatória com determinada distribuição de probabilidade (Tucci, 2005; Fayal, 2008; Christofolletti, 1999).

Modelo conceituais ou empíricos: o modelo é considerado conceitual quando suas funções levarem em consideração os processos físicos do fenômeno estudado. Este modelo pode se subdividir em semi-conceitual e físico, onde o primeiro se refere aos sistemas que relaciona as características físicas do processo, de modo a mater razoavelmente o empirismo na definição dos parâmetros, o segundo faz uma aproximação com a física do modelo hidrológico (Tucci, 2005; Fayal, 2008). Em contrapartida, os modelos empíricos são aqueles que apresentam nenhuma interligação explícita com o processo físico do modelo, utilizam funções matemáticas ajustadas a partir de análise estatística dos dados observados, para mostrar o comportamento hidrológico da bacia, sem levar em conta a física do modelo (Tucci, 2005; Christofolletti, 1999; Fayal, 2008).

2.1.2 – O SWAT+ e suas aplicações

O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998) é um modelo matemático de domínio público, desenvolvido pela equipe do Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Esse modelo tem como finalidade avaliar os impactos decorrente das alterações no uso e manejo do solo,

considerando o escoamento superficial, a perda de solo, o transporte de sedimentos e a produção de nutrientes, bem como a qualidade da água em grandes bacias hidrográficas não monitorada, demonstrando ser um instrumento eficiente e capaz de simular processos hidrológicos (Neitsch et. al., 2011). Esse modelo incorpora as características físicas da bacia hidrográfica, possibilitando que diferentes processos físicos sejam representados e simulados para uma determinada área. Ao longo dos anos, o SWAT tem sido amplamente utilizado por instituições governamentais e privadas, organizações não governamentais, universidades e instituições empenhada em fornecer suporte para a tomada de decisões na gestão e no planejamento recursos hídricos e agrícolas (Abbaspour et al., 2015; Brighenti et al., 2016; Janjic e Tadic, 2023).

O SWAT foi desenvolvido na década de 1990 e, desde então, tem passado por diversas revisões e atualizações contínuas, com a finalidade de aprimorar suas capacidades de simulações. Sua última atualização foi SWAT+, que apresentou melhoria, na questão da representação espacial dos processos hidrológicos, das interações do modelo e da modelagem da bacia hidrográficas (Bieger et al., 2017; Bieger et al., 2019). Outras melhorias desse modelo residem na sua capacidade de diferenciar regiões montanhosas de planícies de inundação e, o aprimoramento referente ao processo de escoamento e possibilita a divisão de sub-bacias em unidades de paisagem (Bieger, 2019; Nogueira et al., 2024). Isso permite que os resultados da modelagem hidrológica sejam mais realistas na representação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

O SWAT é um modelo semi-físico e semi-distribuído que integra dados específicos da bacia hidrográfica, como clima, propriedades do solo, topografia e uso e cobertura da terra, além de considerar a variabilidade espacial dos parâmetros do modelo. O SWAT modela os processos hidrológico com base nos dados de entrada observados, possibilitando uma simulação realista do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Ademais, o modelo executa de forma contínua ao longo do tempo, possibilitando a simulação de processos hidrológicos em escalas temporais diárias, mensais ou anuais (Janjic e Tadic, 2023, Arnold et al., 2012).

O SWAT destaca-se como uma ferramenta multifuncional de ampla aplicabilidade, possibilitando simulação integrada dos diferentes processos hidrológicos em bacia hidrográfica, por exemplo, o escoamento superficial, infiltração, percolação, fluxo lateral superficial e subterrâneo, evapotranspiração, acumulação de neve, transporte de nutrientes, pesticidas e bactérias (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005). O detalhamento teórico do

modelo está disponível manual ‘Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation’ (Neitsch et. al, 2011), acessível no site oficial do SWAT (<https://swat.tamu.edu/>), no qual fornece informações referentes todas as equações e processos físicos subjacentes à modelagem do SWAT, com ênfase nos processos de vazão e produção e transporte de sedimentos.

No que se refere ao escoamento superficial, estudos relevantes desmontaram a eficiência do modelo SWAT em simulação hidrológica. Por exemplo, Yan et al. (2020) e Huang et al. (2024) que aplicaram o modelo, respectivamente, na porção superior da bacia do rio Hailar (nordeste da China) e na bacia do rio Huangfuchuan (China). Ambos os trabalhos tiveram como finalidade de fornecer suporte e orientação estratégico para o planejamento hídrico, a proteção ambiental e a alocação de água nessas regiões. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com valores de Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) na calibração e na validação, respectivamente. Outro estudo que reforça a aplicabilidade do modelo, é o estudo de Hernández-Marín et al. (2024), que realizaram simulações na porção sul de Zacatecas, no México, com intuito de subsidiar na tomada de decisões relacionadas à avaliação hidrológica, a gestão ambiental e ao planejamento dos recursos hídricos na bacia.

Esmali et al. (2021) compararam o desempenho dos modelos SWAT e IHACRES na simulação do processo chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Khorramabad, na porção oeste do Irã. Ambos os modelos apresentaram desempenho satisfatório para simulação hidrológica. No entanto, o SWAT apresentou resultados melhores, com valores $NSE = 0,70$, $R^2 = 0,72$, $PBIAS = 3,44$., enquanto o modelo IHACRES apresentou $NSE = 0,68$, $R^2 = 0,72$, $PBIAS = 5,89$. Dessa forma, observa-se que SWAT apresentou desempenho melhores em relação ao IHACRES, demonstrando ser uma ferramenta eficaz na simulação de chuva-vazão, principalmente quando a finalidade é investigar as características físicas da bacia e seus impactos no escoamento superficial.

No contexto das mudanças climáticas, diversos estudos têm empregado o modelo SWAT para avaliar os impactos das variações da precipitação sobre os regimes de vazão em bacias hidrográficas ao redor do mundo. Um estudo realizado na bacia do rio Parvara Mular, na Índia, Mohseni et al. (2023) investigaram os efeitos das mudanças climáticas e variações uso e cobertura da terra sobre o regime hidrológico futuro da bacia. Os resultados alcançados com o SWAT mostraram que haverá um aumento na vazão do rio nos três modelos climáticos globais e nos três cenários climáticos analisados. Para o ano 2071, o modelo prevê aumento

significativo na vazão média da bacia, apoiando ações de mitigações e planejamento hídrico para diminuir os impactos das mudanças climáticas na região.

No Brasil, Magalhães et al. (2018) aplicaram o modelo SWAT para a Bacia Experimental do Rio Jatobá, situada na região semiárida do estado de Pernambuco. O estudo teve como finalidade avaliar os impactos da precipitação sobre a geração de escoamento superficial e umidade do solo, além disso de analisar os efeitos do reflorestamento da caatinga arbórea e expansão agrícola. O processo de calibração e validação, o NSE atingiu 0,58 e 0,42, respectivamente, e 0,53 e 0,46 para umidade do solo. Em relação ao processo de reflorestamento, obteve-se um aumento de 21 % da cobertura vegetal nativa, resultando no aumento no processo de percolação e diminuição da umidade do solo. Por outro lado, a expansão agrícola resultou no aumento do escoamento superficial e da umidade do solo, evidenciando os efeitos das alterações no uso e cobertura da terra sobre a dinâmica hidrológica da bacia.

Em estudo semelhante, Andrade et al. (2019) aplicaram modelo o SWAT na bacia do rio Mundaú, situado entre os estados de Pernambuco e Alagoas, com a finalidade de investigar a inter-relação entre umidade do solo e a vazão no processo de modelagem hidrológica. Os valores do NSE na calibração variaram, para as estações de medição, entre 0,71 e 0,92 na simulação anual e entre 0,55 e 0,78 na mensal. Na validação, os valores de NSE variaram de 0,53 a 0,78 (anual) e de 0,62 a 0,72 (mensal). Os resultados da simulação da umidade do solo foram satisfatórios com valores de NSE variando de 0,53 a 0,76 na escala anual e 0,62 e 0,72 na escala mensal. Segundos os autores a utilização dos dados de umidade do solo no processo de simulação contribuíram para melhorar o desempenho do modelo.

A bacia do rio Pajeú, em Pernambuco, foi avaliada por Silva et al. (2025) que buscaram identificar os parâmetros mais sensíveis na simulação hidrológica de uma bacia inserida no contexto semiárido. Os resultados demonstraram que os parâmetros influenciam na produção de vazão foram aqueles relacionado ao uso e cobertura da terra (CN2), ao fluxo subterrânea (ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP) e ao escoamento superficial (SLSOIL e LAT_TTIME). O desempenho do modelo foi satisfatório só processo de calibração, com NSE e R^2 entre 0,63 e 0,72 nas estações de medições, respectivamente, mas insatisfatório na validação.

Carreiro et al. (2025) investigaram as vazões e a produção de sedimentos em diferentes cenários de drenagem do sistema hídrico Coremas-Mãe D'Água, observando um aumento na produção de sedimentos. O modelo SWAT representou satisfatoriamente o

comportamento hidrológico da bacia, obtendo valores de NSE, R^2 , RSR superiores a 0,67, 0,69 e 0,48, respectivamente. Santos et al. (2021) analisaram os efeitos das mudanças climáticas na vazão e a produção de sedimentos na bacia do Tapacurá, sub-bacia do Rio Capibaribe. Os resultados indicaram aumento significativo na produção de sedimentos, especialmente em área de cultivo de cana-de-açúcar.

2.2 – Mudanças climáticas futuras

As mudanças climáticas podem ser compreendidas como alterações significativa nos padrões do climáticos, em virtude das emissões de gases de efeito estufa (GEE) como o dióxido de carbono, o metano e óxido nitroso, emitidos pela ação antrópica (IPCC, 2013). Essas alterações climáticas não limitam ao aumento da temperatura média da terra, mas também está interligado com as alterações nos fenômenos naturais, tais como: onda de calor, chuvas mais intensas em período curto, enchentes, movimento das massas, secas prologadas, entres outros eventos extremos. Tais eventos impactam diretamente na qualidade de vida da população e ocasionam vários impactos ao meio ambiente (Abalasei et al., 2025; Bolan et al., 2024; Araújo, 2025). Dessa forma, essas alterações climáticas têm despertado crescente interesse da comunidade científica nos últimos anos, em virtude dos impactos socioeconômicos que acarretam, causando impacto financeiros e, na maioria dos casos, a perda de vidas humana (Marengo et al., 2009).

As mudanças climáticas podem ser ocasionadas tanto por processos naturais (atividades vulcânicas, fenômenos oceânicos e o movimento tectônicos) quanto pela ação antrópica, por exemplo, o desmatamento, queimada, queima de combustíveis fósseis, agropecuária intensiva e urbanização acelerada, essas ações alteram a composição atmosférica e o uso e cobertura do solo (Rocha et al., 2023; Ghafur, 2026). Além disso, essas mudanças, juntamente com o processo de globalização e crescimento populacional, representam um risco significativo ao ecossistema e a subsistência da sociedade e a segurança hídricas (Hassan et al., 2022).

As alterações climáticas podem acarretar a elevação da temperatura ar, intensificando a evaporação e evapotranspiração, diminuindo o volume dos corpos hídricos, como rios, lagos e, principalmente, aquíferos. Essa redução na recarga hídrica, associado a mudanças no regime de chuvas e o aumento da evapotranspiração, implica diretamente na disponibilidade de água doce a curto e longo prazo, especialmente em regiões vulneráveis as mudanças climáticas (Jiménez-Navarro et al., 2021; Dao et al., 2024).

Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) constatou que as mudanças climáticas são verídicas e, que são causadas pela atividade antrópica no meio ambiente, sem comparação aos últimos 2 mil anos. O relatório mostra os possíveis impactos dessas mudanças sobre a sociedade e sobre o planeta, abrangendo ainda mais eventos extremos, secas severas, onda de calor intensa e chuvas mais intensa (Melo, 2022).

No AR6 (2021), foram adotados novos cenários de emissões de Gases de Efeito Estufa, que foram chamados de The Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), abrangendo o período de 2015 a 2100. Esses cenários fornecem projeções climáticas mais detalhada acerca dos danos ocasionado pela emissão GEE sobre o meio ambiente e nos sistemas terrestres. Os cenários principais incluem o SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7 e o SSP5-8.5 (Afsari et al., 2024; Pedersen, 2022). No IPCC AR6, foi apresentado uma nova projeção que mostra que possível atingir a meta de emissões líquidas zero até 2050, por meio de estratégias de mitigação de baixo custo sobre a ótica do cenário SSP1-1.9 (Zhou et al., 2021).

Conforme o IPCC (Hoegh-Guldberg et al., 2018), as regiões árida e semiárida do mundo são consideradas as mais vulneráveis as alterações climáticas em virtude da sua variabilidade climática, pois essas alterações têm acarretado redução da precipitação e aumento da temperatura do planeta que, impacta diretamente nos recursos hídricos, alterando os padrões de vazões dos rios, recarga de aquífero e a disponibilidade para irrigação e consumo humano.

Para subsidiar o planejamento estratégico e políticas de mitigação e adaptação, as projeções climáticas são essenciais, porém representa um desafio para os pesquisadores em virtude dos diferentes fatores vulnerável ao clima (Almagro et al., 2020). As principais ferramentas usadas para essas projeções climáticas são os modelos climáticos globais (Marengo, 2007; Teutschbein e Seibert, 2010).

Os modelos climáticos globais, são uma ferramenta eficaz na simulação a resposta climática da terra (IPCC 2001), fornecendo informações importantes sobre as projeções climáticas globais como também investiga os efeitos das mudanças climáticas na hidrologia (Chen, 2018). Além disso, os modelos climáticos globais apresentam uma resolução espacial brusca, dessa maneira, as saídas são normalmente reduzidas para uma resolução mais alta, utilizado métodos de diminuição de escala empírico-estatísticos ou são utilizadas condições de contorno para modelos climáticos regionais, que, estão expostos a diversas incertezas que

são adquiridas em virtude das condições de contorno dos modelos climáticos globais (Lutz et al., 2016; Rahnama e Yaghoobzadeh, 2025).

Além disso, existe diversos modelos climáticos globais a disposição para projeções de mudanças climáticas. Nesse contexto o projeto CMIP6 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, fornece projeções climáticas de diversos modelos, fundamentado em cenários alternativos diretamente importante para as preocupações da população em relação a mitigação, adaptação ou efeitos das mudanças climáticas (Castro, 2022; Farias, et al., 2025). No CMIP6 foram incorporados novos cenários futuros, como SSP1-1.9, SSP4-3.4, SSP5-3.4OS e SSP3-7.0, além daqueles já existente, como SSP1 2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 e SSP5-8.5. Esses cenários resultam em níveis de forçamento radiativo até 2100, semelhante aos de seus predecessores (Song et al., 2021).

Para esse trabalho, foram considerados dois cenários climáticos o SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O primeiro cenário representa trajetória intermediária, no qual as tendencias de emissões seguem padrões históricos, resultando e uma forçamento radiativo de 4,5 W/m². O segundo cenário representa altos padrões de emissões suficientes para atingir um forçamento radiativo de 8,5 W/m² até 2100.

3 – METODOLOGIA

Neste Capítulo, apresenta-se a metodologia aplicada neste estudo, que partiu da identificação da área de estudo e suas características essenciais, incluindo localização e aspecto físico – climática - clima, geologia, solos, relevo e uso e cobertura da terra das áreas escolhidas. A abordagem metodológica baseou-se na aplicação do modelo SWAT+, cuja execução requer dados geoespaciais e tabulares como entrada. Para esse fim, foram utilizados mapas temáticos de entrada, incluindo os mapas de uso e cobertura da terra e de tipos de solo, além de dados climatológicos necessários à simulação hidrológica. Adicionalmente, são apresentados os conjuntos de dados empregados para estimar as vazões futuras, considerando cenários meteorológicos futuros, os quais permitem analisar as possíveis alterações no regime hidrológico da área de estudo.

3.1 – Área de estudo

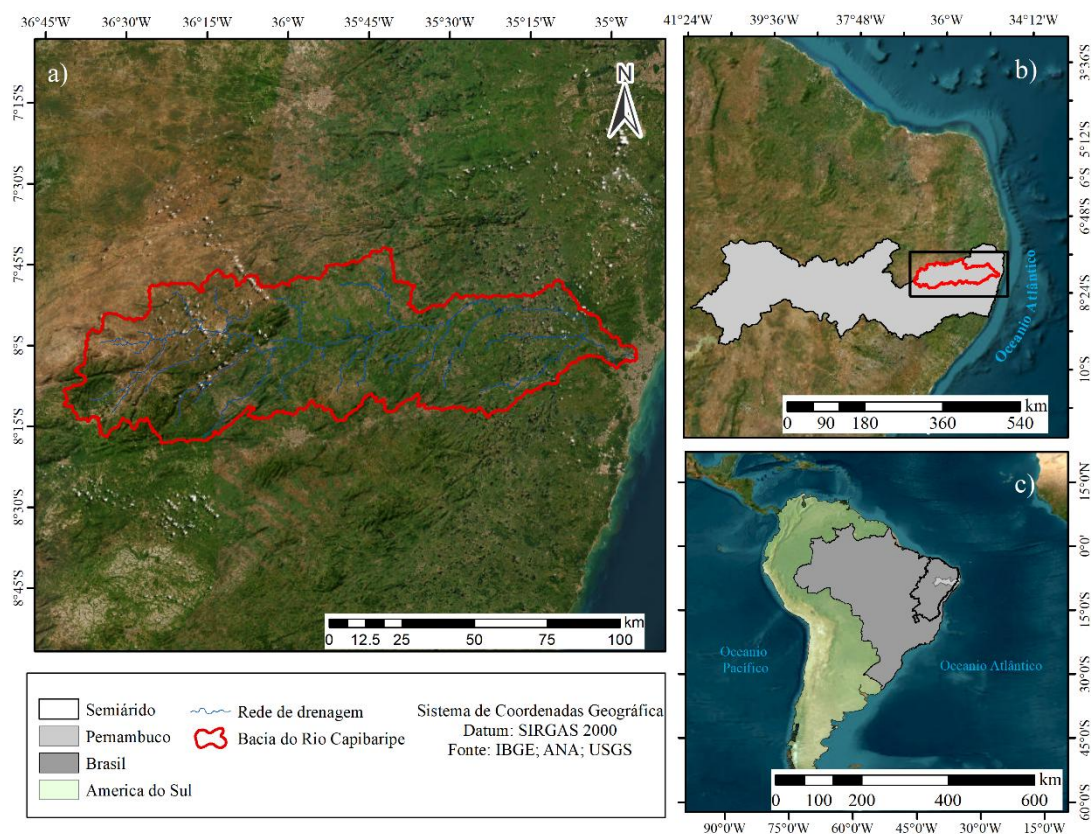
A bacia hidrográfica do Rio Capibaribe - BHRC (Figura 2) está situada na porção norte - oriental do estado de Pernambuco, entre as coordenadas 07°41'20" S e 08°19'30" S de latitude, e 34°51'00" W e 36°41'58" W de longitude. Essa bacia possui uma área de 7.454 km² que corresponde 7,58% de todo o território do estado. Além disso, corresponde uma das principais unidades de planejamento hídrico, que abrange parte das regiões de desenvolvimento do agreste central (RD08), agreste setentrional (RD09), mata sul (RD10), mata norte (RD11) e região metropolitana (RD12). A diversidade regional da bacia, marcado por contraste climático, de relevo, de regime de chuva, pedologia, de uso e cobertura vegetal e aspectos socioeconômicos, configura um ambiente altamente complexo, que demanda de modelos de gestão ambiental e hídrico adaptada as peculiaridades regionais e locais (Pernambuco, 2010).

A BHRC abrange 42 municípios, desde sua nascente, no município de Poção e Jataúba, à sua foz, no Recife, sendo que 15 estão inteiramente inseridos na bacia e 26 possuem suas sedes municipais em seu território (Pernambuco, 2010). O Rio Capibaribe estende-se por 280 km, desde o agreste pernambucano até desaguar na cidade de Recife. Seu regime fluviométrico é intermitente nos trechos alto e médio, tornando-se perene a partir de limoeiro (Salgueiro et al., 2014).

Ademais, a rede de drenagem da bacia do rio Capibaribe é composta por diversos cursos d'água, sendo os principais afluentes, pela margem direita, o riacho Aldeia Velha, riacho Tabocas, riacho Carapotós, rio Cachoeira, riacho das Éguas, riacho Caçatuba, riacho Grota do Fernando, rio Cotunguba, riacho Goitá, rio Tapacurá e vários outros de menor porte.

