



ANALISANDO CENÁRIOS FUTUROS DE PRECIPITAÇÃO E SEUS IMPACTOS NOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE

Susana Cristina Batista Lucena

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Alaine de Sousa Pereira

Universidade Federal da Paraíba

Antonio Marcos Nunes dos Santos

Universidade Federal da Paraíba

Richarde Marques da Silva

Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

Esse artigo analisou a influência do clima futuro (2030–2100) nos recursos hídricos da bacia do Rio Capibaribe. Para a realização desse estudo foram utilizados dados futuros de precipitação e temperatura média do ar do modelo ACCESS-CM2. Para a modelagem hidrológica usou-se o modelo SWAT+ para simular as vazões futuras na bacia, que foi calibrado e validado usando dados de chuva-vazão para o período de 1987 a 2019. Resultados iniciais sem calibração mostraram superestimação de vazões, com NSE negativo. Após calibração, o posto Toritama alcançou NSE=0,79 na calibração e 0,56 na validação; Limoeiro apresentou NSE = -1,83 na calibração e 0,39 na validação; Vitória de Santo Antônio obteve desempenho satisfatório, com KGE reduzido para 0,46 na validação. Projeções climáticas baseadas no modelo ACCESS-CM2 para 2030–2100, nos cenários SSP2.45 e SSP5.85, revelam variabilidade espacial: precipitação de 488–1611 mm em SSP2.45, com maiores valores no litoral (pontos P12-P14) e redução no Agreste (P3-P7); Temperaturas sobem de 26–27,5°C para 27,6–28,8°C, elevando evapotranspiração. Os impactos na vazão incluem picos intensos em SSP2.45 (160–370 m³/s) e redução relativa em SSP5.85 (140-320 m³/s), com superestimação sazonal de fevereiro a maio e boa representação em agosto-dezembro.

Palavras-chave: Cenários climáticos; modelagem hidrológica; mudanças climáticas.

Analyzing future precipitation scenarios and their impact on water resources in the Capibaribe River basin

ABSTRACT

Climate change directly influences hydrological processes, affecting the availability of water resources. This study analyzed the influence of future climate (2030–2100) on the water resources of the Capibaribe River basin. Future precipitation and mean air temperature data from the Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS-CM2) were used. The SWAT+ model was applied for hydrological modeling to simulate future streamflow in the basin, calibrated and validated using rainfall–runoff data for the 1987–2019 period. Initial uncalibrated results indicated overestimation of streamflow, with negative NSE. After calibration, the Toritama station achieved NSE = 0.79 in calibration and 0.56 in validation; Limoeiro showed NSE = –1.83 in calibration and 0.39 in validation; Vitória de Santo Antão presented satisfactory performance, with KGE reduced to 0.46 in validation. Climate projections based on ACCESS-CM2 for 2030–2100 under SSP2.45 and SSP5.85 scenarios revealed spatial variability: precipitation ranging from 488–1611 mm in SSP2.45, with higher values along the coast (points P12–P14) and reduction in the Agreste (P3–P7); temperatures rising from 26–27.5 °C to 27.6–28.8 °C, increasing evapotranspiration. Impacts on streamflow include intense peaks under SSP2.45 (160–370 m³/s) and relative reduction under SSP5.85 (140–320 m³/s), with seasonal overestimation from February to May and good representation from August to December.

Keywords: Climate scenarios; hydrological modeling; climate change.

INTRODUÇÃO

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

Diante dessas mudanças climáticas e panorama de temperatura elevada, alteração no regime de chuvas e na sua distribuição espacial, representam desafios significativo para a sociedade (IPCC, 2021). Essas alterações climáticas impactam a viabilidade populacional, a preservação do meio ambiente, a segurança hídrica e alimentar, além de comprometer os setores como a agricultura e infraestrutura urbana (Tenagashaw *et al* 2022; IPCC, 2021; Almagro et al., 2020).

No Brasil, esses eventos hidrometeorológicos serão mais intensos e frequentes, como secas prolongadas, inundações, enchentes e movimento de massa. Esses eventos impactam diretamente a disponibilidade hídrica e a produção agrícola

(Brasil, 2013). Na região Nordeste brasileira, esses eventos tendem a ser mais severos, com chuvas mais intensas e frequentes em períodos curtos de, ocasionando flutuação no escoamento superficial. Essa situação é agravada pelas condições climáticas semiáridas da região, com precipitação irregular e distribuição espacial, altas temperaturas e evapotranspiração potencial superior a precipitação pluvial, comprometendo a recarga de aquíferos e reservatórios (Angelotti *et al.*, 2012).

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas e compreender os processos hidrológicos em bacia hidrográfica, utilizam-se modelos hidrológicos, como o SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*), uma versão revisada do modelo SWAT (Arnold *et al.*, 2009). Essas modificações tornaram o SWAT+ mais flexível do que o SWAT, em termos de representação espacial dos processos hidrológicos, nas interações do modelo e na modelagem da bacia hidrográficas (Bieger *et al.*, 2017; Bieger *et al.*, 2019). Uma das melhorias desse modelo reside 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 *et al.*, 2019; Nogueira *et al.*, 2024). Isso permite que os resultados da modelagem hidrológicas seja mais realistas na representação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, situado no estado de Pernambuco, 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.

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).

Nesse contexto, esse estudo tem como objetivo analisar cenários climáticos futuros otimista e pessimista para a bacia do Rio Capibaribe entre 2030 e 2100. Além disso, essa pesquisa 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.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Capibaribe (BHRC) (Figura 1) 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 precipitação, pedologia, de uso e cobertura vegetal e socioeconômico, torna o ambiente altamente complexo. Essa heterogeneidade requer de um modelo de gestão ambiental e hídrico, que atenda as peculiaridades regionais e locais (Pernambuco, 2010).

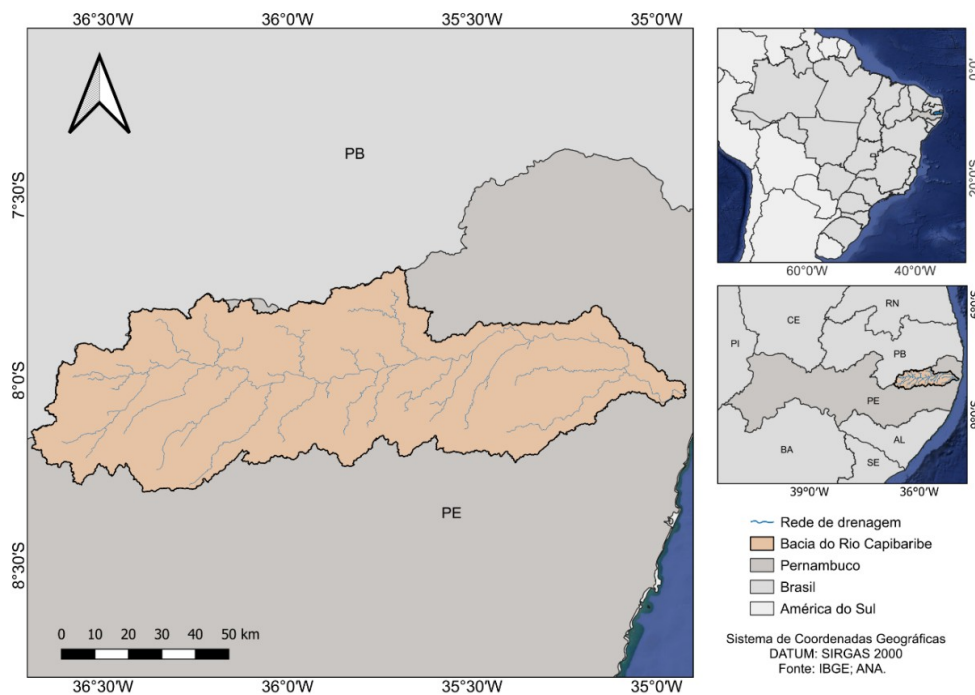


Figura 1. Localização geográfica da bacia do rio Capibaribe, PE

A BHRC abrange 42 municípios desde sua nascente, no município de Poção e Jataúba, à sua foz, no Recife, dos quais 15 municípios estão inteiramente inseridos na bacia e 26 possuem sua sede em sua área (Pernambuco, 2010). O Rio Capibaribe percorre uma extensão de 280 km, desde o manancial no agreste pernambucano, até desagua na cidade de Recife. Além disso, possui o regime

fluviométrico intermitente em seu alto e médio cursos, partir da cidade de Limoeiro passar até um regime perene (Salgueiro et al., 2014).

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 bacia tem dois tipos de climas, sendo que, no alto e médio curso, situado no agreste, tem um clima quente e semiárido com precipitação de 550 mm/ano, com solos rasos e vegetação da caatinga. No baixo curso apresenta 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).

