

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO SMAP VIA PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) NAS SÉRIES FLUVIOMÉTRICAS MENSAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE – PE

Leonardo Maciel de Sousa¹; Gerald Norbert Souza da Silva² & Daniel Conceição do Nascimento³

Abstract: This study evaluated the performance of the monthly SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) hydrological model in simulating average monthly streamflows in the Capibaribe River basin. Ten streamflow stations and hydrometeorological data processed via the HecIMS platform (<https://hecims.netlify.app/>) were used. Automatic calibration was performed using the PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm. Performance was assessed based on three statistical metrics during calibration and validation stages. Results indicated that the model adequately represented hydrological behavior in part of the basin, with varying performance across stations. During calibration, stations such as São Lourenço da Mata II and Vitória de Santo Antão showed very good results, while Santa Cruz do Capibaribe performed poorly, suggesting limitations in flow representation. In validation, only three stations maintained "Good" or "Very Good" ratings, while four had below-expected results, possibly due to dams or data inconsistencies. It is concluded that the monthly SMAP model, combined with PSO, shows potential for semi-arid regions but requires improvements in data preprocessing. A more rigorous assessment of data quality is recommended for future studies.

Resumo: Este trabalho avaliou o desempenho do modelo hidrológico SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure), em sua versão mensal, na simulação de vazões médias mensais na bacia do rio Capibaribe. Foram utilizadas dez estações fluviométricas e dados hidrometeorológicos processados via plataforma HecIMS (<https://hecims.netlify.app/>). A calibração automática foi conduzida por meio do algoritmo de otimização PSO (Particle Swarm Optimization). O desempenho foi avaliado com base em três métricas estatísticas em etapas de calibração e validação. Os resultados indicaram que o modelo representou adequadamente o comportamento hidrológico em regiões da bacia, com desempenho variável entre as estações. Na calibração, estações como São Lourenço da Mata II e Vitória de Santo Antão apresentaram resultados muito bons, enquanto Santa Cruz do Capibaribe teve desempenho insatisfatório, sugerindo limitações na representação do escoamento. Na validação, apenas três estações mantiveram classificação "Boa" ou "Muito Boa", enquanto quatro tiveram resultados abaixo do esperado, possivelmente devido a barramentos ou inconsistências nos dados. Conclui-se que o SMAP mensal, aliado ao PSO, demonstra potencial para aplicação em regiões semiáridas, porém requer melhorias no pré-processamento de dados. Recomenda-se, ainda, uma avaliação mais rigorosa da qualidade dos dados em estudos futuros.

Palavras-Chave – HecIMS; Modelagem Hidrológica SMAP; Bacia do Rio Capibaribe.

1) Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Cidade Universitária, João Pessoa – PB, Brasil. CEP: 58051-900. E-mail: leonardo.maci3@academico.ufpb.br

2) Professor Adjunto DECA-CT-UFPB, Campus I, CEP: 58051-900 - João Pessoa, gerald.silva@academico.ufpb.br

3) Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Cidade Universitária, João Pessoa – PB, Brasil. CEP: 58051-900. E-mail: daniel.conceicao@academico.ufpb.br.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade hídrica é essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos, especialmente em bacias hidrográficas com dados fluviométricos escassos, como ocorre em diversas regiões do semiárido brasileiro (CPRM, 2015; Almeida, 2001). Nesses contextos, modelos hidrológicos tornam-se ferramentas indispensáveis para a simulação da relação chuva-vazão (Tucci, 2005; Beven, 2001). Conforme Otsuki e Reis (2011), a principal vantagem dessas ferramentas está na possibilidade de gerar séries de vazão sintéticas cuja extensão temporal depende dos registros pluviométricos locais, normalmente mais longos e consistentes que os fluviométricos. Essa abordagem permite superar a limitação temporal das estações de referência, reconstituindo históricos hidrológicos em locais com dados escassos ou fragmentados.

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), desenvolvido por Lopes et al. (1982), destaca-se por sua estrutura simplificada e reduzido número de parâmetros, sendo do tipo conceitual e concentrado, amplamente utilizado em estudos hidrológicos, nas escalas horária, diária e mensal, caracterizado por resolver de forma iterativa uma simulação contínua do balanço hidrológico em uma bacia hidrográfica, onde os estados de armazenamento hídrico em reservatórios fictícios são atualizados conforme as funções de transferências predefinidas do modelo, promovendo como resultado principal a estimativa de escoamento superficial no exutório da bacia, exigindo para tal operação, dados de precipitação e evapotranspiração potencial média, além da área de drenagem estudada.

