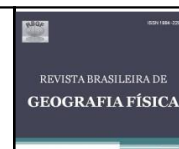




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Mudanças Hidrológicas Projetadas para o Reservatório de Sobradinho sob Cenários Climáticos do Século XXI com Base em Simulações no SWAT/SUPeR

Josicléda Domiciano Galvêncio¹, Eduardo Mario Menciondo², Suzana Gico Montenegro³, Rodrigo Queiroga de Miranda⁴, Danielle Bressiani⁵, Werônica Meira de Souza⁶, Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel⁷, Valéria Sandra de Oliveira Costa⁸, Magna Soelma Beserra de Moura⁹, Luz Adriana Cuartas¹⁰, Rodrigo Santos Costa¹¹, Enio Bueno Pereira¹², Pedro Gustavo Câmara da Silva¹³

¹Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, Brasil. E-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br (autor correspondente), ²Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil. E-mail: emm@sc.usp.br, ³UFPE/Agência Pernambucana de Águas e Clima, Recife/PE, Brasil. E-mail: suzanam.ufpe@gmail.com, ⁴UFPE, Recife/PE, Brasil. E-mail: rodrigo.qmiranda@gmail.com, ⁵Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS, Brasil. E-mail: danielle.bressiani@ufpel.edu.br, ⁶Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns/PE, Brasil. E-mail: veronica.meira@ufape.edu.br, ⁷Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. E-mail: rejane.pimentel@ufrpe.br, ⁸ProfCiamb Associada UFPE, Recife/PE, Brasil. E-mail: costavso@yahoo.com.br, ⁹Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza/CE, Brasil. E-mail: magna.moura@embrapa.br, ¹⁰Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José dos Campos/SP, Brasil. E-mail: adriana.cuartas@cemaden.gov.br, ¹¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP, Brasil. E-mail: rodrigo.costa@inpe.br, ¹²Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre/INPE, São José dos Campos/SP, Brasil. E-mail: enio.pereira@inpe.br, ¹³Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil. E-mail: pedrogc.silva@usp.br.

Artigo recebido em 05/03/2025 e aceito em 23/04/2025

RESUMO

As mudanças climáticas têm impulsionado o uso de novas abordagens e ferramentas para enfrentamento de seus impactos, com destaque para a gestão dos recursos hídricos. Este estudo avaliou as mudanças hidrológicas projetadas para a bacia hidrográfica do reservatório de Sobradinho, localizado no médio curso do rio São Francisco, na região Nordeste do Brasil, utilizando o SUPeR (Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco), baseado no modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Foram utilizados dados climáticos diários de 1960 a 2021 e projeções para o período de 2006 a 2100, considerando o cenário climático RCP 8.5 do IPCC. O modelo foi previamente calibrado e validado com base em estudos anteriores e aplicado para simulações de longo prazo com alta resolução espacial. As variáveis hidrológicas analisadas incluíram precipitação, evapotranspiração real e potencial, escoamento superficial, temperatura da água, percolação e armazenamento de água no solo. As séries temporais foram avaliadas por meio do teste não paramétrico de Mann-Kendall, revelando tendências estatisticamente significativas ao longo do tempo. Os resultados indicam aumento na temperatura média da água e na evapotranspiração potencial, além da redução dos volumes de precipitação e do armazenamento de água no solo, sugerindo intensificação do estresse hídrico regional, especialmente sob o cenário RCP 8.5. O estudo contribui com subsídios técnicos para políticas públicas e aprimoramento da gestão hídrica, ressaltando a importância da modelagem hidrológica de alta resolução na antecipação de riscos climáticos e na adaptação dos sistemas hídricos em contextos vulneráveis. Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Balanço hídrico, Nordeste do Brasil.

Projected Hydrological Changes in the Sobradinho Basin in the 21st Century Based on SWAT/SUPeR Simulations

ABSTRACT

Climate change has prompted the adoption of innovative approaches and tools to address its multifaceted impacts, with water resource management emerging as a critical area of focus. This study evaluated the projected hydrological changes in the Sobradinho reservoir watershed in the middle course of the São Francisco River in Northeast Brazil. The analysis employs SUPeR (Hydrological Response Units System for Pernambuco), based on the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model. Daily climate data from 1960 to 2021 and projections for 2006 to 2100 under the IPCC's RCP 8.5 scenario were used. The model, previously calibrated and validated in earlier studies, was applied to long-term simulations at high spatial resolution. Hydrological variables analyzed include precipitation, actual and potential

evapotranspiration, surface runoff, water temperature, percolation, and soil water storage. These time series of these variables were assessed using the non-parametric Mann-Kendall test, revealing statistically significant trends. The results indicate increases in average water temperature and potential evapotranspiration, coupled with declines in precipitation and soil water storage, suggesting heightened regional water stress under the RCP 8.5 scenario. The study provides technical evidence to support public policy and enhance water management strategies, such as watershed planning and water allocation mechanisms. The findings highlight the essential role of high-resolution hydrological modeling in anticipating climate risks and adapting water systems in increasingly vulnerable environments.

Keywords: Climate Change, Water Balance, Brazilian Northeast.

Introdução

O gerenciamento sustentável dos recursos hídricos é um dos maiores desafios enfrentados pelas sociedades contemporâneas, especialmente em regiões com alta variabilidade climática e crescente demanda por água. A bacia hidrográfica do rio São Francisco, situada em uma região de transição entre climas úmidos e semiáridos no Brasil, é emblemática nesse contexto. Com mais de 640 mil km² de extensão, a bacia do São Francisco representa um dos sistemas hídricos mais estratégicos do país, desempenhando papel crucial no abastecimento urbano, na irrigação agrícola, na geração de energia hidrelétrica e na manutenção de ecossistemas aquáticos (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco [CBHSF], 2016).

De acordo com Souza et al. (2024), em um estudo sobre os desafios e estratégias para a gestão sustentável dos recursos hídricos diante dos desastres naturais em Pernambuco, a crescente demanda por água — impulsionada principalmente pelos setores de irrigação, abastecimento urbano e expansão industrial — impõe sérios desafios à gestão das bacias hidrográficas, com destaque para a região do Submédio São Francisco. A irrigação, maior consumidora de água e com baixo índice de retorno aos corpos hídricos, agrava a escassez, especialmente em áreas com altas taxas de evapotranspiração, contribuindo para a ocorrência de desastres na região. O estudo aponta ainda que, entre 1991 e 2024, aproximadamente 13 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens em Pernambuco, resultando em prejuízos públicos e privados superiores a 14 bilhões de reais. Esses eventos têm causado impactos significativos nas comunidades, na produção agrícola e na disponibilidade hídrica, sobretudo nos municípios do semiárido, onde se concentram os maiores registros de desastres associados às secas. Outro fator complicador é a questão da geração de energia por fonte hídrica, visto que este reservatório é estratégico para o sistema elétrico nacional como um dos grandes geradores de eletricidade do país. Eventos de estiagem intensificam ainda mais o

conflito pelo uso da água, com reflexos diretos na segurança hídrica, energética e alimentar.

O contexto climático da bacia do São Francisco e, em particular do reservatório de Sobradinho, é caracterizado por alta variabilidade pluviométrica, longos períodos de seca e eventos extremos de precipitação concentrados em um curto período (Assis et al., 2015). Esses fatores tornam a região especialmente vulnerável aos impactos das mudanças climáticas globais. Diversos estudos indicam que, ao longo do século XXI, o semiárido brasileiro poderá experimentar aumentos de temperatura, redução da precipitação e alterações nos padrões de evapotranspiração, afetando diretamente o ciclo hidrológico (Naumann et al., 2018; ANA, 2024). Tais mudanças podem comprometer, fortemente, a disponibilidade e a qualidade da água, aumentando os riscos de conflitos pelo uso do recurso e pressionando os sistemas de gestão hídrica existentes.

As interações entre o oceano e a atmosfera têm sido identificadas como componentes-chave na variabilidade das chuvas no Nordeste brasileiro. Bjerknes (1969) foi pioneiro ao associar as anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Pacífico Tropical à modulação da circulação atmosférica equatorial, fenômeno posteriormente conhecido como circulação de Walker. No contexto do Atlântico Tropical, Moura e Shukla (1981) demonstraram que variações térmicas regionais têm impacto direto sobre o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical, influenciando, fortemente, o padrão de chuvas no semiárido nordestino. Essa complexidade atmosférica associada a eventos como o El Niño, cuja relação com os totais precipitados na bacia do São Francisco foi revista por Galvêncio e Sousa (2002), os quais evidenciaram que, ao contrário do senso comum técnico da época, a influência do fenômeno pode resultar em aumento da produção hídrica em determinadas sub-bacias, como o Alto e o Médio São Francisco. Graças à mencionada extensão territorial da Bacia, nestas regiões não há,

necessariamente, a diminuição da precipitação em eventos de El Niño, podendo ocorrer inclusive o aumento dos totais pluviométricos, o que resulta em uma propagação da vazão para as sub-bacias que enfrentam condições de estiagem.

