XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

APLICAÇÃO DO MODELO SMAP PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES NA SUB-BACIA DO RIO CAPIBARIBE-MIRIM, PERNAMBUCO

Alda Viana Duarte [1]; José Adalberto da Silva Filho [2]; Luan Alves Furtado [3]; Antônio Celso Dantas Antonino [4]; Severino Martins dos Santos Neto [5]; Tassia dos Anjos Tenorio de Melo [6] & Artur Paiva Coutinho [7]

RESUMO

A modelagem hidrológica constitui uma importante ferramenta para a estimativa de vazões e o suporte ao planejamento dos recursos hídricos. Neste contexto, o presente estudo aplicou o modelo SMAP na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, com o objetivo de simular vazões mensais e avaliar o desempenho do modelo na representação do comportamento hidrológico da área. Foram utilizados dados de precipitação e vazão observada da estação fluviométrica de Timbaúba, abrangendo o período de novembro de 2012 a janeiro de 2026. O desempenho do modelo foi avaliado por meio de indicadores estatísticos, obtendo-se coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,73 na calibração e 0,72 na validação, além de coeficientes de correlação linear (R) de 0,81 e 0,91, respectivamente. A comparação entre os hidrogramas observados e simulados indicou boa representação da sazonalidade das vazões e dos principais eventos de escoamento. Os resultados evidenciam o potencial do modelo SMAP como ferramenta de apoio à avaliação da disponibilidade hídrica e à gestão dos recursos hídricos na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim.

ABSTRACT

Hydrological modeling is an important tool for streamflow estimation and for supporting water resources planning. In this context, this study applied the Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) model to the Capibaribe-Mirim River sub-basin in order to simulate monthly streamflows and evaluate the model performance in representing the hydrological behavior of the study area. Precipitation and observed streamflow data from the Timbaúba gauging station, covering the period from November 2012 to January 2026, were used as input. Model performance was assessed using statistical indicators, yielding Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficients of 0.73 for the calibration period and 0.72 for the validation period, as well as linear correlation coefficients (R) of 0.81 and 0.91, respectively. The comparison between observed and simulated hydrographs showed a good representation of streamflow seasonality and the main runoff events. The results highlight the potential of the SMAP model as a useful tool for water availability assessment and water resources management in the Capibaribe-Mirim River sub-basin.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica, simulação, recursos hídricos.

[1]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife: Departamento de Engenharia Civil, alda.viana@ufpe.br.
[2]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Caruaru: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, jose.adalberto@ufpe.br.
[3]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife: Departamento de Energia Nuclear, luan.furtado@ufpe.br.
[4]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife: Departamento de Energia Nuclear, antonio.antonino@ufpe.br.
[5]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Sertânia: Centro Acadêmico do Sertão, severino.martins@ufpe.br.
[6]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife: Departamento de Arquitetura a Urbanismo, tassia.melo@ufpe.br.
[7]) Universidade Federal de Pernambuco – Campus Caruaru: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, arthur.coutinho@ufpe.br.

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de informações hidrológicas confiáveis é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (Keller et al., 2023). Entretanto, a obtenção de séries históricas consistentes de vazão ainda representa um desafio em diversas bacias hidrográficas brasileiras, em razão da baixa densidade das redes de monitoramento, da ocorrência de falhas observacionais e da limitada cobertura espacial das estações fluviométricas (Souza e Reis, 2022). Essas limitações dificultam a avaliação da disponibilidade hídrica e o desenvolvimento de instrumentos de apoio à tomada de decisão (Keller et al., 2023).

Nesse contexto, a modelagem hidrológica tem se consolidado como uma importante ferramenta para a representação dos processos de transformação da precipitação em escoamento, permitindo estimar vazões, preencher lacunas de dados observados e analisar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Entre as diferentes abordagens disponíveis, os modelos conceituais destacam-se por representar os principais componentes do ciclo hidrológico por meio de estruturas simplificadas, demandando menor quantidade de dados quando comparados a modelos de base física (Keller et al., 2023; Silva, 2021).

Dentre esses modelos, destaca-se o Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP), amplamente utilizado em estudos de simulação chuva-vazão devido à sua simplicidade operacional, reduzida demanda computacional e capacidade de representar satisfatoriamente os processos de armazenamento de água no solo, geração de escoamento superficial e contribuição do escoamento de base (Perez et al., 2025; Lopes et al., 1982). Apesar de sua aplicação em diferentes regiões do país, ainda são limitados os estudos voltados à avaliação de seu desempenho em bacias hidrográficas da Zona da Mata Norte de Pernambuco.

