IMPLEMENTAÇÃO DE ENSEMBLE KALMAN FILTER NO MODELO SMAP PARA PREVISÃO DE VAZÕES EM 37 BACIAS NA AMAZÔNIA

Felipe M. Pineroli [1]; Luiz Felipe P. de Brito [2]; Marcus S. Santos [3] & Pedro L. B. Chaffe [4]

Palavras-Chave – Forecast, Ensemble Kalman Filter, Amazônia.

INTRODUÇÃO

A bacia Amazônica tem apresentado intensificação do ciclo hidrológico e aumento da frequência de eventos extremos nas últimas décadas (Chagas *et al.*, 2022; Fleischmann *et al.*, 2023). Cheias e secas recentes causaram impactos sobre comunidades ribeirinhas, transporte fluvial, geração de energia e demais atividades dependentes dos recursos hídricos, reforçando a necessidade de sistemas confiáveis de previsão hidrológica.

A previsão hidrológica na Amazônia, entretanto, é desafiadora devido à heterogeneidade espacial dos processos hidrológicos, bacias extensas com elevada capacidade de armazenamento, à baixa densidade de monitoramento e às incertezas das previsões meteorológicas, especialmente de precipitação (Paiva *et al.*, 2013; Wongchuig *et al.*, 2024). Além disso, erros nas condições iniciais dos modelos hidrológicos acumulam-se ao longo da simulação, degradando a qualidade das previsões. Métodos de assimilação de dados, como o *Ensemble Kalman Filter* (EnKF; Evensen, 1994; Burgers *et al.*, 1998), atualizam os estados do modelo a partir das observações, reduzindo os erros propagados nas previsões subsequentes.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho das previsões de vazão utilizando o modelo SMAP com a implementação de assimilação por *Ensemble Kalman Filter*.

METODOLOGIA

Dados e área de estudo

Foram selecionadas 37 bacias hidrográficas de cabeceira na Amazônia com pelo menos 10 anos de dados de vazão observada com no máximo 10 % de falhas anuais, e compatibilidade temporal com as demais séries hidrometeorológicas. Utilizou-se precipitação histórica do produto MERGE, evapotranspiração potencial do GLEAM e previsões de precipitação do GEFS, com horizonte de 15 dias e 30 membros de *ensemble*. Durante o período de previsão, a evapotranspiração foi representada por uma climatologia diária derivada da série histórica do GLEAM.

Modelo hidrológico

As previsões foram geradas com o modelo conceitual concentrado SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*; Lopes, Braga e Conejo, 1981), cuja estrutura representa os processos hidrológicos por meio de três reservatórios correspondentes ao armazenamento superficial, à camada superior do solo e ao aquífero. A calibração foi realizada individualmente para cada bacia utilizando o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*), adotando o coeficiente de *Nash–Sutcliffe*

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, felipe.pineroli55@gmail.com
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, britofelipe85@gmail.com
3) Pesquisador em Geociências, Serviço Geológico do Brasil, marcus.santos@sgb.gov.br
4) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, pedro.chaffe@ufsc.br

(NSE) como função objetivo. O desempenho do modelo foi avaliado nos períodos de calibração e validação por meio dos índices NSE e *Kling–Gupta Efficiency* (KGE).

Previsão hidrológica e assimilação de dados

Foi desenvolvido um sistema de previsão com horizonte de 15 dias, utilizando os 30 membros de precipitação do GEFS para propagar o modelo SMAP. O *hindcast* compreendeu o período de 2023 a 2026, utilizando previsões reprocessadas do GEFS quando disponíveis e precipitação observada do MERGE nos períodos restantes.

Foram comparadas duas estratégias de atualização das previsões. A primeira consiste na correção por delta, em que a diferença entre a última vazão observada e a simulada é adicionada às vazões previstas de todos os membros do *ensemble*, sem modificar os estados internos do modelo.

A segunda estratégia emprega o *Ensemble Kalman Filter* que atualiza sequencialmente os estados internos do SMAP a partir da última observação de vazão disponível. A assimilação foi realizada mensalmente entre janeiro de 2023 e na data da rodada operacional, utilizando um *ensemble* de 30 membros para estimar as covariâncias entre estados e vazão simulada. Após cada atualização, os estados corrigidos são propagados pelo modelo para gerar as previsões de 15 dias. Foi adotada a formulação estocástica clássica do EnKF, com inflação multiplicativa e pequeno ruído aditivo para preservar a dispersão do *ensemble*.