O modelo SMAP tem sido amplamente testado na previsão de vazões em diversas bacias hidrográficas do Brasil. Lopes (1999) utilizou calibração automática para 3 dos 4 parâmetros do modelo SMAP mensal, obtendo faixas de variação dos parâmetros em variadas regiões hidrográficas do Brasil. Alexandre (2005) investigou a regionalização de seus parâmetros no Ceará, comparando diversas metodologias. Silva (2012) demonstrou o bom desempenho do SMAP diário para a simulação de séries fluviométricas na Paraíba, onde o SMAP superou outros modelos chuva-vazão estudados. ONS (2018) adotou oficialmente o SMAP/NOS para o Sistema Interligado Nacional devido à sua simplicidade e confiabilidade. Junior (2024) integrou o SMAP com aprendizado de máquina, introduzindo um modelo híbrido de simulações para previsão de vazões na bacia hidrográfica do reservatório de Sobradinho, Bahia. Esses estudos, entre outros, evidenciam a versatilidade do SMAP, sua evolução metodológica e seu potencial para otimizar a gestão hídrica no Brasil.

Todavia, a eficiência de modelos hidrológicos em estimar os escoamentos de bacias hidrográficas é subsidiada pelos resultados das etapas de calibração e validação, onde diversas abordagens metodológicas podem ser empregadas para avaliar o desempenho do modelo na simulação de vazões em uma determinada área de estudo. Com a crescente disponibilidade de dados climáticos e o avanço de técnicas de otimização, como o algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization), é possível aprimorar a calibração automática de modelos hidrológicos, reduzindo incertezas e melhorando sua capacidade preditiva (Kennedy & Eberhart, 1995; Chou, 2012). Além disso, ferramentas como a plataforma web HecIMS (Sousa et al, 2024) facilitam o acesso e o processamento de dados hidrometeorológicos, integrando variáveis fisiográficas, edáficas e climáticas de forma eficiente.

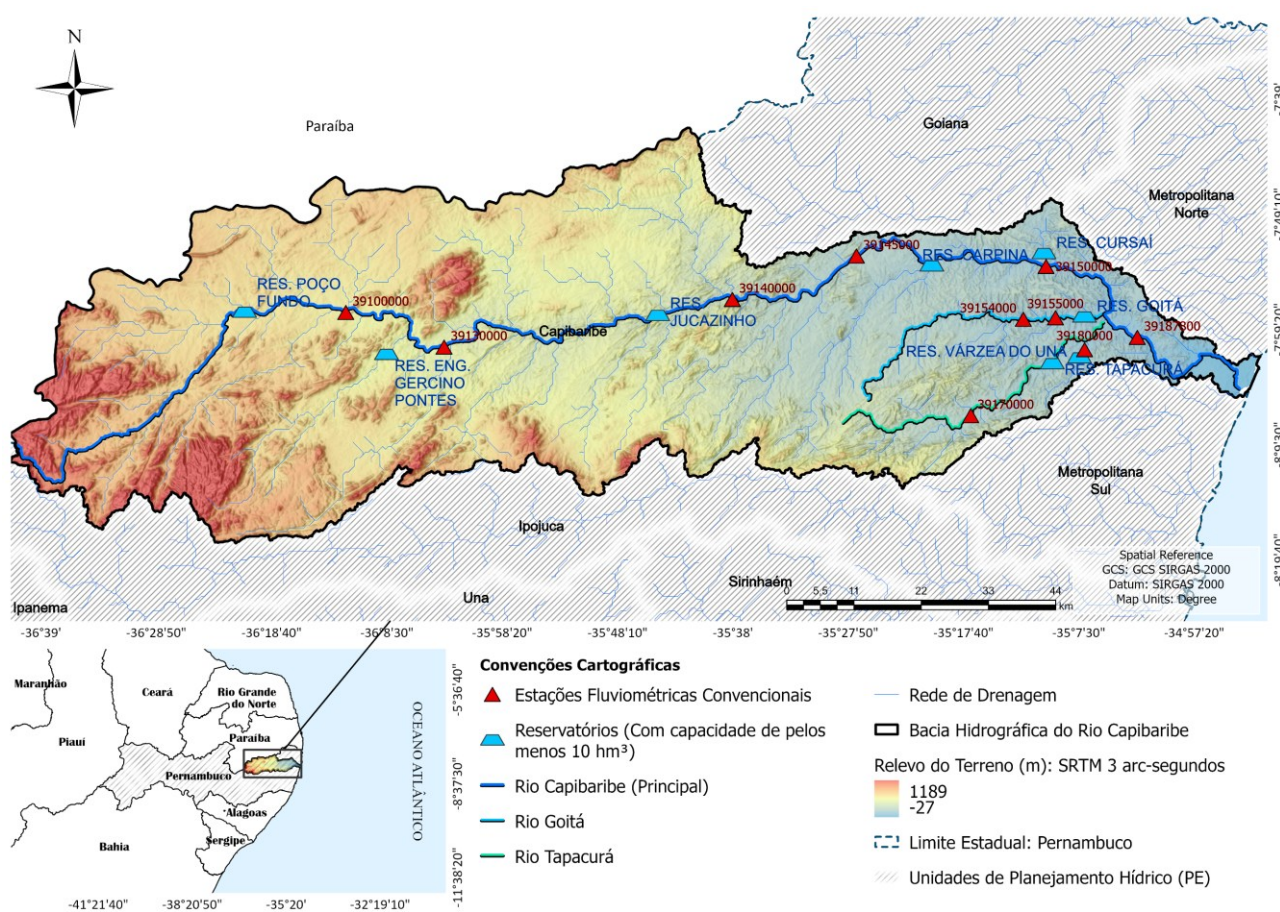
A bacia hidrográfica do rio Capibaribe possui monitoramento fluviométrico convencional responsável por registrar as vazões médias diárias do rio principal desde 1960, constitui-se de uma base de dados amplamente empregada em diversos trabalhos acadêmicos e estatais, como no Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe e Plano Estadual de Recursos Hídricos. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo SMAP mensal na simulação de vazões médias mensais na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, utilizando calibração automática via PSO e dados hidrometeorológicos processados na plataforma HecIMS.