Apesar de avanços na compreensão dos fatores climáticos, ainda persistem lacunas importantes na avaliação dos impactos hidrológicos em escala de bacia. Mutti (2020) e Mutti et al. (2020) realizaram uma análise multiescalar sobre eventos de seca no Nordeste brasileiro e validaram o uso dos *dados CRU-TS Climatic Research Unit Time-Series* para estimar a precipitação e a evapotranspiração potencial na bacia do São Francisco, com desempenho satisfatório em diferentes sub-regiões. Suas análises revelaram tendências de intensificação da aridez, marcada por aumento da evapotranspiração e redução da precipitação, particularmente nas áreas média e inferior da bacia. Outros impactos negativos neste ecossistema incluem o aumento da salinidade por conta da diminuição da vazão, especialmente na foz do rio. Fonseca et al. (2020) e Cavalcante et al. (2020) analisaram a presença da cunha salina no rio São Francisco e concluíram que a concentração de sal apresentava menor amplitude ao longo das marés, atingindo mais de 10 km além da foz. Os autores caracterizaram o padrão de fluxo do rio como insuficiente para conter a pluma estuarina ou transportar adequadamente os sedimentos provenientes do escoamento superficial e das regiões a montante.

Nas últimas décadas, a bacia do rio São Francisco tem sido alvo de diversos estudos voltados à compreensão dos impactos hidrológicos decorrentes das mudanças no uso do solo e da ocupação desordenada. A modelagem com o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) tem se destacado como uma ferramenta robusta para esse tipo de análise, sendo amplamente empregada em diferentes sub-bacias. Creech et al. (2015) avaliaram os impactos antrópicos sobre o balanço de sedimentos no canal de navegação do São Francisco, utilizando o SWAT para quantificar as alterações associadas às intervenções humanas. Silva et al. (2017) aplicaram o modelo para simular a vazão e a resposta hidrológica frente às alterações de cobertura vegetal em uma bacia tropical, revelando sensibilidade significativa à conversão de vegetação nativa para pastagens e áreas agrícolas. Em outra vertente, Silva et al. (2016) constataram que as mudanças no uso da terra no Submédio do São Francisco provocaram aumento expressivo na produção de sedimentos, reforçando

a necessidade de estratégias de manejo conservacionistas. Estudos focados na parte inferior da bacia também têm demonstrado a eficácia do SWAT para estimativas de vazão, como no estudo de Silva et al. (2015), que calibraram o modelo para simular o fluxo na região do Submédio São Francisco. Além disso, pesquisas mais recentes, como a de Simões et al. (2021), mostraram o potencial do SWAT como ferramenta de apoio à gestão integrada na bacia do rio Indaia (Alto São Francisco), ao simular, simultaneamente, o fluxo hídrico e a descarga sólida. Siqueira et al. (2021) também utilizaram o SWAT para investigar diferentes cenários de mudanças climáticas, e de uso e cobertura da terra (com reflorestamento e práticas de manejo conservacionistas) na disponibilidade hídrica em bacias à montante do Reservatório Três Marias (Alto São Francisco). No contexto de sub-bacias adjacentes, Leal et al. (2023) analisaram os impactos das mudanças de cobertura do solo na sub-bacia do rio Tapuio (AL), reforçando que intervenções antrópicas desordenadas tendem a alterar, de forma significativa, o balanço hídrico local. Esses estudos, assim como a revisão de estudos com o SWAT no Brasil (Bressiani et al., 2015), revelam que o modelo SWAT tem sido amplamente adotado e adaptado para diferentes realidades hidrográficas do Brasil, sendo uma ferramenta essencial para o planejamento hidrológico e a avaliação de cenários futuros, como os que envolvem mudanças climáticas e transformações no uso da terra.

Nos últimos anos, avanços significativos na modelagem hidrológica têm reforçado o papel do modelo SWAT como ferramenta fundamental para a análise de bacias hidrográficas frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Estudos recentes têm demonstrado que a integração entre SWAT e modelos de inteligência artificial, como redes neurais recorrentes, pode ampliar consideravelmente a acurácia das simulações. Jin et al. (2024) propuseram o acoplamento do SWAT com o modelo *Bidirectional Long Short-Term Memory* (BiLSTM), aprimorado com dados de sensoriamento remoto, resultando em melhorias substanciais nas previsões de vazão diária. Resultados semelhantes foram observados por Phetanan et al. (2024), ao acoplar o SWAT com o Long Short-Term Memory (LSTM) na bacia do rio Chao Phraya, evidenciando ganhos de desempenho, em relação aos métodos tradicionais. Além disso, Zhao et al. (2024) enfatizam a versatilidade do SWAT, não apenas para simulações hidrológicas, mas também para a

avaliação de serviços ecossistêmicos, em diferentes escalas. Le et al. (2024) exploraram o uso de redes neurais convolucionais para corrigir vieses em produtos de precipitação por satélite, elevando a precisão da modelagem chuva-vazão na bacia do Mekong. Esses estudos evidenciam a tendência crescente de integração entre modelagem hidrológica física e técnicas de aprendizado de máquina, consolidando o SWAT como plataforma robusta e adaptável às necessidades atuais de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

A esse cenário soma-se o desafio técnico da modelagem em bacias de grande porte. Modelos como o SWAT têm se mostrado eficientes para representar a dinâmica hidrológica de bacias tropicais, desde que devidamente calibrados. Estudos recentes mostraram que o SWAT calibrado para a bacia do São Francisco é capaz de simular, com uma boa acurácia, os padrões de vazão mensais, entre 1961 e 2016, permitindo sua aplicação segura em análises de cenários de mudança climática e gestão integrada da água (Farias et al., 2023).

Uma boa calibração e validação utilizando o algoritmo SUFI-2 no SWAT-CUP, reforça o potencial do modelo para análises de sensibilidade, incerteza e desempenho em grandes regiões hidrográficas.

Uma equipe de pesquisadores de Pernambuco, junto à Texas A&M University, vem se dedicando intensamente à aplicação e ao aprimoramento do modelo SWAT em bacias hidrográficas do estado, bem como em sub-bacias do rio São Francisco. Como resultado desse esforço, foi desenvolvido o Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPER), uma plataforma baseada no modelo SWAT e na plataforma Americana HAWQS, adaptada às especificidades climáticas, edáficas e fisiográficas do estado e da bacia do rio São Francisco. O SUPER tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para a gestão integrada dos recursos hídricos, oferecendo dados especializados e de alta resolução que subsidiam o planejamento hídrico em escala estadual e regional. Avanços

significativos na formulação de políticas públicas e na alocação de recursos hídricos em Pernambuco têm sido viabilizados a partir das simulações e análises produzidas por esse sistema.

O estudo objetivou avaliar as mudanças hidrológicas projetadas para a bacia do reservatório de Sobradinho, ao longo do século XXI, com base em simulações realizadas por meio do SUPER, fundamentado no modelo hidrológico SWAT. A análise abrangeu tendências em variáveis, como precipitação, evapotranspiração, temperatura da água, armazenamento de água no solo, escoamento superficial e percolação, sob diferentes cenários climáticos projetados pelo IPCC, visando subsidiar estratégias de gestão hídrica, diante dos cenários de mudanças climáticas.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi aplicado à bacia hidrográfica do rio São Francisco, localizada nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. A Figura 1 destaca a área de estudo na América do Sul, em especial no território brasileiro. A área em azul escuro representa a bacia hidrográfica contribuidora do reservatório de Sobradinho, situada no trecho médio do rio São Francisco, no Nordeste do Brasil. Essa representação geográfica objetivou contextualizar, em escala continental, a relevância estratégica da bacia, destacando sua extensão territorial e diversidade de características físicas.

A bacia hidrográfica de Sobradinho abrange diferentes condições climáticas, tipos de uso e ocupação do solo, classes de solos e variações de relevo, refletindo sua complexidade ambiental e socioeconômica. Além disso, essa bacia hidrográfica abriga o maior reservatório, em volume útil, do Brasil, o que a torna um elemento central na gestão hídrica da região semiárida nordestina. Dessa forma, a Figura 1 fornece um importante contexto espacial para estudos hidrológicos, climáticos e de planejamento e gestão dos recursos hídricos no contexto continental.

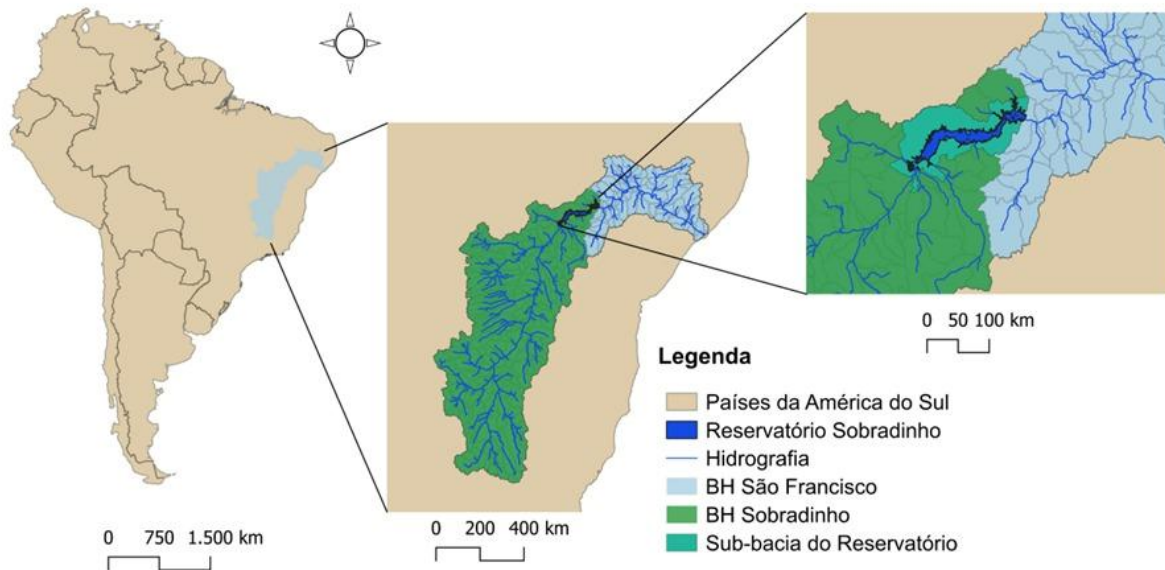


Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do reservatório de Sobradinho (área em azul escuro).