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, zona metropolitana do Recife, 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 BHRC apresenta uma enorme importância econômica liderada pelas atividades industriais associado a produtos alimentares, têxtil, indústria sucroalcooleira, minerais não metálicos etc. Há também atividades relacionado agricultura irrigada, agropecuária, aquicultura, entre outras atividades econômicas (Pernambuco, 2010).

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 diferente processo físico sejam simulados para uma área de estudo (Abbaspour et al., 2015; Brighenti et al., 2016; Nunes, 2018).

Dados de Entrada do modelo

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.

Modelo Digital de Elevação - MDE

O modelo digital de elevação usado nesse trabalho foi do *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM* (Missão Topográfica Radar Shuttle), com uma resolução espacial de 30 m, foi obtido através da plataforma USGS (*United States Geological Survey*). A partir do MDE (Figura 2a), 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, tem que determinar uma área mínima de acumulação do fluxo. Onde foi definido uma área mínima de 50.000 hectares, de modo a garante que nenhum curso de rio seja gerado abaixo desse valor definido. Essa definição designa a área de influência, onde os canais serão criados durante o processo de discretização da bacia.

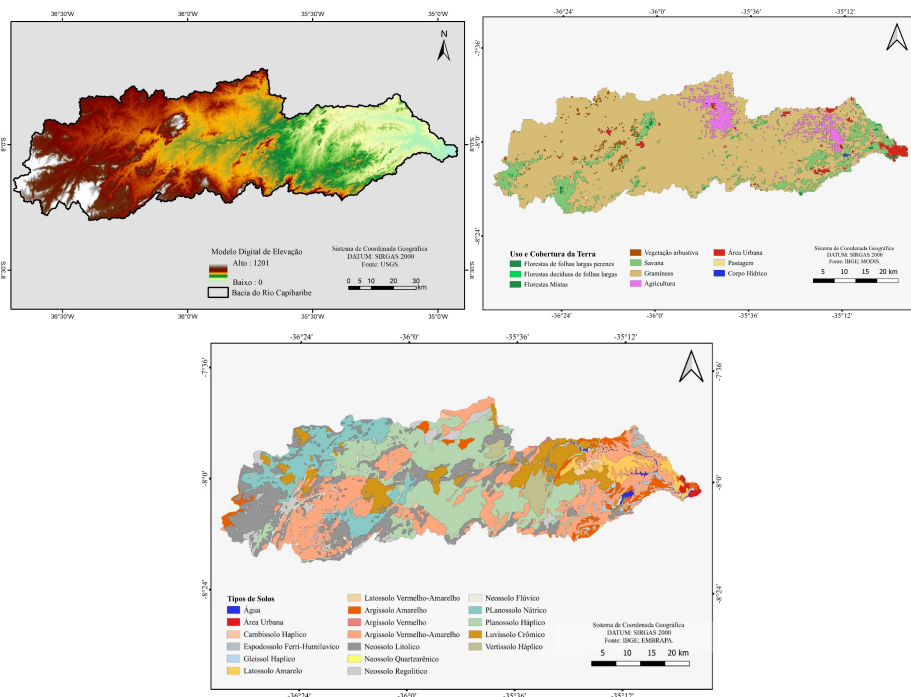


Figura 2. (a) Delimitação da bacia, (b) uso e ocupação da terra, e (c) tipos de solos da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe.

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 do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS. Os usos do solo foram classificados de acordo com as características da bacia de estudo. Para áreas foi identificado dez classes de uso e cobertura vegetal, 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 2b). Ela 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. Destacando que o modelo tem um vasto banco de dados com variados uso de solo e cobertura vegetal, com suas respectivas propriedades, que podem ser utilizadas por diferentes bacias hidrográficas. A Tabela 1 mostra a área de cada tipo de uso e ocupação e indica a porcentagem de cada uso presente bacia. E, mostra também a associação aos tipos de uso e cobertura vegetal com as classes existem no banco de dados do SWAT.

Para 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 valores dos parâmetros para os tipos de solos foram obtidos junto a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os tipos de solos são mostrados e descritos na Figura 2c.

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

| Tipos de Usos | Área (ha) | % | Classe no SWAT |
|-------------------------------------|-----------|-------|---------------------------------|
| Florestas de folhas largas perenes | 1882.00 | 0.25 | <i>Forest evergreen</i> |
| Florestas decíduas de folhas largas | 1742.77 | 0.24 | <i>Forest deciduous</i> |
| Florestas Mistas | 79.68 | 0.01 | <i>Forest Mixed</i> |
| Vegetação Arbustiva | 6326.02 | 0.85 | <i>Range Brush</i> |
| Savana | 72413.76 | 9.77 | <i>Savanna</i> |
| Gramíneas | 612915.13 | 82.68 | <i>Range Grasses</i> |
| Agricultura | 33403.49 | 4.51 | <i>Agricultura Land-Generic</i> |
| Área Urbana | 11614.55 | 1.57 | <i>Residential</i> |
| Pastagem | 715.42 | 0.10 | <i>Pasture</i> |
| Corpo hídrico | 254.56 | 0.03 | <i>Water</i> |

Dados meteorológico e hidrológico

Para simulação hidrológica no SWAT+ reque também de 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.

Para compor os dados meteorológicos foram utilizados o próprio banco de dados de modelo *Global Weather Data* SWAT, que disponibiliza dados *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+.

Os dados precipitação foram coletados de 16 estações pluviométricos (Tabela 2) 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, 2024). 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+. Além disso, foram utilizados dados de fluviométricos de 3 postos de monitoramento, obtidos na plataforma Hidroweb (ANA, 2024). 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. 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 6 reservatórios para a modelagem hidrológica.

Tabela 2. Postos pluviométricos usado na modelagem da bacia do Rio Capibaribe.

| Código | Nome da Estação | Longitude | Latitude | Elevação (m) |
|---------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| 735050 | Engenho Sítio | -35,15 | -7,96 | 65 |
| 735066 | Paudalho | -35,17 | -7,89 | 82 |
| 735067 | Salgadinho | -35,63 | -7,94 | 201 |
| 735100 | Limoeiro | -35,45 | -7,87 | 138 |
| 735157 | Carpina | -35,18 | -7,84 | 116 |
| 735158 | Surubim | -35,76 | -7,85 | 419 |
| 735159 | Surubim | -35,98 | -7,91 | 406 |
| 736040 | Jataúba | -36,50 | -7,98 | 518 |
| 736041 | Santa Cruz do Capibaribe | -36,20 | -7,96 | 437 |
| 736042 | Taquaritinga do Norte | -36,04 | -7,90 | 738 |
| 835048 | São Lourenço da Mata II | -35,03 | -7,99 | 42 |
| 835068 | Vitória de Santo Antão | -35,28 | -8,11 | 156 |
| 835135 | Cumaru | -35,69 | -8,01 | 375 |
| 835136 | Glória do Goitá | -35,29 | -8,00 | 158 |
| 835137 | Pombos | -35,40 | -8,14 | 191 |
| 836092 | Brejo da Madre de Deus | -36,37 | -8,14 | 651 |
| 39130000 | Toritama | -36,06 | -8,01 | 642 |
| 39145000 | Toritama | -35,45 | -7,88 | 642 |
| 39170000 | Vitória de Santo Antão | -35,28 | -8,11 | 285 |

Calibração e validação do modelo hidrológico

A calibração e validação do modelo SWAT+ foram realizadas através da comparação entre as vazões mensais simuladas pelo modelo e as vazões mensais observadas das estações fluviométrica, referentes aos períodos de 1992 a 2007 para calibração e de 2008 a 2016 para a validação do modelo. O processo de calibração das vazões mensais foi realizado de forma automatizada, por meio do software de domínio público o SWAT+ Toolbox. A utilização de ferramentas automatizadas para calibração possibilitar redução de erros e agilizar a realização de múltiplos testes de configuração de parâmetros em menos tempo.

O SWAT+ Toolbox disponibiliza não apenas automatização no processo de calibração, mas também algoritmos diferentes para automatizar os parâmetros do modelo SWAT+. Os algoritmos disponíveis nessa ferramenta são: *Dynamically Dimensioned Search* (DDS), *Differential Evolution Adaptive metropolis* (DREAM) e *Calibration by Latin-hypercube Sampling Iterations* (CALSI). Esse software disponibiliza seis funções objetivas distintas para análise dos resultados, como NSE, KGE, MSE, RMSE, PBIAS E MARE.

O algoritmo usado nesse trabalho foi DDS, e as funções objetivas usadas foram NSE, R, R^2 , KGE, RMSE e PBIAS. 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).