METODOLOGIA

A Área de Estudo

As áreas de estudo analisadas na modelagem hidrológica são as bacias de drenagem e contribuição das estações fluviométricas convencionais da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, esta estando localizada no nordeste de Pernambuco, como mostra a Figura 1, possui área de 7.454,88 km², o que representa 7,58% da área total do Estado, sendo uma bacia hidrográfica que abrange 42 municípios, fazendo-se limite ao Norte com o Estado da Paraíba e a bacia hidrográfica do rio Goiana, ao Sul com a bacia hidrográfica do rio Ipojuca, a Leste com o Oceano Atlântico e a Oeste com a Paraíba (APAC, 2025).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

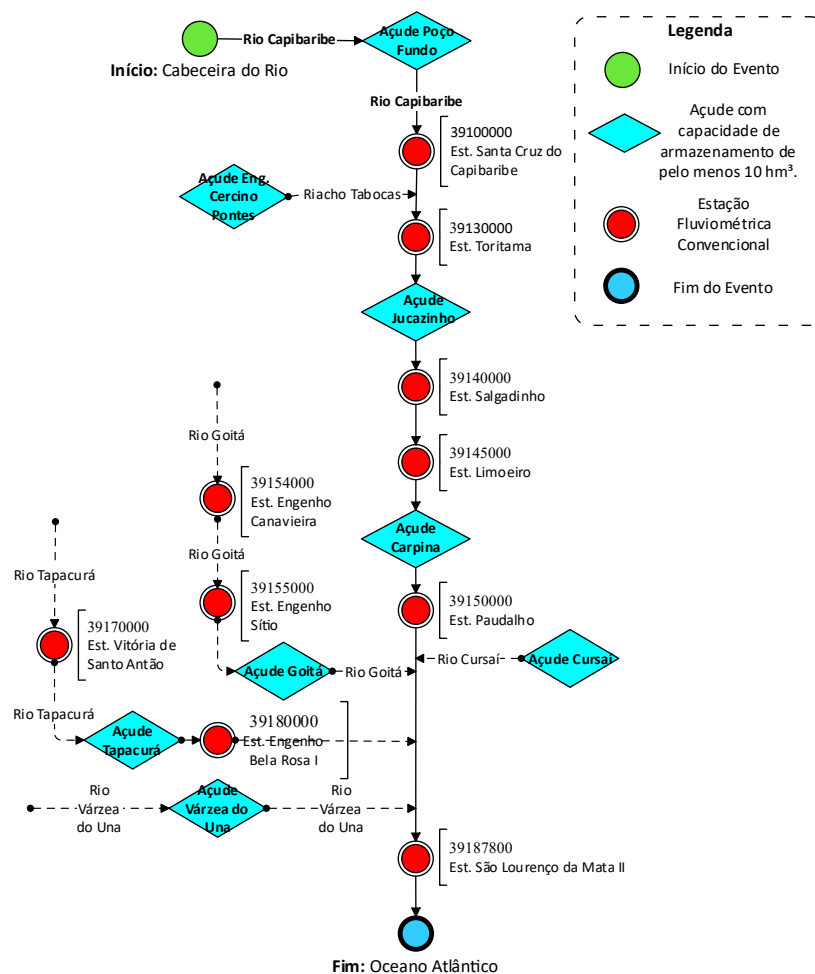


Fonte: Autores, 2025.