E pela margem esquerda, o riacho Jundiá, riacho do Pará, riacho Tapera, riacho do Arroz, riacho da Topada, riacho Caiaí, rio Camaragibe ou Besouro, além de outros corpos hídricos de menor porte (Pernambuco, 2010; Ferreira, 2020).

Figura 2 - Localização geográfica da bacia do rio Capibaribe, PE



Fonte: Autoral (2026).

A BHRC possui uma alta variabilidade de precipitação, com valores variando de 600 a 2400 mm ao ano e um total médio anual de 1133,59 mm (Pernambuco, 2010). Essa heterogeneidade climática reflete-se em dois tipos principais de climas ao longo da bacia: no alto e médio curso, localizado no agreste, predomina clima quente e semiárido, com precipitação de 550 mm/ano, com solos rasos e vegetação da caatinga. No baixo curso caracterizam-se por solos mais profundos, vegetação de mata atlântica e com predominância clima úmido-subúmido e seco-subúmido, com pluviosidade média de aproximadamente de 2267,05 mm (Pernambuco, 2010, Ribeiro Neto et al., 2014).

De acordo com o Diagnóstico Hidroambiental da Bacia do Rio Capibaribe (Pernambuco, 2010) a temperaturas média anual varia entre 20,46°C a 26,14°C, com mínimas absolutas de 16,90°C e 23,27°C, e máximas de 25,50°C e 29,92°C. As temperaturas

apresentam padrão sazonal bem definido, com período mais quente compreendido entre outubro a março e período mais frio de abril a setembro.

A região onde está localizada a BHRC tem predominância de rochas cristalinas, com ocorrência de unidades sedimentares no baixo curso. Na região do município do Recife, pode ser encontrado embasamento cristalino, que se limita em subsuperfície com a Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba. Além disso, região metropolitana do Recife (RMR), destaca-se a presença da formação de barreiras, composta por camadas sedimentares dispersas que recobrem o embasamento cristalino e a bacia sedimentar (Farias, 2025; Pernambuco, 2010).

A bacia do rio Capibaribe desempenha um papel essencial na economia regional, com atividades industriais ligada diretamente com a produção de alimentos, têxtil, indústria sucroalcooleira, minerais não metálicos etc. Há também atividades relacionadas agricultura irrigada, agropecuária, aquicultura e demais atividades desenvolvidas ao longo do curso (Pernambuco, 2010).

3.1.1 - Reservatórios do Capibaribe

Os reservatórios da bacia do Capibaribe possuem capacidade de armazenamento da ordem de 800 milhões de m³, distribuído entre sete reservatórios com volume superior a 10 milhões m³ e diversos outros de menor porte, sendo que cerca de 900 acumulam menos de 500 mil metros cúbicos (Pernambuco, 2010). Dentre esses, são cinco representam em conjunto um percentual de 94,7% do volume total acumulada na bacia. São eles: Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Poço Fundo (Compesa, 2009 *apud* Pernambuco, 2010; Ferreira, 2020).

O reservatório Jucazinho está situado no município de Surubim, nas coordenadas geográficas 7°57'53,41"S e 35°44'33,52" W, possui a capacidade máxima de 327,04 milhões de m³ (Pernambuco, 2010). Inaugurado em 1999, foi projetado principalmente para o controle de cheias na parte alta da bacia, entretanto, atualmente, sua operação não contempla essa finalidade, em virtude, dos conflitos entre dispositivos de descarga e abastecimento Fundo (Pernambuco, 2010; Ferreira, 2020).

O reservatório Carpina, situado no município de Feira Nova, encontra-se nas coordenadas geográficas de 7°53'41" S e 35°20'14" W, e foi construído em 1978 com a finalidade de evitar possíveis enchentes na região metropolitana do Recife (RMR), com capacidade de 270 milhões de m³. Embora projetado para operar com acumulação nula, a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), vem operando com acumulação

média de 56,6 milhões m³, para atender o abastecimento de cidades próximas e à pesca artesanal (Pernambuco, 2010; Ferreira, 2020).

O reservatório Tapacurá está localizado no município de São Lourenço da Mata, nas coordenadas geográficas de 8°02'12" S e 35°09'46" W, ele integra o sistema de proteção contra as enchentes do rio Capibaribe no Recife, com capacidade de 94,2 milhões m³ quando entrou operação em 1973. Em 1987, passou por ampliação volumétrica para 98,7 milhões metros cúbicos, em 2020 essa capacidade máxima aumento para de 104,9 milhões de m de acordo com a APAC (2020). É responsável por aproximadamente 40% do abastecimento da RMR (Pernambuco, 2010).

O reservatório Goitá, localiza-se nos municípios de Glória de Goitá e Paudalho, foi construído entre 1976 e 1978 e possui capacidade máxima de 52 milhões de m³. Esse reservatório faz parte do sistema de controle de cheias, permitindo laminar uma vazão efluente de até 100 m³/s, e reduzindo a probabilidade de inundação na RMR (Pernambuco, 2010).

O reservatório Poço Fundo, concluído em 1987, está situado entre os municípios de Jataúba e Santa Cruz do Capibaribe e possui uma capacidade máxima de armazenamento de 27,75 milhões de m³. Atende parcialmente o abastecimento desses municípios e de Brejo da Madre de Deus (Pernambuco, 2010). De acordo com Agência Nacional de Águas e Saneamento básico (ANA, 2017), aproximadamente 69%, de suas demandas são destinados ao abastecimento urbano, 9% são para abastecimento rural, 9% para irrigação e 13% para dessedentação de animais.

O reservatório de Cursai está localizado no município de Paudalho, encontra-se na latitude de -7,88 e longitude de -35,18, possuem uma capacidade máxima de 13,00 milhões m³ (Pernambuco, 2010). Esse reservatório localiza-se no curso d'água do Riacho Cursai que faz parte da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. Tem como objetivo reforçar o abastecimento d'água das cidades de Carpina, Tracunhaém, Lagoa do Itaenga e Paudalho (Pernambuco, 2010, Alves et al. 2019).

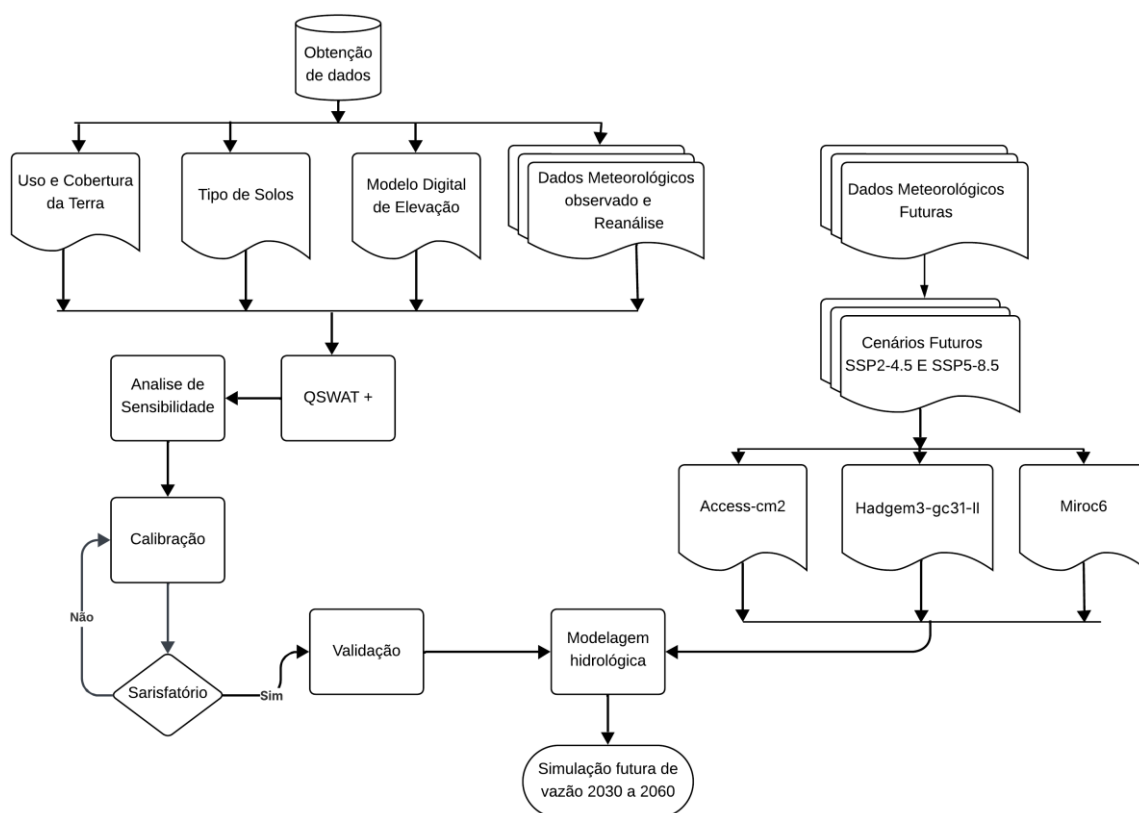
Por fim, o reservatório Engenho Gercino Pontes está situado no município de Caruaru, encontra-se na latitude de -8,02° e longitude de -36,14°, possui uma capacidade máxima de 13,6 milhões m³ (Pernambuco, 2010). Conforme a Agência Nacional de Águas e Saneamento básico (ANA, 2017), aproximadamente 64%, de suas demandas são destinados ao abastecimento urbano, 11% são para abastecimento rural, 15% para irrigação e 9% para dessedentação de animais.

3.2 Etapas de execução do modelo

Nesse item, abordam-se as etapas metodológicas da modelagem hidrológica para bacia do Rio Capibaribe, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na figura 3. Na modelagem, utilizou-se o QSWAT+, uma interface que integra o modelo SWAT+ ao software QGIS 3.40.8, um Sistema de Informações Geográficas amplamente utilizados em estudos hidrológicos e ambientais. Os tópicos subsequentes detalham todo o processo de execução do modelo, incluindo a obtenção e processamento dos dados tabulares e espaciais, como uso e cobertura da terra, tipos de solos, modelo digital de elevação e dados meteorológicos observados, bem como a calibração, análise de sensibilidade e validação do modelo.

Além disso, também é descrito os procedimentos usados para a incorporação dos dados meteorológicos futuros, após a validação do modelo, considerando os cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5, utilizados na simulação das vazões futuras para o período de 2030 a 2060 para os modelos climáticos Access-cm2, Hadgem3-gc31-ll e MIROC6.

Figura 3 - Fluxograma de etapas de execução do modelo



Fonte: Autoral (2026).

3.2.1 – O modelo SWAT+

O SWAT+ é uma versão completamente reestruturada, desenvolvida com a finalidade de atender aos desafios futuros da modelagem hidrológica (Bieger et al., 2017). No processo de modelagem hidrológica da bacia do rio Capibaribe foi utilizado interface QSWAT+ no QGIS na versão 3.40.5. Esse modelo leva em consideração as características físicas da bacia hidrográfica, possibilitando que diferentes processos físicos sejam simulados para uma área de estudo (Abbaspour et al., 2015; Brighenti et al., 2016; Nunes, 2018).

O modelo hidrológico SWAT+ é baseado na equação do balanço hídrico (1) para estimar escoamento superficial, evapotranspiração, percolação, produção de sedimentos, perda do solo na bacia e escoamento de base (Arnold et al., 2009).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Onde: SW_t e SW_0 quantidade final e inicial de água retida no solo (mm); t é o tempo (dias); R_{day} quantidade de água precipitada no dia (mm); Q_{surf} escoamento superficial no dia (mm); E_a evapotranspiração no dia (mm); W_{seep} percolação no dia (mm); Q_{gw} escoamento de base (mm).

Para a realização da simulação hidrológica com o modelo SWAT+, é necessário inserir um conjunto de dados que represente as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Esses dados são classificados, como: dados espaciais, como mapas de uso do solo, mapa de tipos de solo e o modelo digital de elevação (MDE) da bacia do Rio Capibaribe. Os dados tabulares utilizados no modelo para modelagem hidrológica requerem dados diários e de variáveis meteorológicas, como: umidade relativa do ar (%), precipitação (mm), temperatura máxima e mínima (°C), radiação solar (MJ.m²) e velocidade do vento.

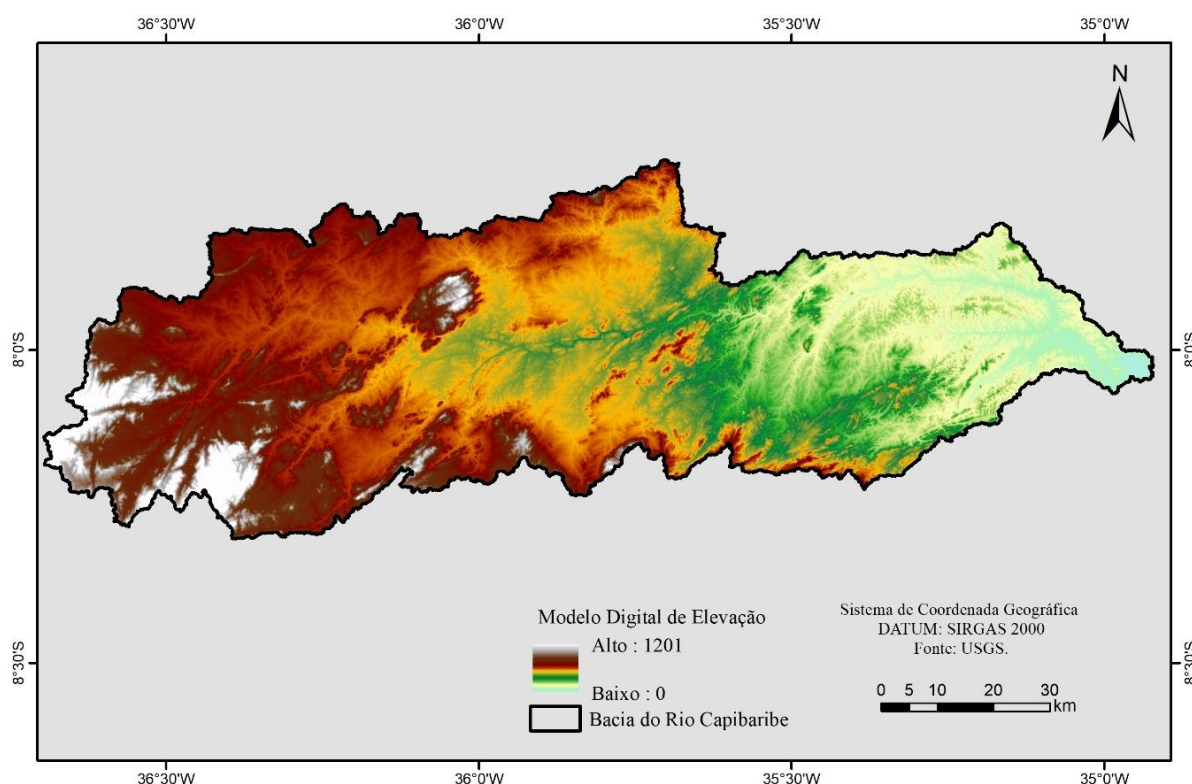
3.2.2 – Modelo digital de elevação e declividade

O modelo digital de elevação usados nesse trabalho foi do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com uma resolução espacial de 30 m, foi obtido através da plataforma United States Geological Survey. A partir do MDE (Figura 4), é possível obter informações cruciais para o estudo hidrológico, como a declividade e elevação (máxima e mínima) da bacia hidrográfica, a extração da rede de drenagem e delimitação da bacia.

A partir da inserção do MDE é iniciado o processo de delimitação da bacia hidrográfica e da sua rede de drenagem. Inicialmente, determina-se a área mínima de acumulação do fluxo. Neste estudo, a área mínima foi definida como sendo de 50.000 ha, de modo a garantir que nenhum curso de rio seja gerado abaixo desse valor. Essa definição designa a área de influência, onde os canais são criados durante o processo de discretização da bacia.

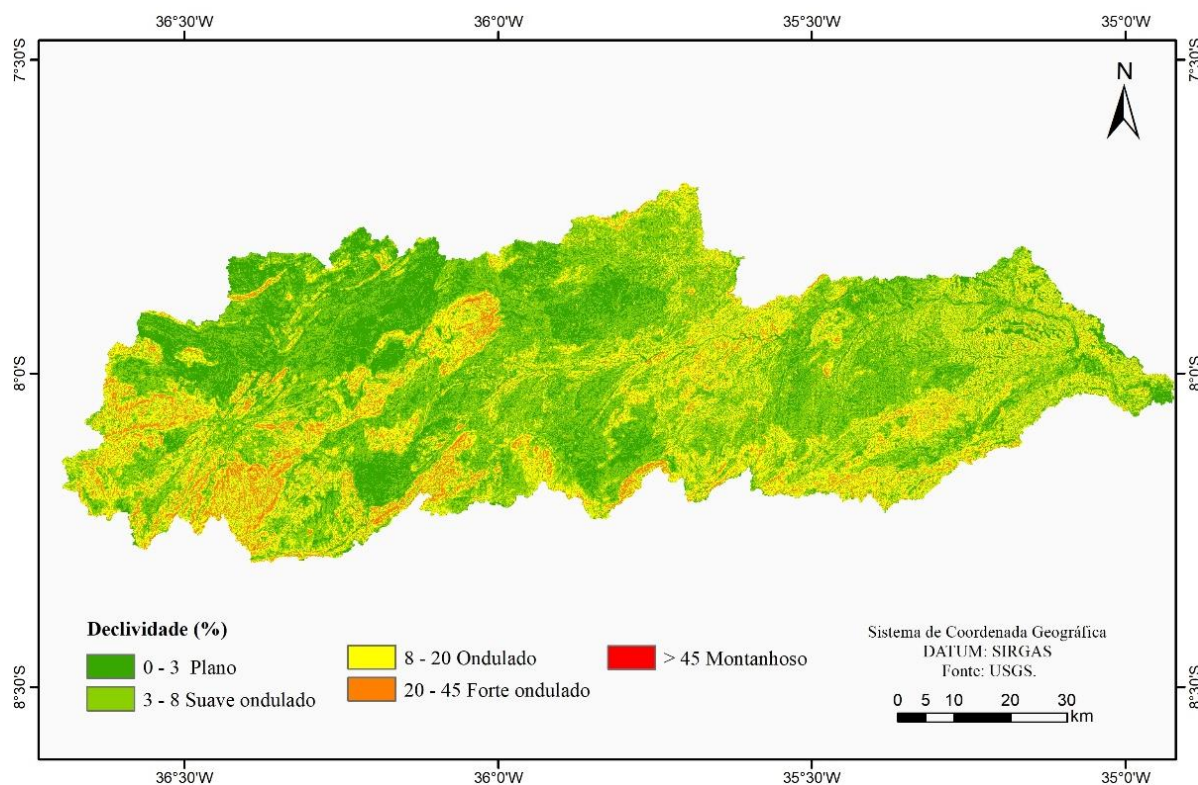
Durante o processo de discretização, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias para uma análise detalhada do comportamento hidrológico e das características físicas da bacia. Em cada sub-bacia são calculados os parâmetros topográficos, como a declividade e a área, que contribuem para compreensão da dinâmica hídrica. Para a área de estudo foram definidas cinco classes de declividade (Figura 5). A maior parte da bacia possui declividades de 3–8% (suave-ondulado) e 8–20% (ondulado), de acordo com classificação da EMBRAPA (1979).

Figura 4 - Delimitação da bacia hidrográfica de Rio Capibaribe



Fonte: Autoral (2025).