No SWAT+ Toolbox, existe diversos parâmetros disponível para ajusta os variados aspectos das variáveis hidrológicas presente no modelo, como as características físicas das sub-bacias, dos solos, fluxo lateral, fluxo de base, canais, entre outros. O primeiro passo na calibração é a determinação dos parâmetros considerados mais sensíveis para bacia hidrográfica analisada, sendo uma seleção fundamentada na literatura e análise de sensibilidade. Para selecionar quais os parâmetros seriam usados na calibração, foi realizado uma análise de sensibilidade para avaliar o nível de sensibilidade, de acordo com Arnold et al. (2012) e Abbaspour et al. (2015). Foram escolhidos 16 parâmetros (Tabela 3) relacionados fluxo, percolação, reservatório, aquífero, condutividade hidráulica, umidade do solo e escoamento, entre outros, baseado em trabalhos realizado na região (Farias, 2025; Ferreira, 2020).

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, 2025).

Tabela 3 – Descrições dos parâmetros e limites usados na calibração do modelo.

| Parâmetros | Método | Descrição | Intervalo | |
|------------|--------|--|-----------|-----|
| CN2 | P | SCS Curva Número / valor da curva número para a condição de solo úmido | -20 | 20 |
| ESCO | R | Fator de compensação de evaporação do solo | 0 | 1 |
| EPCO | P | Fator de compensação de retirada de água pelos vegetais | 0 | 1 |
| CANMX | R | Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm/H ₂ O) | 1 | 100 |
| PERCO | R | Coefficiente de percolação do solo | 0 | 1 |
| LAT_TTIME | P | Tempo de viagem do fluxo lateral | -10 | 20 |
| CN3_SWF | R | Fator de água do solo para CN3 | 0 | 1 |
| ALPHA | R | Fator de recessão de escoamento de base (dias) | 0,01 | 0,9 |
| FLO_MIN | P | Profundidade limite da superfície ao lençol freático para que ocorra o fluxo de águas subterrâneas (m) | 0 | 20 |
| REVAP_CO | R | Coefficiente de revitalização das águas subterrâneas (adimensional) | 0,02 | 0,2 |
| REVAP_MIN | R | Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada (m) | 0 | 50 |
| BF_MAX | R | Taxa máxima de fluxo de base (mm) | 0.1 | 2 |
| AWC | P | Capacidade de armazenamento de água no solo (mm H ₂ O/mm) | -10 | 10 |
| K | P | Condutividade hidráulica (mm/h) | -10 | 20 |
| CHK | P | Condutividade hidráulica efetiva no canal tributário aluvial (mm/h). | -20 | 20 |
| VOL | R | Volume do reservatório (m ³ /s) | 10 | 100 |

P = Percentual, e R = Substituição.

Para determinar a variação dos parâmetros no modelo, utiliza-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 tem como intuito multiplica um valor de um parâmetro calibrado pelo valor inicial do modelo padrão (Nguyen et al, 2022; Abbaspour, 2012; Farias, 2025).

A análise de sensibilidade foi realizada considerando os 16 parâmetros, para assim identificar aqueles que mais influência no processo de modelagem hidrológica da bacia. 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. Após realizar análise de sensibilidade a partir de 682 amostras, o método fornece a ordem de sensibilidade dos parâmetros analisados.

A calibração do modelo foi realizada através do método DDS no SWAT+ Toolbox, uma abordagem eficiente para a análise simultânea de inúmeros parâmetros que pode exercer influência o desempenho do modelo, de modo otimizar os resultados por meio de iterações sucessivas. Nesse trabalho, foram realizadas calibrações em três estações fluviométricas distribuídas ao longo da bacia. Os dados observados foram divididos em dois períodos distintos: o primeiro foi utilizado no processo de calibração (1992 – 2007); e o segundo foi empregado na validação (2008 – 2017) da modelagem hidrológica. 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.

Sendo assim, 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 Vitória de Santo Antão, onde foi realizado a calibração para sub-bacia 38. O processo de calibração foi conduzido por 100 iterações com a finalidade de alcançar os melhores valores dos parâmetros dentro dos intervalos de cada parâmetro usado no processo de modelagem hidrológica.

Análises de desempenho do modelo para o período histórico

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. A análise estatística envolveu o uso de métrica de regressão linear, o coeficiente de Pearson (r), coeficiente de determinação (R^2), para quantificar a relação linear entre os dados

simulados e observados. Além disso, foram utilizados coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o percentual de viés (PBIAS), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE) para avaliar a confiabilidade dos resultados simulados.

Cenários de mudanças climáticas

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; Farias, 2025). Neste estudo, foi utilizado um modelo climático de circulação global (MCCG), o *Australian Community Climate And Earth System Simulator* (ACCESS-CM2). Os dados dos MCCG foram obtidos junto ao *Climate Change Dataset for Brazil – CLIMBra* (Ballarin et al., 2023), que disponibiliza dados de projeções futuras desses modelos com correção de viés para as variáveis meteorológicas 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 $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$.

As projeções climáticas futuras 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).

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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem hidrológica

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 séries temporais de precipitação e vazão de três postos fluviométricos. A aplicação modelo SWAT+, permitiu observar o comportamento das variáveis hidrossedimentológicas ao longo do período analisado.

A escolha dos parâmetros mais adequados para cada área de contribuição é mostrada na Tabela 4. 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 *Replace* e *Percent* foram utilizados na calibração, pois apresentar os valores reais dos parâmetros a serem colocados no modelo, eliminando a necessidade de realiza operações matemáticas a partir dos valores iniciais.

Tabela 4 – Resultados da calibração dos parâmetros no SWAT-CUP para as áreas de contribuição das estações fluviométricas.

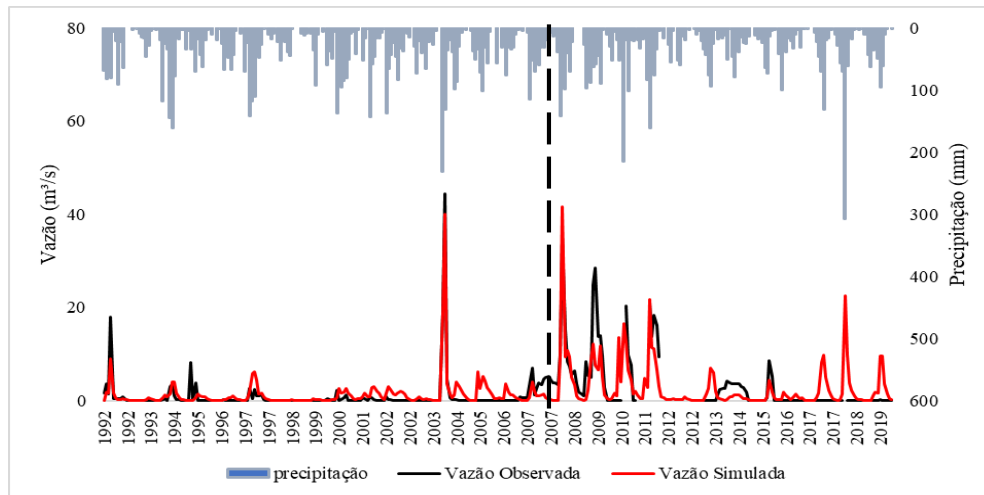
| Parâmetro | Método | Toritama | Limoeiro | Vitória de Santo Antão |
|-----------|----------------|----------|----------|------------------------|
| CN3_SWF | <i>Replace</i> | 0,6527 | 0,6573 | 0,0469 |
| CN2 | <i>Percent</i> | -11,9757 | -13,125 | -7,5119 |
| PERCO | <i>Replace</i> | 0,9182 | 0,9183 | 0,7535 |
| REVAP_MIN | <i>Replace</i> | 12,0093 | 38,3957 | - |
| ESCO | <i>Replace</i> | 0,7969 | 0,7969 | 0,6606 |
| REVAP_CO | <i>Replace</i> | 0,1578 | 0,1578 | - |
| CANMX | <i>Replace</i> | 70,6094 | 70,6094 | - |
| K | <i>Percent</i> | -6,7188 | | 15,7812 |
| ALPHA | <i>Replace</i> | 0,01 | 0,2819 | - |
| LAT_TTIME | <i>Percent</i> | 9,5924 | - | - |
| FLO_MIN | <i>Percent</i> | 12,1875 | - | - |
| AWC | <i>Percent</i> | - | - | 2,1875 |
| VOL | <i>Replace</i> | 14,2188 | 11,6668 | 54,238 |

Calibração e validação para o posto 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. O resultado da calibração e validação são apresentados na Figura 3, que exhibe os hidrogramas da vazão após o ajuste do modelo.

Na Tabela 5 apresentam 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.* (2015), 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.

Figura 3 - Hidrogramas das vazões observadas, calibradas, validada e hietograma da precipitação média mensal de 1992 a 2017, para a estação fluviométrica de Toritama.



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.