RESULTADOS

O modelo SMAP, calibrado individualmente por bacia com o algoritmo SCE-UA, representou o regime hidrológico da maior parte das 37 bacias avaliadas. A Figura 1 apresenta a distribuição espacial do KGE nos períodos de calibração (a) e validação (b). O KGE mediano entre as bacias foi de aproximadamente 0,78 na calibração e 0,73 na validação, com 32 das 37 bacias apresentando KGE superior a 0,6 na calibração e 29 na validação. O desempenho foi baixo em um pequeno número de bacias (KGE e NSE negativos em duas bacias).

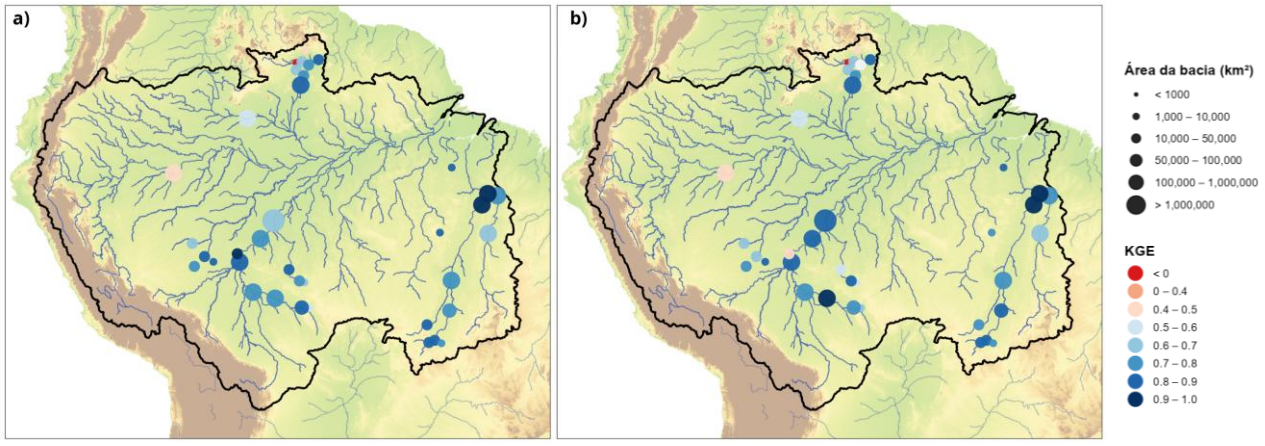


Figura 1. Localização das bacias estudadas na Amazônia e desempenho do modelo SMAP em termos de KGE: (a) período de calibração e (b) período de validação. A cor de cada ponto indica a classe de KGE e o tamanho representa a área da bacia.

A bacia do Rio Acre, em Rio Branco (código 13600002; área de ~23.416 km²), foi adotada como exemplo detalhado. A Figura 2 mostra o hidrograma observado e simulado nos períodos de calibração (2000–2022) e validação (2023–2025), com KGE de 0,89 e NSE de 0,80 na calibração e KGE de 0,65 e NSE de 0,75 na validação. O modelo reproduziu a sazonalidade e a recessão; a redução do KGE na

validação, mantendo o NSE elevado, é consistente com um período de validação coincidente com os anos hidrológicos recentes de extremos (2023–2025).