Figura 5 - Declividade bacia hidrográfica de Rio Capibaribe

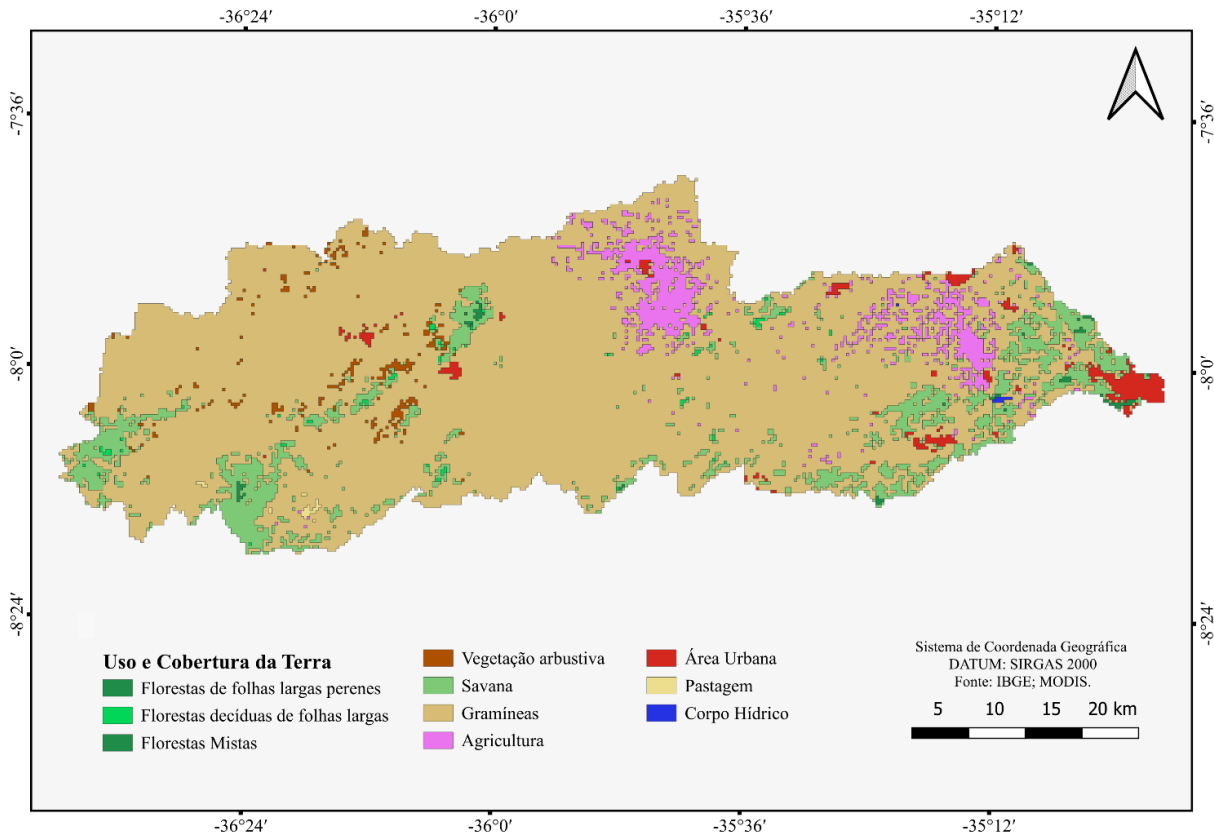


Fonte: Autoral (2025).

3.2.3 – Uso e ocupação do solo e tipos de solos

O mapa de uso e cobertura do solo da bacia do Rio Capibaribe foi obtido por meio do produto MCD12Q1v006 para ano de 2018, do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Os usos do solo foram classificados de acordo com as características da bacia. Para a bacia estudada foram identificadas dez classes de uso e ocupação do solo, sendo elas: floresta de folha largas perenes, floresta decíduas de folhas largas, floresta mista, vegetação arbustiva, savana, gramíneas, agricultura, corpo hídrico, área urbana, e solo exposto (Figura 6). A imagem foi reclassificada de acordo com as classes disponibilizadas no banco de dados do SWAT+, de modo a considerar as características de maior semelhança entre ambas. A Tabela 1 mostra a área de cada tipo de uso e ocupação, indica a porcentagem e mostra também a associação aos tipos de uso e cobertura vegetal com as classes existentes no banco de dados do SWAT+.

Figura 6 - Uso e ocupação da bacia hidrográfica rio Capibaribe



Fonte: Autoral (2025).

Tabela 1 - Associação dos usos de solo existentes na área de estudo com o banco de dados do SWAT+

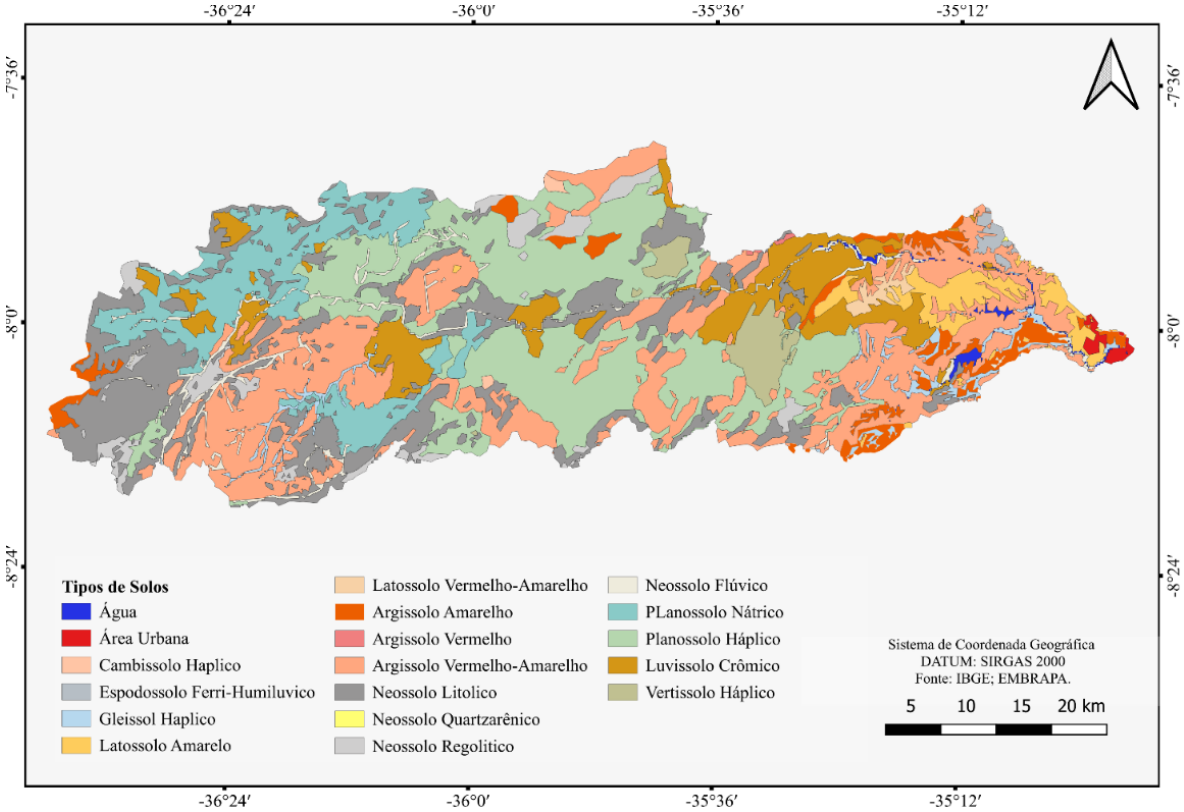
Usos e coberturas da terra	Área (ha)	%	Classes no SWAT+
Florestas de folhas largas perenes	1.882	0,25	FRSE - Forest evergreen
Florestas decíduas de folhas largas	1.742	0,24	FRSD - Forest deciduous
Florestas Mistas	79	0,01	FRST - Forest Mixed
Vegetação Arbustiva	6.326	0,85	RNGB - Range Brush
Savana	72.413	9,77	SAVA - Savanna
Gramíneas	612.915	82,68	RNGE - Range Grasses
Agricultura	33.403	4,51	AGRL - Agriculture Land-Generic
Área Urbana	11.614	1,57	URBN - Residential
Pastagem	715	0,10	PAST - Pasture
Corpo hídrico	254	0,03	WATR - Water

Fonte: Autoral (2025).

Para a simulação hidrológica da bacia hidrográfica foram utilizados parâmetros dos solos associando aos tipos de solos (nome do solo, grupo hidrológico, entre outros) e camada de solo (profundidade da camada, textura do solo, densidade do solo, porcentagem de argila,

silte e areia). Os tipos de solos e os valores dos parâmetros físicos dos solos foram obtidos junto a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). O mapa do tipo de solo é mostrado na Figura 7, na Tabela 2 é apresentado área e porcentagem de cada tipo de solo.

Figura 7 - Tipos de solos da bacia hidrográfica rio Capibaribe.



Fonte: Autoral (2025).

Após inserção desses dados mencionados anteriormente no modelo SWAT+, foram geradas as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que corresponde a áreas que possuem as mesmas características físicas. Esse processo foi definido por meio de uma filtragem por porcentagem de 10% para uso e cobertura da terra, tipo de solo e declividade, de forma a considerar um percentual mínimo de ocupação da área da sub-bacia hidrográfica para geração das HRUs. A partir desse procedimento foram gerados entorno de 7.812 HRUs que foram agrupadas de acordo com as características físicas da bacia hidrográfica.

Tabela 2 - Tipos de solos existentes na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe

Tipos de Solos	Sigla	Área (ha)	%
Área urbana	URB	2.644	0,36
Água	Água	2.980	0,4
Espodossolo Ferri-humiluvico	ESK	3.203	0,43
Gleissolo Háplico	GX	11.952	1,61
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	4.081	0,55
Planossolo Háplico	SX	167.629	22,61
Neossolo Litólico	RL	131.351	17,72
Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA	174.326	23,51
Luvissolo Crômico	TC	64.443	8,69
Latossolo Amarelo	LA	20.127	2,71
Argissolo Amarelo	PA	28.401	3,83
Neossolo Flúvico	RY	17.228	2,32
Vertissolo Háplico	VX	18.074	2,44
Cambissolo Háplico	CX	1.268	0,17
Neossolo Quartzarenico	RQ	60	0,01
Planossolo Nátrico	SN	7.1072	9,59
Neossolo Regolítico	RR	22.068	2,98
Argissolo Vermelho	PV	433	0,06

Fonte: Autoral (2025).

3.2.4 – Dados meteorológicos e dados hidrológicos

Para a simulação hidrológica, o SWAT+ requer também uma série de dados climáticos da região, como precipitação (mm), temperatura máxima e mínima (°C), velocidade do vento (m/s), radiação solar (MJ/m²), e umidade relativa do ar (%). Esses dados podem ser obtidos por meio de registros de estações climatológicas localizada na bacia ou nas proximidades, ou através do gerador climático do modelo.

Os dados meteorológicos utilizados foram adquiridos no banco de dados do Global Weather Data, que disponibiliza dados do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) em escala global. Os dados foram obtidos para anos de 1987 a 2019, onde foram usados dados de 8 estações meteorológica do banco de dados do SWAT+.

3.2.4.1 – Precipitação

Os dados precipitação foram coletados de 16 estações pluviométricos (Tabela 3) distribuída na bacia, obtidos junto Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

e Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Esses dados estão disponibilizados na plataforma digital do Hidroweb (ANA, 2025). A seleção das estações baseou-se em uma análise que identificava os postos com menos falhas em sua série histórica. Os dados foram obtidos para anos de 1987 a 2019. As falhas apresentadas nesses dias eram substituídas por -99 e, posteriormente, corrigidas pelo gerador climático interno do SWAT+.

Tabela 3 - Postos pluviométricos usado na modelagem da bacia do Rio Capibaribe.

Código	Nome da Estação	Longitude (°)	Latitude (°)	Elevação (m)
735050	Engenho Sítio	-35,157	-7,968	65
735066	Paudalho	-35,173	-7,894	82
735067	Salgadinho	-35,634	-7,943	201
735100	Limoeiro	-35,452	-7,879	138
735157	Carpina	-35,183	-7,843	116
735158	Surubim	-35,764	-7,855	419
735159	Surubim	-35,989	-7,910	406
736040	Jataúba	-36,501	-7,986	518
736041	Santa Cruz do Capibaribe	-36,202	-7,962	437
736042	Taquaritinga do Norte	-36,047	-7,904	738
835048	São Lourenço da Mata II	-35,032	-7,999	42
835068	Vitória de Santo Antão	-35,284	-8,114	156
835135	Cumaru	-35,696	-8,012	375
835136	Glória do Goitá	-35,291	-8,000	158
835137	Pombos	-35,400	-8,141	191
836092	Brejo da Madre de Deus	-36,370	-8,146	651

Fonte: Autoral (2025).

3.2.4.2 – Vazão

Para os dados de vazão foram utilizados dados de fluviométricos de quatro postos de monitoramento, obtidos na plataforma Hidroweb (ANA, 2025), como demonstrado na Tabela 4. Esses dados foram usados para comparar os resultados da vazão simulada pelo modelo com os dados de vazão observadas no período de 1992 a 2019.

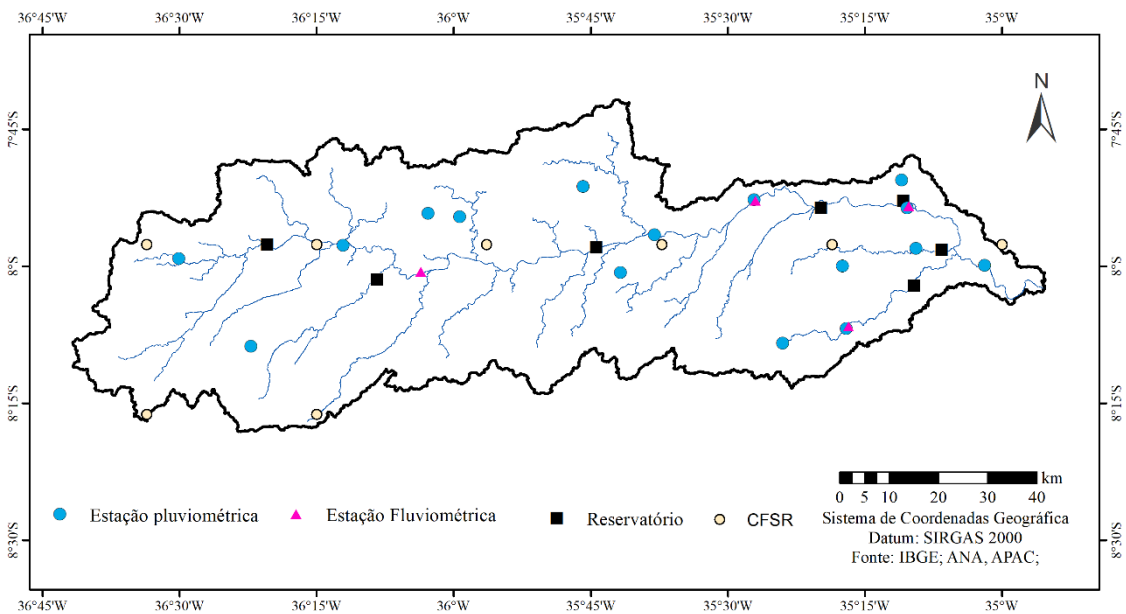
Tabela 4 - Postos Fluviométricos usado na modelagem da bacia do Rio Capibaribe.

Código	Nome da Estação	Longitude (°)	Latitude (°)
39130000	Toritama	-36,06	-8,01
39145000	Limoeiro	-35,45	-7,88
39150000	Paudalho	-35,17	-7,89
39170000	Vitória de Santo Antão	-35,28	-8,11

Fonte: Autoral (2025).

Com relação aos reservatórios, o modelo SWAT+ exige um conjunto mínimo de dados sobre volume e à área. Essas informações foram obtidas junto APAC, por meio de relatórios técnicos e arquivos contento as relações de Cota × Área × Volume de cada reservatório. Neste trabalho foram utilizados 7 reservatórios para a modelagem hidrológica. A Figura 8 ilustra a localização dos postos de precipitação e vazão, além dos principais reservatórios da bacia do Rio Capibaribe como também os 8 Pontos de grade de reanálise (CFSR).

Figura 8 - Localização dos postos fluviométricos, pluviométricos e reservatórios.



Fonte: Autoral (2026).

3.3 – Simulação hidrológica

3.3.1– Calibração e validação do modelo SWAT+

A calibração e validação do modelo SWAT+ foram realizadas através da comparação entre as vazões observadas e simuladas mensais das estações fluviométricas. O período de calibração foi de 1992 a 2007 e o de validação foi de 2008 a 2016. Além disso, foi estabelecido um período de aquecimento de três anos para os dados de vazão (1989–1991), como recomendado pelos desenvolvedores do modelo.

O processo de calibração, iniciou-se pelas estações situado mais a montante, avançando progressivamente para a estação mais próxima do exutório. As sub-bacias a montante de cada posto fluviométrico eram calibradas e validadas, com os parâmetros ajustados eram colocados manualmente no SWAT+ Editor, seguido de uma nova simulação com os valores atualizados. Após a calibração das sub-bacias de montante, o processo prosseguia para as sub-bacias a jusante de cada estação calibrada, seguindo uma abordagem sequencial.

A calibração teve início na estação fluviométrica de Toritama. A cada iteração, o modelo gerou novos intervalos e rankings para os parâmetros, que foram atualizados para a iteração subsequente na respectiva área de contribuição. Com os melhores valores calibrados eram incorporados ao modelo para as sub-bacias 3, 4, 7, 17, 18, 19, 24, 26, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 39, 41, 42, 46, 49, 51, 52, 53, 55, 57 e 59, pertencente a área de contribuição de Toritama. Em seguida, era realizado uma nova simulação com os parâmetros Ajustado. O processo avançou para a estação de Limoeiro, onde foram obtidos os melhores parâmetros para as sub-bacias 1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 23, 25, 31, 32, 37, 40, 43, 44, 45, 47, 48, 50, 54, 56, 58 e 60, correspondente a sua área de contribuição. Com os parâmetros ajustado, a calibração prosseguiu para a estação de Paudalho, onde foi realizado a calibração para sub-bacia 8. A última área de contribuição foi a de Vitória de Santo Antão, onde foi realizado a calibração para sub-bacia do 38, localizada na bacia do rio Tapacurá. O processo de calibração foi conduzido por 100 iterações com a finalidade de alcançar os melhores valores dentro dos intervalos de cada parâmetro usado no processo de modelagem hidrológica.

O processo de calibração das vazões mensais foi realizado de forma automatizada, por meio do software de domínio público, SWAT+ Toolbox. A utilização de ferramentas automatizadas para calibração possibilita a redução de erros e agiliza a realização de múltiplos testes de configuração de parâmetros em menos tempo.

Para selecionar quais os parâmetros devem ser usados na calibração, foi realizado uma análise de sensibilidade para avaliar o nível de sensibilidade usando o SWAT+ Toolbox. Neste estudo foram escolhidos 16 parâmetros relacionados fluxo, percolação, reservatório, aquífero, condutividade hidráulica, umidade do solo e escoamento, entre outros, baseado em trabalhos realizado na região (Tabela 5). Avaliação da sensibilidade foi feita por meio do método de variância Sobol. Esse método é uma técnica de análise sensibilidade global do modelo que fornecem os impactos de cada parâmetro em relação a outros parâmetros na saída de um modelo e sua contribuição na entrada e suas iterações (Sobol, 1993; Saltelli et al., 2010). Após realizar análise de sensibilidade a partir de 682 amostras, o método fornece a ordem de sensibilidade dos parâmetros analisados.

Para cada parâmetro escolhido é estabelecido um intervalo de valores mínimo e máximo. Esses valores dos parâmetros são ajustados, durante o processo de calibração dentro de seus respectivos limites até que obtenha o melhor resultado para modelo. Vale destacar, que as características do solo, uso e cobertura da terra e da declividade, podem variar ao longo da bacia, sendo que, alguns parâmetros podem ser uniformes para toda a bacia, enquanto outros podem mostrar variações espaciais (Farias et al., 2025).

Para determinar a variação dos parâmetros no modelo, utilizou-se o método de alteração. Sendo que, esses métodos englobam algumas abordagens, como a substituição direta, que tem como finalidade de substituir um valor de um antigo parâmetro por um novo valor dentro do intervalo definido pelo usuário; o método de porcentagem, que tem como intuito multiplicar um valor de um parâmetro calibrado pelo valor inicial do modelo padrão (Nguyen et al., 2022; Abbaspour, 2015).

Tabela 5 - Descrições dos parâmetros e limites usados na calibração do modelo.

Parâmetros	Método	Descrição	Intervalo	
CN2	Porcentagem	SCS Curva Número / valor da curva número para a condição de solo úmido	-20	20
ESCO	Substituição	Fator de compensação de evaporação do solo	0	1
EPCO	Porcentagem	Fator de compensação de retirada de água pelos vegetais	0	1
CANMX	Substituição	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm/H2O)	1	100
PERCO	Substituição	Coefficiente de percolação do solo	0	1
LAT_TTIME	Porcentagem	Tempo de viagem do fluxo lateral	-10	20
CN3_SWF	Substituição	Fator de água do solo para CN3	0	1
ALPHA	Substituição	Fator de recessão de escoamento de base (dias)	0,01	0,9
FLO_MIN	Porcentagem	Profundidade limite da superfície ao lençol freático para que ocorra o fluxo de águas subterrâneas (m)	0	20
REVAP_CO	Substituição	Coefficiente de revitalização das águas subterrâneas (adimensional)	0,02	0,2
REVAP_MIN	Substituição	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada (m)	0	50
BF_MAX	Substituição	Taxa máxima de fluxo de base (mm)	0,1	2
AWC	Porcentagem	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm H2O/mm)	-10	10
K	Porcentagem	Condutividade hidráulica (mm/h)	-10	20
CHK	Porcentagem	Condutividade hidráulica efetiva no canal tributário aluvial (mm/h).	-20	20
VOL	Substituição	Volume do reservatório (m³/s)	10	100

Fonte: Fonte: Autoral (2025).