A hipótese central deste estudo é que o modelo SMAP é capaz de representar adequadamente os processos de transformação chuva-vazão na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, produzindo séries de vazão mensal estatisticamente consistentes com os registros observados. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o modelo SMAP na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, pertencente à bacia hidrográfica do rio Goiana, visando à simulação de vazões mensais e à avaliação do desempenho do modelo por meio da comparação entre vazões observadas e simuladas obtidas durante as etapas de calibração e validação.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, localizada no estado do Pernambuco, integra a bacia do rio Goiana, juntamente com as sub-bacias dos rios Siriji, Tracunhaém e Goiana. O rio Capibaribe-Mirim possui uma extensão aproximadamente de 93 km e drena a maior parte da bacia. A nascente do rio se localiza no município de São Vicente Férrer, na divisa da Zona da Mata com o Agreste. Até as proximidades do município de Timbaúba, o rio apresenta regime fluvial intermitente, a partir de onde ele se torna perene (APAC, 2026; Ferreira et al., 2019).

A delimitação da área da sub-bacia foi realizada através do software QGis 3.40 (Figura 1), possuindo uma área de drenagem da de 1600 km².

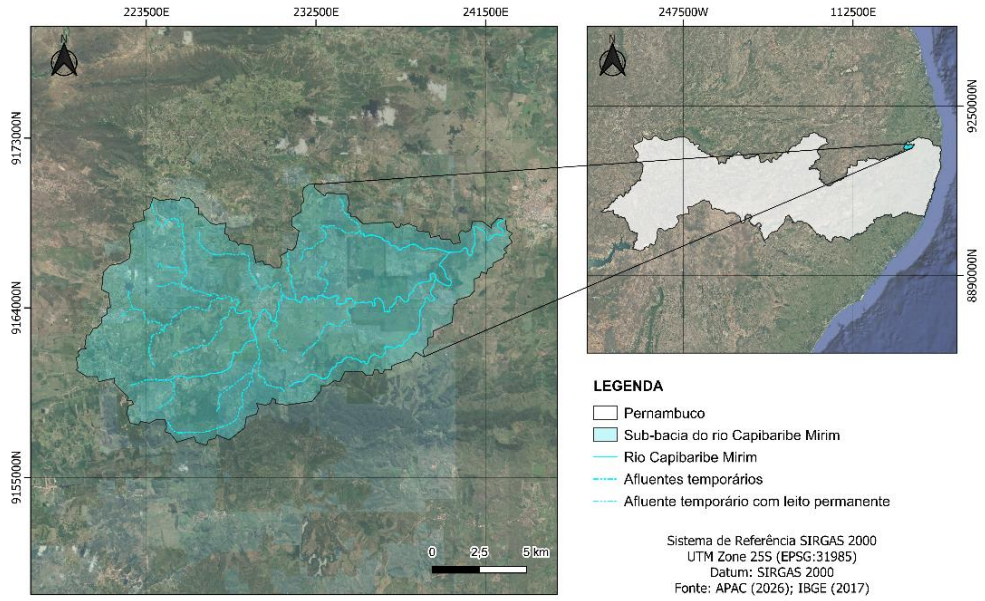


Figura 1-Delimitação da sub-bacia hidrográfica do rio Capibaribe-Mirim.

2.2 Modelo SMAP

O SMAP é um modelo conceitual de simulação hidrológica para transformação de chuva em vazão, que representa o armazenamento e a circulação hídrica por meio do balanço de umidade em dois reservatórios virtuais correspondentes ao solo e ao subsolo (Lopes et al., 1982; Nunes, 2014). Neste estudo foi empregada a versão mensal do modelo, adequada para análises de disponibilidade hídrica e simulação de vazões em escalas de maior agregação temporal.

De forma simplificada, o modelo considera a entrada de água no reservatório do solo a partir da precipitação, descontando as perdas por evapotranspiração e o escoamento superficial. Parte da água armazenada é transferida para o reservatório subterrâneo por meio da recarga, contribuindo posteriormente para o escoamento de base. A vazão simulada resulta da combinação entre as parcelas de escoamento superficial e subterrâneo (Silva Filho et al., 2020; Bittencourt et al., 2024).