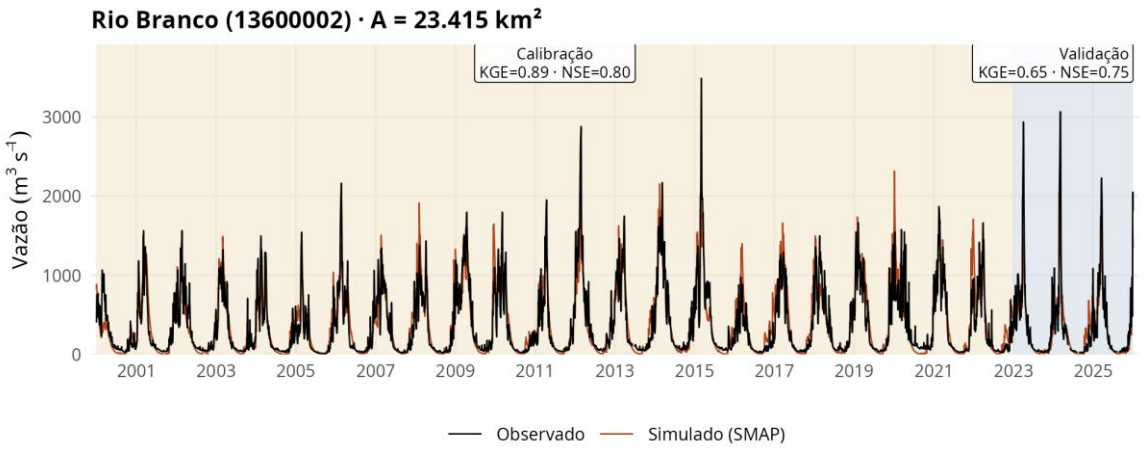


Figura 2. Hidrograma observado e simulado pelo modelo SMAP para a bacia do Rio Acre, em Rio Branco (código 13600002; área de ~23.416 km²), nos períodos de calibração e validação, com os respectivos valores de KGE e NSE.

A Figura 3 avalia as previsões de vazão de 2023 a 2026. O painel (a) apresenta o erro absoluto médio (MAE) da bacia do Rio Acre (em Rio Branco) em função da antecedência, para as previsões sem ajuste, com correção por delta, com o *Ensemble Kalman Filter* e para um referencial de persistência (a última vazão observada mantida constante ao longo do horizonte). Nessa bacia, o EnKF reduziu o MAE em relação à correção por delta em todos os horizontes, em aproximadamente 42% em D+7 (de 260 para 151 m³ s⁻¹) e 45% em D+10 (de 227 para 125 m³ s⁻¹). A persistência, entretanto, apresenta MAE inferior ao de todos os métodos do modelo nas antecedências mais curtas, mas é superada pelo EnKF a partir de D+8. O painel (b) mostra um exemplo de *hindcast* iniciado em 15/06/2026, no qual a previsão inicializada com os estados atualizados pelo EnKF acompanhou a vazão observada subsequente de forma mais próxima do que a correção por delta e a simulação sem ajuste.

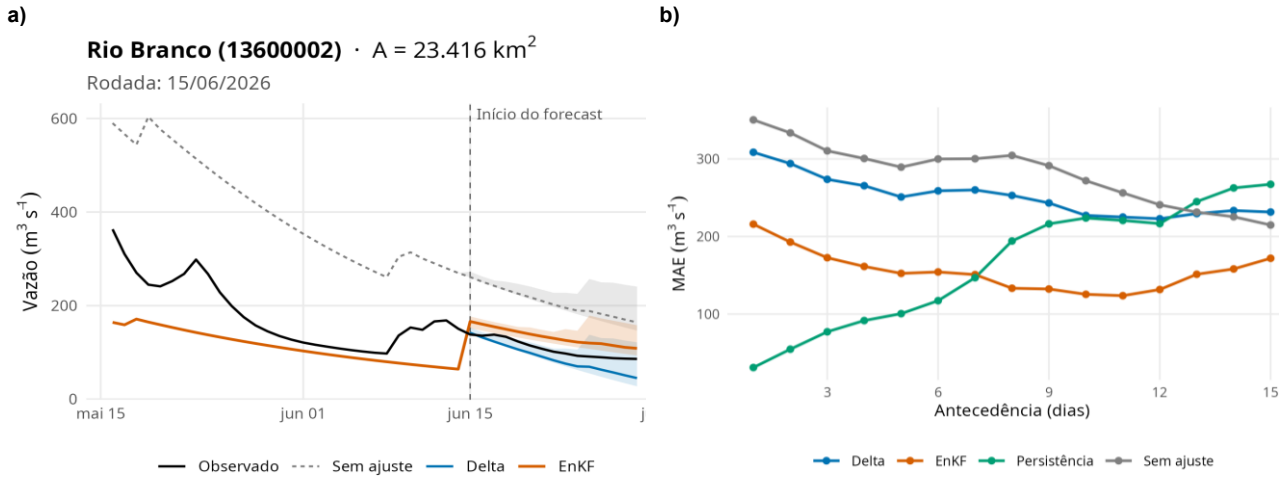


Figura 3. Avaliação das previsões de vazão para a bacia do Rio Acre (código 13600002): (a) erro absoluto médio (MAE) em função da antecedência da previsão, para as estratégias sem ajuste, correção por delta, Ensemble Kalman Filter e persistência; (b) hindcast em 15/06/2026, comparando a vazão observada com as previsões sem ajuste, corrigida por delta e corrigida pelo EnKF.

O ganho do EnKF sobre a correção por delta se manteve no conjunto das 37 bacias. A redução mediana do MAE foi de aproximadamente 41% em D+7 e 33% em D+15, e o EnKF superou a

correção por delta em aproximadamente 86% das bacias nos horizontes de 5 a 15 dias. O ganho foi mais expressivo nas bacias grandes (mediana de skill de aproximadamente +0,51 em D+7 e +0,36 em D+15, para as 13 bacias com área acima de 100 mil km²) e menor nas bacias pequenas (mediana de aproximadamente +0,30 em D+7 e +0,24 em D+15, para as 12 bacias com área abaixo de 20 mil km²). Quando tomada a persistência como referência, contudo, as previsões do modelo não a superaram na maioria das bacias nos horizontes curtos: o EnKF apresentou MAE inferior ao da persistência em 9 das 37 bacias em D+7 e em aproximadamente 15 das 37 bacias em D+15, indicando que a persistência é um referencial difícil de superar em grandes bacias amazônicas de resposta lenta e que o principal ganho da assimilação se dá sobre as demais estratégias baseadas no modelo.

CONCLUSÕES

O modelo SMAP reproduz de maneira satisfatória o regime hidrológico na Amazônia, porém degrada previsões em função de erros nas condições iniciais do modelo. A assimilação de vazão por *Ensemble Kalman Filter* é uma alternativa viável para a operacionalização de previsões de vazão, corrigindo os estados internos do modelo e reduzindo o erro das previsões em relação ao modelo sem correções. Por atualizar sequencialmente as condições iniciais a partir dos dados disponíveis, o método integra-se a um sistema de previsões e contribui para antecipação de extremos hidrológicos na Amazônia.

REFERÊNCIAS

BURGERS, G.; VAN LEEUWEN, P. J.; EVENSEN, G. (1998). "*Analysis Scheme in the Ensemble Kalman Filter*". Monthly Weather Review, v.126, n.6, p.1719–1724.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. (2022). "*Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle*". Nature Communications, v.13, 10.1038/s41467-022-32580-x.

EVENSEN, G. (2003). "*The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation*". *Ocean Dynamics*, v.53, p.343–367.

FLEISCHMANN, A. S.; PAPA, F.; HAMILTON, S. K.; FASSONI-ANDRADE, A.; WONGCHUIG, S.; ESPINOZA, J. C.; PAIVA, R.; MELACK, J.; FLUET-CHOUINARD, E.; CASTELLO, L.; ALMEIDA, R.; BONNET, M. P.; ALVES, L.; MOREIRA, D.; YAMAZAKI, D.; REVEL, M.; COLLISCHONN, W. (2023). "*Increased floodplain inundation in the Amazon since 1980*". Environmental Research Letters, v.18, n.3, p.034024.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. (1981). *"Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado"* in Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, 42-62, Fortaleza.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. B. (2013). "*Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling in South America*". Water Resources Research, 49, p.1226–1243.

WONGCHUIG, S.; PAIVA, R.; SIQUEIRA, V.; PAPA, F.; FLEISCHMANN, A.; BIANCAMARIA, S.; PARIS, A.; PARRENS, M.; AL BITAR, A. (2024). "*Multi-satellite data assimilation for large-scale hydrological-hydrodynamic prediction: Proof of concept in the Amazon Basin*". Water Resources Research, v.60, n.8, e2024WR037155.

AGRADECIMENTO

O trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES, do CNPq e do Serviço Geológico do Brasil.