3.3.2 – Análise do desempenho estatístico do modelo

Para avaliar o desempenho dos dados simulado pelo modelo SWAT+ Toolbox, foram empregadas análises gráficas e estatísticas. Essas análises têm como finalidade avaliar a qualidade dos resultados obtidos no processo de calibração e validação, comparando as vazões observados com as vazões estimadas pelo modelo. A avaliação gráfica foi realizada por meio da comparação entre os hidrogramas gerados pelo modelo para os dados simulados e observados, permitindo visualizar a correlação ou discrepâncias entre eles.

O SWAT+ Toolbox disponibiliza durante o processo de calibração, o algoritmo DDS que dispõe de diversas funções objetivas que foram usadas para a análise de desempenho da

modelagem hidrológica. O DDS é um algoritmo de otimização global heurístico estocástico, que tem como finalidade de procura solução de um problema dentro de um conjunto de prováveis soluções, isto é, buscar soluções dentro do número máximo de avaliações de função especificada pelo usuário (Tolson e Shoemaker, 2007). Os índices estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo SWAT+ Toolbox são apresentados a seguir, juntamente com suas fórmulas e descrições.

- a) O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma métrica estatística que quantifica a relação linear entre os dados observados e estimados pelo modelo (Aldrich, 1995; Paranhos et al., 2014). Esse índice varia de -1 a 1, onde r igual a 0, demonstra não haver uma relação linear, já r igual 1 ou -1, mostra uma relação linear perfeita, positiva ou negativa (Moriasi et al., 2007). O coeficiente de correlação de Pearson é calculado através da equação (2).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde: X_i é a vazão observada, Y_i é a vazão simulada, $\bar{X}$ é média da vazão observada, $\bar{Y}$ média da vazão simulada e n é o número total de observações.

- b) O coeficiente de determinação R^2 é obtido por meio de análise de variância, que quantifica a proporção covariância da variável a ser estudada (Coffey et al., 2004). Os valores de R^2 variar entre 0 e 1, que indica o grau de correlação entre os dados simulados e os observados. Sendo que, o valor de R^2 igual 1 representa uma regressão linear perfeita, enquanto o valor zero significa uma ausência de correlação entre os dados (Krause et al., 2005). Obtido partir da equação abaixo:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (3)$$

Onde: X_i é a vazão observada, Y_i é a vazão simulada, X_m é média da vazão observada e n é o número total de observações

- c) O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma métrica estatística que determina a magnitude da variância do modelo em comparação com a variância dos

dados observados (Nash e Efficiency, 1970). Seus valores variam entre $-\infty$ e 1 (um), sendo 1 considerado um ajuste perfeito. Valores entre 0 e 1 são considerados aceitáveis, mostrando um bom desempenho do modelo, enquanto valores < 0 sugerem que as médias dos dados observados é mais confiável do que os valores simulados pelo modelo (Moriassi et al., 2007; Nash e Sutcliffe, 1970). O NSE é calculado pela seguinte fórmula (4):

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2} \right) \quad (4)$$

Onde: X_i é a vazão observada, Y_i é a vazão simulada, X_m é média da vazão observada e n é o número total de observações

d) O percentual de viés (PBIAS) é uma métrica estatística que quantifica a tendência média dos valores simulados em relação aos dados observados. O valor de PBIAS igual 0 é considerado ideal, com baixas magnitudes que indicar uma boa simulação do modelo (Gupta et al., 1999). Os valores positivos indicam subestimação pelo modelo, em contrapartida os valores negativos sugerem superestimação do modelo (Gupta et al., 1999). Essa métrica é calculada pela seguinte equação (5):

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^N Q_{obs}} \times 100 \quad (5)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada, Q_{sim} é a vazão simulada, e n é o número total de observações.

e) A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) é um parâmetro estatístico que quantifica o erro absoluto entre os valores observados e simulado pelo modelo. Quanto menor o melhor desempenho do modelo (Kouzehgar e Eslamian, 2023). Essa métrica estatística também permitir realizar uma comparação real entre o valor estimado e o observado (Kambezidis, 2012). O RMSE é calculado através da seguinte Equação (6):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(Q_{obs,i}) - (Q_{sim,i})]^2}, (0 \leq RMSE < +\infty) \quad (6)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada, Q_{sim} é a vazão simulada e n é o número total de observações.

e) O índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE) é uma métrica estatística foi desenvolvido por Gupta et al. (2009), que tem com a finalidade fornecer uma decomposição do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), em componentes

distintos. Esse índice incorpora na sua fórmula a correlação de Pearson, a razão de viés e a razão de variabilidade (Gupta et al., 2009). O KGE variar entre $-\infty$ e 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam um ajuste perfeito do modelo. O KGE pode ser calculado pela seguinte equação (7):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (7)$$

Onde r é correlação de Pearson, α é a taxa entre o desvio padrão das series observada e simulada, β é taxa entre a média simulada e a média observada.

A Tabela 6 apresenta a classificação da eficácia da modelagem no SWAT, com base na análise dos valores das métricas estatísticas. Para avaliar a eficiência do modelo, adotou-se os critérios propostos por Moriasi et al. (2007). Os seguintes parâmetros estatísticos como R^2 , NSE e PBIAS, foram analisados de acordo com classificação estabelecido por esse autor, enquanto as demais parâmetros foram avaliadas com base padrões consolidados na literatura.

Tabela 6 - Classificação da eficiência da modelagem pelo SWAT

Parâmetro estatístico	Muito boa	Boa	Satisfatório	Insatisfatório
R^2	$> 0,85$	$0,80 \leq R^2 \leq 0,85$	$0,70 < R^2 < 0,80$	$\leq 0,70$
NSE	$> 0,85$	$0,70 \leq NSE \leq 0,85$	$0,55 < NSE < 0,70$	$\leq 0,55$
PBIAS	$\leq \pm 5,0$	$\pm 5,0 < PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$> \pm 15$

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

3.4 – Cenários futuros e os modelos climáticos

Os modelos de circulação global têm um papel essencial no processo de obtenção de informações sobre potenciais impactos das mudanças climáticas em escala global. Esses instrumentos proporcionam uma visão abrangente das modificações do clima em distintos cenários de emissão de gases de efeito estufa (Xavier et al., 2021; Ballarin et al., 2023).

Nesse trabalho, utilizou-se um conjunto de dados de três modelos climáticos de circulação global o ACCESS-CM2 (*Australian Community Climate And Earth System Simulator*), HadGEM3-GC31-LL (*Hadley Centre Global Environment Model in the Global Coupled configuration 3.1*) e MIROC6 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*), disponibilizado pelo CLIMBra - *Climate Change Dataset for Brazil* (Ballarin et al., 2023), que fornece projeções de modelos com correção de viés para as variáveis meteorológicas fundamentais para estudos hidroclimáticos (precipitação, temperatura máxima e mínima,

radiação líquida de ondas curtas na superfície, velocidade do vento próximo à superfície e umidade relativa), com resolução espacial de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$. E, também fornece dados em escala de bacia hidrográfica abrangendo mais de 700 bacias hidrográficas brasileiras (Ballarin et al., 2023). Os dados modelos globais utilizados para a realização do estudo são apresentados na Tabela 7.

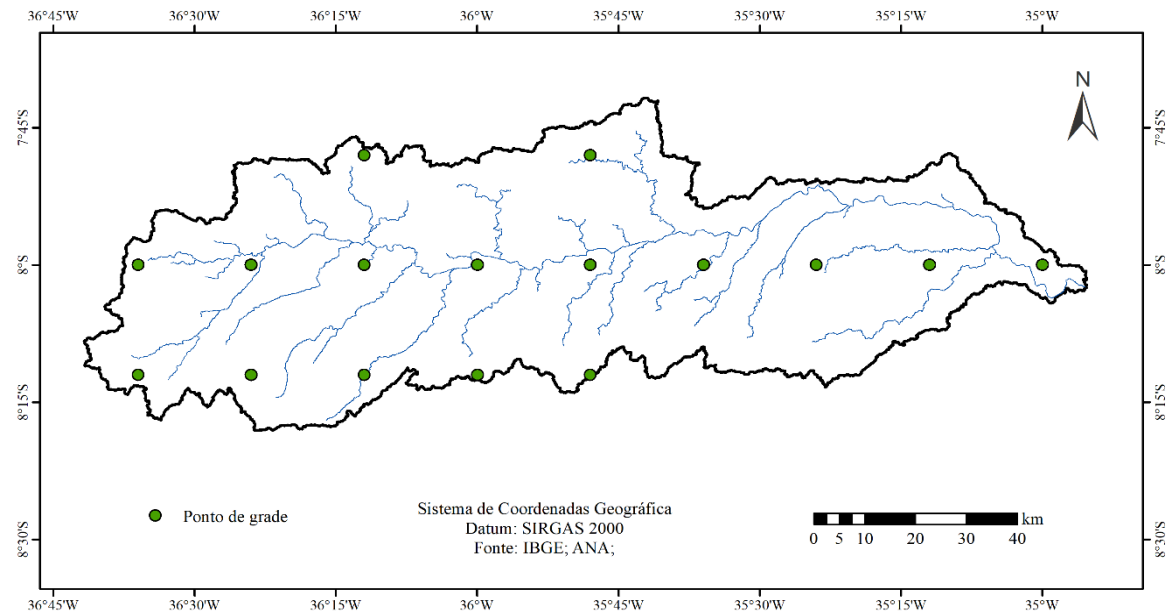
Tabela 7 - Modelos Climáticos Globais utilizados na pesquisa.

Modelo	País/Região	Resolução inicial	Referência
ACCESS-CM2	Australia	$1,87^{\circ} \times 1,25^{\circ}$	Bi et al., (2020)
HadGEM3-GC31-LL	UK	$1,87^{\circ} \times 1,25^{\circ}$	Williams et al., (2018)
MIROC6	Japão	$1,4^{\circ} \times 1,4^{\circ}$	Tatebe et al. (2019)

Fonte: Adaptado de Ballarin et al. (2023)

As projeções disponíveis referem-se aos cenários climáticos SSP2-4.5, que representa o nível intermediário das emissões de efeito estufa, e SSP5-8.5, que corresponde ao nível mais elevado das emissões. Esses dados incluem informações de simulações históricas de (de 1980 a 2013) e de projeções futuras (de 2015 a 2100) (Ballarin *et al.*, 2023). Para esse estudo, foram obtidos dados de precipitação e temperatura máxima e mínima para o período de 2030 a 2060, onde foram usados 16 pontos de grades distribuído de forma homogênea na bacia, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Localização dos pontos de grade



Fonte: Fonte: Autoral (2026).

3.5 Análise de tendências

Para a análise das tendências foram utilizados dois métodos não-paramétricos: (a) teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), proposto pela Organização Meteorológica Mundial, e (b) teste de Sen (Sen, 1968), que define a amplitude dessa tendência. O método de Mann-Kendall é utilizado nos casos em que os valores de dados x_i de uma série temporal podem obedecer ao modelo:

$$x_i = f(t_i) + \varepsilon_i \quad (8)$$

sendo $f(t_i)$ um aumento ou diminuição da função monótona e ε_i os resíduos assumidos como sendo a mesma distribuição com média igual à zero. Em seguida assume-se que a variância da distribuição é constante.

Nesse método, o teste da hipótese é nulo (H_0), indica que não a tendência dos dados analisado; a hipótese H_1 , mostra que houve tendência aumentando ou diminuindo ao longo do tempo (Júnior e Ely, 2021). Em seguida é calculada a variância S pela seguinte fórmula:

$$var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (9)$$

Onde, n é o número de valores de dados, p representa o número de grupos com dados repetidos e t_i é o número de valores de dados do p -ésimo grupo. Os valores de S são utilizados para calcular o teste Z_S :

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{var(S)}}, S > 0 \\ 0, se S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{var(S)}}, se S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

A tendência é avaliada a partir do valor de Z_S . O valor do Z_S positivo mostra uma tendência ascendente da série temporal; o valor negativo corresponde a uma tendência negativa, isto é, descendente da série (Júnior e Ely, 2021). À medida que a hipótese nula (H_0) é rejeitada, isso mostra que a série temporal há uma tendência significativa (Júnior e Ely, 2021). Essa significância (α) pode ser testadas para 0,001(***), 0,01(**), 0,05(*) e 0,1(+).

O método de Sen é utilizado para analisar as tendências das séries temporais. Esse método é empregado para estimar a inclinação de uma tendência, usado a seguinte formula:

$$f(t) = Q + B \quad (11)$$

Sendo Q_i a declividade e B uma constante. Para se obter a estimativa da inclinação dada mencionado na equação acima, é preciso calcular a inclinação para todos os pares de dados:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ para } j > k \quad (12)$$

Onde, x_j e x_k são os valores de x nos tempos j e k , respectivamente, com $j > k$. Se existem n valores x_j na série temporal, obtêm-se $N = n(n-1)/2$ para estimar a inclinação Q_i . Os valores N de Q_i são classificados do menor para o maior e a mediana N e Q_i , são estimadas pelo método de Sen, que é dado por:

$$Q = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]}, & \text{se } N \text{ é ímpar} \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}}{2}, & \text{se } N \text{ é par} \end{cases} \quad (13)$$

Para estimar B na Eq. 11, são calculados as n diferença $x_i - Q_i$. Em seguida, são determinados os intervalos de confiança em dois níveis distintos para garantir a confiabilidade do teste, onde $\alpha = 0,01$ (99%) e $\alpha = 0,05$ (95%).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção, apresentam-se os resultados obtidos na modelagem hidrológica, os parâmetros usados para calibrar e validar o modelo, bem com a análise estatística de desempenho. Posteriormente, são apresentados os resultados das projeções futuras de precipitação e temperatura e, por fim, análise das projeções futuro de vazões na bacia.

4.1 – Modelagem hidrológica

4.1.1 Modelagem inicial

O modelo SWAT+ foi empregado para simular o processo hidrológico da bacia do rio Capibaribe, inicialmente com a finalidade de estimar a vazão, sem ajustes nos parâmetros. Foram usados dados topográficos como o modelo digital de elevação (MDE), que apresenta altitude que variam de 0 metros no litoral a 1201 metros que abrangem a região mais elevada do alto Capibaribe. A partir do MDE, foi calculado a declividade, gerado o mapa da declividade. O mapa mostrar que a maior parte da área da bacia possuir uma declividade entre 3-8% (suave ondulado) e 8-20 (ondulado).

A discretização da bacia resultou na criação de 60 sub-bacias e 7.812 HRUs que são unidade de respostas hidrológicas, onde as áreas apresentam a mesma característica física como o tipo de solo, o uso e cobertura da terra e declividade. Esse detalhamento das HRUs proporciona uma representação mais precisa do processo hidrológico na área de estudo. A simulação hidrológica foi realizada em escala mensal, abrangendo o período de 1992 a 2019, com base em series temporais de precipitação e vazão de quatro postos fluviométricos. A aplicação modelo SWAT+, permitiu observar o comportamento das variáveis hidrossedimentológicas ao longo do período analisado.

Os resultados da simulação hidrológica (sem calibração), podem ser observados na Figura 10, que mostram as vazões observadas e a simuladas pelo modelo. Os hidrogramas indicam um desempenho insatisfatório na modelagem inicial para os quatros postos analisados. Apesar disso, o modelo capturou adequadamente o comportamento hidrológico da bacia em relação aos dados de entrada, onde observa-se que os picos de vazões estão alinhados com precipitação. Contudo, observa-se uma superestimação nos dados de vazão para os postos, que sugere a necessidade de ajuste dos parâmetros do modelo.

A superestimação da vazão simulada é evidente nos resultados estatísticos, apresentado na Tabela 8, com valores de NSE variando de -19,79 e -8.15 para maioria dos postos, caracterizado um desempenho insatisfatório. Somente Vitoria de santo Antão obteve

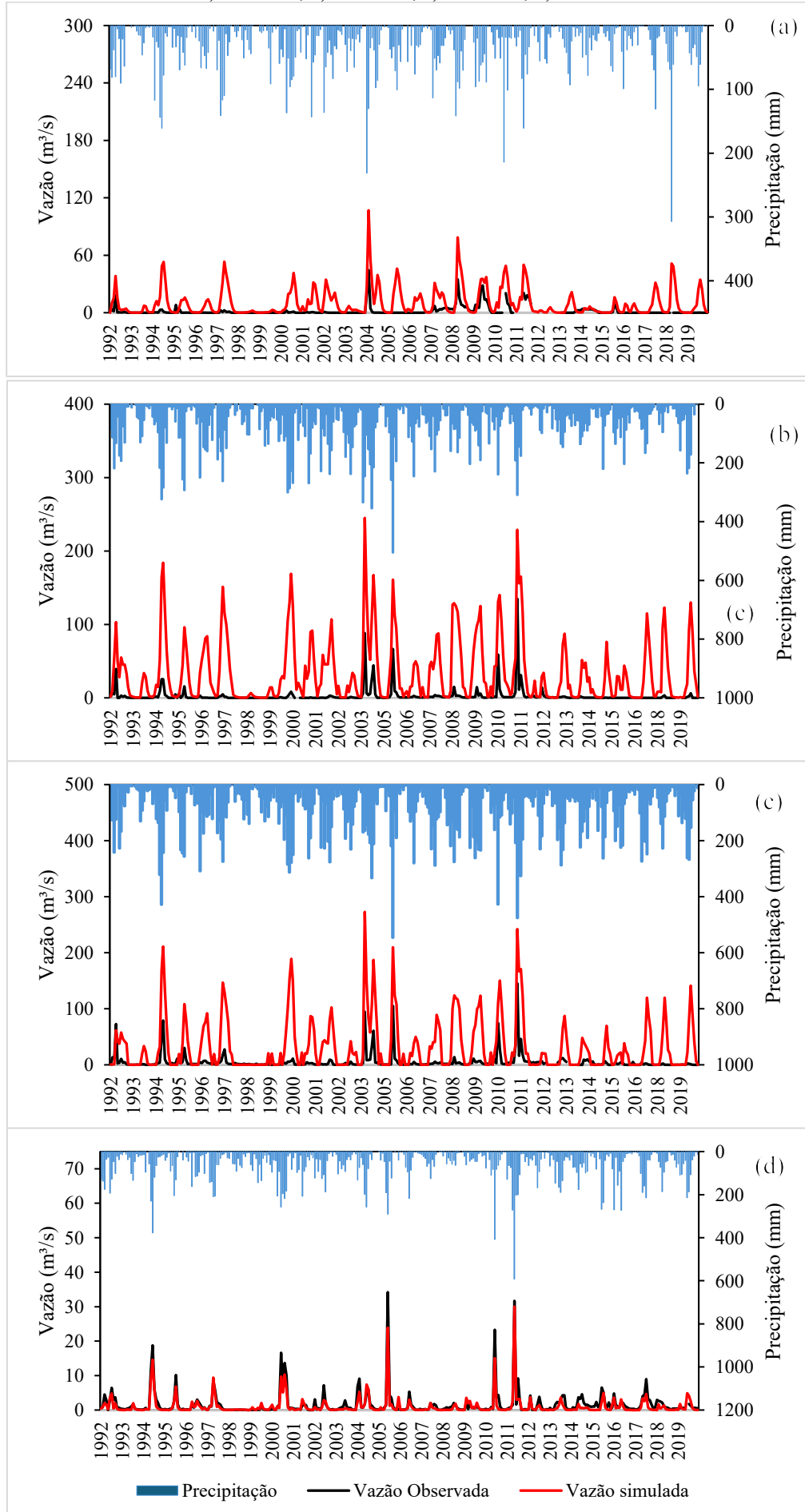
um valor de NSE positivo, indicando um desempenho adequado. Nesse ponto, o modelo exibiu bom desempenho em diversas métricas estatística, mostrando que modelo é representativo. Outras métricas, foram usadas para avaliar a acurácia do modelo.

Tabela 8 - Desempenho estatístico do modelo.