A inicialização do modelo foi realizada a partir da definição da umidade inicial do solo (Tuin) e do escoamento de base inicial (Ebin). A calibração considerou quatro parâmetros hidrológicos:

capacidade de saturação do solo (Str), parâmetro de escoamento superficial (Pes), coeficiente de recarga do aquífero (Crec) e constante de recessão do reservatório subterrâneo (Kkt). As equações de balanço hídrico e transferência de água entre os reservatórios seguiram a formulação originalmente proposta por Lopes et al. (1982), sendo utilizadas para a estimativa das vazões mensais simuladas.

A estrutura matemática do modelo é baseada em equações de continuidade que representam o armazenamento e a transferência de água entre os reservatórios conceituais. As equações utilizadas neste estudo seguem a formulação proposta por Lopes et al. (1982) e são apresentadas a seguir. As Equações (1) a (9) descrevem os processos de armazenamento, recarga e geração dos escoamentos superficial e subterrâneo, enquanto a Equação (10) corresponde ao cálculo da vazão total simulada.

$$R_{solo}(i) = R_{solo}(i-1) + P(i) - Er(i) - Rec(i) \quad (1)$$

$$R_{sub}(i) = R_{sub}(i-1) + Rec(i) - Eb(i) \quad (2)$$

$$R_{solo}(0) = Tu_{in} * Str \quad (3)$$

$$R_{sub}(0) = \frac{2630 * Eb_{in}}{A_d(1-0{,}5^{1/kkt})} \quad (4)$$

$$Es(i) = Tu(i)^{Pes} * P(i) \quad (5)$$

$$Er(i) = Tu(i-1) * E(i) \quad (6)$$

$$Rec(i) = C_{res} Tu(i-1)^4 * R_{solo}(i-1) \quad (7)$$

$$Eb(i) = (1 - 0{,}5^{1/kkt}) * R_{sub}(i-1) \quad (8)$$

$$Tu(i) = \frac{R_{solo}(i)}{Str} \quad (9)$$

$$Q_{cal}(i) = \frac{[Es(i)+Eb(i)] * A_d}{2630} \quad (10)$$

Onde: Rsolo (i) é o volume hídrico acumulado no reservatório do solo no mês i, em mm; P (i) é a precipitação média da bacia no mês i, em mm; Es (i) é o escoamento superficial no mês i, em mm; Er (i) é a evapotranspiração real da bacia no mês i, em mm; Rec é a recarga do reservatório subterrâneo no mês i, em mm; Rsub (i) é o volume de hídrico acumulado no reservatório subterrâneo no mês i, em mm; Eb (i) é o escoamento base do reservatório subterrâneo no mês i, em mm; Tu (i) é a umidade básica no mês i, adimensional; Qcal (i) é a vazão calculada no mês i, em m³/s e Ad é a área de drenagem da bacia.

2.3 Calibração e validação do modelo SMAP

Para a calibração do modelo foram utilizados dados da estação fluviométrica localizada no município de Timbaúba (39081250) que integra a região da sub-bacia, os dados compreendem o período de novembro de 2012 a janeiro de 2026, e foram coletados no site da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

Umas das principais vantagens do modelo SMAP está associada à sua simplicidade e pequena quantidade de parâmetros necessários. Os dois parâmetros de inicialização (Tuin e Ebin) foram considerados fixos e os quatro restantes (Str, Pes, Cres e kkt) foram calibrados, respeitando o

respectivo limite inferior e superior, por meio dos dados de entrada fornecidos, que foram as séries de vazão, precipitação e evapotranspiração potencial (Lopes et al., 1982; Bittencourt et al., 2024). Esse processo de calibração ocorreu por meio de algoritmos genéticos para otimizar uma função objetivo específica correspondente a maximização do coeficiente de Eficiência NASH (Nash e Sutcliffe, 1970), conforme a Equação (11):

$$NASH = 1 - \frac{\sum(Qobs(i) - Qcal(i))^2}{\sum(Qobs(i) - Qobs)^2} \quad (11)$$

Para uma análise estatística e de consistência dos dados foram utilizados o viés relativo e o coeficiente de correlação (R). Para a validação do modelo, foram selecionadas as vazões calculadas correspondentes aos anos de 2024 e 2025, que correspondem aos anos finais da série adotada, e foram comparadas com as vazões observadas no mesmo período, em relação aos índices estatísticos adotados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante as etapas de calibração e validação indicam que o modelo SMAP foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento hidrológico da sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim. Os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NASH) foram iguais a 0,73 e 0,72 para os períodos de calibração e validação, respectivamente, evidenciando bom desempenho na simulação das vazões mensais. A proximidade entre os valores obtidos nas duas etapas sugere estabilidade dos parâmetros calibrados e reduz a possibilidade de superajuste (overfitting), demonstrando que o modelo manteve capacidade preditiva mesmo quando aplicado a um conjunto de dados independente.