Procedimentos metodológicos

A base de dados utilizada no SUPER para a bacia hidrográfica de Sobradinho foi derivada da calibração e validação desenvolvidas por Vasco (2023). Os resultados desses processos estão detalhadamente apresentados nos artigos Farias et al. (2023) e Vasco et al. (2024), que fundamentam a consistência dos parâmetros utilizados. Este estudo herda diretamente essa configuração calibrada. Esses estudos forneceram subsídios técnicos robustos para a parametrização hidrológica do modelo SWAT, garantindo maior fidelidade às condições locais da bacia e contribuindo significativamente para a confiabilidade dos diagnósticos produzidos neste artigo.

Análise de Tendências da Simulação Hidrológica do SWAT no SUPER

Foi utilizado o Sistema SUPER tendo como base o modelo SWAT, na versão SWAT 2012 rev. 664, com interface de simulação datada de 23 de dezembro de 2016. A simulação iniciou em 4 de janeiro de 1961 e foi encerrada em 31 de março de 2021, totalizando 61 anos de simulação, com dois anos iniciais de aquecimento do modelo. Os dados climáticos de entrada utilizados foram os observados e disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O modelo foi configurado para fornecer saídas diárias, abrangendo uma área de bacia hidrográfica de Sobradinho de 499.293,97 km²,

subdividida em 278 sub-bacias e 4.634 HRUs (Unidades de Resposta Hidrológica).

Inicialmente, foram analisados os dados climáticos e as tendências do balanço hídrico referentes ao período de simulação entre 1961 e 2021. Em seguida, foram examinadas as tendências projetadas para o período de 2006 a 2100, com base em cenários de mudança climática projetados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês para Intergovernmental Panel on Climate Change), visando avaliar a dinâmica futura do balanço hídrico na bacia de Sobradinho.

Considerando a identificação de tendências temporais nos dados simulados, foi aplicado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall, Strobel (1987) amplamente utilizado em séries hidrológicas, por sua robustez em detectar tendências monotônicas, sem pressupor uma distribuição normal dos dados. O objetivo foi verificar a existência de tendências significativas ao longo do tempo, especialmente em relação à variável evaporação.

A análise foi conduzida na linguagem R, utilizando o pacote Kendall, <https://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/index.html>. O arquivo de entrada continha valores diários, os quais foram processados para o cálculo da média anual da evaporação, da evapotranspiração e do escoamento superficial, dentre outros. Em seguida, a série anual resultante foi submetida ao teste de Mann-Kendall.

O teste forneceu, como saída, o coeficiente tau de Kendall, que indicou a direção e a intensidade da tendência, e o valor de p (p -value), que informou a significância estatística da tendência observada. As interpretações seguiram os seguintes critérios:

- $p < 0,05$: tendência estatisticamente significativa ao nível de 95%;
- $p < 0,10$: tendência significativa ao nível de 90%;
- $\tau > 0$: tendência crescente;
- $\tau < 0$: tendência decrescente.

Essa análise permitiu avaliar a ocorrência de mudanças significativas no comportamento das variáveis, ao longo do tempo, sendo essencial para compreender os efeitos de variações climáticas sobre os processos hidrológicos simulados na bacia do reservatório de Sobradinho.

Cenários Climáticos futuros

Para a criação dos cenários futuros, foram utilizadas as projeções apresentadas por Vasco et al. (2024), cuja metodologia baseia-se na aplicação de um conjunto multimodelo (*multi-model ensemble*) com correção de viés, voltado à análise de tendências de longo prazo de precipitação e temperatura na Bacia do Rio São Francisco. Esses dados derivam do NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections), considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2006 a 2100, de nove diferentes modelos climáticos globais do CMIP5 (Thrasher et al., 2012), nesse estudo utilizamos o RCP 8.5.

A seleção dos modelos climáticos com melhor desempenho foi realizada por meio do método REA (*Reliable Ensemble Average*), utilizando métricas como o Erro Normalizado da Raiz do Erro Quadrático Médio (NRMSD) e o coeficiente de correlação de Pearson. A correção de viés foi conduzida com o *software* CMhyd, empregando o método de escalonamento linear (*Linear Scaling*).

Após a publicação do estudo de Vasco et al. (2024), os dados foram integrados ao Sistema SUPeR. A partir desse repositório, os dados de balanço hídrico foram processados e submetidos a testes estatísticos não paramétricos, como o teste de Mann-Kendall, aplicados às séries temporais diárias até o ano de 2100, visando identificar tendências significativas na bacia hidrográfica do reservatório de Sobradinho.

O período de simulação foi de 1º de janeiro de 2006 a 31/12/2100. O período abrange quase todo o século XXI, permitindo avaliar os efeitos de

longo prazo das mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos. Foram utilizados dois anos iniciais para aquecimento do modelo, para estabilizar as variáveis internas do modelo (como umidade do solo e armazenamento em reservatórios), garantindo maior confiabilidade nos resultados a partir de 2008. Os resultados hidrológicos são produzidos em base diária, permitindo análises detalhadas de variação temporal, sazonalidade e eventos extremos.

Banco de dados: RCP 8.5 para o rio São Francisco

O conjunto de dados climáticos utilizado, foi baseado no cenário de alta emissão RCP 8.5, processado e adaptado para a região do São Francisco (SF). Esses dados foram extraídos de modelos climáticos globais com correção de viés, como o NEX-GDDP da NASA. O período de simulação foi de 1º de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2100. O período abrange quase todo o século XXI, permitindo avaliar os efeitos, a longo prazo, das mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos. Foram utilizados dois anos para o aquecimento do modelo (*warm-up*). Os dois primeiros anos de simulação foram utilizados para estabilizar as variáveis internas do modelo (como umidade do solo e armazenamento em reservatórios), garantindo uma maior confiabilidade nos resultados, a partir de 2008. Os resultados hidrológicos são produzidos em base diária, permitindo análises detalhadas de variação temporal, de sazonalidade e de eventos extremos. A versão modelo SWAT utilizada foi a de 2012. Essa versão do modelo é amplamente validada na literatura e compatível com simulações baseadas em mudanças climáticas, incluindo integrações com ferramentas de pré e pós-processamento, como o QSWAT+ e plataformas online.

Resultados e discussão

Considerando a análise hidrológica da subbacia do reservatório de Sobradinho, foram consideradas as seguintes variáveis simuladas pelo modelo hidrológico: PRECIP (precipitação), ET (evapotranspiração real), PET (evapotranspiração potencial), SURF (escoamento superficial), PERC (percolação), WTMP (temperatura da água) e SW (armazenamento de água no solo). Todas as variáveis foram simuladas em base diária e, posteriormente, agregadas em médias anuais para análise de tendências no período de 1961 a 2021 (histórico) e para o horizonte projetado de 2030 a 2099. A Figura 2 apresenta o balanço hídrico médio anual da subbacia, no período de 1961 a 2021.