Tabela 5. Desempenho estatístico do modelo para as estações fluviométricas usadas neste estudo.

| Estatísticas | Toritama | | | Limoeiro | | | Vitória de Santo Antão | | |
|----------------|----------|--------|-------|----------|---------|--------|------------------------|-------|-------|
| | Qo | Qc | Qv | Qo | Qc | Qv | Qo | Qc | Qv |
| Média | 0,95 | 1,26 | 2,94 | 2,73 | 3,83 | 9,02 | 1,62 | 1,15 | 1,10 |
| Desvio Padrão | 3,86 | 3,38 | 5,40 | 9,53 | 6,87 | 16,78 | 3,65 | 2,66 | 3,30 |
| R ² | - | 0,79 | 0,61 | - | 0,31 | 0,71 | - | 0,92 | 0,89 |
| Nash | - | 0,79 | 0,56 | - | -1,83 | 0,39 | - | 0,85 | 0,85 |
| r | - | 0,89 | 0,78 | - | 0,56 | 0,74 | - | 0,96 | 0,94 |
| KGE | - | 0,52 | 0,66 | - | -0,45 | -0,05 | - | 0,71 | 0,46 |
| PBIAS | - | -32,75 | 15,91 | - | -137,83 | -90,82 | - | 28,27 | 38,41 |
| RMSE | - | 1,78 | 4,63 | - | 6,13 | 12,67 | - | 1,40 | 1,53 |

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.

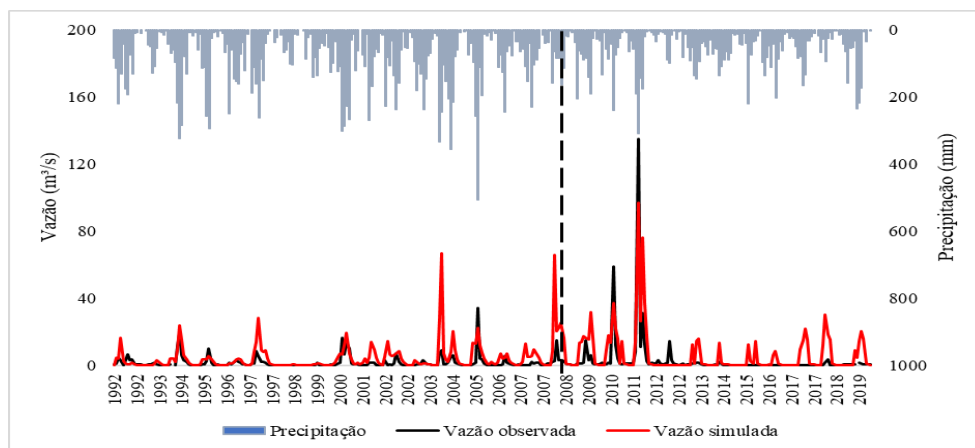
Os resultados obtidos para o posto fluviométrico de Limoeiro estão ilustrados na Figura 4. O processo de calibração foi realizado para mesmo período utilizado para o posto de Toritama, enquanto a validação abrangeu os anos de 2008 a 2014. A calibração e validação do modelo não apresentaram um desempenho satisfatório, no entanto, observou-se uma melhora significativa durante o processo de validação, com R² de 0,71, r de 0,74, NSE de 0,39, as demais métricas ficaram abaixo desses valores, sendo consideradas insatisfatório segundo Moriasi *et al.* (2015), indicado que o modelo não conseguiu representar bem o comportamento hidrológico da bacia nesse ponto de contribuição. 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.

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 desafiam a capacidade do modelo, principalmente em período com alta variabilidade climatológica.

A Figura 5 apresenta 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 altos. 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 validação.

Figura 4 – Hidrograma das vazões observadas, calibradas, validadas e histograma da precipitação média mensal de 1992 a 2014, para a estação fluviométrica de Limoeiro.



Tendências futuras da precipitação e temperatura do ar para bacia do Rio Capibaribe entre 2030 e 2100

A análise descritiva dos dados de precipitação e temperatura, projetada para o período de 2030 a 2100, foi realizada com base nos cenários otimista (SSP2.45) e pessimista (SSP5.85), considerando os parâmetros estatísticos, como média, desvio médio e desvio padrão. Esses resultados estão apresentados na Tabela 6. O ponto P7 destaca-se por apresentar valor baixo de desvio padrão tanto no cenário otimista como no pessimista, como respectivo valor 246,21 e 189,42, indicando uma aproximação com a média, ou seja, uma ausência de dispersão dos dados, sugerindo uma uniformidade na chuva na região. Por outro lado, os pontos P14 e P13 exibem os maiores valores de desvio padrão em ambos os cenários, apontando para uma alta variabilidade e a possibilidade de eventos extremos de chuvas na região próxima ao oceano.

Figura 5 - 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.

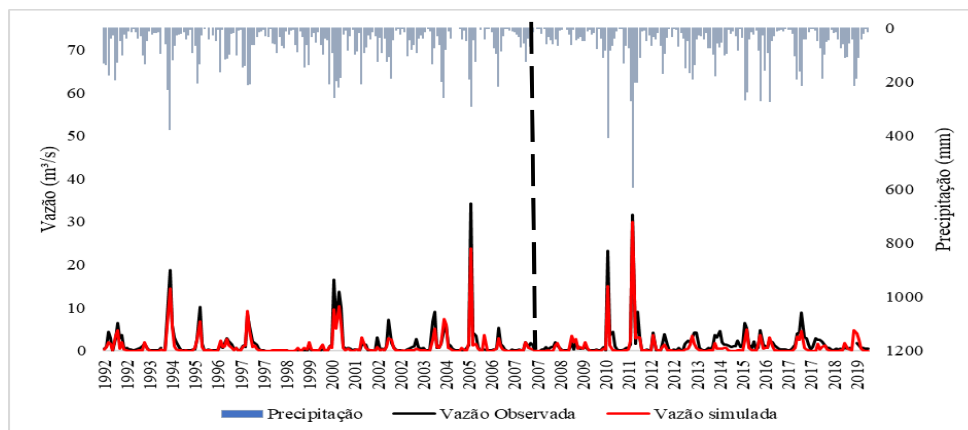


Tabela 6. Análise descritiva dos dados futuros de precipitação (mm) de 2030 a 2100

| Ponto de grade | SSP2.45 | | | SSP5.85 | | |
|----------------|----------|---------------|--------------|----------|---------------|--------------|
| | Média | Desvio Padrão | Desvio Médio | Média | Desvio Padrão | Desvio Médio |
| P1 | 591,94 | 299,82 | 254,23 | 584,74 | 290,57 | 227,88 |
| P2 | 583,32 | 291,64 | 249,18 | 578,79 | 284,37 | 225,22 |
| P3 | 536,66 | 252,07 | 217,50 | 531,45 | 249,91 | 196,86 |
| P4 | 578,58 | 260,14 | 224,21 | 572,89 | 258,04 | 202,81 |
| P5 | 578,58 | 260,14 | 224,21 | 572,89 | 258,04 | 202,81 |
| P6 | 499,11 | 262,15 | 221,45 | 494,71 | 250,92 | 198,69 |
| P7 | 491,53 | 246,21 | 209,48 | 488,04 | 237,17 | 189,42 |
| P8 | 638,34 | 307,25 | 264,92 | 636,56 | 299,12 | 239,34 |
| P9 | 614,04 | 283,76 | 245,24 | 613,28 | 277,98 | 223,05 |
| P10 | 614,04 | 283,76 | 245,24 | 613,28 | 277,98 | 223,05 |
| P11 | 706,25 | 312,75 | 269,06 | 706,53 | 309,12 | 247,09 |
| P12 | 964,88 | 405,61 | 345,97 | 964,66 | 395,23 | 316,27 |
| P13 | 1.247,83 | 503,65 | 425,15 | 1.246,84 | 484,56 | 390,53 |
| P14 | 1.611,38 | 616,06 | 513,39 | 1.605,72 | 583,74 | 472,55 |
| P15 | 638,34 | 307,25 | 264,92 | 636,56 | 299,12 | 239,34 |
| P16 | 614,04 | 283,76 | 245,24 | 613,28 | 277,98 | 223,05 |

Em relação ao desvio médio, observa-se que não apresenta variações significativas em relação à média, reforçado a ausência na dispersão na maioria dos pontos analisados. Os pontos P7 e P8 destacam-se pela menor dispersão dos dados de precipitação, indicando uma distribuição mais uniforme das chuvas para

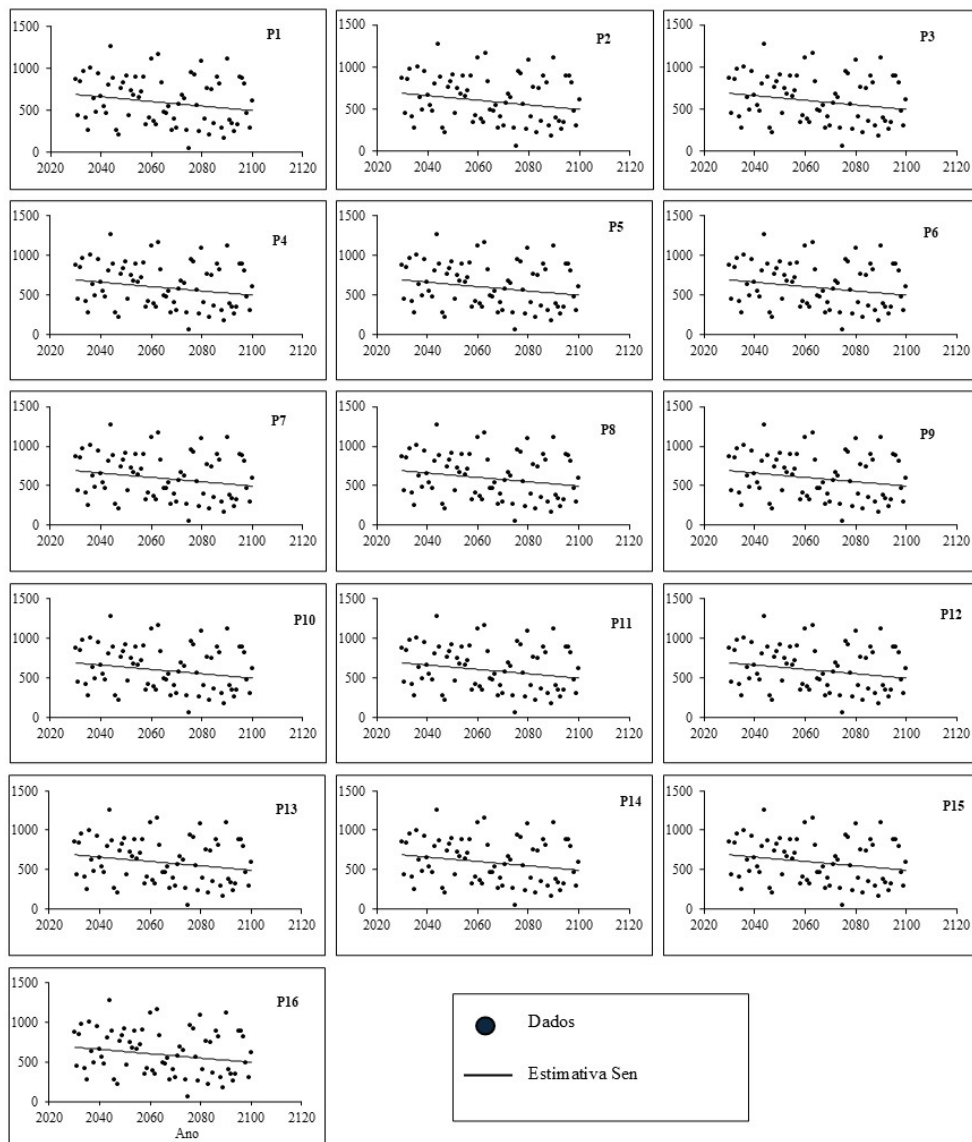
essas regiões, para os ambos os cenários. Em contraste, os pontos P14, P13 e P12 mostram uma maior variabilidade, sugerindo chuvas mais irregulares e intensas, nos cenários analisados, com potencial de ocasiona impactos (inundação e movimento de massa). A análise da média revelou que, no cenário SSP2.45 os valores variam de 591 mm a 1.611 mm, enquanto no SSP5.85 a variação é de 584,74 mm a 1.605,72 mm. O ponto P14 apresenta a maior média de precipitação, associada a altos desvio padrão e médio, o que o identifica como uma área vulnerável a eventos extremos de chuvas.

Na Tabela 7 apresenta os resultados da estatística descritiva para avaliar o comportamento da temperatura. Observa-se que os valores se mantiveram semelhantes entre os cenários SSP2.45 e SSP5.85, com pouca variação. Essa estabilidade, indica ausência na dispersão significativa nos desvios padrão e médio, sugere que as projeções de temperatura são mais previsíveis do que a precipitação. No entanto, essa estabilidade “térmica” e a variabilidade da precipitação, principalmente nos pontos P13 e P14, pode intensificar os ricos hidrológicos, como enchentes, inundação ou estiagens prolongas, agravados pelas mudanças climáticas. A Figura 6 apresenta as tendências anuais de precipitação, projetada para o período de 2030 a 2100, para o cenário SSP2.45 (otimista). Observa-se uma diminuição da tendência de precipitação em todos os pontos analisado, caracterizada por uma redução gradativo ao longo do período.

Tabela 7 – Análise descritiva dos dados futuros de temperatura (°C) de 2030 a 2100

| Ponto de Grade | SSP2.45 | | | SSP5.85 | | |
|----------------|---------|---------------|--------------|---------|---------------|--------------|
| | Média | Desvio Padrão | Desvio Médio | Média | Desvio Padrão | Desvio Médio |
| P1 | 26.88 | 0.89 | 0.72 | 27.96 | 1.62 | 1.39 |
| P2 | 26.81 | 0.86 | 0.70 | 27.87 | 1.59 | 1.36 |
| P3 | 26.92 | 0.84 | 0.68 | 27.95 | 1.58 | 1.36 |
| P4 | 27.17 | 0.82 | 0.66 | 28.18 | 1.57 | 1.34 |
| P5 | 27.17 | 0.82 | 0.66 | 28.18 | 1.57 | 1.34 |
| P6 | 27.30 | 0.88 | 0.72 | 28.38 | 1.63 | 1.39 |
| P7 | 27.23 | 0.86 | 0.70 | 28.29 | 1.60 | 1.37 |
| P8 | 27.23 | 0.85 | 0.69 | 28.26 | 1.59 | 1.36 |
| P9 | 27.37 | 0.86 | 0.70 | 28.38 | 1.63 | 1.40 |
| P10 | 27.37 | 0.86 | 0.70 | 28.38 | 1.63 | 1.40 |
| P11 | 27.42 | 0.88 | 0.71 | 28.41 | 1.67 | 1.43 |
| P12 | 27.55 | 0.77 | 0.63 | 28.51 | 1.53 | 1.31 |
| P13 | 27.82 | 0.70 | 0.57 | 28.74 | 1.44 | 1.23 |
| P14 | 27.86 | 0.68 | 0.56 | 28.76 | 1.42 | 1.21 |
| P15 | 27.23 | 0.85 | 0.69 | 28.26 | 1.59 | 1.36 |
| P16 | 27.37 | 0.86 | 0.70 | 28.38 | 1.63 | 1.40 |

Figura 6 – Variação anual da precipitação utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2100 no cenário SSP2.45



A Figura 7 apresenta as tendências anuais de precipitação para o cenário pessimista (SSP5.85), observa-se uma tendência constante de precipitação, sugerido uma estabilidade climática na região estudada, com variações não significativas ao longo do tempo. Essa estabilidade indica que o modelo ACCESS-CM2 pode não ter capturado adequadamente as características específicas da bacia sob o cenário pessimista.

A Figura 8 apresenta as tendências anuais médias de temperatura, projetada para o período de 2030 a 2100, com base no cenário SSP2.45 (otimista). Observa-se um

crescimento da tendência de temperatura em todos os pontos analisados, caracterizado por um aumento significativo ao longo do período. 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.

Figura 7 – Variação anual da precipitação utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2100 no cenário SSP5.85