As Estações Fluviométricas e o Sistema Capibaribe

Neste trabalho, o modelo SMAP mensal teve seu desempenho avaliado nas regiões estudadas, para isso foram utilizados dados hidrometeorológicos processados na plataforma HecIMS, e dados de vazão média mensal de estações fluviométricas convencionais disponíveis na plataforma Hidroweb. A figura 2 mostra o Sistema Capibaribe, com os principais reservatórios fluviais e a localização, de maneira esquemática, das estações fluviométricas analisadas. Foram selecionadas 10 estações fluviométricas para o estudo, essas registram ou registraram, ao longo da história, as vazões médias diárias de 3 rios importantes da bacia do rio Capibaribe, sendo eles o rio principal (Capibaribe) com 6 estações; e nos afluentes: rio Goitá e rio Tapacurá, ambos com 2 estações fluviométricas.

Figura 2 – Sistema Capibaribe com os principais reservatórios fluviais e as estações fluviométricas analisadas.



Fonte: Autores, 2025.

O Modelo SMAP mensal

O modelo SMAP, em sua versão mensal é constituído de dois reservatórios matemáticos, o reservatório de água do solo e o reservatório de água subterrânea, ambos inicializados no primeiro mês da série de dados de entrada. Os dados de entrada necessários são: as séries médias mensais de precipitação e evapotranspiração potencial, ambas em milímetros, além da área da bacia hidrográfica em km² para conversão da vazão média mensal calculada em altura d'água (mm) em m³/s. O modelo conta com 4 parâmetros calibráveis que simulam aproximadamente a ação da bacia hidrográfica no processo de conversão da chuva em vazão, que devem ser calibrados, sendo esses: Str : Capacidade de saturação do solo (mm); Pes: Parâmetro adimensional que determina o escoamento superficial; Crec: Coeficiente adimensional de recarga e o Kkt: Constante de recessão do escoamento básico (em meses).

O Algoritmo PSO

O PSO (*Particle Swarm Optimization*) é um algoritmo estocástico baseado no comportamento social de animais, como peixes e aves. Cada solução potencial é representada por uma partícula que se move pelo espaço de busca, atualizando sua posição com base nas melhores soluções já encontradas por ela e por outras partículas. O algoritmo, ao longo de várias iterações, busca gradualmente a solução ótima. Esse método é popular devido à sua simplicidade e ao número reduzido de parâmetros a ajustar (Chou, 2012).

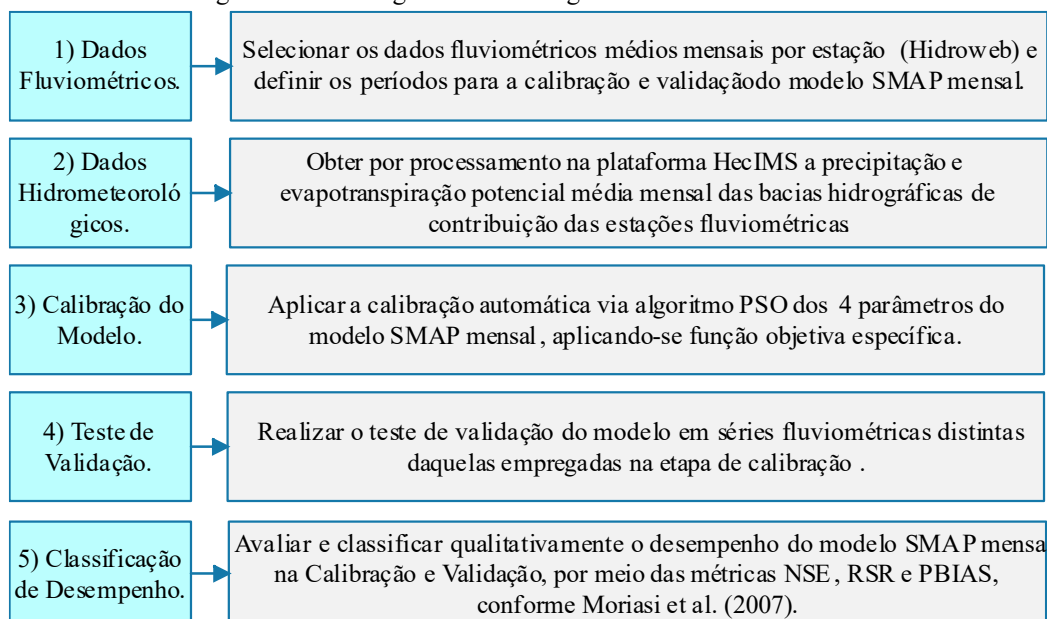
De acordo com Chou (2012), o procedimento de execução do algoritmo PSO descrito por Kennedy e Eberhart (1995) segue as seguintes etapas:

1. As partículas são inicializadas aleatoriamente, com posições e velocidades no espaço multidimensional.
2. A performance de cada partícula é avaliada, geralmente definida como a soma dos quadrados das diferenças entre a saída estimada e a saída observada, ou por outra função objetivo de preferência.
3. A performance atual de cada partícula é comparada com a melhor que ela já encontrou (*pbest*) e com a melhor performance encontrada pelo grupo (*gbest*). A velocidade das partículas é então atualizada com base nessas melhores posições.
4. Se uma partícula encontrar um resultado melhor que a do grupo, o valor global do melhor resultado (*gbest*) é atualizado.
5. As novas velocidades e posições das partículas são calculadas para a próxima iteração com base em equações específicas, comentadas em detalhes por Kennedy e Eberhart (1995).

Os Procedimentos Metodológicos

A sequência das análises na metodologia para avaliar o desempenho do modelo SMAP mensal pode ser observada no fluxograma da Figura 3, a explicação dos procedimentos por etapas é também discutida a seguir. Os cálculos e as análises foram realizados através da linguagem de programação Python, bem como utilizando as ferramentas de geoprocessamento e tratamento de dados hidrometeorológicos da plataforma HecIMS (<https://hecims.netlify.app/>).

Figura 3 – O fluxograma metodológico realizado neste estudo.



Fonte: Autores, 2025.

Etapas 1 (Processamento dos dados fluviométricos): Foi desenvolvido um script na linguagem de programação Python para processamento e requisição online na plataforma HidroWeb dos dados fluviométricos diários das estações selecionadas para o estudo. Os dados foram agregados para a escala de tempo mensal, calculando-se a média aritmética das vazões diárias. Na seleção das séries fluviométricas ótimas para as etapas de calibração e validação do modelo, optou-se, quando possível, por períodos que ainda não existissem reservatórios fluviais construídos a montante das estações.

Etapas 2 (Processamento dos dados hidrometeorológicos): As séries de precipitação e evapotranspiração potencial média mensais foram obtidas na execução em sequência das ferramentas

Watershed Delineation, que possibilita a delimitação das áreas de drenagem e contribuição das estações fluviométricas, *Monitoring Characteristics*, que determina as estações hidrometeorológicas de monitoramento, e *Climate Characteristics*, que calcula a ponderação espacial da precipitação e evapotranspiração potencial média das bacias hidrográficas, todas essas funções estão disponíveis para os usuários no painel *Watershed Hydrology* da plataforma HecIMS (<https://hecims.netlify.app/>).

Etapas 3 (Calibração automática do modelo SMAP mensal): A calibração automática do modelo SMAP mensal foi realizada individualmente por estação fluviométrica estudada, empregando o algoritmo PSO, com os mesmos limites de busca de Lopes (1999), esse autor afirma que para a calibração da versão mensal são necessários de 2 a 9 anos de dados observados de precipitação, evapotranspiração e vazão média mensal, optou-se para este estudo, selecionar no mínimo 8 anos consecutivos para a calibração. A escolha dos parâmetros ótimos calibrados foi realizada utilizando-se como critério maximizar o valor da média aritmética entre a função F_{01} o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), e a função F_{02} o Índice de Eficiência de Kling-Gupta (KGE).

$$F_{01} = NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - Q_{SIM,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - \overline{Q_{OBS}})^2} \quad (1)$$

Onde, NSE é o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (*ad.*); $Q_{OBS,t}$ é o valor observado da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $Q_{SIM,t}$ é o valor simulado (modelado) da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $\overline{Q_{OBS}}$ é a média aritmética dos valores observados de vazão (m^3/s) e n é o número total de instantes de tempo ou número de dados.

$$F_{02} = KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (2)$$

Onde, KGE é o Índice de Eficiência de Kling-Gupta (*ad.*); r é a correlação de Pearson (*ad.*) entre os dados modelados e observados, refletindo o grau de associação temporal entre as duas séries; β é o viés (*ad.*), quantifica a diferença relativa entre as médias das séries modelada e observada e o γ é o índice de variabilidade (*ad.*), que comprara a dispersão ou desvio padrão das duas séries.

Etapas 4 (Teste de validação do modelo do modelo SMAP mensal): A validação do modelo foi testada em intervalos temporais não utilizadas no processo de calibração das séries de vazão média mensal. Em geral, os períodos de validação foram intervalos temporais posteriores aos intervalos utilizados na calibração, optou-se para este estudo, selecionar no mínimo 4 anos consecutivos para a validação.