Tabela 1-Resultado dos índices estatísticos utilizados durante as fases de calibração e validação do modelo SMAP

Fase	NASH	VR (%)	R
Calibração	0,73	-7,05	0,81
Validação	0,72	14,16	0,91

Os coeficientes de correlação linear também apresentaram resultados satisfatórios, com valores de 0,81 na calibração e 0,91 na validação. Esses resultados indicam forte associação entre as vazões observadas e simuladas, evidenciando que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a variabilidade temporal dos escoamentos ao longo do período analisado. O desempenho observado na validação demonstra que o SMAP conseguiu preservar a dinâmica hidrológica da bacia mesmo após o processo de calibração, condição desejável em aplicações voltadas à previsão e ao planejamento dos recursos hídricos.

A análise do erro relativo de volume (VR) indica uma leve subestimativa do volume total escoado durante a calibração, representada pelo valor de -7,05%. Por outro lado, na etapa de validação

observou-se uma superestimativa de 14,16%. Apesar dessas diferenças, os resultados permanecem dentro de limites considerados aceitáveis para aplicações de modelagem hidrológica em escala mensal, sugerindo que o modelo reproduziu adequadamente o balanço hídrico da bacia ao longo do período de estudo.

A comparação visual entre os hidrogramas observados e simulados (Figura 2 e 3) reforça os indicadores estatísticos obtidos. De maneira geral, o modelo reproduziu satisfatoriamente a sazonalidade das vazões e a ocorrência dos principais eventos de aumento de escoamento. Os períodos de estiagem também foram representados adequadamente, evidenciando a capacidade do SMAP em simular os mecanismos de armazenamento e liberação gradual da água no sistema hidrológico.

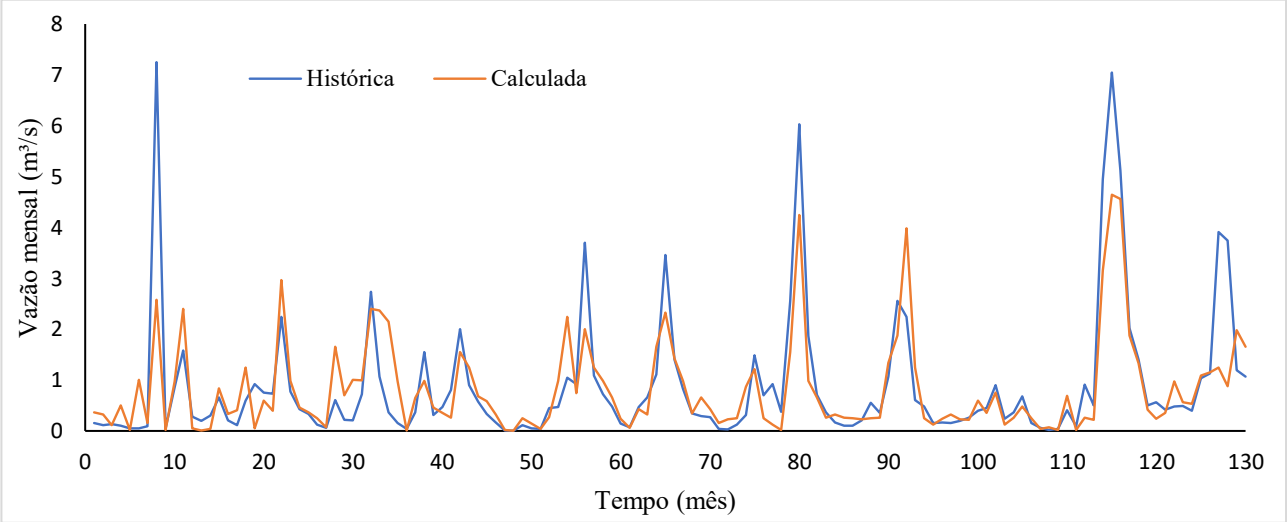


Figura 2-Hidrograma de vazões observadas e calculadas durante a fase de calibração do modelo SMAP (novembro de 2012 até setembro de 2023) para a sub-bacia hidrográfica do rio Capibaribe-Mirim.

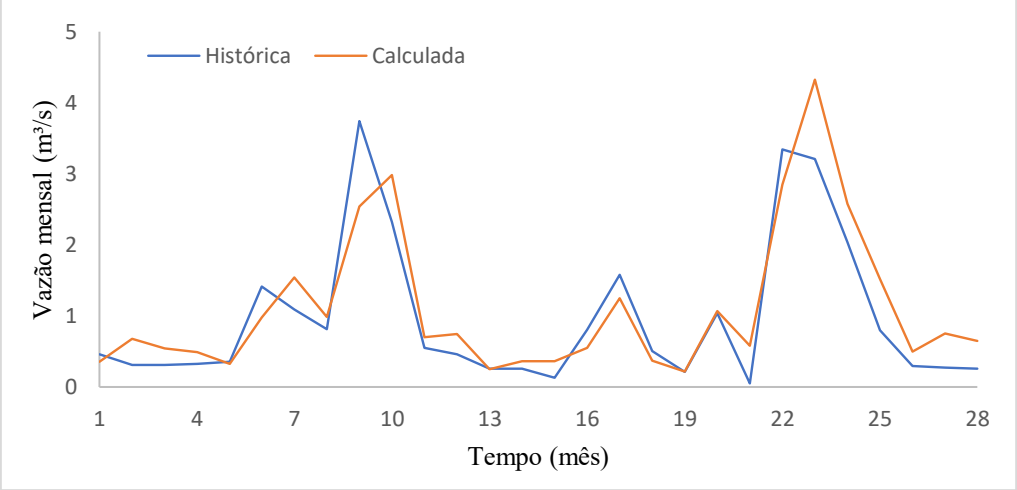


Figura 3-Hidrograma de vazões observadas e calculadas durante a fase de validação do modelo SMAP (outubro de 2023 até janeiro de 2026) para a sub-bacia hidrográfica do rio Capibaribe-Mirim.

Entretanto, algumas diferenças podem ser observadas nos eventos de maior magnitude, especialmente durante o período de calibração, quando determinados picos de vazão foram subestimados pelo modelo. Esse comportamento é recorrente em modelos conceituais concentrados, uma vez que a simplificação dos processos hidrológicos e a utilização de parâmetros médios para toda a bacia tendem a suavizar respostas hidrológicas associadas a eventos extremos. Ainda assim, o modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente a tendência geral dos hidrogramas e a dinâmica temporal dos escoamentos observados.

A análise conjunta dos parâmetros calibrados e dos indicadores de desempenho sugere que a sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim apresenta comportamento hidrológico fortemente influenciado pelos processos de infiltração e armazenamento subterrâneo. O valor relativamente elevado do coeficiente de recessão (Kkt = 5,3 meses) indica contribuição significativa do escoamento de base para a manutenção das vazões durante períodos secos, enquanto o coeficiente de recarga (Crec = 9,03%) evidencia a participação dos fluxos subsuperficiais na dinâmica hidrológica da bacia. Essas características contribuíram para o bom desempenho do modelo na reprodução das vazões mensais observadas.

Tabela 2- Parâmetros obtidos na aplicação do modelo SMAP.

Parâmetro	Simbologia	Valores	Faixa	Unidade
Coeficiente de saturação do solo	Str	496,29	400 - 5000	mm
Escoamento Superficial	Pes	2,34	1 - 10	adm
Coeficiente de recarga	Crec	9,03	0 - 70	%
Coeficiente de recessão	Kkt	5,30	1 - 6	meses

O coeficiente de saturação do solo (Str) foi estimado em 496,29 mm, valor próximo ao limite inferior da faixa de calibração adotada. Esse resultado sugere uma capacidade moderada de armazenamento hídrico na zona não saturada do solo, indicando que o sistema responde relativamente rápido aos eventos de precipitação quando comparado a bacias que apresentam maiores capacidades de armazenamento.

O parâmetro associado ao escoamento superficial (Pes) apresentou valor de 2,34, indicando uma tendência intermediária de geração de escoamento superficial. Valores mais elevados desse parâmetro normalmente estão associados a uma menor contribuição do escoamento superficial direto e maior infiltração da água precipitada no solo. Dessa forma, o resultado obtido sugere que parte significativa da precipitação é inicialmente armazenada ou infiltrada antes de contribuir para a geração de vazão no canal principal.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o modelo SMAP apresentou desempenho satisfatório na simulação das vazões mensais da sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, constituindo uma ferramenta potencialmente útil para aplicações relacionadas à avaliação da disponibilidade hídrica, ao planejamento dos recursos hídricos e ao suporte à tomada de decisão na bacia hidrográfica do rio Goiana.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a aplicação do modelo hidrológico SMAP na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, visando à simulação de vazões mensais e à avaliação do desempenho do modelo na representação do comportamento hidrológico da bacia. Os resultados obtidos durante as etapas de calibração e validação indicaram desempenho satisfatório, com coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,70 e elevada correlação entre as séries observadas e simuladas, evidenciando a capacidade do modelo em reproduzir a dinâmica hidrológica da área de estudo.