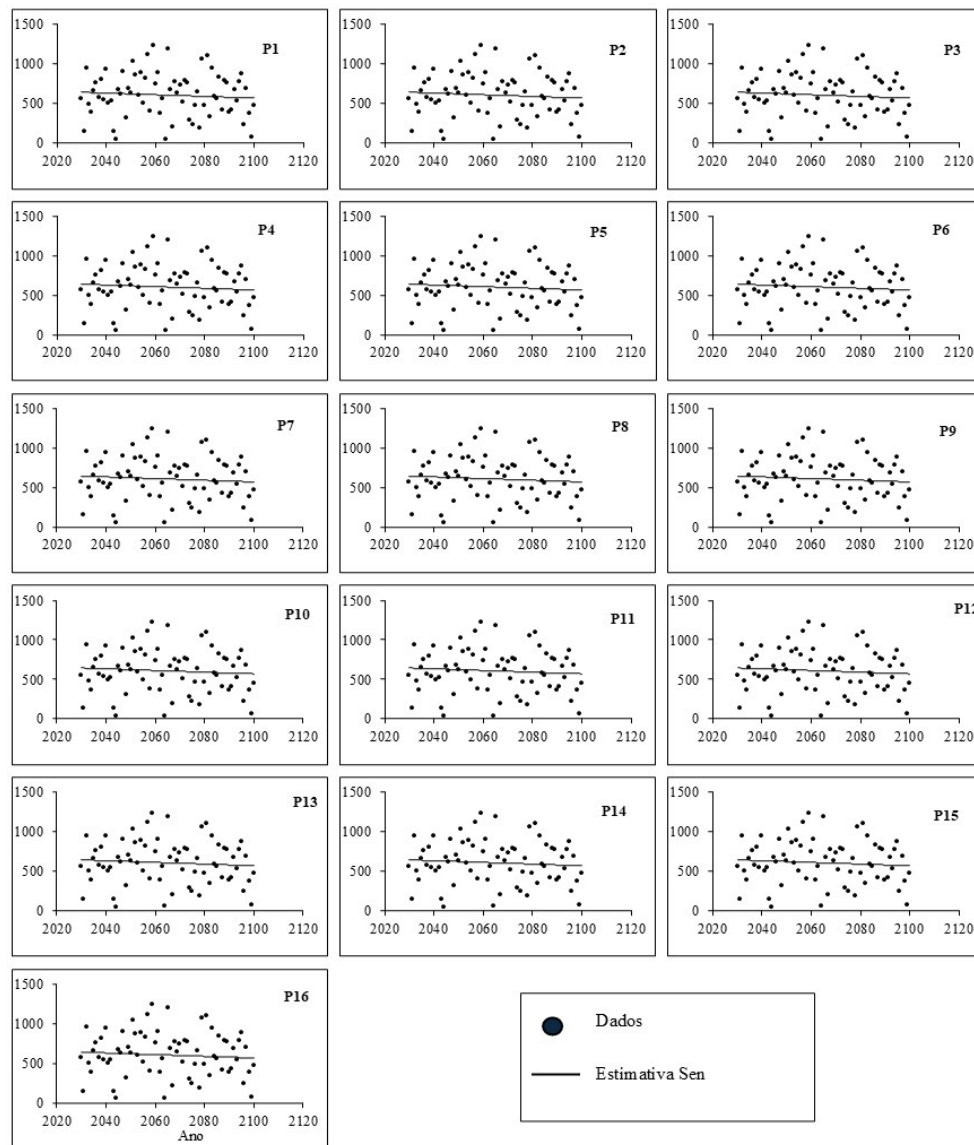
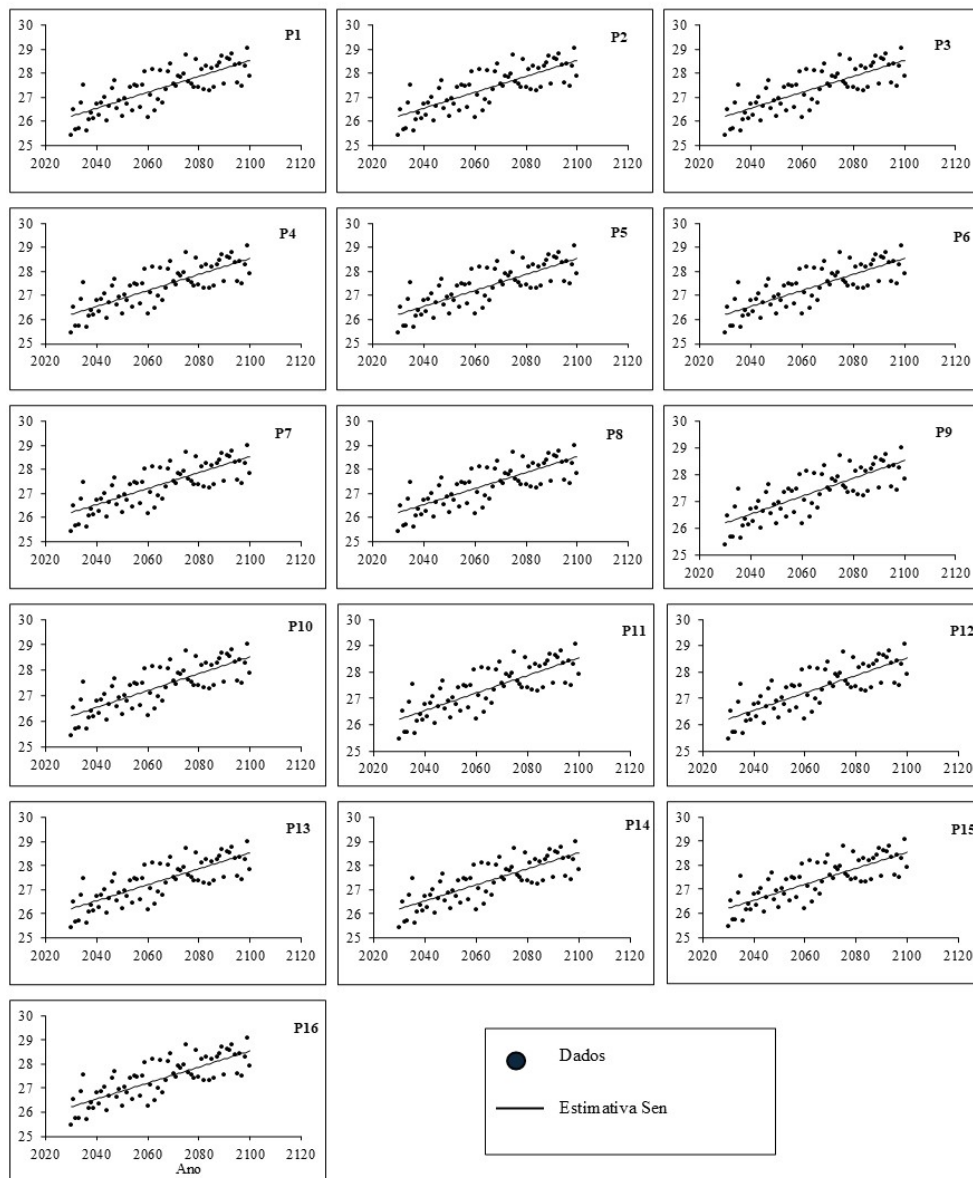
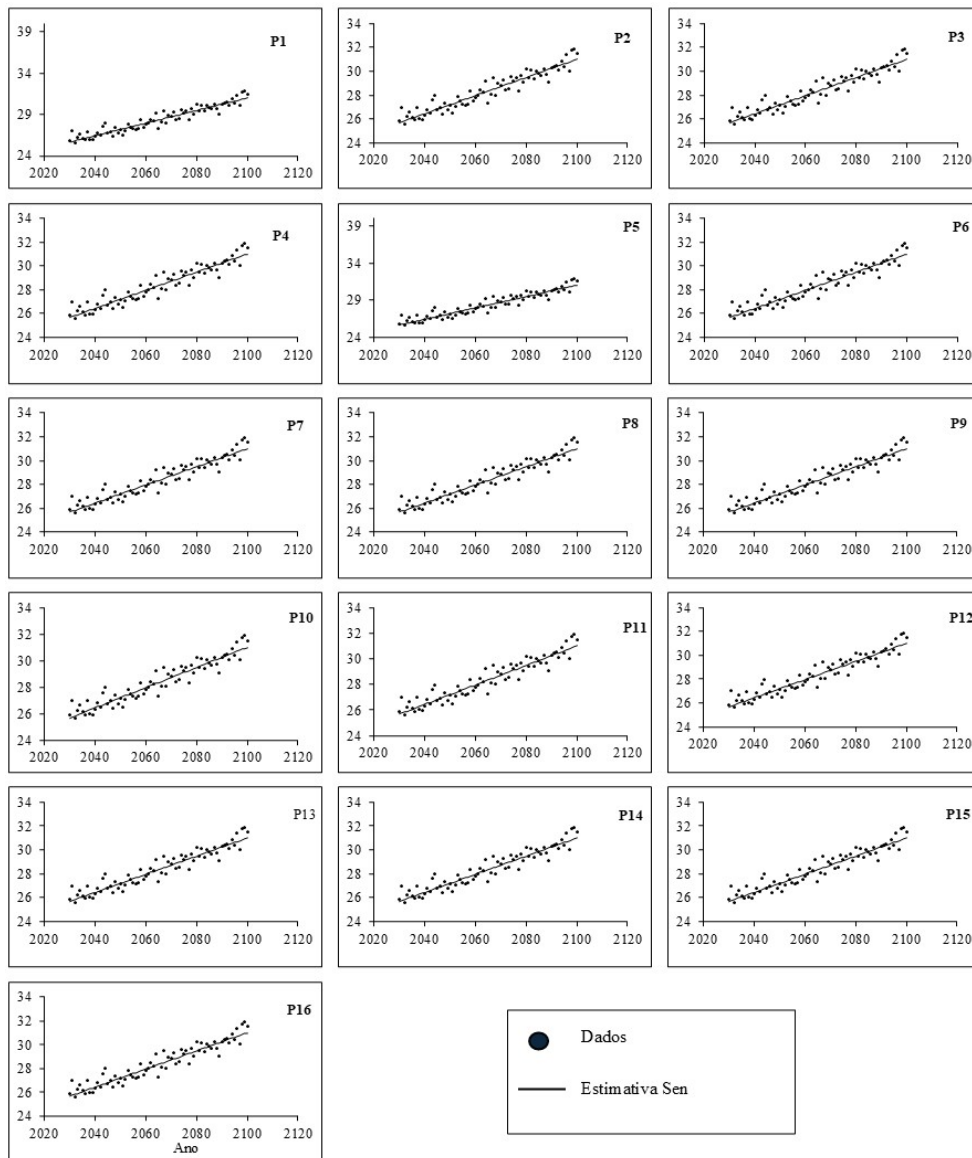


Figura 8 – Variação anual da temperatura utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2100 no cenário SSP2.45.



A Figura 9 apresenta as tendências anuais médias de temperatura para o cenário pessimista, observa-se uma tendência de crescimento mais acentuada da temperatura, sugerindo uma variação significativa ao longo do período analisado. Essa mudança ocorre de forma previsível, indicando um padrão de aquecimento que pode ser atribuído às mudanças climáticas e às ações antrópicas. O aumento da temperatura acarreta impactos, pois pode reduzir a quantidade de água armazenadas em reservatórios, lagos e lenções freático, influenciando na disponibilidade hídrica ao longo do tempo.

Figura 9 – Variação anual da temperatura utilizando o teste de Mann-Kendall para o período 2030 a 2100 no cenário SSP5.85.



Variabilidade da precipitação e da temperatura do ar para o período entre 2030 e 2100

As Figuras 10a–b mostram a distribuição espacial de precipitação projetada para a bacia do rio Capibaribe nos cenários SSP2.45 e SSP5.85, referente ao período de 2030 a 2100. No cenário SSP2.45 (Figura 10a) a variação da precipitação varia entre 488 mm e 1611 mm, apresentado uma distribuição espacial não uniforme. Os pontos P6, P7, p5, P4 e P3 apresentar o menor índice pluviométrico, com precipitação entre de 488 mm a 583 mm. Esses pontos abrangem a região do

Agreste Pernambucano que, apresenta uma variabilidade climática típica do semiárido, o que intensifica as flutuações observada. Contudo, Destaca-se a ocorrência de eventos extremos de chuvas na porção do litorânea, corroborando com os resultados estatísticos, especialmente nos pontos P12, P13 e P14.

Em relação ao cenário pessimista (Figura 10b), verifica-se uma redução gradual na precipitação na região Agreste, acompanhada por uma maior variabilidade climática, com uma precipitação variando entre 488 mm e 708 mm. O ponto P11 e P8 mostram uma redução das chuvas em comparação ao cenário otimista, sugerindo uma tendência a condições mais secas. Em contraste, os pontos P12, P13 e P14 mantém os valores de precipitação elevados, o que reforça a vulnerabilidade dessas áreas, especialmente a região metropolitana de Recife, a eventos hidrológicos extremos sob o cenário pessimista.

As Figuras 11a–b mostram a distribuição espacial de temperatura média do ar projetada referente ao período de 2030 a 2100 nos cenários SSP2.45 e SSP5.85, para a bacia do rio Capibaribe. No cenário SSP2.45, a temperatura varia entre 26 °C a 27 °C, com a maior parte da área de estudo registrando valores entre 27,2 °C a 27,5, mostrando um comportamento previsível (Figura 11a). Contudo, observa-se um leve aumento da temperatura na região leste da bacia, possivelmente influenciado pelas mudanças climáticas e pela variabilidade climática do litoral. No cenário SSP5.85 (Figura 11b), há um aumento generalizado da temperatura, variando 27,9 °C e 28,8 °C, com pico mais intensos na porção leste (de até 30 °C), o que pode acarretar secas prolongadas em períodos curtos. Essas elevações térmicas combinada com a variabilidade da precipitação, pode amplificar a possibilidade de eventos extremos, como inundação e períodos secos.

Figura 10 – Distribuição espacial da precipitação média anual na bacia do rio Capibaribe para o período de 2030 a 2100.

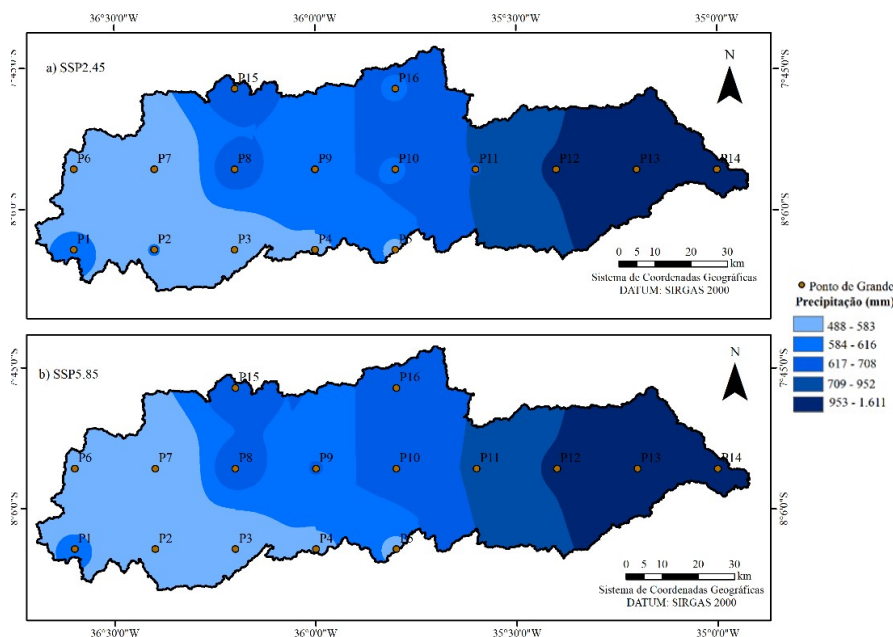
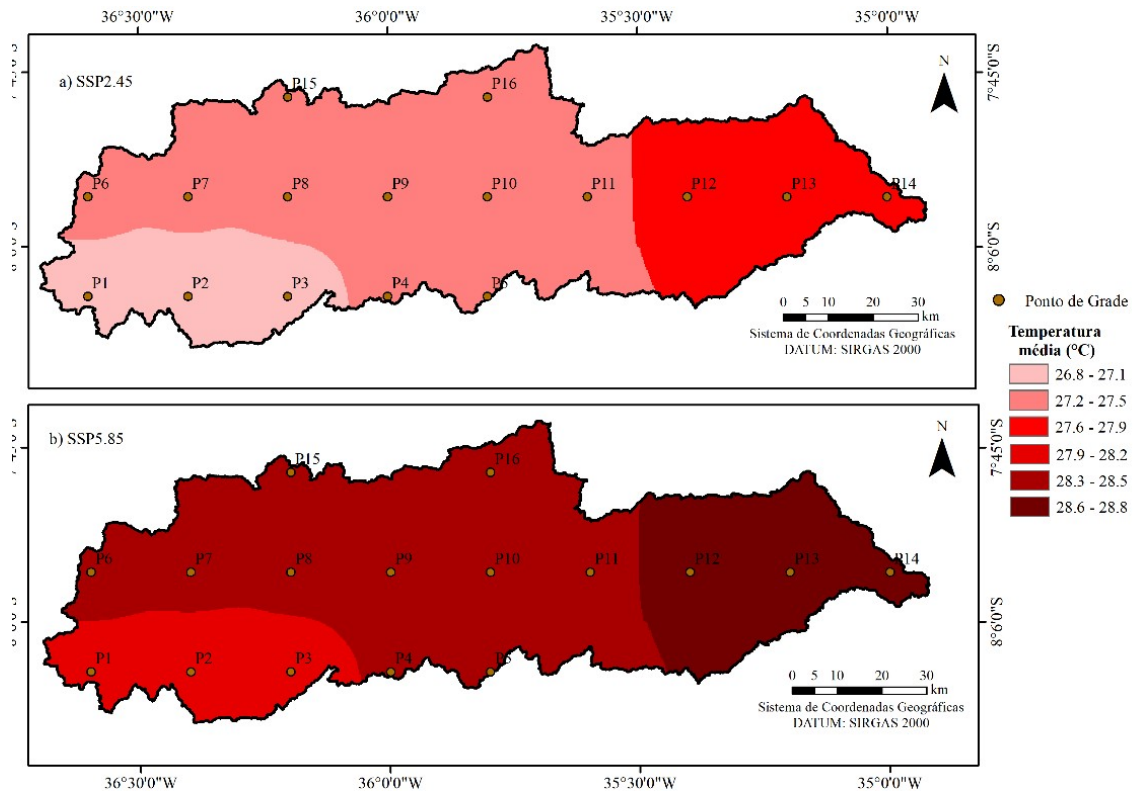


Figura 11. Distribuição espacial da temperatura média anual na bacia do rio Capibaribe para o período de 2030 a 2100.



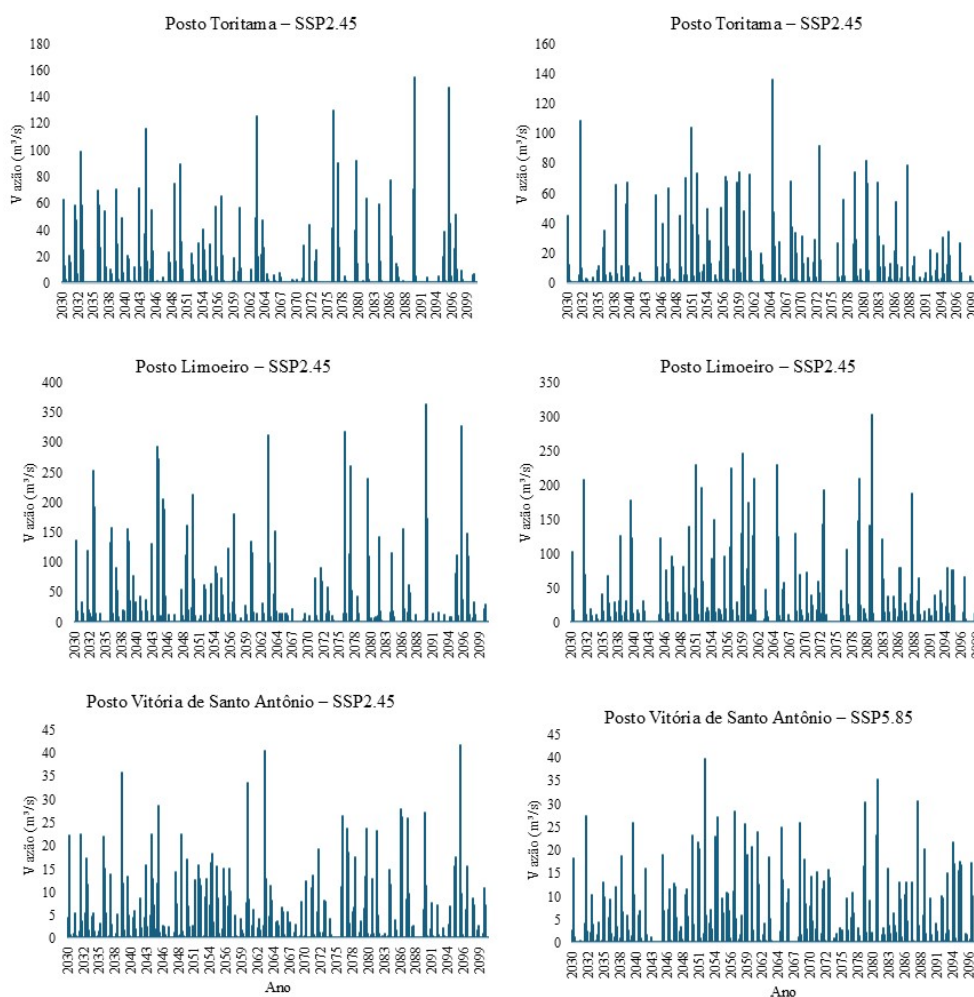
Fonte: Autoral (2025).

Impactos das mudanças climáticas nas vazões da bacia do rio Capibaribe

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do rio Capibaribe, foram utilizados dados climáticos do modelo ACCESS-CM2, integrados ao modelo hidrológico calibrado, considerado os cenários SSP2.45 e SSP5.85 para o período de 2030 a 2100. Esse procedimento possibilitou observar o comportamento hidrológico da bacia nos cenários climáticos adotado. Com relação ao cenário SSP5.85, que representa um cenário mais extremos, os resultados mostram uma redução no fluxo de vazão, indica uma diminuição da precipitação e aumento da temperatura globais para o período analisado. Nos postos de Toritama e limoeiro apresentam uma redução do fluxo em comparação com o SSP2.45, com picos de 140 m³/s a 320 m³/s, essa diminuição pode ser em virtude do aumento da temperatura e as variações sazonais na precipitação. Na região de Vitória de Santo Antônio continua apresentado picos de vazão baixo, permanecendo abaixo de 40 m³/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.

A Figura 12 apresenta a série temporal mensal da vazão simulada para os mesmos postos. Observa-se que o modelo climático em relação aos dados observado diverge em ambos os cenários, observando uma superestimação da vazão para os postos analisado, sugerindo que o modelo não conseguiu captura bem o comportamento hidrológico da bacia entre os meses fevereiro a maio. Por outro lado, o modelo conseguiu captura bem a dinâmica da bacia em ambos os cenários climático nos meses de agosto a dezembro, sendo que esse modelo é mais representativo para posto de limoeiro, onde a vazão simulada e observada tem picos de vazão alinhado. Para os postos de Toritama e Vitória de Santo Antônio, essa concordância ocorre apenas de outubro a dezembro. Contudo, em de Vitória de Santo Antônio, o modelo subestima a vazão de junho a setembro, período chuvoso, sugerindo uma limitação na representação das chuvas intensas nessa região. Nos períodos secos, O modelo climático apresenta um bom desempenho na captura das vazões mínimas.

Figura 12 – Vazão mensal de um modelo climático para o período de 2030 a 2100.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este esse trabalho analisou os impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do rio Capibaribe. O resultado alcançado pelo processo de modelagem hidrológico empregado o modelo SWAT +, foi satisfatório o desempenho do modelo para os postos de Toritama e Vitória de Santo Antônio. Porém, o modelo não foi eficiente na modelagem do posto de Limoeiro, indicado o ajuste ineficaz.

As projeções climáticas baseadas no modelo ACCESS-CM2 e cenários SSP2.45 e SSP5.85, indicam uma variabilidade espacial na precipitação, com valores elevados, especialmente na porção leste da bacia, sugerindo que essa área é suscetível aos eventos extremos de precipitação no cenário SSP2.45. 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. Em relação a temperatura haverá aumento gradativo em ambos os cenários climático, de modo a intensifica evapotranspiração e redução não armazenamento de água de reservatórios, lago e lagoa.

Quanto as medias mensais de vazão simulada, o modelo não foi totalmente representativo, com superestimação ou subestimação em relação aos dados observados, especialmente nos meses de fevereiro a maio, enquanto só conseguiu capturas bem os períodos secos. Essas discrepâncias mostram a necessidade de um refinamento no processo de calibração e nos dados de precipitação.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.

ALMAGRO, André et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmospheric Research*, v. 244, p. 105053, 1 nov. 2020.

ANGELOTTI, Francislene; JÚNIOR, Paulo Ivan Fernandes; SÁ, Iedo Bezerra de. Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Medidas de Mitigação e Adaptação (Climate Change in the Brazilian Semiarid: Mitigation and Adaptation Practices). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, n. 6, p. 1097–1111, 2011.

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, 1 ago. 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.

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*, 10, 131. 2023.

BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCH, D. D.; ALLEN, P. M. 2019. representing the connectivity of upland areas to floodplains and streams in swat+. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 55, n. 3, P. 578–590, 2019. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12728>

BIEGER, K. et al. Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 53, n. 1, p. 115–130, 2017. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>

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.

DIAZ, C. C. F. (2021). Impactos da dinâmica de uso e cobertura da terra sobre os

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.

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.

FERREIRA, T. S. G. (2020). 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.

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

JUNIOR, E. C.G.; ELY, D. F. Métodos estatísticos não-paramétricos como ferramenta no monitoramento pluviométrico. *Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)*, v. 23, n. 1, p. 38–53, 2021.

- KENDALL, M.G. Rank correlation methods. 1. ed. Griffin, London, 1975.
- 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. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- 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, 1 abr. 1970. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- NGUYEN, Tam V. et al. 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, 1 out. 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, 59, e1743, 2024. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781743>
- 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.
- 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.
- 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, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 34493459, 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3449-2014>.
- 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, vol.07, n.05. Número Especial-VIWMCRHPE. 1002-1014, 2014. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.5.p1002-1014>
- 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 C.R.; QUINTAS M.C.L.; CENTENO J.A.S. Estudo do Método de Interpolação do Inverso da Distância a Uma Potência. Anais. II Simpósio Brasileiro de Geomática Presidente Prudente - SP. V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. p. 057-062, 2007.

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, Direess Yigezu 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, 1 set. 2022.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration, *Water Resour. Res.*, 43, W01413, (2007). doi:10.1029/2005WR004723.

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.

Contato com o autor: susana.lucena@ifpb.edu.br

Recebido em: 02/05/2025

Aprovado em: 27/06/2026