Etapas 5 (Classificação de desempenho do modelo SMAP mensal): Moriasi et al. (2007) desenvolveu uma classificação qualitativa para o desempenho de modelos hidrológicos, a partir dos resultados de métricas avaliativas, apresentadas na Tabela 1. Sendo que, o presente estudo analisa as 3 métricas abordadas por ele: NSE, RSR e PBIAS (%); nas etapas de avaliação do desempenho do modelo SMAP mensal: calibração e validação. O NSE foi rapidamente abordado neste trabalho, as métricas RSR e PBIAS estão descritas de forma detalhada em Moriasi et al. (2007).

Tabela 1 – Classificação qualitativa do desempenho de modelos hidrológicos.

Classes de Desempenho	RSR	NSE	PBIAS(%)
Muito Bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi et al. (2007).

RESULTADOS

Análise de Desempenho do modelo SMAP mensal na Calibração

Na tabela 2, estão descritas as datas, meses de início e fim dos períodos de calibração por estação fluviométrica, onde podemos observar também os 4 parâmetros do modelo SMAP mensal (Str, Pes, Crec, Kkt), calibrados automaticamente para as 10 estações fluviométricas estudadas, utilizando o algoritmo de otimização PSO.

Tabela 2 – Dados da calibração automática com o PSO e resultados obtidos dos parâmetros ótimos, por estação fluviométrica.

Código	Estação	Início	Fim	SMAP Str (mm)	SMAP Pes (ad.)	SMAP Crec (%)	SMAP Kkt (meses)
39100000	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	dez/87	dez/97	400	2,62	0	5,19
39130000	TORITAMA	dez/74	dez/87	400	2,08	0	3,54
39140000	SALGADINHO	dez/84	dez/96	400	2,78	0	1,55
39145000	LIMOEIRO	dez/74	dez/87	400	2,21	0	3,7
39150000	PAUDALHO	dez/67	dez/77	400	2,49	0	5,48
39187800	SÃO LOURENÇO DA MATA II	dez/93	dez/01	468,42	2,91	11,94	6
39154000	ENGENHO CANAVIEIRA	dez/02	dez/11	1364,77	1,97	0	2,75
39155000	ENGENHO SÍTIO	dez/67	dez/77	400	2,21	49	6
39170000	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	dez/85	dez/95	400	5,58	6,44	6
39180000	ENGENHO BELA ROSA I	dez/67	dez/75	400	3,2	0	1

Fonte: Autores, 2025.

Conforme mostra a Tabela 3, de maneira geral, a fase de calibração apresentou resultados positivos, como mais esperado, pois nesta fase os parâmetros do modelo são ajustados iterativamente com o PSO em busca de minimizar a diferença entre as vazões calculadas pelo SMAP e as vazões observadas. Porém, na validação, o modelo já calibrado é testado em um conjunto de dados independentes, sem o ajuste de parâmetros, para verificar se o modelo generaliza bem as condições não usadas na calibração, o que pode levar a resultados não tão positivos ou até mesmo ruins. Das 10 estações fluviométricas analisadas nas simulações realizadas neste trabalho, as estações fluviométricas São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Sítio (rio Goitá) e Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá) apresentaram excelentes resultados na calibração, com as 3 métricas avaliativas de desempenho classificadas como “Muito Bom”. Contudo, a estação fluviométrica Santa Cruz do Capibaribe apresentou calibração “Insatisfatória” com NSE= 0,10; RSR= 0,95 e PBIAS= 9,04 %.

Tabela 3 – Resultados da avaliação de desempenho do modelo SMAP mensal na calibração, por estação fluviométrica.

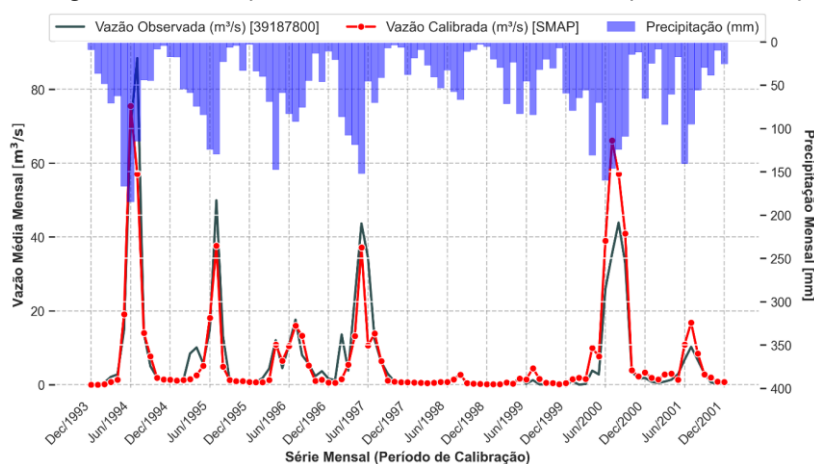
Código	Estação	NSE (ad.)	RSR (ad.)	PBIAS (%)	Classe NSE	Classe RSR	Classe PBIAS
39100000	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	0,1	0,95	9,04	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Bom
39130000	TORITAMA	0,72	0,53	13,51	Bom	Bom	Bom
39140000	SALGADINHO	0,78	0,47	0,55	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
39145000	LIMOEIRO	0,66	0,58	12,15	Bom	Bom	Bom
39150000	PAUDALHO	0,72	0,53	1,19	Bom	Bom	Muito Bom