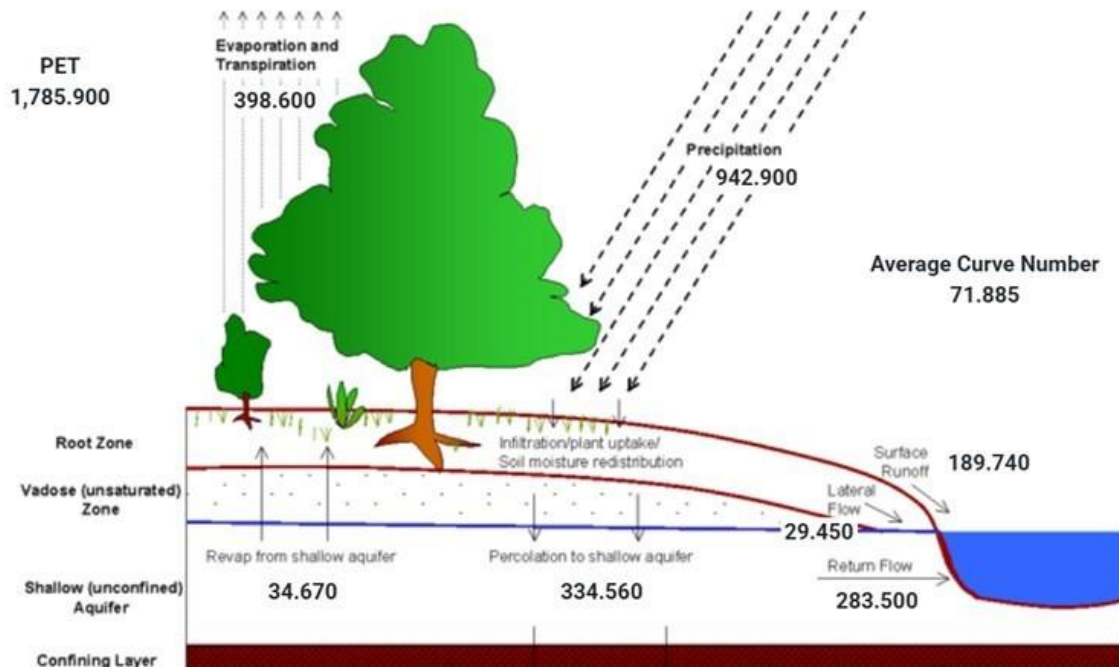


Figura 2. Balanço hídrico médio anual da subbacia do reservatório de Sobradinho, período de 1961-2021.

A precipitação média anual da bacia foi estimada em 942 mm, enquanto a evapotranspiração potencial (PET) alcançou 1.785 mm, indicando um ambiente com alta demanda evaporativa. A evapotranspiração real (ET) foi de 398 mm, representando apenas 22% da PET, evidenciando um quadro de severa limitação hídrica. O escoamento superficial médio foi de 189 mm, o escoamento lateral de 29 mm e o fluxo de base (retorno do aquífero) atingiu 283 mm. A percolação para o aquífero raso foi estimada em 334 mm, enquanto o processo de *revap* (evaporação da água do aquífero para o solo) foi de 34 mm. Esses valores reforçaram a presença de um déficit hídrico expressivo, com a maior parte da água precipitada sendo redistribuída entre o escoamento, a evaporação e a recarga subterrânea.

Entre as décadas de 1960 e 1980, observou-se uma frequência relativamente constante de eventos de escoamento superficial, com magnitudes predominantemente abaixo de 30 mm/dia, e raros picos que alcançaram até 70 mm/dia. Na década de 1990, ocorreu uma redução, tanto na frequência, quanto na intensidade desses eventos, o que pode estar relacionado a uma diminuição da pluviosidade regional ou ao aumento da capacidade de infiltração do solo, possivelmente decorrente de mudanças no uso e cobertura da terra. A redução da precipitação na década de 90 esteve associada aos eventos do fenômeno de El Niño de 1991/1992 e

1997-1998 com intensidade forte, ocasionando uma seca severa e aumento dos dias consecutivos secos na região Nordeste do Brasil (Assis et al., 2022; Silva et al., 2023). Esses autores também verificaram uma mudança no padrão das chuvas a partir da década de 90, com aumento dos dias consecutivos secos, diminuição do total anual de chuvas e aumento da frequência e intensidade dos anos secos em bacias hidrográficas no semiárido de Pernambuco.

No período entre 2000 e 2010, verificou-se um aumento expressivo na ocorrência e intensidade dos eventos de escoamento, com destaque para um pico marcante em torno de 2011, que ultrapassou os 100 mm/dia. Esse episódio pode estar associado a um evento extremo de precipitação ou a alterações antrópicas no território, como a supressão vegetal ou intensificação do uso agrícola, que favoreceram o escoamento superficial.

Durante a década de 2010 a 2020, embora não tenham sido observados novos picos extremos como o registrado em 2011, os eventos de escoamento superficial mantiveram-se relativamente frequentes, com intensidades moderadas, geralmente abaixo de 50 mm/dia.

A análise geral da série histórica (1960-2021) não revelou tendência clara de aumento ou diminuição contínua dos volumes de escoamento superficial, ao longo do tempo (Figura 3). Contudo,

notou-se uma acentuada variabilidade interdecadal, com episódios extremos mais concentrados nas últimas duas décadas. Tal comportamento pode estar associado, tanto às variabilidades climáticas naturais, como os eventos El Niño/La Niña, Oscilações Decadais do Pacífico e mesmo as Oscilações Multidecadais do Atlântico, quanto às mudanças induzidas pelo uso e ocupação do solo, incluindo processos de urbanização, desmatamento ou intensificação agrícola. Alterações na cobertura vegetal e práticas inadequadas de manejo de bacias hidrográficas também podem ter contribuído para a intensificação dos episódios de escoamento.

Convém ressaltar que Assis et al. (2018) investigaram a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais sobre os índices climáticos de precipitação na bacia do Submédio São Francisco, no período de 1964 a 2016. O estudo constatou que as tendências negativas de precipitação estão mais fortemente associadas às variações da TSM no oceano Pacífico do que às do oceano Atlântico. Esses resultados evidenciam a significativa influência do fenômeno El Niño na redução dos volumes de chuva na bacia do Submédio São Francisco.

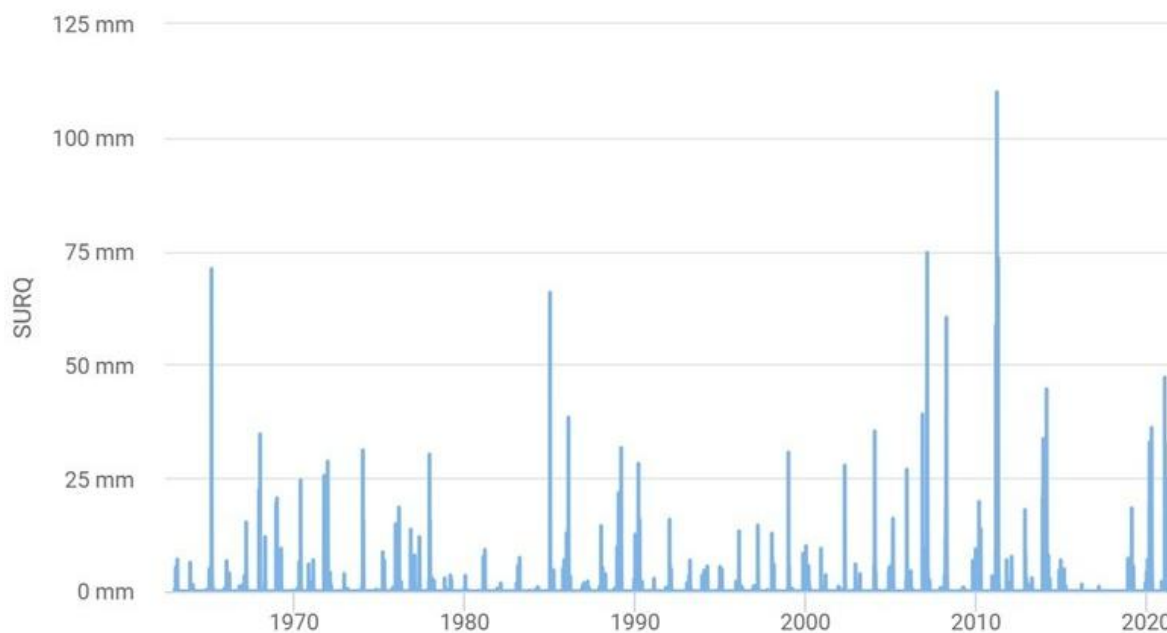


Figura 3. Escoamento superficial diário (mm), no período de 1960 a 2021, na subbacia do reservatório de Sobradinho.

A evaporação do reservatório de Sobradinho oscila entre 0 e 300 m³/s, com eventos extremos pontuais que ultrapassam os 300 m³/s. Entre 1960 e meados da década de 1980, observou-se tendência de aumento nos valores médios de evaporação. Entre 1990 e 2005, ocorreu oscilação menor, mas, ainda, com picos esporádicos intensos. Após 2005, até 2020, observou-se, novamente, aumento na variabilidade da evaporação, com mais eventos extremos e elevação dos valores médios. A alta evaporação pode estar associada ao aumento da temperatura (mudanças climáticas) e à redução da umidade relativa do ar, com uma maior

exposição de superfície líquida ao sol (como em reservatórios). A presença de picos muito altos e isolados pode indicar erros de entrada de dados climáticos ou *outliers*, eventos excepcionais de calor e variações abruptas no nível de água ou regime de operação de reservatórios (Figura 4A). Embora tenha havido indício de aumento na evaporação anual ao longo dos anos ($\tau = 0,158$, $2\text{-sided } p\text{-value} = 0,077453$), a tendência não é significativa ao nível de 95% de confiança. Porém, se for considerado um nível de 90%, isso pode começar a indicar possível mudança (Figura 4B).

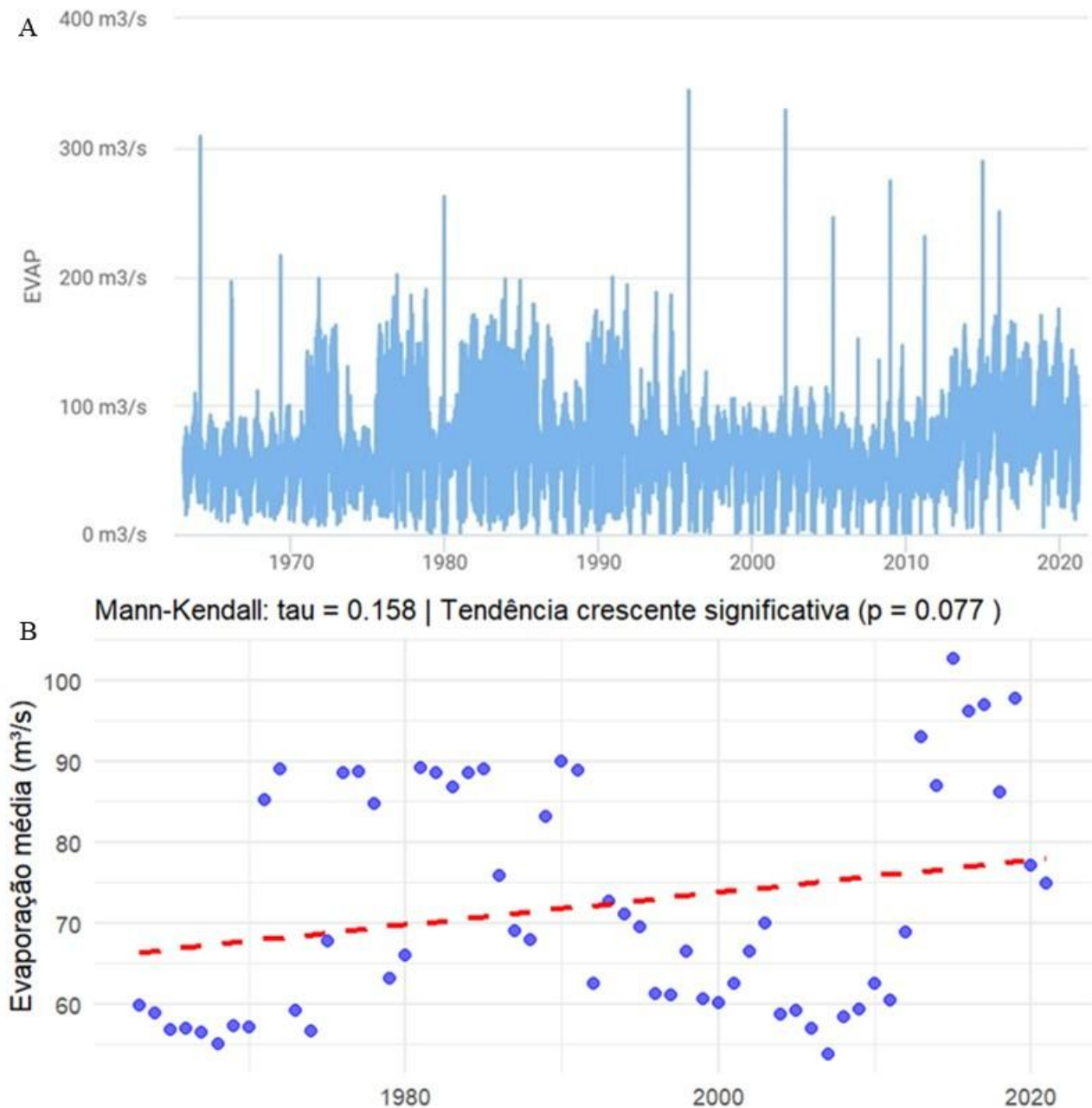


Figura 4. Variação (A) e tendência (B) da evaporação média diária (m^3/s) no reservatório de Sobradinho.

Os valores de percolação variaram de 0 até acima de 150 mm/dia em eventos isolados, indicando episódios intensos de infiltração (Figura 5A). A maior parte do tempo, no entanto, os valores se mantiveram próximos de zero, o que é esperado em áreas com alta evaporação e baixa frequência de chuvas intensas. A distribuição dos eventos, ao longo do tempo, revelou três fases distintas: entre 1960 e 1985 ocorreu maior frequência e

intensidade dos picos; entre 1985 e 2005 observou-se redução perceptível na magnitude e na ocorrência dos eventos; e no período pós-2005, ocorreu a retomada, com picos notáveis em torno de 2010. O teste de Mann-Kendall aplicado à série de PERC resultou em tau de Kendall = -0,122 e valor-p = 0,172. Apesar da indicação de tendência decrescente, a tendência não foi estatisticamente significativa.

Séries Temporais Normalizadas (0 a 1) - Linha Laranja - Bacia de Sobradinho

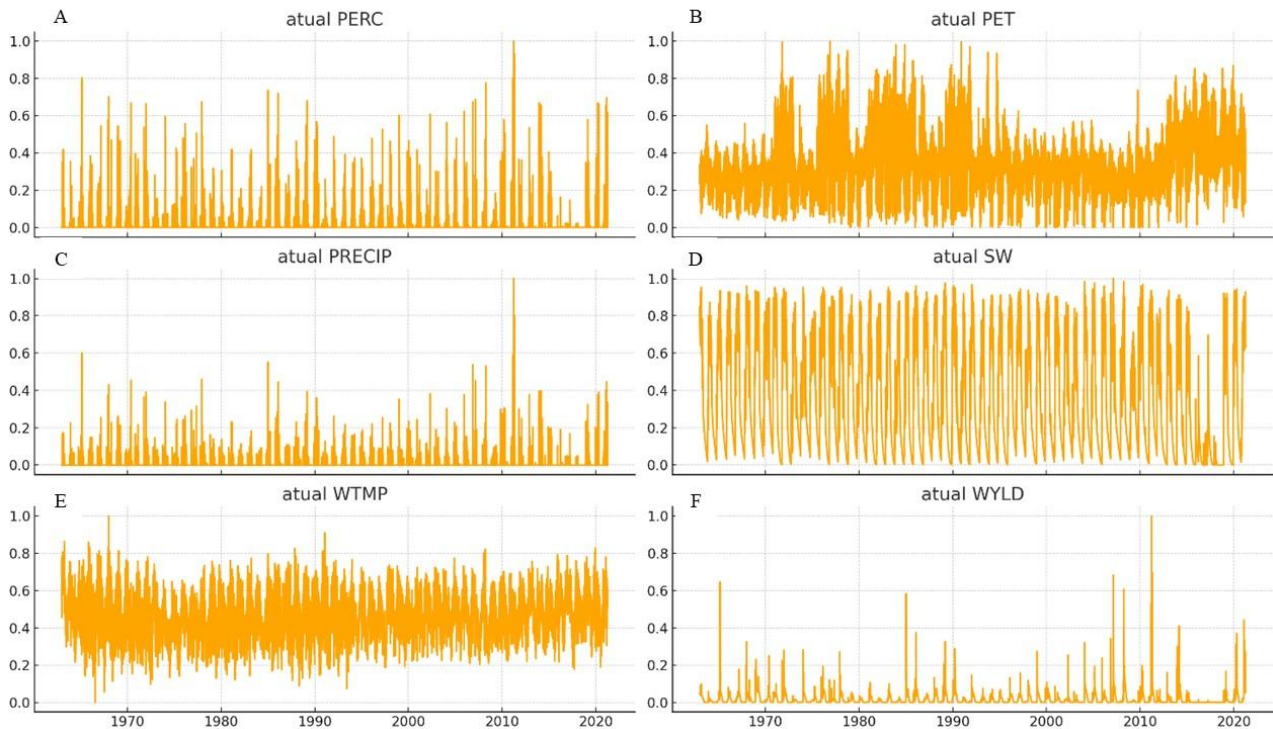


Figura 5. Percolação (A), Evapotranspiração potencial (B), Precipitação (C), Umidade do solo (D), Temperatura da Superfície da água (E) e Fluxo total de entrada de água diária (F).

A PET variou tipicamente entre 0 e 20 mm/dia, com a maior parte dos valores entre 5 e 15 mm (Figura 5B). Picos mais elevados ocorreram, principalmente, entre 1970 e 1985. A partir dos anos 2000, percebeu-se aumento na variabilidade e nos valores máximos. Essa intensificação pode estar relacionada ao aumento da temperatura atmosférica e à intensificação da aridez climática. O teste de Mann-Kendall apontou tau de Kendall = 0,148 e valor-p = 0,098, indicando tendência crescente significativa ao nível de 90% de confiança, embora não ao nível de 95%.

A precipitação apresentou tendência de redução ao longo do período (Figura 5C). O teste de Mann-Kendall identificou tau de Kendall = -0,175 e valor-p = 0,0505, indicando tendência decrescente, estatisticamente significativa ao nível de 95%. Essa redução na precipitação impacta diretamente outras variáveis do balanço hídrico, como a evapotranspiração real e a recarga do solo e dos aquíferos.

Os valores de armazenamento de água no solo variam entre 75 mm e 210 mm, com uma estabilidade relativa até, aproximadamente, 2010 (Figura 5D). A partir desse ano, observou-se mudança marcante, com aumento da frequência de valores baixos e rara ocorrência de picos anteriores,

indicando solo mais seco e com menor recarga. O teste de Mann-Kendall resultou em tau de Kendall = -0,268 e valor-p = 0,0027, confirmando tendência decrescente, estatisticamente significativa ao nível de 99%. Essa redução pode ser consequência da combinação entre menor precipitação e maior evaporação.

A temperatura da água variou, predominantemente, entre 20 °C e 30 °C, com extremos entre 15 °C e 35 °C (Figura 5E). A média estimada ficou entre 25 °C e 27 °C. O teste de Mann-Kendall, aplicado à série de temperatura média anual da água, indicou tau de Kendall = 0,345 e valor-p = 0,00011, confirmando tendência crescente altamente significativa (nível de 99%).

Ekhtiari et al. (2017) realizaram um estudo sobre os efeitos do Lago Sobradinho sobre a região utilizando o modelo regional COSMO-CLM, investigando um ano seco (1998) e um ano classificado normal (2002) em relação as chuvas. Os resultados obtidos demonstram que o lago afeta a temperatura do ar próximo à superfície da área circundante, bem como seus padrões de umidade e vento. A comparação entre o ano mais extremo e o clima médio demonstra que o efeito climático regional do Lago Sobradinho é mais pronunciado durante anos extremos. Especificamente, a

presença do lago tem efeitos mais fortes sobre as variáveis meteorológicas próximas à superfície em uma situação mais seca do que sob a climatologia média normal.

A análise da vazão total de entrada mostrou tendência levemente crescente ao longo dos anos (Figura 5F). O teste de Mann-Kendall resultou em tau de Kendall = 0,161 e valor-p = 0,073, indicando tendência crescente significativa ao nível de 90% de confiança, embora não tenha sido estatisticamente relevante ao nível de 95%. Essa

tendência pode estar relacionada às alterações no regime hidrológico à montante ou à variabilidade climática.

A Tabela 1 apresenta um resumo das tendências das variáveis analisadas. Notou-se que as tendências significativas de diminuição foram registradas para a umidade do solo e a precipitação. Tendências crescentes significativas foram encontradas para a temperatura e a evapotranspiração potencial.

Tabela 1. Resumo dos resultados das análises de tendências de Mann Kendall.

Variável	Tau de Kendall	Valor-p	Tendência	Significância
Temperatura da água (WTMP)	+0,345	0,0001	Crescente	Significativa (99%)
Evapotranspiração potencial (PET)	+0,148	0,098	Crescente	Significativa (90%)
Armazenamento de água no solo (SW)	-0,268	0,0027	Decrescente	Significativa (99%)
Percolação profunda (PERC)	-0,122	0,172	Leve tendência decrescente	Não significativa
Precipitação (PRECIP)	-0,175	0,050	Decrescente	Significativa (95%)
Escoamento superficial (WYLD)	-0,072	0,421	Tendência fraca decrescente	Não significativa

Análise integrada

A água no solo (SW) apresentou redução acentuada e significativa, indicando menor retenção hídrica no solo, o que pode ser reflexo do aumento da evaporação e da diminuição da precipitação. A PRECIP mostrou queda estatisticamente significativa, sinalizando um processo de redução das chuvas na região, o que afeta diretamente as demais variáveis. As PERC e WYLD apresentaram tendências negativas, porém não significativas, sugerindo alta variabilidade interanual ou estabilidade relativa desses fluxos, sob as condições atuais.

O conjunto de tendências apontou para um cenário de intensificação do estresse hídrico: Menos chuva (PRECIP) e maior evaporação (PET) → reduzem a recarga do solo e dos aquíferos (SW e PERC). O aumento na temperatura da água (WTMP) é um reflexo direto desse desequilíbrio térmico-hídrico. A estagnação do escoamento superficial (WYLD) pode indicar que o solo permaneceu mais seco por períodos mais longos, reduzindo o escoamento direto.

Avaliação para o período de 2030 a 2099

A variação temporal das principais variáveis hidrológicas simuladas para a subbacia

do reservatório de Sobradinho é apresentada na Figura 6, considerando o cenário climático RCP 8.5 do IPCC, para o período de 2030 a 2099. As séries foram geradas com base no modelo hidrológico SWAT e processadas com o sistema SUPER.

Observou-se evidente sazonalidade nas variáveis evapotranspiração potencial (PET) e evapotranspiração real (ET), compatível com os padrões climáticos da região semiárida, caracterizados por uma forte variação térmica ao longo do ano e um elevado déficit hídrico. A PET atingiu picos bem elevados, enquanto a ET se manteve geralmente abaixo de 5 mm/dia, indicando limitação hídrica à evaporação real.

A umidade do solo (SW) e a percolação (PERC) apresentaram comportamento igualmente sazonal, com reduções significativas nos períodos secos e aumento durante os meses mais úmidos. A variável PERC mostrou episódios pontuais de recarga significativa, provavelmente associados aos eventos extremos de precipitação.

O escoamento superficial (SURQ), a descarga subterrânea (GW_Q) e a produção de água (WYLD) indicaram resposta hidrológica típica de áreas com baixa capacidade de retenção hídrica e recarga limitada. O escoamento superficial apresentou picos concentrados em

curtos períodos, enquanto a GW_Q manteve comportamento mais estável, refletindo o escoamento de base proveniente de aquíferos rasos.

De forma geral, a análise das séries temporais permitiu inferir uma forte influência da variabilidade climática sobre os componentes do balanço hídrico, reforçando a importância da aplicação de estratégias de gestão adaptativa da água em cenários futuros.

Considerando que, na série histórica real de 1960 a 2021, a Evapotranspiração Potencial (PET) foi a variável que apresentou a maior tendência significativa de aumento (Figura 8B), foi direcionada uma atenção especial à análise dessa variável no cenário futuro.

Sob o cenário climático RCP 8.5, a evapotranspiração potencial (Figura 6B), a análise de tendência utilizando o teste de Mann-Kendall aplicada à série diária de PET para o período de 2030 a 2099 revelou tau de Kendall: 0,0412 e p-valor de $2,00 \times 10^{-22}$, indicando tendência estatisticamente significativa.

Apesar do tau indicar uma tendência de baixa magnitude, o p-valor extremamente reduzido confirmou que essa tendência de aumento foi estatisticamente robusta e persistente ao longo do tempo. Isso significa que houve aumento sistemático e consistente da PET até o final do século XXI, mesmo diante da variabilidade interanual.

Esse resultado é particularmente alarmante. O aumento progressivo da evapotranspiração potencial implica em maior demanda atmosférica por água, agravando o déficit hídrico, acelerando a perda de umidade do solo e comprometendo a recarga dos aquíferos. Em um contexto de redução de precipitação e aumento da temperatura — fatos apontados em outras variáveis do modelo —, a elevação da PET pode intensificar severamente o estresse hídrico na bacia do reservatório de Sobradinho, colocando em risco a sustentabilidade hídrica da região.

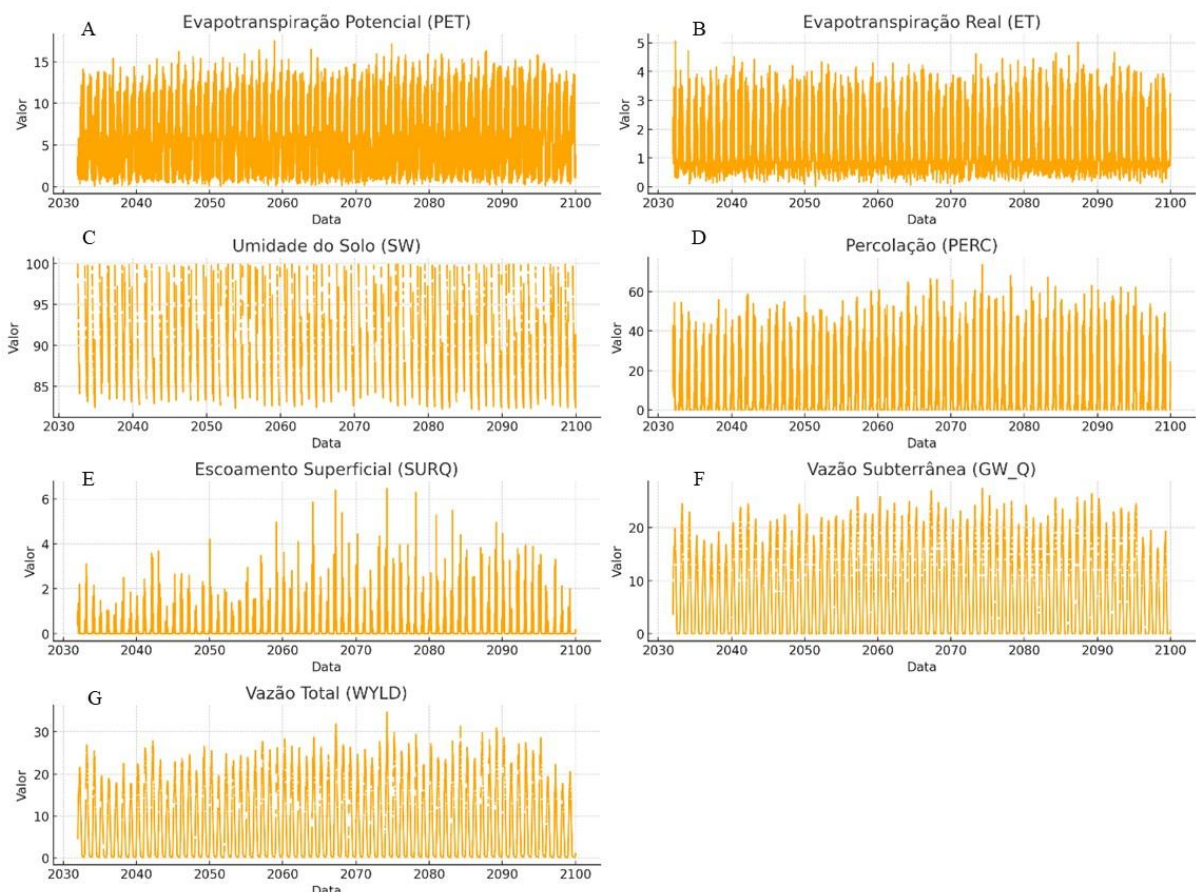


Figura 6. Evapotranspiração potencial (A), Evapotranspiração real (B), Umidade do solo (C), Percolação (D), Escoamento superficial (E), Água subterrânea (F) e Fluxo total de entrada de água (G) diária. Todas as unidades estão em milímetros.

Implicações para a gestão hídrica

Os resultados obtidos neste estudo apontam tendências de aumento da evapotranspiração potencial (PET), de redução do armazenamento de água no solo e de elevação da temperatura da água no reservatório de Sobradinho, ao longo do século XXI, especialmente sob o cenário RCP 8.5. Tais alterações refletiram a intensificação do estresse hídrico regional, o que exige a adoção de estratégias adaptativas por parte dos órgãos gestores de recursos hídricos. Algumas dessas estratégias podem estar relacionadas com a implementação de políticas públicas que favoreçam, por exemplo, a geração de energia por meio de estratégias complementares, como a solar-hídrica – por meio da fotovoltaica flutuante. Estudos como o de Campos et al. (2021) indicam que é possível aumentar a segurança hídrica e energética em Sobradinho por meio deste tipo de tecnologia, garantindo a vazão regulamentada e a

manutenção dos níveis do reservatório acima de 20% utilizando áreas inferiores a 1% do mesmo.

A identificação de tendências estatisticamente significativas para variáveis críticas como PET, evapotranspiração real (ET), escoamento superficial (SW), precipitação (PRECIP), percolação (PERC) e temperatura da água (WTMP) deve servir de base para o replanejamento de políticas públicas e a atualização dos instrumentos de gestão (como os Planos de Bacia e outorgas). Além disso, a previsão de redução na recarga hídrica e o aumento na demanda evaporativa reforçam a necessidade de investimentos em infraestrutura hídrica, como sistemas de reuso, conservação do solo e aproveitamento de águas pluviais. A Figura 7 representa os impactos esperados das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do reservatório de Sobradinho, com base nas simulações SWAT/SUPer.

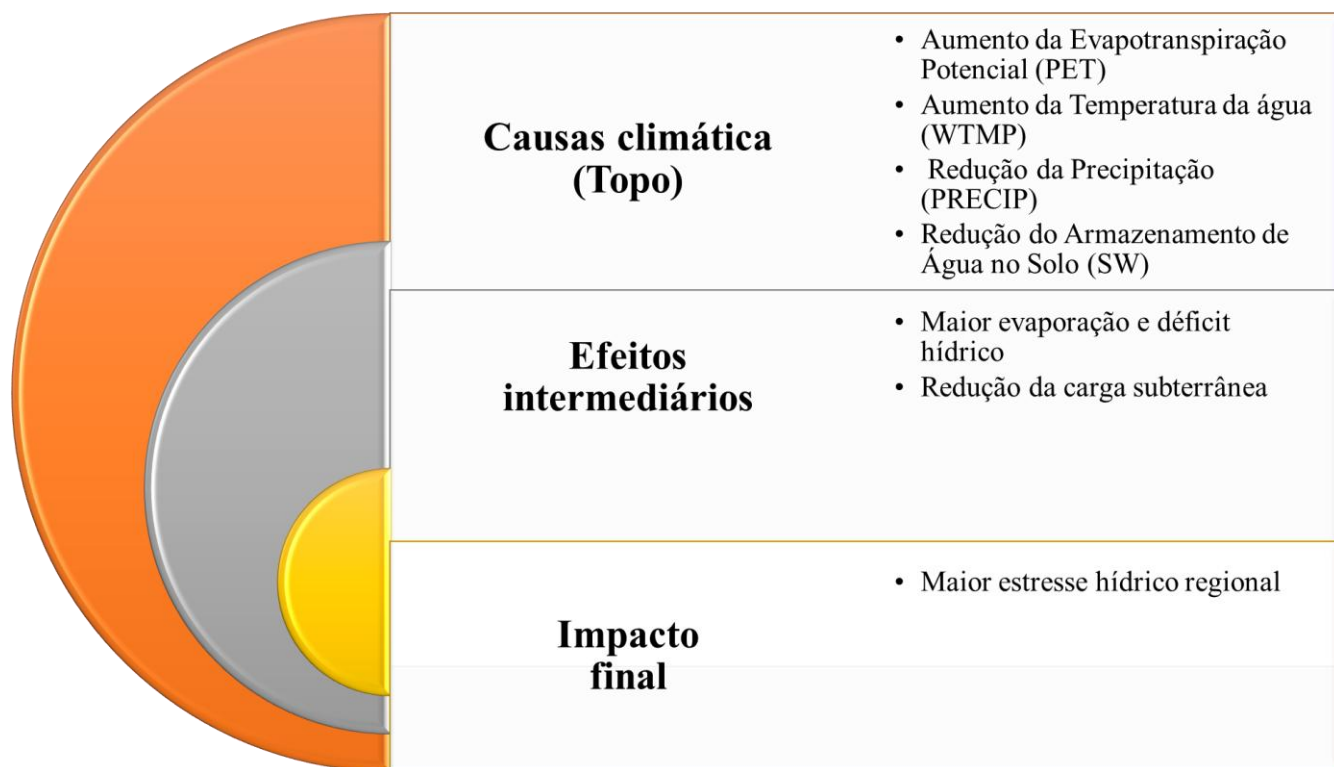


Figura 7. Fluxograma dos impactos esperados das mudanças climáticas na subbacia do reservatório de Sobradinho, com base nas simulações SWAT/SUPer.

A integração das projeções hidrológicas aos modelos de gestão contribuirá para o fortalecimento da resiliência dos sistemas hídricos no semiárido brasileiro, permitindo respostas mais rápidas e eficientes diante de eventos extremos e mudanças climáticas.

Conclusão

As simulações indicaram tendência significativa de redução da precipitação e do armazenamento de água no solo, associada ao aumento da evapotranspiração potencial e da temperatura da água no reservatório de

Sobradinho. Esses fatores apontam para a intensificação do estresse hídrico na região ao longo do século XXI, especialmente sob o cenário climático RCP 8.5.

Ocorreu tendência crescente e estatisticamente significativa na temperatura média da água no espelho d'água de Sobradinho, com valor de $Tau = 0,345$ e $p < 0,001$. Essa elevação está associada a possíveis efeitos das mudanças climáticas e poderá afetar, diretamente, a qualidade da água e os processos de evaporação no reservatório. Também houve tendência significativa de diminuição no conteúdo de água no solo ($tau = -0,268$; $p = 0,0027$), sugerindo menor capacidade de armazenamento hídrico. Isso impacta negativamente a recarga dos aquíferos rasos e compromete a sustentabilidade do ciclo hidrológico local.

Apesar de algumas variáveis, como escoamento superficial e percolação profunda, não apresentarem tendências estatisticamente significativas, foi constatada alta variabilidade interdecadal, com picos extremos em determinados períodos. Isso sugere a influência combinada de eventos climáticos extremos e alterações no uso do solo.

O uso do Sistema SUPer, aliado ao modelo SWAT, demonstrou elevada capacidade de simulação e análise detalhada das variáveis hidrológicas, em diferentes cenários climáticos. Os dados gerados são fundamentais para subsidiar estratégias de adaptação e planejamento hídrico regional frente às mudanças climáticas projetadas para o semiárido brasileiro.

A subbacia hidrográfica e o espelho d'água do reservatório de Sobradinho demonstram uma elevada sensibilidade às mudanças climáticas regionais, com impactos potenciais sobre a disponibilidade hídrica, a recarga subterrânea e a dinâmica hidrológica do sistema. É importante reforçar a importância da incorporação de cenários climáticos futuros nas ferramentas de gestão e planejamento dos recursos hídricos de uma bacia, visando desenvolver e aplicar estratégias mais resilientes e adaptativas, especialmente sob a ação de mudanças climáticas.

Agradecimentos

Este estudo recebeu apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), no âmbito do projeto "Mudanças

Globais e Adaptações Sustentáveis com a Viabilidade Hídrica e Energética e Solvência Econômica-Projeto OUR-EYES", Processos APQ-0392-3.07/22 (FACEPE) e chamada pública FAPESP-FACEPE 09/2022. Agradecemos ao apoio do projeto "Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas de Pernambuco-SUPer para as Pequenas Bacias de Pernambuco" (FACEPE-APQ-0044-24), uma contribuição essencial para a estruturação das simulações hidrológicas e climáticas aplicadas neste estudo.

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de pesquisa concedidas aos pesquisadores autores deste artigo, fundamentais para a continuidade e aprofundamento das atividades científicas desenvolvidas, bem como aos Grupos de Pesquisa SERGEO-Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento – UFPE, Grupo de Recursos Hídricos – UFPE, Clima, Mudanças Climáticas e Desastres Naturais - CLIMADEN – UFPE, e Fitomorfologia Funcional e Interações Antrópicas - FITANTROP – UFRPE. Os autores agradecem também ao CNPq pelo suporte oferecido por meio do projeto "Avaliação integrada de recursos de energia solar no território sulamericano" (processo 443403/2023-6) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas – Projeto INCT-MC Fase 2 (FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, e CAPES/FAPS Nº 16/2014).

Reconhecemos o suporte institucional da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), e da Texas A&M University, parceira estratégica no desenvolvimento e aperfeiçoamento do SUPer. Estendemos nossos agradecimentos aos membros da equipe técnica e aos estudantes envolvidos pelos esforços dedicados à calibração dos modelos e à organização de dados que fundamentaram os resultados obtidos. De forma especial, agradecemos a Rodrigo Queiroga de Miranda, por sua valiosa contribuição no desenvolvimento do SUPer.

Referências

- Agência Nacional de Águas. ANA (2024). Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 96 p. Brasília.
- Assis, J. M. O. de, Caldas, H. F. M., Sobral, M. do C. M., Souza, W. M. de, & Melo, M. M. G. de S. (2022). Analysis of climate indices and

2653

- impacts on the rainfall regime in the Sub-medium stretch of the São Francisco river basin, Brazil. *Revista Principia*, 54(4), 1224-1235. <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5570>
- Assis, J. M. O. de, Souza, W. M. de, Koch, H., & Sobral, M. do C. M. (2018). Influência dos oceanos pacífico e atlântico tropicais sobre os índices climáticos da precipitação na bacia do submédio São Francisco. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23(14), 411-433. <https://doi.org/10.5380/abclima.v23i0.60005>
- Assis, J. M. O. de, Souza, W. M. de, & Sobral, M. do C. M. (2015). Climate analysis of the rainfall in the lower-middle stretch of the São Francisco river basin based on the rain anomaly index. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 36, 115-127. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820151012>
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric Teleconnections from the equatorial pacific. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163-172.
- Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonuma, N. B., & Mendiando, E. M. (2015). Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8, 9-35.
- Campos, É. F. de, Pereira, E. B., Van Oel, P., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., & Costa, R. S. (2021). Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin. *Journal of environmental management*, 294, 112989, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112989>
- Cavalcante, G., Vieira, F., Campos, E., Brandini, N., & Medeiros, P. R. P. (2020). Temporal streamflow reduction and impact on the salt dynamics of the São Francisco River Estuary and adjacent coastal zone (NE/Brazil). *Regional Studies in Marine Science*, 38, e101363.
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. CBHSF. (2016). Resumo executivo do plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025. CBHSF.
- Creech, C., Siqueira, R. B., Seleguean, J. P., & Miller, C. J. (2015). Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 140-157. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v8i3.1372>
- Ekhtiari, N., Grossman-Clarke, S., Koch, H., Souza, W. M. de, Donner, R. V., & Volkholz, J. (2017). Effects of the lake Sobradinho reservoir (Northeastern Brazil) on the regional climate. *Climate*, 5(3), 50. <https://doi.org/10.3390/cli5030050>
- Farias, C. W. L. de A., Viana, J. F. de S., Miranda, R. de Q., Silva, S. F. da, Vasco, G., Montenegro, S. M. G. L., & Galvêncio, J. D. (2023). Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1621-1628. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1621-1628>
- Fonseca, S. L. M., Magalhães, A. A. J., Campos, V. P., & Medeiros, Y. D. P. (2020). Effect of the reduction of the outflow restriction discharge from the Xingó dam iwater salinity in the lower stretch of the São Francisco river. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 25(4), 1-16.
- Galvêncio, J. D., & Sousa, F. A. S. (2002). Relação entre o fenômeno El Niño e os totais mensais precipitados na bacia hidrográfica do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 7(4), 113-119.
- Jin, L., Xue, H., Dong, G., Han, Y., Li, Z., & Lian, Y. (2024). Coupling the remote sensing data-enhanced SWAT model with the bidirectional long short-term memory model to improve daily streamflow simulations. *Journal of Hydrology*, 634, 131117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131117>
- Le, X-H., Kim, Y., Binh, D. V., Jung, S., Nguyen, D. H., & Lee, G. (2024). Improving rainfall-runoff modeling in the Mekong river basin using bias-corrected satellite precipitation products by convolutional neural networks. *Journal of Hydrology*, 630, 130762. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130762>
- Leal, R., Almeida, N. V., & Silva, M. D. da. (2023). Impacts of changes in land cover and land use on the hydrological cycle of the Tapuio river sub-basin/AL. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 13(4), 497-511. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.4.p497-511>
- Moura, A. D., & Shukla, J. (1981). On the dynamics of in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(12), 2653-2675.

- Mutti, P. R. (2020). *Drought characterization in the Northeast Brazil: a multiscale watershed analysis and remote sensing monitoring*. [Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Université Rennes 2]. Repositório Institucional - UFRN. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/31308>
- Mutti, P. R., Dubreuil, V., Bezerra, B. G., Arvor, D., de Oliveira, C. P., & Santos e Silva, C. M. (2020). Assessment of gridded CRU TS data for long-term climatic water balance monitoring over the São Francisco watershed, Brazil. *Atmosphere*, 11(11), 1207. <https://doi.org/10.3390/atmos11111207>
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., & Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 45, 3285-3296. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>
- Phetanan, K., Hong, S. M., Yun, D., Lee, J., Chotpanarat, S., Jeong, H., & Cho, K. H. (2024). Enhancing flow rate prediction of the Chao Phraya River Basin using SWAT-LSTM model coupling. *Environmental Advances*, 53, 101820. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101820>
- Silva, V. P. R. da, Silva, M. T., Singh, V. P., Souza, Ê. P. de, Braga, C. C., Holanda, R. M. de, Almeida, R. S. R., Sousa, F. A. S. de, & Braga, A. C. R. (2017). Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*, 162, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>
- Silva, V. P. R. da, Silva, M. T., & Souza, Ê. P. de. (2016). Influence of land use change on sediment yield: A case study of the sub-middle of the São Francisco River Basin. *Engenharia Agrícola*, 36(6), 1005-1015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1005-1015/2016>
- Silva, M. T., Silva, V. P. R. da, Souza, E. P. de, & Araújo, A. L. (2015). SWAT model application to estimate the flow in the basin of lower-middle São Francisco River. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(6), 1615-1627. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150086>
- Silva, N. G. da, Almeida, F. F. A. de, Sales Filho, R. L. M., Souza, Souza, W. M. de, & Galvêncio, J. D. (2023). Vulnerabilidade ambiental e socioeconômica aos eventos extremos de precipitação relacionados a seca no semiárido nordestino – Estudo de caso da bacia hidrográfica de Terra Nova – Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1490-1510. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1490-1510>
- Simões, K., Condé, R. C. C., Roig, H. L., & Cicerelli, R. E. (2021). Application of the SWAT hydrological model in flow and solid discharge simulation as a management tool of the Indaia river basin, Alto São Francisco, Minas Gerais. *Ambiente & Água*, 16(3), e2694. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2694>
- Siqueira, P. P., Oliveira, P. T. S., Bressiani, D., Meira Neto, A. A., & Rodrigues, D. B. B. (2021). Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100931, 2214-5818. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>
- Souza, W. M. de, Penha, M. J., Moraes, E. S. de, & Sales Filho, R. L. M. (2024). Desafios e estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos frente aos desastres naturais. In Í. R. P. de Arruda, G. Mariano, T. de O. Guimarães, D. G. da S. Listo (Orgs.). *Geopatrimônio de Pernambuco*. (pp. 169-185). CBL. <https://doi.org/10.29327/5463145>
- Strobel, O. M. (1987). Homogeneidade de séries temporais. *Revista Brasileira de Engenharia*, 5(1), 5-30.
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Technical note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309-3314.
- Vasco, G. (2023). *Novo modelo espacialmente explícito de uso da terra e modelagem hidrológica baseada em SWAT profundamente acoplado ao multi-modelo na avaliação probabilística do impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos* [Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural de Pernambuco].
- Vasco, G., Miranda, R. de Q., Viana, J. F. de S., Bressiani, D., Menciondo, E. M., Silva, R. M. da., Galvêncio, J. D., Silva, S. F. da., & Montenegro, S. M. G. L. (2024). Multi-model ensemble for long-term statistical trend analysis of observed gridded precipitation and temperature data in the São Francisco river basin, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 29, e37.

<https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420240042>

Zhao, J., Zhang, N., Liu, Z., Liu, Q., & Shang, C. (2024). SWAT model applications: From

hydrological processes to ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 931, 172605.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172605>