A análise dos hidrogramas demonstrou que o SMAP foi capaz de representar adequadamente a sazonalidade das vazões e os principais eventos de escoamento observados ao longo do período analisado. Embora tenham sido verificadas diferenças pontuais na reprodução de alguns picos de vazão, os resultados indicam que a estrutura conceitual do modelo conseguiu representar satisfatoriamente os processos de transformação chuva-vazão na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim.

Dessa forma, conclui-se que o modelo SMAP constitui uma ferramenta adequada para a simulação de vazões mensais na área estudada, podendo auxiliar estudos de disponibilidade hídrica, bem como ações de planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Goiana. A utilização de dados independentes na etapa de validação também contribuiu para aumentar a confiabilidade das simulações e reduzir as incertezas associadas ao processo de modelagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa 159815/2025-8 a primeira autora, a CAPES pela concessão das bolsas 88887.191557/2025-00 ao segundo autor número e 88887.689130/2022-00 ao terceiro autor. Os autores agradecem também pelo financiamento das pesquisas a FACEPE pelo projeto APQ-2169-3.01/24, a CAPES pelo projeto 88887.689130/2022-00, e ao CNPq pelos projetos 406978/2022-0 e 311705/2025-1.

REFERÊNCIAS

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. Bacia Hidrográfica do rio Goiana. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=13. Acesso em 03 de mai. de 2026.

BITTENCOURT, T. K. A.; VIEIRA, E. O.; RIBEIRO, M. E. C. Previsão de vazões na bacia de contribuição da estação Itabirito Linígrafo utilizando metodologia SMAP. Revista Mineira de Recursos Hídricos, v. 6, 2024. DOI: 10.59824/rmrh.v6.323.

FERREIRA, E. C.; CABRAL, J. J. S. P.; MOURA, L. S.; RODRIGUES, A. B.; NEVES, Y. T. Avaliação do grau de estresse hidrológico na bacia do rio Goiana no estado de Pernambuco. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2019. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5378. Acesso em: 20 mai. 2026.

KELLER, A. A.; GARNER, K.; RAO, N.; KNIPPING, E.; THOMAS, J. Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models. Science of the Total Environment, v. 867, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161209.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP: A simplified hydrologic model. In: Applied Modeling in Catchment Hydrology. Water Resources Publications, Littleton, 1982.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). “River Flow Forecasting through Conceptual Models: Part I - A Discussion of Principles”. Journal of Hydrology 10(3), pp. 282–290.

NUNES, F. M. S. Modelagem chuva-vazão utilizando o modelo SMAP em bacias hidrográficas do semiárido. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2014. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/12444. Acesso em: 14 mai. 2026.

PEREZ, R. F.; TERCINI, J. R. B.; HOSSODA, D. H.; RABIOGLIO, V. L. G.; BONNECARRÈRE, J. I. Advancing Water Resources Management Through Reservoir Release Optimization: A Study Case in Piracicaba River Basin in Brazil. Hydrology, Basel, v. 12, n. 10, p. 269, 2025. DOI: 10.3390/hydrology12100269.

SILVA, L. R. S. Monitoramento hidrometeorológico no Brasil: uma análise sob a ótica da coordenação de políticas públicas. Revista de Gestão de Água da América Latina, Porto Alegre, v. 18, 2021. DOI: 10.21168/rega.v18e3.

SILVA FILHO, J. A.; RODRIGUES JÚNIOR, J. C.; ARAÚJO, S. C. Aplicação de um modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Brígida. In: XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2020, Caruaru. Anais [...]. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347907230_Aplicacao_de_um_modelo_chuva-vazao_na_bacia_hidrografica_do_rio_Brigida. Acesso em: 20 mai. 2026.

SOUZA, S. A.; REIS JUNIOR, D. S. Trend Detection in Annual Streamflow Extremes in Brazil. Water, v. 14, n. 11, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/w14111805.