Estatísticas	Vazão Observada				Vazão Simulada			
	Toritama	Limoeiro	Paudalho	Vitória de Santo Antônio	Toritama	Limoeiro	Paudalho	Vitória de Santo Antônio
Média	1,81	2,82	5,11	3,92	10,10	34,47	32,04	1,14
Desvio Padrão	5,04	11,00	14,36	23,46	14,43	43,93	47,09	7,54
R ²	-	-	-	-	0,38	0,36	0,41	1,00
Nash	-	-	-	-	-8,15	-19,79	-10,37	0,44
r	-	-	-	-	0,61	0,60	0,64	1,00
KGE	-	-	-	-	-3,62	-10,26	-4,30	0,28
PBIAS	-	-	-	-	-498,88	1141,94	-542,42	70,92
RMSE	-	-	-	-	15,30	50,12	48,40	17,70

Fonte: Autorial (2026).

Figura 10 - Comportamento da vazão simulada pelo modelo hidrológico, antes da calibração, nos postos fluviométricos: a) Toritama, b) Limoeiro, c) Paudalho, d) Vitória de Santo Antão



4.1.2 Calibração e validação do modelo

A escolha dos parâmetros mais adequados para cada área de contribuição é mostrada na Tabela 9. O processo de calibração teve início com 16 parâmetros, sendo posteriormente reduzido, após análise de sensibilidade realizada no SWAT+ TOOLBOX, que identificou os parâmetros que mais influência no comportamento da vazão. Os métodos de Substituição e Percentagem foram utilizados na calibração, pois mostrar os valores reais dos parâmetros a serem colocados no modelo, eliminando a necessidade de operações matemáticas a partir dos valores iniciais. Além disso, pode-se observar que os parâmetros que mais influência no comportamento hidrológico da bacia são aqueles relacionados ao escoamento superficial, uso e cobertura da terra e com fluxo subterrâneos, como *cn2*, *cn3-swf*, *perco*, *esco*, *revap-min*, *revap-co* e *canmx*. Estudo realizado por Silva et al. (2025) colabora com esses resultados alcançados, reforçando a importância desses parâmetros na simulação hidrológica da bacia.

Tabela 9 – Valores da calibração dos parâmetros do SWAT+ para as áreas de contribuição das estações.

Parâmetro	Método	Toritama	Limoeiro	Paudalho	Vitória de Santo Antônio
<i>cn3_swf</i>	Substituição	0,6527	0,6573	0,0576	0,0469
<i>cn2</i>	Porcentagem	-11,9757	-13,125	-7,6263	-7,5119
<i>perco</i>	Substituição	0,9182	0,9183	0,8419	0,7535
<i>revap_min</i>	Substituição	12,0093	38,3957	35,4013	-
<i>esco</i>	Substituição	0,7969	0,7969	0,8259	0,6606
<i>revap_co</i>	Substituição	0,1578	0,1578	0,6455	-
<i>canmx</i>	Substituição	70,6094	70,6094	80,4568	-
<i>k</i>	Porcentagem	-6,7188	-	-	15,7812
<i>alpha</i>	Substituição	0,01	0,2819	-	-
<i>lat_ttime</i>	Porcentagem	9,5924	-	-	-
<i>flo_min</i>	Porcentagem	12,1875	-	-	-
<i>awc</i>	Porcentagem	-	-	-	2,1875
<i>vol</i>	Substituição	14,2188	11,6668	19,2243	54,238

4.1.2.1 Calibração e validação da área de contribuição de Toritama

O processo de calibração teve início pelo posto fluviométrico de Toritama, localizado próximo à nascente da bacia. A calibração foi realizada para o período de 1992 a 2007, enquanto a validação abrangeu os anos de 2008 a 2017, permitindo uma análise temporal detalhada do comportamento da vazão.

A Tabela 10 apresenta os resultados estatísticos referentes aos dados observados de vazão, o calibrado e validado. Durante a calibração, observou-se uma alta correlação entre vazão simulada e calibrada, com valores de $R^2 = 0,79$, $NSE = 0,79$, $KGE = 0,52$, além de outras métricas que, conforme Moriasi et al. (2007), indicam um ajuste bom do modelo. Na validação, algumas métricas estatísticas apresentam redução, como o $R^2 = 0,61$, $NSE = 0,56$ e $r = 0,78$, considerado satisfatório, enquanto KGE aumentou em relação à calibração, refletindo uma apresentação adequada do comportamento hidrológico da bacia. Os resultados de calibração encontrados neste trabalho corroboram com os valores obtidos por Ferreira (2020), que realizou duas calibrações para períodos distintos, obtendo bons valores para calibração para o R^2 que foram de 0,502 e 0,749 para primeira calibração e segunda calibração, em referência ao NSE encontrou 0,499 e 0,743.

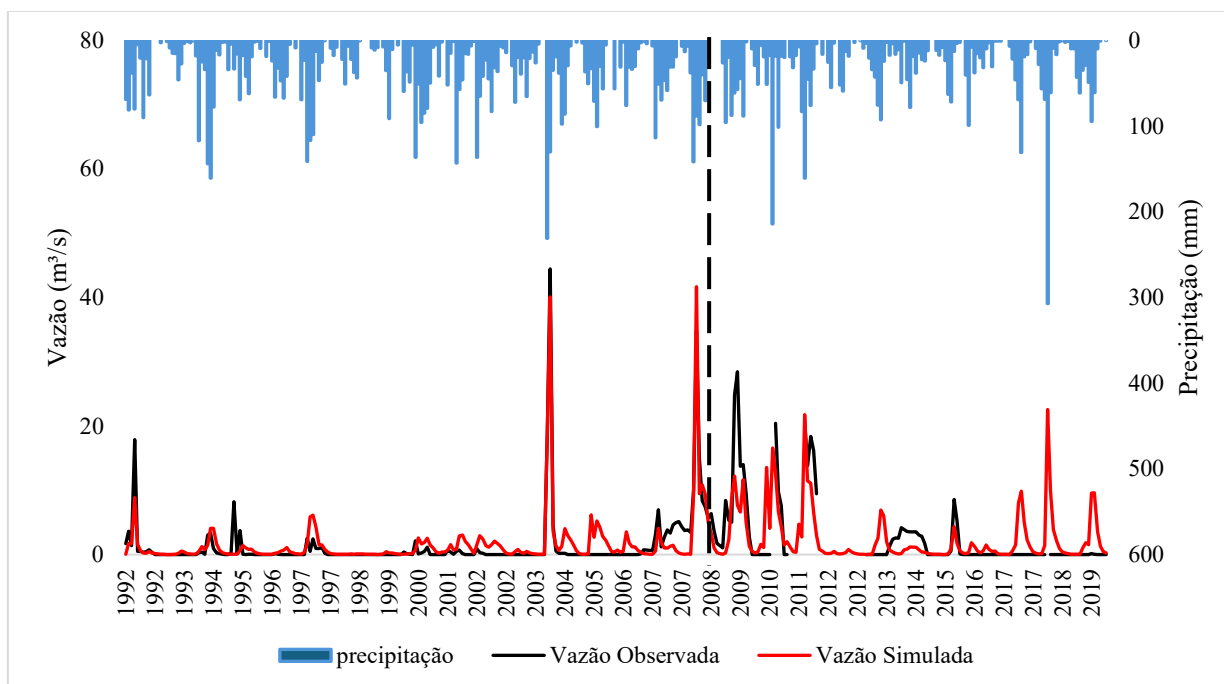
Os resultados da calibração e validação são apresentados na Figura 11, que exibe os hidrogramas da vazão após o ajuste do modelo. Pode-se observar que os picos de vazões são capturados adequadamente, mostrando-se alinhado com os eventos de precipitação. Esse resultado indica que o modelo conseguiu representar de forma satisfatória o comportamento hidrológico da área de contribuição.

Tabela 10 - Desempenho estatístico do modelo para estação fluviométrica de Toritama.

Estatísticas	Vazão observada em m³/s	Vazão calibrada em m³/s (1992-2007)	Vazão validada em m³/s (2008-2017)
Média	0,95	1,26	2,94
Desvio Padrão	3,86	3,38	5,40
R^2	-	0,79	0,61
Nash	-	0,79	0,56
Correlação (r)	-	0,89	0,78
KGE	-	0,52	0,66
PBIAS	-	-32,75	15,91
RMSE	-	1,78	4,63

Fonte: Autoral (2026).

Figura 11 - Hidrogramas das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Toritama.



Fonte: Autoral (2026).

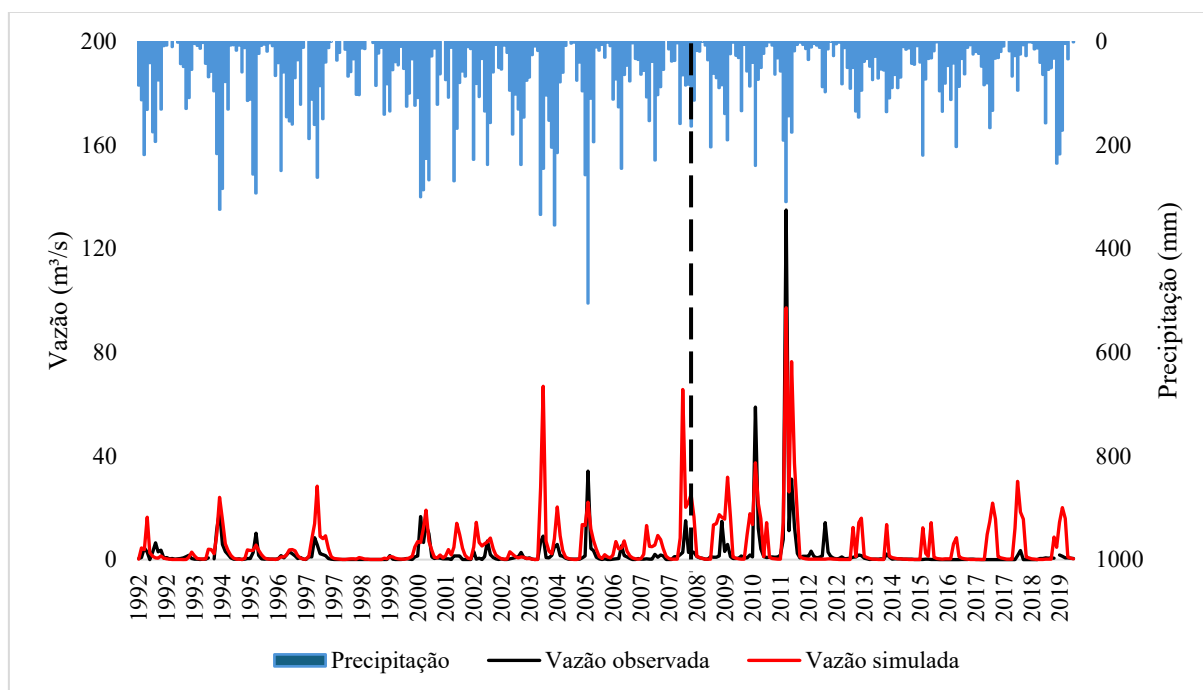
O hidrograma mostrado na figura anterior, revela picos elevados de vazão nos períodos de 2003–2004 e 2007–2010, identificadas pelo modelo, embora com precisão variável, principalmente durante a validação. Observa-se que o modelo superestimou alguns picos e subestimou outros, particularmente em épocas chuvas intensas, como a 2003/2004 e 2009/2010, quando os dados de vazão observados apresentam lacunas ou registros incompletos. Essas falhas podem acontecer por diversos fatores, como falha dos equipamentos de medição, dificuldade de acesso dos técnicos a estação durante eventos extremos e outras limitações operacionais, podem influenciar no processo de calibração.

Outro fator que podem influenciar a calibração é a presença dos reservatórios de Engenheiro Gercino e Poço Fundo na bacia do rio Capibaribe, pois pode afetar no regime de vazão, pois são utilizados para armazenar água nos períodos de chuvas e liberá-la em épocas seco, promovendo a regulação do fluxo de vazão. Essas interferências, combinado com as falhas dos dados observados e ausência da quantificação dos reservatórios, aumentam a incerteza nas estimativas da vazão geradas pelo modelo. Tal aspecto deve ser considerado durante a análises dos resultados.

4.1.2.2 Calibração e validação da área de contribuição de Limoeiro

Os resultados obtidos para o posto fluviométrico de Limoeiro estão ilustrados na Figura 12 e Tabela 11. O processo de calibração e validação foram realizados para mesmo período utilizado para o posto de Toritama. A calibração e validação do modelo não apresentaram um desempenho satisfatório. No entanto, observou-se uma melhora significativa durante o processo de validação, com $R^2 = 0,71$ e $r = 0,74$, enquanto, as demais métricas ficaram abaixo dos critérios adotado do Moriasi et al. (2007) como o PBIAS -90,82 e NSE = 0,39. Esses resultados podem ser considerados insatisfatórios, segundo esse autor, indicando que o modelo não conseguiu representar bem o comportamento hidrológico da bacia nesse ponto de contribuição. O resultado foi condizente com o encontrado no trabalho de Ferreira (2020), no que se refere aos valores de PBIAS, que variaram entre -106,235 a -73,886, esse valor negativo dessa métrica indica uma tendencia do modelo de superestima os dados observados. Alguns fatores podem tem contribuído para esse resultado insatisfatório, como a qualidade dos dados inseridos na simulação, a escolha do período ou limitação do modelo em capturar as características hidrológicas específicas dessa região.

Figura 12 - Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Limoeiro.



Fonte: Autoral (2025).

O hidrograma representado na figura abaixo revela que o modelo superestimou a maior parte dos dados simulado e subestimou outros pontos. Além disso, destaca-se a ocorrência de eventos extremos no período de 2010 a 2012, com o ano de 2011 registrando o maior pico de vazão, esse fator está entrelaçado com as chuvas intensas que sofrer influência das mudanças climáticas. Essas variações desafia a capacidade do modelo, principalmente em período com alta variabilidade climatológica.

Tabela 11 - Desempenho estatístico do modelo para a estação fluviométrica de Limoeiro.

Estatísticas	Vazão observada em m³/s	Vazão calibrada em m³/s (1992-2007)	Vazão validada em m³/s (2008-2017)
Média	2,73	3,83	9,02
Desvio Padrão	9,53	6,87	16,78
R²	-	0,31	0,71
Nash	-	-1,83	0,39
Correlação (r)	-	0,56	0,74
KGE	-	-0,45	-0,05
PBIAS	-	-137,83	-90,82
RMSE	-	6,13	12,67

Fonte: Autoral (2026).

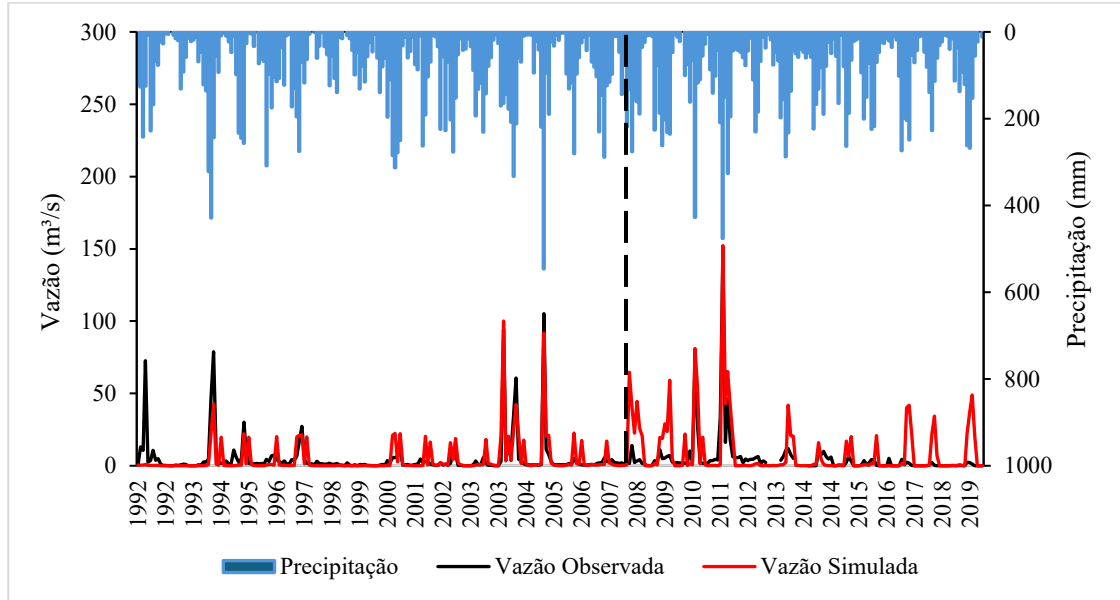
4.1.2.3 Calibração e validação da área de contribuição de Paudalho

Na Figura 13 e Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos na simulação do posto de Paudalho. O modelo apresentou desempenho satisfatório na calibração com valores de NSE 0,62, KGE 0,77, PBIAS 8,74, R² 0,62, indica a eficiência para representar o comportamento hidrológico dessa área de contribuição no período analisado. Na validação, os valores estatísticos foram inferiores aos alcançados na calibração, sendo obtidos NSE 0,36, PBIAS -56,98, KGE 0,52. Dessa forma, o modelo mostrou uma tendencia de superestimação das vazões durante o processo de validação em alguns trechos, o que ficou evidente pelo valor negativo do PBIAS. Os valores obtidos na calibração são condizentes com os encontrados por Ferreira (2020) e Farias (2025). Ferreira (2020), obteve NSE e R² de 0,434 e 0,679 na primeira calibração e na segunda o valor foi 0,621 e 0,626. Farias (2025) encontrou valores de R² 0,66 e NSE 0,64, considerando satisfatórios de acordo Moriasi *et al.* (2007).

O resultado apresentado no hidrograma abaixo revela as vazões simuladas para calibração e validação. No período de calibração observa-se uma superestimação da vazão para o ano de 2003 e subestimação para o período de 2004 a 2005. Na validação, verifica-se

superestimação do modelo para o período de 2008 a 2019, mostrando que o modelo não conseguiu capturar bem o comportamento das vazões.

Figura 13 - Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Paudalho.



Fonte: Autoral (2026).

Tabela 12 - Desempenho estatístico do modelo para a estação fluviométrica de Paudalho.

Estatísticas	Vazão observada em m³/s	Vazão calibrada em m³/s (1992-2007)	Vazão validada em m³/s (2008-2017)
Média	5,13	4,68	11,91
Desvio Padrão	14,06	12,34	24,00
R²	-	0,63	0,65
Nash	-	0,62	0,36
Correlação (R)	-	0,79	0,81
KGE	-	0,77	0,52
PBIAS	-	8,74	-56,98
RMSE	-	8,61	15,38

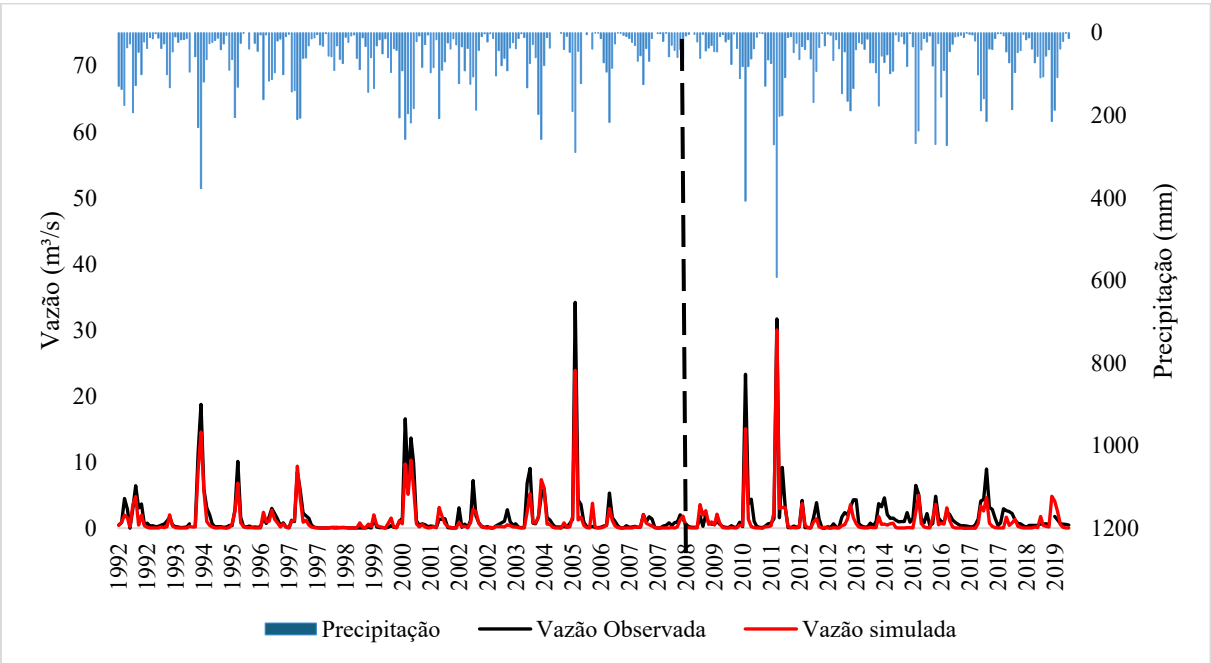
Fonte: Autoral (2026).