39187800	SÃO LOURENÇO DA MATA II	0,82	0,43	-0,25	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
39154000	ENGENHO CANAVIEIRA	0,71	0,54	2,62	Bom	Bom	Muito Bom
39155000	ENGENHO SÍTIO	0,91	0,31	0,09	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
39170000	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	0,9	0,31	-0,07	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
39180000	ENGENHO BELA ROSA I	0,74	0,51	-0,49	Bom	Bom	Muito Bom

Fonte: Autores, 2025.

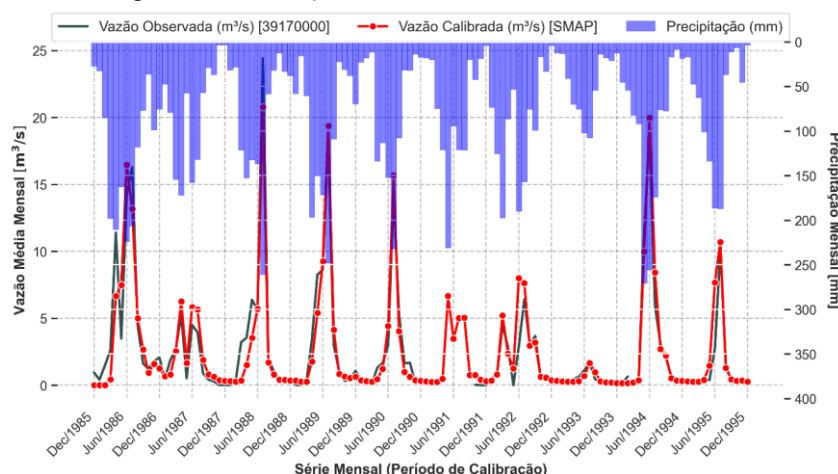
Os hidrogramas, a título de demonstração dos resultados, para 2 estações fluviométricas com resultados positivos na calibração (São Lourenço da Mata II, Vitória de Santo Antão), estão mostrados, respectivamente, a seguir nas figuras 4 e 5.

Figura 4 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata I.



Fonte: Autores, 2025.

Figura 5 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Vitória de Santo Antão.



Fonte: Autores, 2025.

As possíveis causas para o desempenho insatisfatório de um modelo hidrológico são diversas, desde a própria limitação do modelo matemático, em representar a complexidade dos fenômenos reais que ocorrem na bacia hidrográfica até a ausência de precisão ou veracidade dos dados empregados na modelagem como precipitação, evapotranspiração e vazões observadas, que podem ser registrados ou processados de forma incorreta ou inapropriada, a presença de reservatórios fluviais interferindo no escoamento, entre outros.

Análise do Desempenho do modelo SMAP mensal na Validação

De maneira geral, a fase de validação do modelo apresentou resultados piores que a de calibração. As estações fluviométricas São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Sítio (rio Goitá) e Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá) mostraram os melhores resultados, sendo que essas obtiveram classificação de desempenho “Boa” ou “Muito Boa” em pelo menos 2 das 3 métricas avaliadas. Contudo, 4 estações fluviométricas do rio Capibaribe apresentaram resultados insatisfatórios nas 3 métricas avaliadas, sendo elas: Santa Cruz do Capibaribe, Toritama, Salgadinho e Limoeiro, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da avaliação de desempenho do modelo SMAP mensal na validação, por estação fluviométrica.