4.1.2.4 Calibração e validação da área de contribuição de Vitória de Santo Antão

Na Figura 14 e Tabela 13, é apresentada os resultados alcançados na simulação do posto de Vitória de Santo Antão, localizado na sub-bacia do Tapacurá. O modelo apresenta um desempenho satisfatório tanto para calibração quanto na validação, com valores métricos estatísticos satisfatório. Contudo, observa-se uma diminuição significativa no índice KGE,

que passou de 0,71 na calibração para 0,46 na validação, tornando se insatisfatório. Essa redução sugere que, apesar do bom desempenho, o modelo ainda enfrenta limitações na captura da variabilidade climatológica. Além disso, destaca-se que o valor do NSE de 0,85 se manteve constante tanto na calibração como na validada. Farias (2025) alcançou valores de NSE 0,76 na calibração e 0,74 para validação, condizente com os resultados obtidos nesse trabalho. Santos et al., (2021) que trabalhou na sub – bacia do Tapacurá, obteve valores de NSE de 0,71 na calibração e 0,85 para validação, o que indicam um bom desempenho do modelo.

Figura 14 - Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validadas e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2019, para a estação fluviométrica de Vitória de Santo Antão.



Fonte: Autoral (2026)

Tabela 13 - Desempenho estatístico do modelo para a estação fluviométrica de Vitória de Santo Antão.

Estatísticas	Vazão observada em m³/s	Vazão calibrada em m³/s (1992-2007)	Vazão validada em m³/s (2008-2017)
Média	1,62	1,15	1,10
Desvio Padrão	3,65	2,66	3,30
R²	-	0,92	0,89
Nash	-	0,85	0,85
Correlação (r)	-	0,96	0,94
KGE	-	0,71	0,46
PBIAS	-	28,27	38,41
RMSE	-	1,40	1,53

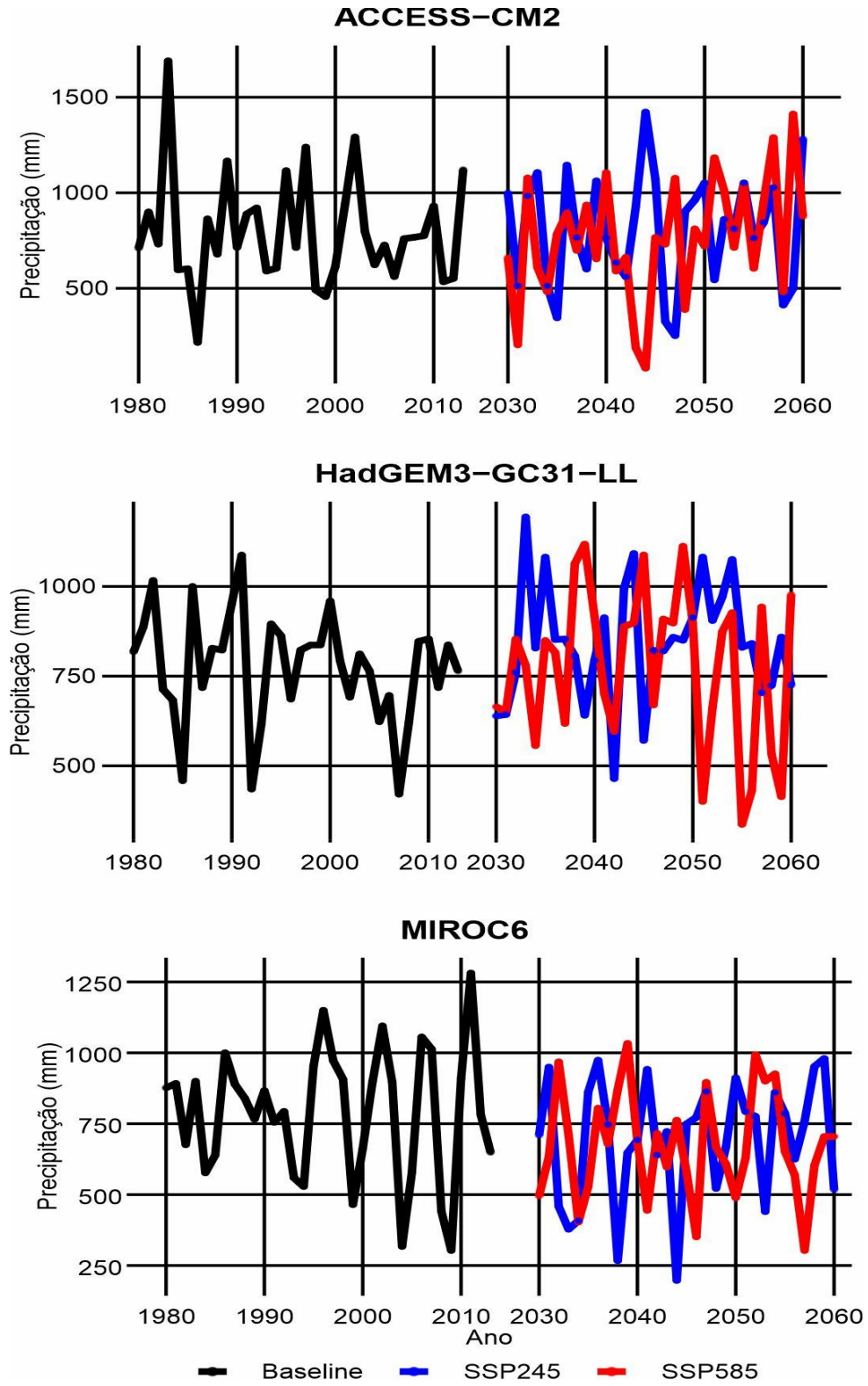
4.2 – Cenários futuros de precipitação na bacia do rio Capibaribe para o período de 2030 a 2060

A análise dos cenários intermediário (SSP2-4.5) e pessimista (SSP5-8.5) de precipitação para o período de 2030 a 2060 na bacia do Rio Capibaribe, revela alterações significativas no regime pluviométrico. Na Figura 15 são apresentadas as projeções para os modelos climáticos, observando-se grande variabilidade climáticas, o que sugere chuvas mais irregulares e intensas, com potencial de causar impactos ao meio ambiente e no planeta (inundação e movimento de massa).

Na Figura 15a (modelo Access-cm2), observa-se que o período histórico (baseline, 1987 a 2013), apresentar uma variabilidade interanual, com valores de precipitação variado entre 400 mm (ano seco) a 1500 mm (ano chuvoso). Em relação aos cenários futuros, observa-se uma maior irregularidade pluviométrica, com anos secos severos, no período entre 2030 e 2044 no cenário pessimista, em que a precipitação ficou abaixo de 400 mm. No cenário intermediário, nota-se, eventos mais chuvosos, para ano de 2044. Essa variação acarreta impactos no processo hidrológico da bacia, sendo assim, essas informações ajudam a entender a dinâmica climática futura da bacia.

Na Figura 15b e 15c são apresentadas as séries temporais anuais de precipitação para os modelos Access-cm2, Hadgem3-gc31-ll e MIROC6, respectivamente. Baseline de ambos os modelos apresenta uma variação entre anos secos e anos mais úmidos, mostrando uma tendência de redução da precipitação. O MIROC6, observa-se uma variabilidade mais acentuada, com picos menores de precipitação variado entre 250 e 300 mm/ano. Essa sazonalidade e variabilidade climática reflete bem o clima semiárido da região do Nordeste. O modelo hadgem3-gc31-ll apresentar picos mais elevados de precipitação e picos mais acentuados variado de 800 a 500 mm/ano, sendo mais propícios a eventos mais extremos. Nesse modelo observa-se que no período entre 2050 e 2060 apresentara anos mais secos (< 500 mm). O MIROC6 apresenta uma redução anual na precipitação, apresentando picos baixo de 500 a 250 mm/ano, evidenciado uma maior recorrência de anos mais secos, sendo suscetível a estiagem prologada. Além disso, pode ser constatado uma alta variabilidade interanual nos cenários climáticos analisados, em relação ao período histórico.

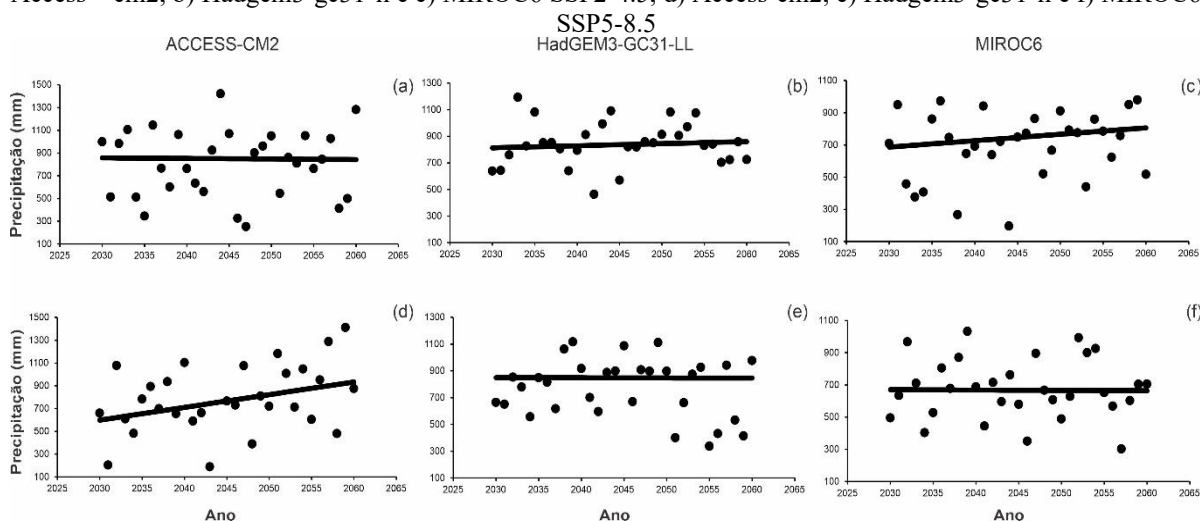
Figura 15 - Projeções de precipitação anuais para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll, c) MIROC6.



Fonte: Autoral (2026).

A Figura 16 apresenta as tendências anuais de precipitação, projetada para o período de 2030 a 2060, para o cenário SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Observa-se uma tendência constante de precipitação, para alguns modelos analisados, caracterizada por uma redução gradativa ao longo do período. O modelo Access-cm2 (SSP5-8.5) e Hadgem3-gc31-ll (SSP2-4.5) apresenta o crescimento da tendência de precipitação, esse crescimento é mais evidente no modelo Access-cm2 (Figura 16d). Essa variação na tendencia pode ser relacionado com as ações antrópicas, como desmatamento e a urbanização, que alteram a cobertura vegetal e os processos de infiltração, bem com as mudanças climáticas, que impactam os regimes pluviométricos. A Tabela 14 apresenta a significância dos modelos e das projeções climáticas analisadas, observa-se que único modelo que apresentou uma significância positiva Access-cm2 SSP5.85. Os demais modelos não apresentaram nenhuma significância em ambos os cenários analisado.

Figura 16 - Variação anual da precipitação utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2060, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6 SSP2-4.5, d) Access-cm2, e) Hadgem3-gc31-ll e f) MIROC6



Fonte: Autoral (2026)

Tabela 14 - Tendencia significativa de precipitação

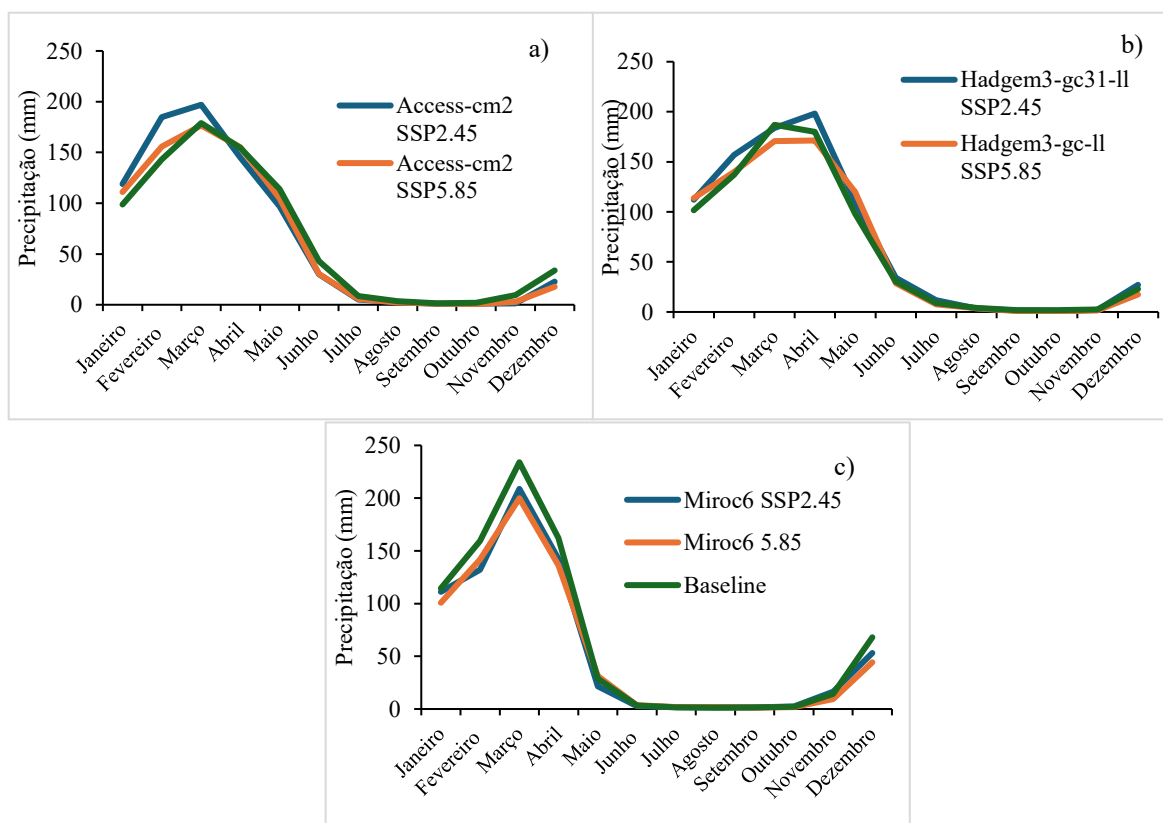
Modelos	Test Z	Q	Confiança
Access-cm2 (SSP2.45)	-0,1	-0,501	99%
Hadgem3-gc31-ll (SSP2.45)	0,65	1,5643	
MIROC6 (SSP2.45)	1,16	3,976	
Access-cm2 (SSP5.85)	1,7	11,162	
Hadgem3-gc31-ll (SSP5.85)	0	-0,132	
MIROC6 (SSP5.85)	0	-0,206	

Fonte: Autoral (2026).

Na Figura 17 são apresentados os resultados das projeções de precipitação mensal para os três modelos climáticos, e a comparação entre os cenários intermediários e pessimista com o baseline de referência. Dessa forma, observa-se que todos os modelos apresentam padrões de precipitação semelhantes, com período chuvoso concentrado entre janeiro a maio e com período seco entre julho e novembro. Porém, os modelos apresentam diferenças e nos cenários futuros que, são perceptíveis. O modelo Access-cm2 (Figura 17a), revela um aumento da precipitação, especificamente, no mês de março em comparação ao baseline, no cenário SSP2-4.5.

Por outro lado, o modelo Hadgem3-gc31-ll apresenta um deslocamento do pico maior de precipitação para o mês de abril. Além disso, no cenário SSP5-8.5 mostra uma tendência de redução da precipitação em relação ao baseline, o que era previsível para esse cenário. O modelo MIROC6 mostra uma redução da precipitação nos cenários em relação ao baseline, observa-se que cenários climáticos intermediário e pessimista apresentam padrão próximo. Além disso, podemos destacar que haverá mais meses secos em comparação aos outros modelos.

Figura 17 - Projeções de precipitação mensais para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6



Fonte: Autoral (2026)

4.3 – Cenários futuros de temperatura na bacia do rio Capibaribe para o período de 2030 a 2060

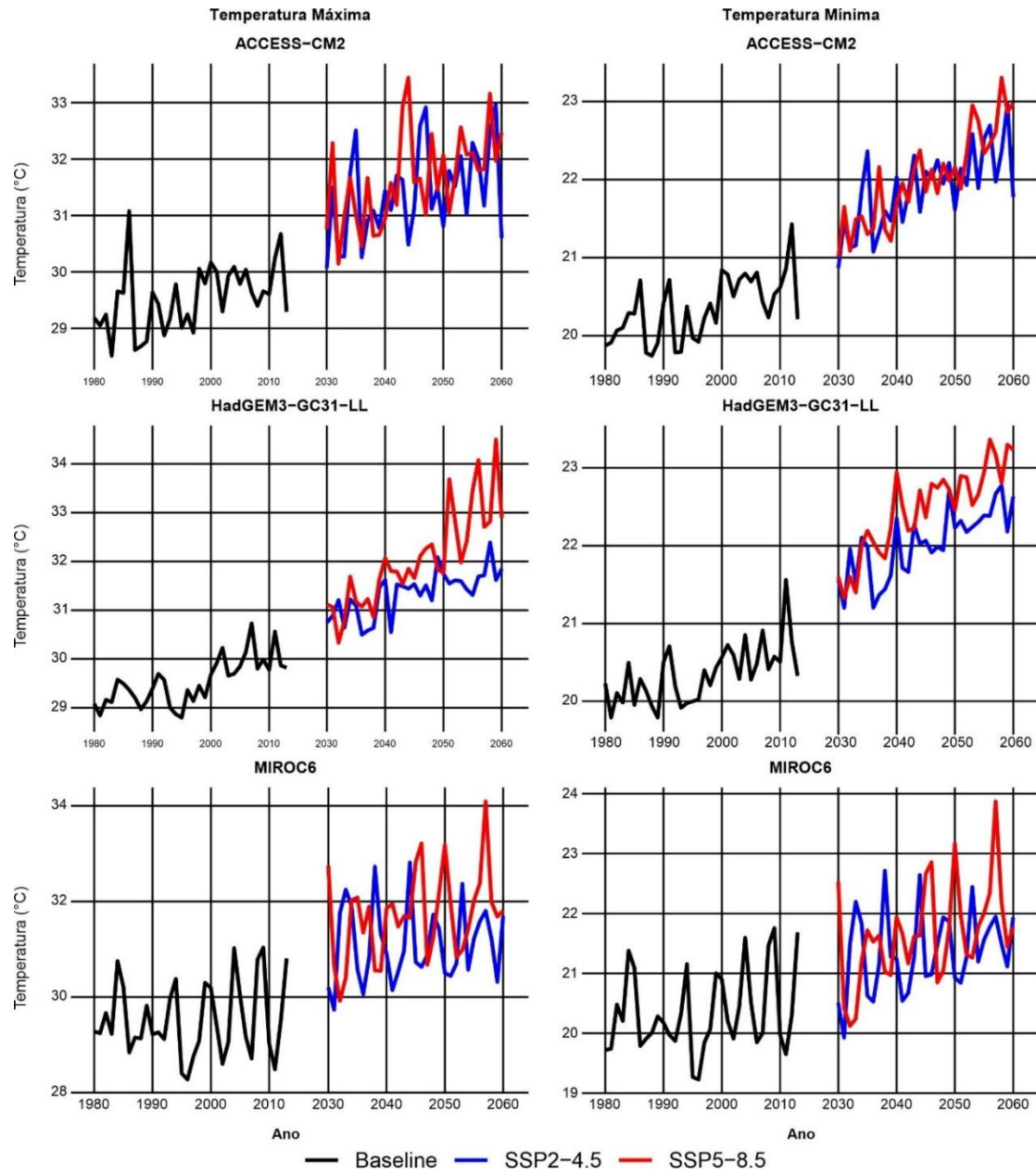
A Figura 18 mostra as projeções da temperatura máxima e mínima para os modelos climáticos para o período de 2030 a 2060 para bacia do Rio Capibaribe. A linha azul representa a variação da temperatura para o cenário intermediário de emissões e a linha vermelha corresponde ao cenário pessimista. As projeções das temperaturas dos modelos analisados para ambas as variáveis (mínimo e máximo), mostram um aumento da temperatura em toda a bacia hidrográfica. A projeção para o cenário SSP2-4.5 apresenta um aumento gradual da temperatura mínima ao longo do período analisado, porém essa elevação da temperatura é menos evidente em comparação ao SSP5-8.5. O cenário pessimista destaca o aumento contínuo da temperatura mínima, especificamente partir de 2040, onde essa projeção se torna mais evidente.

As temperaturas máximas projetada pelos modelos, apresenta um comportamento parecido, apresentado um aumento gradual sob cenário SSP2-4.5, mas essa elevação da temperatura evidente no cenário SSP5-8.5 em comparação ao SSP2-4.5. Observa-se que no modelo Hadgem3-gc31-ll mostram uma elevação acentuado para ambas as variáveis em comparação aos outros modelos analisados, chegando a temperatura maior que 34 °C.

A Figura 19 apresenta as tendências anuais médias de temperatura, projetada para o período de 2030 a 2060, para o cenário SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Observa-se um crescimento da tendência de temperatura em todos a bacia hidrográfica, caracterizado por um aumento significativo ao longo do tempo. Esse aumento pode estar associado a ações antrópicas, como a emissão de gases de efeito estufa, desmatamento e as mudanças climáticas, que contribuem para o aquecimento global. O aumento da temperatura acarreta impactos, pois pode reduzir a quantidade de água armazenadas em reservatórios, lagos e lençóis freático, influenciando na disponibilidade hídrica ao longo do tempo.

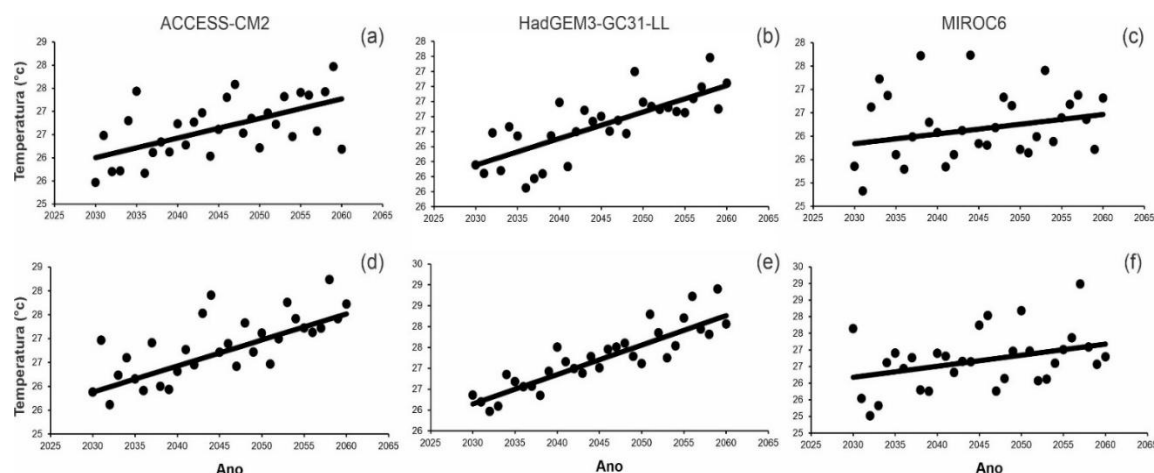
Os modelos Access-cm2 e Hadgem3-gc31-ll mostra um aumento mais acentuado da temperatura em comparação ao MIROC6. Na Tabela 13, é apresentado a significância dos modelos e das projeções climáticas analisadas, observa-se que o modelo Access-cm2 e Hadgem3-gc31-ll apresentou uma maior significância de tendência.

Figura 18 - Projeções de temperatura anuais máxima e mínima para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.



Fonte: Autoral (2026).

Figura 19 - Variação anual da temperatura utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2060, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6 SSP2-4.5, d) Access – cm2, e) Hadgem3-gc31-ll e f) MIROC6 SSP5-8.5



Fonte: Autoral (2026)

Tabela 15 - Tendencia significativa de temperatura

Modelos	Test Z	Q	Confiança
Access-cm2 SSP2.45	3,09	0,042	95%
Hadgem3-gc31-ll SSP2.45	4,69	0,0353	99%
MIROC6 SSP2.45	1,39	0,021	—
Access-cm2 SSP5.85	4,32	0,055	99%
Hadgem3-gc31-ll SSP5.85	5,71	0,071	99%
MIROC6 SSP5.85	2,18	0,033	95%

Fonte: Autoral (2026)

Na Figura 20, são apresentados os resultados das projeções de temperatura mensal mínima e máxima para os três modelos climáticos, comparando os cenários intermediários e pessimista com baseline de referência. Os resultados mostram um tendencia do aumento da temperatura nos cenários futuros em comparação ao baseline, com a elevação mais evidente no cenário SSP5-8.5, com picos variando entre 33 a 35 °C. Observa-se que todos os modelos apresentam padrões temperatura semelhantes, com período quente concentrado entre outubro a dezembro. O modelo Access-cm2 e Hadgem3-gc31-ll (Figuras 18^a-118b) apresentam maiores temperatura, onde a máxima tende atingir limiares próximos dos 35°C sob o cenário SSP5-8.5, o MIROC6 apresenta uma temperatura continua em comparação aos outros modelos, mas ainda com tendencia de aquecimento.

4.4 – Projeções futuras de vazão em diferentes cenários climáticos para o período de 2030 a 2060

A Figura 21 apresenta uma comparação entre precipitação mensal observada com os dados estimado pelos três modelos climáticos, considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Observa-se que o período chuvoso se concentra entre janeiro e maio, percebe-se que os modelos tendem a estimar volume de chuva superiores aos registrado na série observada. Podemos observar que no cenário SSP2-4.5 o modelo Hadgem3-gc31-ll apresentam picos duas vezes maior do que o dado observado. Isso acontece também no cenário SSP5-8.5 para modelos Access-cm2 e MIROC6. Por outro lado, os modelos climáticos apresentam valores próximos dos dados observado para o período de outubro a dezembro (estação seca).

Na Tabela 16 são apresentadas as médias da precipitação estimadas pelos modelos climáticos globais e de vazão estimadas pelo SWAT+ com os dados futuros de precipitação. No cenário pessimista apresenta uma redução da precipitação futura, que reflete diretamente na diminuição do fluxo de vazão. Nos cenários SSP2-4.5, as medias de precipitação variam entre 54 e 122 mm e vazões entre 0,68 a 24 m³/s.

Tabela 16 - Média da precipitação e da vazão

MCG	Precipitação média (mm)				Vazão média (m ³ /s)			
	Santo Cruz do Capibaribe	Limoeiro	Paudalho	Vitoria Santo Antônio	Toritama	Limoeiro	Paudalho	Vitoria Santo Antônio
Access-cm2 SSP2.45	57,44	65,43	113,61	88,54	2,53	11,97	24,76	0,69
Hadgem3-gc31-ll SSP2.45	54,08	62,82	112,27	86,42	3,77	14,02	24,17	0,70
MIROC6 SSP2.45	59,46	68,51	122,00	94,15	3,65	12,67	21,43	0,68
Access-cm2 SSP5.85	54,58	62,79	111,76	86,20	0,78	7,92	20,02	0,59
Hadgem3-gc31-ll SSP5.85	48,50	55,87	99,10	76,16	2,67	9,86	51,80	0,52
MIROC6 SSP5.85	47,20	53,95	96,35	73,93	1,96	7,64	16,23	0,47

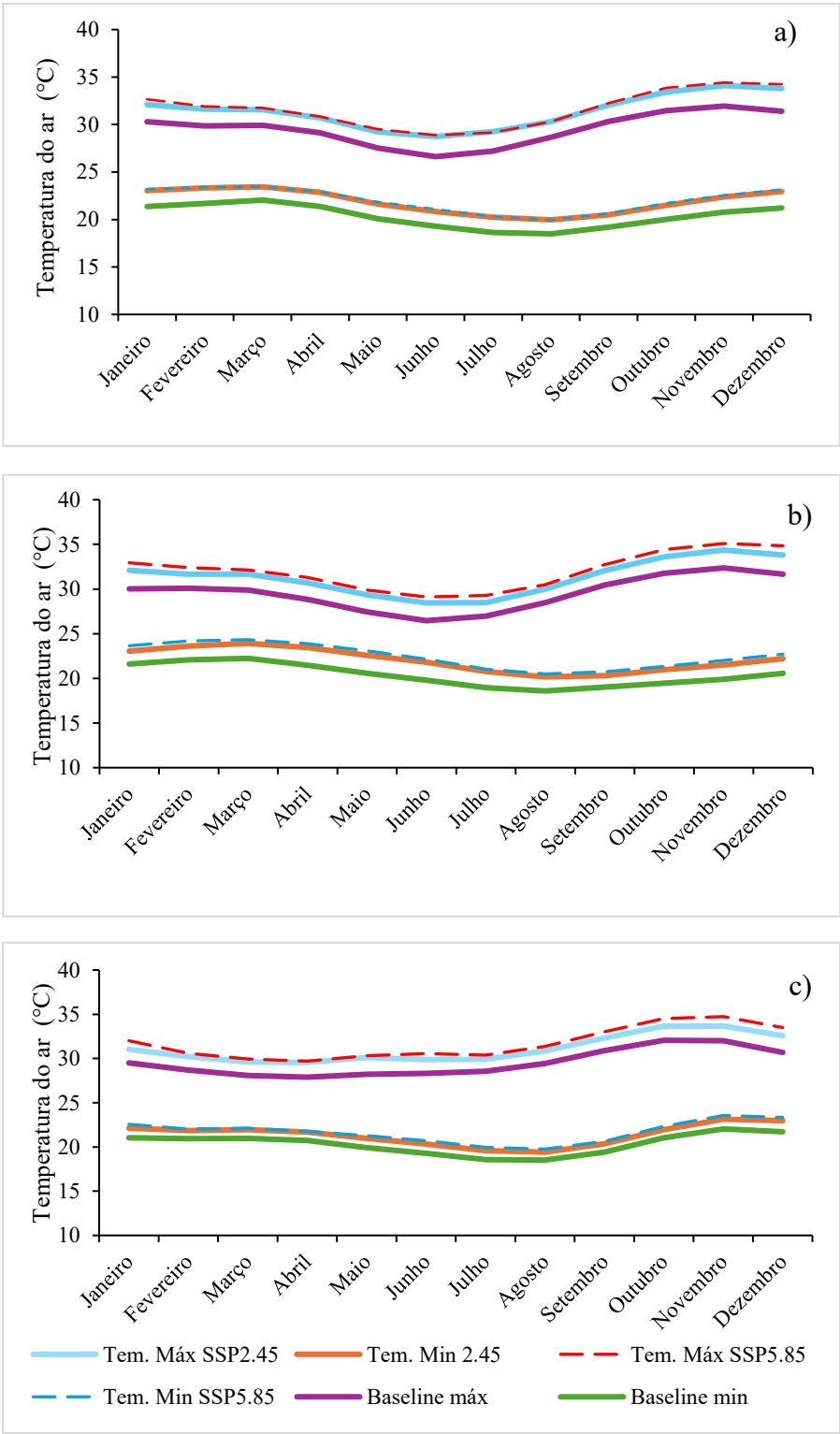
Fonte: Autoral (2026).

A Figura 22 apresentam os resultados das projeções de vazões para a bacia do rio Capibaribe, onde foram utilizados dados climáticos de três modelo, integrados ao modelo hidrológico calibrado, considerado os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para o período de 2030 a 2060. Esse procedimento possibilitou observar o comportamento hidrológico da bacia nos cenários climáticos adotado, para os para o posto de Toritama, Limoeiro, Paudalho e Vitória de Santo Antão.

Os resultados mostram que para o modelo MIROC6 sob cenários SSP2-4.5 o posto de Paudalho apresenta picos de vazão muito elevado, atingindo valor de aproximadamente $200 \text{ m}^3/\text{s}$, indicando que, essa área está suscetível aos eventos extremos de precipitação, em contrapartida os modelos Hadgem3-gc1-ll e Access-cm2 apresenta valor de vazão entre 50 e $20 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. Enquanto os postos de Toritama e Limoeiro apresenta fluxo relativamente baixo, entre 25 e $60 \text{ m}^3/\text{s}$ para ambos os modelos analisados, sugerindo que essas áreas estão menos propícias eventos extremos. Além disso, observa-se para o posto de Vitória de Santo Antão um fluxo de vazão extremamente baixos a apresentado valor entorno de $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$.

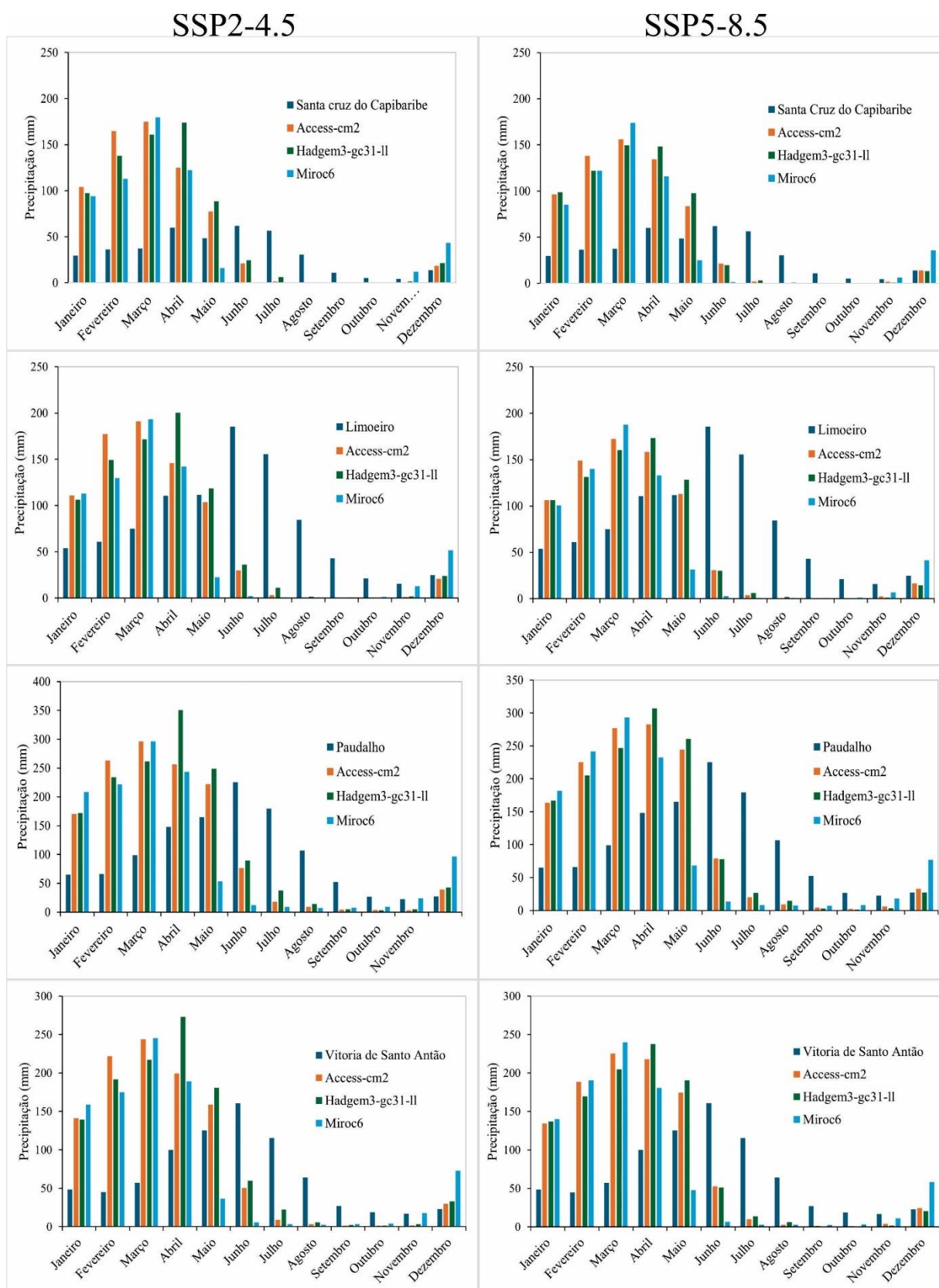
Com relação ao cenário SSP5.85, que representa um cenário mais extremos, os resultados mostram uma redução no fluxo de vazão para os postos fluviométricos, indica uma diminuição da precipitação e aumento da temperatura globais para o período analisado. No posto de limoeiro para o modelo Access-cm2 apresenta um aumento no fluxo de vazão. Nos postos de Toritama e Paudalho apresentam uma redução do fluxo em comparação com o SSP2.45, com picos de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ a $80 \text{ m}^3/\text{s}$, essa diminuição pode ser em virtude do aumento da temperatura e as variações sazonais na precipitação. Na região de Vitória de Santo Antão continua apresentado picos de vazão baixo, permanecendo abaixo de $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$. Além disso, pode observar a diferença clara entre os dois cenários, onde no cenário SSP2.45 mostram picos mais intensos do que no SSP5.85.

Figura 20 - Projeções de temperatura mensais para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a) Access – cm2, b) Hadgem3-gc31-ll e c) MIROC6



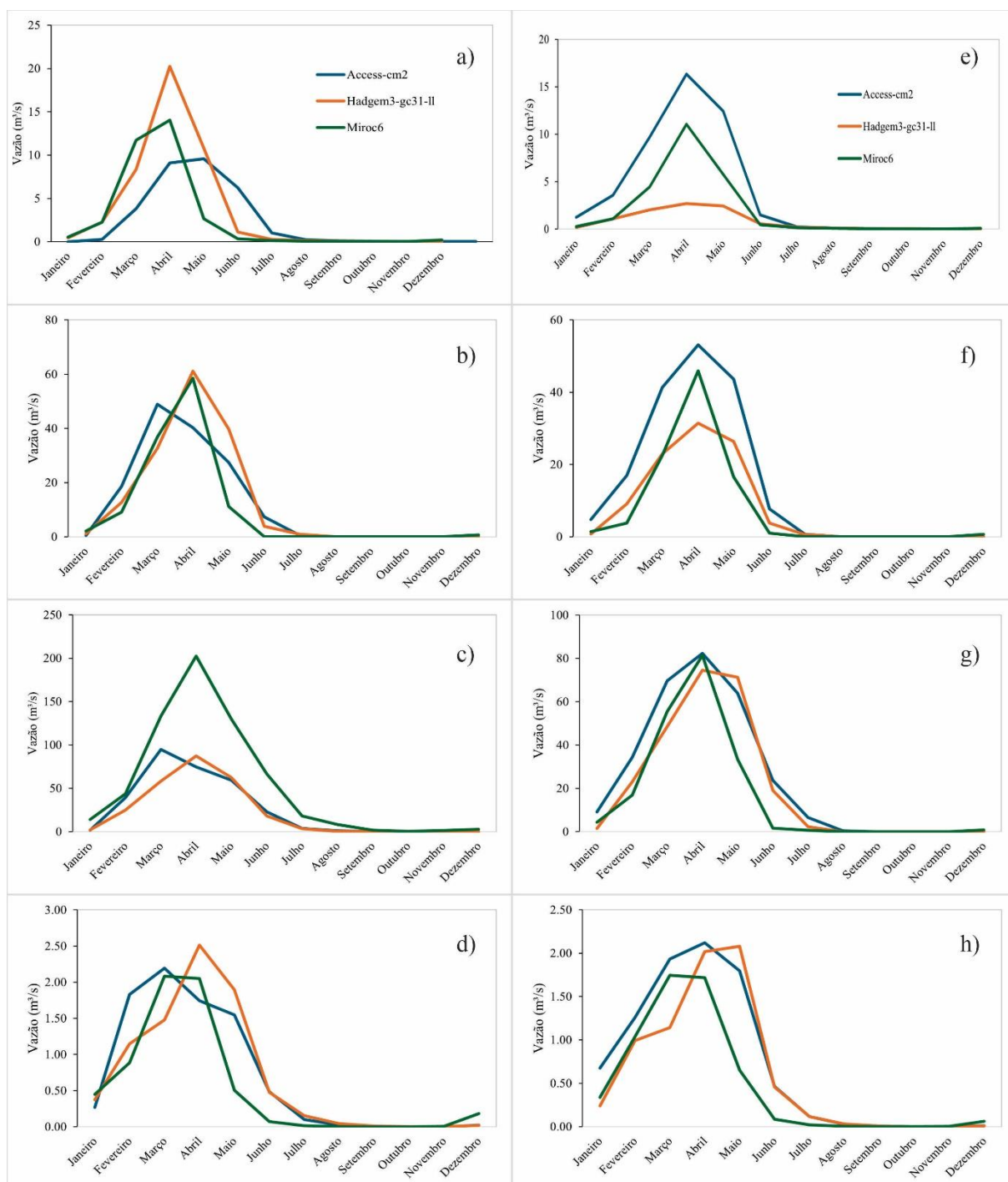
Fonte: Autoral (2026)

Figura 21 - Comparação entre os dados observado mensais com os modelos climáticos estimados de precipitação



Fonte: Autoral (2026)

Figura 22 - Comparação entre as vazões médias mensais entre os modelos, a) Toritama, b) Limoeiro, c) Paudalho, d) Vitoria de Santo Antônio – SSP2-4.5, e) Toritama, f) Limoeiro, g) Paudalho, h) Vitoria de Santo Antônio – SSP5-8.5,



Fonte: Autoral (2026).

5 - CONCLUSÕES

Este trabalho analisou as projeções climáticas futuras de vazão da bacia do rio Capibaribe, utilizando o modelo hidrológico SWAT+, integrando as projeções climáticas dos modelos Access-cm2, Hadgem3-gc31-ll e MIROC6 sob os cenários SSP2-4.5 (intermediário) e SSP5-8.5 (pessimista) para o período de 2030 a 2060. Os resultados alcançados demonstram a eficiência da modelagem hidrológica para simular cenários futuros nessa bacia.

Quanto a modelagem hidrológica, apresentou desempenho satisfatório nos postos fluviométricos de Toritama e Vitória de Santo Antão, com os valores de NSE, R^2 , KGE, PBIAS, entres outras métricas dentro dos critérios estabelecidos por Moriasi et al. (2007), capturando bem o comportamento hidrológicos dessas áreas de contribuição. O posto Paudalho desempenho satisfatório na calibração. Entretanto, o desempenho foi insatisfatório no posto de Limoeiro, sugerindo ajustes inadequado nos parâmetros usados na simulação, apresentados resultados que superestima/subestima a vazão observada.

Em relação as projeções climáticas de ambos os modelos, os cenários indicaram uma tendencia de aumento gradual da temperatura em toda a bacia, com elevações mais acentuadas no SSP5-8.5, com picos mensais próximos a 35 °C, de modo a intensifica evapotranspiração e redução do armazenamento hídricos. Os modelos climáticos revelaram uma alta variabilidade climática na precipitação futura em comparação aos dados observados, principalmente nos meses entre janeiro e maio, mas no período entre setembro a dezembro os modelos ajustas bem com os valores observados. No cenário SSP2-4.5, observou-se valores elevados, especialmente na porção leste da bacia, sugerindo que essa área e suscetível aos eventos extremos nessa região. Enquanto, no cenário SSP5.85 apresentou uma redução da precipitação na região do Agreste, essa diminuição pode estar associada aumento da temperatura global, emissão de gases de efeito estufa e as ações antrópicas.

As projeções futuras de vazões apresentaram uma redução significativas no SSP5.85 em comparação ao SSP2-4.5, com redução próximos dos 40% nos postos de Paudalho e Toritama, influenciado com a diminuição da precipitação e elevação da temperatura. Observou-se também picos elevados no cenário intermediário de 200 m³/s no posto de Paudalho, indicando maior risco de enchentes, enquanto Vitória de Santo Antão obteve valores de vazão baixo, mostrando uma vulnerabilidade hídrica nessa área de contribuição. Os resultados confirmam a aplicabilidade do SWAT+ como uma ferramenta eficaz para modelagem de vazões e previsão de eventos hidrológicos futuros.

6 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar mais parâmetros na calibração do modelo, permitindo estimar o balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Capibaribe de forma mais consistente e confiável.
- Realizar mais estudos utilizando o modelo SWAT+ para avaliação de cenários futuros de mudanças climáticas.
- Simular vazões futuras usando predições de uso e cobertura da terra, para analisar os impactos das mudanças antrópicas sobre o escoamento superficial.
- Utilizar dados de outros modelos climáticos globais.

7 - REFERÊNCIAS

ABALASEI, M. E.; TOMA, D.; DORUS, M.; TEODOSIU, C. The impact of climate change on water quality: A critical analysis. *Water*, v. 17, n. 21, p. 3108, 2025.

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal Hydrology*, 524, 733–752, 2015.

AFSARI, R.; NAZARI-SHARABIAN, M.; HOSSEINI, A.; KARAKOUZIAN, M. A CMIP6 Multi-Model analysis of the impact of climate change on severe meteorological droughts through multiple drought indices—Case study of Iran’s metropolises. *Water*, v. 16, n. 5, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Rede Hidrometeorológica Nacional. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em 26 de nov. de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Anexo E. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/72647. Acesso em 26 de jan. de 2026.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1602548545_TAPACURA%20NOVO.pdf. Acesso em 26 de jan. de 2026.

ALDRICH, John. Correlations genuine and spurious in Pearson and Yule. *Statistical Science*, v. 10, n. 4, p. 364–376, nov. 1995

ALVES, F. H. B.; CIRILO, L. A.; ALVES, I. S. atualização das vazões máximas de projeto da barragem Cursai em Paudalho-PE. In: XXIII Simpósio de Brasileiro de Recursos Hídricos 2022, Foz do Iguaçu – pr. Anais [...] ABRHidro, 2017. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6475>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; LIMA, J. R.S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C.A. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 41, n. S1, p. E1045–E1061, 2021.

ARAÚJO, A. R.; DUTRA, R. M. S.; PEREIRA, U. C.; NUNES, F. G.; FERREIRA, M. E. Análise de métodos de preenchimento de falhas em dados pluviométricos para a Região de Planejamento Sudoeste de Mato Grosso, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 4, p. 2271–2286, 2023.

ARNELL, N. W. et al. Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, v. 155, n. 3, p. 377–391, 2019.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; NEITSCH, S. L. Ferramentas de avaliação de solos: documentação Teórica versão 2009. Instituto de Recursos Hídricos do Texas - Relatório técnico n. 406, 634p, 2009.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development 1. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. C. CLIMBra - Climate change dataset for Brazil. *Scientific Data*, v. 10, n. 131. 2023.

BESKOW, S.; TIMM, L. C.; TAVARES, V. E. Q.; CALDEIRA, T. L.; AQUINO, L. S. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 61, n. 14, p. 2567–2578, 2016.

BI, D. et. al. Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, v. 70, n. 1, p. 225–251, 2020.

BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCH, D. D.; ALLEN, P. M.; VOLK, M.; SRINIVASAN, R. 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, 2017.

BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCH, D. D.; ALLEN, P. M. Representing the connectivity of upland areas to floodplains and streams in SWAT+. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 55, n. 3, p. 578–590, 2019.

BOLAN, S.; PADHYE, L.P.; JASEMIZAD, T.; GOVARTHANAN, M.; KARMEGAM, N.; WIJESEKARA, H. AMARASIRI, D. et al. Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. *Science of The Total Environment*, v. 909, p. 168388, 2024.

BRASIL NETO, R. M.; CUNHA, A. P. M. A.; SILVA, R. M.; OLIVEIRA, G.; SANTOS, C. A. G. How does the reference period influence meteorological drought analysis and monitoring? A case study in Northeast Brazil using a century of data. *Science of The Total Environment*, v. 1010, p. 181124, 2026.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, Tecnologia e Inovação (MCTI). Sumário executivo: Base Científica das Mudanças Climáticas: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. [S.l.]: Painel brasileiro de mudanças climáticas - PBMC, 2013.

BRIGHENTI, T.M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFF, P.L.B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21, 53-64, 2016.

CABRAL, S. L. Intervalo de tempo de máxima previsibilidade no acoplamento de modelos climáticos e hidrológico para gerenciamento de reservatório. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – DEHA - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CARREIRO, D. A.; SANTOS, L. L.; ARAGÃO, R.; PAIVA, W. Aplicação da modelagem hidrossedimentológica em uma bacia semiárida paraibana com grandes reservatórios via modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 18, n. 6, p. 4749–4769, 2025.

CASTRO, E. L. H. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica. Mestrado em Hidráulica e Saneamento—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2022.

CHEN, J; BRISSETTE, F. P.; CHEN, H. Using reanalysis-driven regional climate models output for hydrology modelling. *Hydrological Processes*, v. 32, n. 19, p. 3019–3031, 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1999. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/177700/pdf/0>. Acesso em 15 de nov. 2025.

COFFEY, A.E.; WORKMAN, S.R.; TARABA, J.L.; FOGLE, A.W. statistical procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions. *Transactions of the ASAE*, v.47, n.1, p. 59-68, 2004.

CUNHA, L. K. Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, p. 239, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/672>. Acesso em 15 de nov. 2025.

DAO, P. U.; HEUZARD, A.G.; LE, T. X.XH. ZHAO, R.Y.; SHANG, C.; FAN. C. The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of The Total Environment*, v. 912, p. 169241, 2024.

DIONATA, C. Ciclo Hidrológico – Água, um bem escasso? Disponível em: <https://carlosdionata.wordpress.com/tag/ciclo-hidrologico/> Acesso em 03 de fev. de 2026.

EASTERLING, D. R.; KUNKEL, K. E.; WEHNEN, M. F.; SUN, L. Detection and attribution of climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes*, v. 11, p. 17–27, 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula da X reunião Técnica de Levantamento de Solos. Miscelânea 1, Rio de Janeiro: 1979, 83 p.

_____. Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE). Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEPD Recife; Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária, 2001.

ERMANO, R. A. Impacto das mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana da bacia do açude Santo Anastácio, em Fortaleza - Ceará. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Campus de Crateús, Universidade

Federal do Ceará, Crateús, 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80171>. Acesso em 26 de jan. de 2026.

ESMALI, A.; GOLSHAN, M.; KAVIAN, A. Investigating the performance of SWAT and IHACRES in simulation streamflow under different climatic regions in Iran. *Atmosfera*, v. 34, n. 1, p. 79–96, 2021.

FARIAS, Vanine Elane Menezes de. Projeções de secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas na Bacia do Rio Capibaribe (PE), sob cenários futuros de mudanças climáticas e uso da terra. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/62584>. Acesso em: 25 maio. 2025.

FAYAL, M. A. A. Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada Wavelet. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, p.158, 2008. Disponível em: <https://research.ebsco.com/c/s7mzkw/search/details/nmpxdzepu5?limiters=FC1%3AN%2CFT%3AN%2CRV%3AN%2CFT1%3AN&q=Previs%C3%A3o%20de%20Vaz%C3%A3o%20por%20Redes%20Neurais%20Artificiais%20e%20Transformada%20Wavelet>. Acesso em 15 de nov. 2025.

FERREIRA, T. S. G. Análise de desempenho do modelo SWAT para a bacia do Rio Capibaribe e estimativa do aporte de sedimentos a seus reservatórios. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil e Ambiental. 145 f. 2020.

GHAFUR, P. G. Climate change in Iraq: temperature trend analysis based on the NASA POWER project data. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 157, n. 2, p. 78, 2026.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 377, n. 1, p. 80–91, 2009.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

HASSAN, B. T; YASSINE, M; AMIN, D. Comparison of urbanization, climate change, and drainage design impacts on urban flashfloods in an arid region: Case Study, New Cairo, Egypt. *Water*, v. 14, n. 15, p. 2430, 2022.

HERNÁNDEZ-MARÍN, M. A.; ORTIZ-GOMEZ, R.; ZAVALA, M.; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, MEDELLIN, P. A.; ORTIZ-ROBLES, F. A. Hydrological simulation using the SWAT model in a semi-arid region in the southern part of Zacatecas, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 18, p. 540, 2024.

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijikata, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pré-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Disponível

em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter3_Low_Res.pdf. Acesso em 18 de jan.2026.

HUANG, X.; QIU, L. Impacts of Climate Change and Land Use/Cover Change on Runoff in the Huangfuchuan River Basin. *Land*, v. 13, n. 12, 2024.

IPCC (2001) Climate Change, Impacts Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf. Acesso em 18 de jan de 2026.

IPCC. Climate Change 2013 The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2013. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/03/ar5_wg1_spm.pdf. Acesso em 18 de jan. de 2026.

IPCC. Technical Summary. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

JANJIC, J.; TADIC, L. Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. *Earth*, v. 4, n. 2, p. 331–344, jun. 2023.

JIMÉNEZ-NAVARRO, I. C.; JIMENO-SÁEZ, P.; LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J.; SENENT-APARICIO, J. Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. *Forests*, v. 12, n. 12, 2021.

KAMBEZIDIS, H. D. 3.02 - The Solar Resource. In: SAYIGH, Ali (Org.). *Comprehensive Renewable Energy*. Oxford: Elsevier, 2012. p. 27–84.

KENDALL, M.G. Rank correlation methods. 1. ed. Griffin, London, 1975.

KOUZEHGAR, K.; ESLAMIAN, S. Chapter 2 - Application of experimental data and soft computing techniques in determining the outflow and breach characteristics in embankments and landslide dams. In: ESLAMIAN, Saeid; ESLAMIAN, Faezeh (Orgs.). *Handbook of Hydroinformatics*, Elsevier, 2023. p. 11–31.

KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BÄSE, F. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment. *Advances in Geosciences*, v. 5, p. 89-97, 2005.

LUTZ, A. F.; TER MAAT, H. W.; BIEMANS, H.; SHRESTHA, A. B.; WESTER, P. IMMERZEEL, W. W. Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 3988-4005, 2016.

MAGALHÃES, A. G.; MONTENEGRO, A. A. A.; ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; JÚNIOR, R. V. P. F. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. *Revista Ambiente & Água*, v. 13, p. e2204, 2018.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA. 2a. 212 p. Série Biodiversidade, v. 26. ISBN 85-7738 038-6, 2007.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 15, p. 2241–2255, 2009.

MELO, L. S. Avaliação das alterações de vazões na bacia hidrográfica do rio São Francisco entre 1985 e 2019: análise de tendências e relações com variáveis climáticas e antrópicas. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, p. 214, 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/50803>. Acesso em 26 de jan. 2026.

MOHSENI, U., AGNIHOTRI, P. G.; PANDE, C. B.; DURIN, B. Understanding the climate change and land use impact on streamflow in the present and future under CMIP6 climate scenarios for the Parvara Mula Basin, India. *Water*, v. 15, n. 9, p. 1753, 2023.

MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais), setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, p. 81. 2005. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/2576>. Acesso em: 15 de jan. 2026.

MORIASI, D.N.; ALLAH, O.; NAJAFIAN, Y. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.3, p. 885-900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NEITSCH, S. L. et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. [S.d.].

NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2009, p. 618). Technical Report, Texas Water Resources Institute, College Station, 2011.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Theoretical Documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station and Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, 2005.

NGUYEN, T. V.; DIETRICH, J.; DANG, T. D.; TRAN, D. A.; DOAN, B. V.; SARRAZIN, F. J.; ABBASPOUR, K.; SRINIVASAN, R. An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, v. 156, p. 105497, 2022.

NOGUEIRA, M. P.; DA SILVA, P. R.; MINOTI, R. T. Influence of the integrity of the riparian zone on the Capão Comprido Stream Water Basin (DF) by simulating different spatial

discretizations with the SWAT+ model. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, v. 59, n. e1743, 2024.

NUNES, F. M. S. Avaliação hidrossedimentológica de uma bacia sem dados de vazão utilizando o modelo swat Dissertação (Mestrado na área de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2018.

PARANHOS, R.; FILHO, D. B. F.; ROCHA, E. C.; JUNIOR, J. A. D.; NEVES, J. A. B.; SANTOS, M, L, W. D. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno. *Leviathan* (São Paulo), n. 8, p. 66–95, 2014.

PEDERSEN, J. T. S.; VUUREN, d. v.; GUPTA, J.; SANTOS, F. D.; EDMONDS, J.; SWART, R. IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022? *Global Environmental Change*, v. 75, p. 102538, 2022.

PERNAMBUCO. SECRETARIA INFRAESTRUTURA E RECURSOS HÍDRICOS (SIRH). Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental. Recife: [s.n.], v. 01/03, 2010.

RAHNAMA, S.; YAGHOOBZADEH, M. Assessing climate change effects on meteorological drought in the extra-arid climate of Bandar Abbas, Iran, using CMIP6 and a multivariable standard precipitation index (MSPI). *Journal of Water and Climate Change*, v. 16, n. 12, p. 3751–3776, 2025.

RIBEIRO NETO, A.; SCOTT, C. A.; LIMA, E. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AND CIRILO, J. A. Infrastructure sufficiency in meeting water demand under climate induced socio-hydrological transition in the urbanizing Capibaribe River basin Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 34493459, 2014.

ROCHA, A. K. P.; SOUZA, L. S. B.; MONTENEGRO, A. A. A.; SOUZA, W. M.; SILVA, T. G. F. Revisiting the application of the SWAT model in arid and semi-arid regions: a selection from 2009 to 2022. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 154, n. 1, p. 7–27, 2023.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; PINTO, E. J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. S. Tendência de índices pluviométricos na bacia do Rio Capibaribe-PE e sua influência na gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 5. Número Especial-VIWMCRHPE, p. 1002-1014, 2014.

SALTELLI, A.; ANNONI, P.; AZZINI, I.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M.; TARANTOLA, S. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, v. 181, n. 2, p. 259–270, 2010.

SALTELLI, A. et al. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, v. 181, n. 2, p. 259–270, 2010.

SANTOS, J. Y. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; QUINN, N. W.; DANTAS, A. P. X.; NETO, A. R. Modeling the impacts of future LULC and

climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. *CATENA*, v. 203, p. 105308, 2021.

SELL, B. M.; BRESSIANI, D.; CECCONELLO, S. T.; BESKOW, S. Desempenho estatístico do swat+ na modelagem hidrológica de uma grande bacia do Pampa Brasileiro. In: 8ª semana integrada da UFPel 2022 – XXIV ENPÓS – Encontro de pós-graduação, 2022, Pelotas – RS. Anais [...] Pelotas: UFPel, 2022.

SEN, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SILVA, G. J. F.; SILVA, R. M.; BRASIL NETO, R. M.; Silva, J.F.C.B.C.; DANTAS, A. P. C.; SANTOS, C. A. G. Multi-datasets to monitor and assess meteorological and hydrological droughts in a typical basin of the Brazilian semiarid region. *Environmental MONITORING and Assessment*, v. 196, p. 368, 2024.

SILVA, T. G. F.; ROCHA, A. K. P.; LUCAS, A. F.; MARINHO, G. T. B.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; MONTENEGRO, A. A. A.; SOUZA, W. M. Streamflow prediction based on the soil and water assessment tool in the Pajeú river basin, Brazilian semiarid. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 156, p. 105420, 2025.

SOBOL, I.M. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, v. 4, p. 407-414, 1993

SONG, Y. H.; NASHWAN, M. S.; CHUNG, E. S.; SHAHID, S. Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea. *Atmospheric Research*, v. 247, p. 105261, 2021.

TATEBE, H et al. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 7, p. 2727–2765, 2019.

TAYE, M.T.; WILLEMS, P.; BLOCK, P. Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, p. 280- 293, 2015.

TENAGASHAW, D. Y. et al. Land use and climate change impacts on streamflow using SWAT model, Middle Awash sub basin, Ethiopia. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 7, n. 3, p. 183–196, 2022.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: A Review of recent modeling strategies. *Geography Compass*, v. 4, n. 7, p. 834–860, 2010.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, v. 43, n. W01413, 2007.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; SHEPHERD, T. G. Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 8, p. 725–730, 2015.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS-ABRH, 2005.

VERTESSY, R. A.; HATTON, T. J.; O'SHAUGHNESSY, P. J.; JAYASURIYA, M. D. A. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. *Journal of Hydrology*, v. 150, n. 2, p. 665–700, 1993.

WILLIAMS, K. D. et al. The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 10, n. 2, p. 357–380, 2018.

XAVIER, A. C. F.; MARTINS, L. L.; RUDKE, A. P.; MORAIS, M. V. B.; MARTINS, J. A.; BLAIN, G. C. Evaluation of Quantile Delta Mapping as a bias-correction method in maximum rainfall dataset from downscaled models in São Paulo state (Brazil). *International Journal of Climatology*, 42(1), 175-190, 2021.

YAN, Y.; XUE, B.; Yinglan, A.; SUN, W.; SHANG, H. Quantification of climate change and land cover/use transition impacts on runoff variations in the upper Hailar Basin, NE China. *Hydrology Research*, v. 51, n. 5, p. 976–993, 2020.

ZHOU, T. New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us? *The Innovation*, v. 2, n. 4, p. 100173, 2021.