Estação	Início	Fim	NSE (ad.)	RSR (ad.)	PBIAS (%)	NSE	RSR	PBIAS
SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	dez/99	dez/04	0,41	0,77	74,41	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
TORITAMA	dez/92	dez/97	-5,69	2,59	317,43	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
SALGADINHO	dez/99	dez/04	0,21	0,89	111,68	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
LIMOEIRO	dez/93	dez/98	-0,97	1,4	191,31	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
PAUDALHO	dez/87	dez/92	0,58	0,64	-24,6	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
SÃO LOURENÇO DA MATA II	dez/10	dez/15	0,82	0,42	-16,67	Muito Bom	Muito Bom	Satisfatório
ENGENHO CANAVIEIRA	dez/12	dez/16	0,62	0,62	2,21	Satisfatório	Satisfatório	Muito Bom
ENGENHO SÍTIO	dez/84	dez/88	0,73	0,52	3,23	Bom	Bom	Muito Bom
VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	dez/96	dez/01	0,74	0,51	11,66	Bom	Bom	Bom
ENGENHO BELA ROSA I	dez/84	dez/89	-1,99	1,73	162,5	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório

Fonte: Autores, 2025.

A degradação do desempenho na fase de validação pode estar associada a fatores como sobreajustes do modelo durante a calibração, que limitam sua capacidade de generalização, à variabilidade hidrológica não capturada adequadamente no período de calibração, como eventos extremos ou mudanças sazonais, à perda de qualidade na medição das variáveis e a intervenções antrópicas na bacia hidrográfica, como alterações no uso do solo, captações irregulares ou operação de estruturas hídricas, que não foram incorporadas ou não existiam nas simulações da calibração.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que o modelo SMAP mensal foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento hidrológico em regiões da bacia do rio Capibaribe, com desempenho variável entre as estações analisadas. Na calibração, as estações São Lourenço da Mata II, Engenho Sítio e Vitória de Santo Antão apresentaram resultados muito bons, indicando uma boa representação dos processos hidrológicos. No entanto, a estação Santa Cruz do Capibaribe obteve desempenho insatisfatório sugerindo limitações na representação do escoamento nessa região. Na validação, observou-se uma redução no desempenho do modelo, com apenas três estações mantendo classificação "Boa" ou "Muito Boa" em pelo menos duas métricas. Quatro estações (Santa Cruz do Capibaribe, Toritama, Salgadinho e Limoeiro) apresentaram resultados insatisfatórios, possivelmente devido a interferências antrópicas, como barramentos, ou inconsistências nos dados observados. Recomenda-

se, para estudos futuros, uma análise mais rigorosa da qualidade dos dados, a incorporação de intervenções humanas no modelo para melhorar a precisão em bacias com respostas hidrológicas complexas. Diante disto, estes ajustes podem aumentar a confiabilidade do modelo em simulações hidrológicas na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E.; CLARKE, R. T.; REIS, D. S. *Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos*. Fortaleza: FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Chuvas Artificiais, 2005.
- ALMEIDA, C. N. *Implantação de um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos na bacia do Rio do Peixe, com ênfase ao modelo de transformação chuva-vazão*. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. *Bacias Hidrográficas - Rio Capibaribe*. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/162-bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/193-bacia-do-rio-capibaribe>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- BEVEN, K. *How far can we go in distributed hydrological modelling?* Hydrology and Earth System Sciences, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2001.
- CHOU, C. M. *Particle swarm optimization for identifying rainfall-runoff relationships*. Journal of Water Resource and Protection, v. 4, p. 115-126, mar. 2012. DOI: 10.4236/jwarp.2012.43014. Publicado online em março de 2012.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 39. Bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Una, Goiana, Mundaú, Paraíba, Coruripe, Pratagi, Sirinhaém, São Miguel, Camaragibe, Abilhai, Gramame e Manguba*. Recife: CPRM, 2015.
- JUNIOR, A. D.; SILVEIRA, C. S.; COSTA, J. M. F.; GONÇALVES, S. T. N. *Combining traditional hydrological models and machine learning for streamflow prediction*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 29, e11, 2024.
- KENNEDY, J. e EBERHART, R. 1995 *Particle Swarm Optimization*. Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Neural Networks, IEEE, Piscataway, NJ, 1942 - 1948.
- LOPES, J. E. G. *Manual do modelo SMAP*. 1999. Disponível em: <http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. *SMAP - A simplified hydrological model*. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Applied modelling in catchment hydrology*. Water Resources Publications, 1982.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE, v.50, p.885 - 900, 2007.
- ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (BRASIL). *Aplicação do modelo SMAP/ONS para previsão de vazões no âmbito do SIN*. ONS 0097/2018-RV3. 2018.
- SILVA, G. N. S. *Regionalização automatizada de parâmetros de modelos chuva-vazão integrada a um sistema de informações geográficas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2012.
- SOUZA, L. M.; SILVA, G. N. S.; REGO, A. M. S. *Sistema computacional de informação e modelagem hidro-edafoclimática (HECIMS) para o Brasil*. Anais do XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa-PB, 2024.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH.