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

MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DE VAZÕES EM BACIAS POUCO OU NÃO MONITORADAS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Leonardo M. C. Ribeiro [1]; Ana A. Ribeiro [2]; Marina B. Macedo [3]; Franz C. Gonçalves [4] & Ingrid C. R. O. Marques [5]

RESUMO: A estimativa de vazões em bacias pouco monitoradas ou não monitoradas permanece um desafio relevante para a hidrologia aplicada, principalmente devido à escassez de dados hidrometeorológicos para calibração e validação de modelos chuva–vazão. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre métodos de simulação de vazões em bacias com limitação de dados, com ênfase em modelos conceituais, regionalização hidrológica, sensoriamento remoto, métodos híbridos e aprimoramentos do SCS-Curve Number. A revisão considerou estudos publicados a partir de 2014, destacando as contribuições de Loukas e Vasiliades (2014) e pesquisas recentes relacionadas ao uso de redes neurais artificiais, produtos orbitais e formulações assintóticas do Curve Number. Os resultados indicam que modelos como HEC-HMS, UBC, SWAT e HBV permanecem amplamente utilizados, embora seu desempenho dependa da qualidade dos dados de entrada e da definição adequada dos parâmetros hidrológicos. Observa-se ainda que abordagens híbridas e atualizações dinâmicas das condições de umidade antecedente contribuem para reduzir incertezas em bacias com monitoramento limitado.

Palavras-Chave: Modelagem hidrológica; Bacias pouco monitoradas; SCS-CN.

ABSTRACT: Estimating streamflow in poorly gauged or ungauged basins remains a major challenge for applied hydrology due to the limited availability of hydrometeorological data for rainfall–runoff model calibration and validation. This study presents a bibliographic review of streamflow simulation methods applied to data-scarce basins, emphasizing conceptual models, hydrological regionalization, remote sensing, hybrid approaches, and improvements to the SCS-Curve Number method. The review considered studies published since 2014, highlighting the contributions of Loukas and Vasiliades (2014) and recent research involving artificial neural networks, satellite-derived data, and asymptotic CN formulations. The results indicate that models such as HEC-HMS, UBC, SWAT, and HBV remain widely applied, although their performance strongly depends on input data quality and proper parameter definition. Hybrid approaches and dynamic antecedent moisture estimation have also contributed to reducing uncertainties in poorly monitored basins.

Key-words: Hydrological modeling; Poorly gauged basins; Regionalization; HEC-HMS; SCS-CN.

1) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (71) 99124-2793, leo5991@hotmail.com
2) Afiliação: Universidade Federal da Bahia, (71) 988410131, clau69.ac@gmail.com
3) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (34) 99801-0110, marinamacedo@unifei.edu.br
4) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (34) 98426-7447, fcg120@hotmail.com
5) Afiliação: Universidade do Estado da Bahia, (71) 99272-0943, ingridcarolinee@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A estimativa de vazões em bacias hidrográficas pouco monitoradas ou não monitoradas permanece como um dos principais desafios da hidrologia aplicada, especialmente em países em desenvolvimento, onde a disponibilidade de dados hidrometeorológicos ainda é limitada. A ausência de séries históricas consistentes dificulta a calibração e validação de modelos chuva–vazão, comprometendo a previsão de eventos extremos, o planejamento de recursos hídricos e o dimensionamento de estruturas hidráulicas. A *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS) destacou essa problemática por meio da iniciativa *Prediction in Ungauged Basins* (PUB, 2003–2012) e, posteriormente, do programa *Unsolved Problems in Hydrology* (UPH), ambos voltados ao aprimoramento da compreensão e previsão de processos hidrológicos em ambientes com escassez de dados.

No Brasil, esse cenário se torna ainda mais crítico devido à baixa densidade de estações pluviométricas e fluviométricas, à descontinuidade das séries temporais e às dificuldades operacionais de manutenção das redes de monitoramento. Nesse contexto, modelos chuva–vazão tem sido amplamente utilizados para estimar vazões de projeto, avaliar riscos hidrológicos e apoiar o planejamento hídrico, mesmo em regiões onde as informações disponíveis são insuficientes para calibração convencional.

Nos últimos anos, avanços relacionados à regionalização de parâmetros, ao uso de sensoriamento remoto e à integração entre modelos conceituais e técnicas de aprendizado de máquina têm contribuído para ampliar a capacidade preditiva da modelagem hidrológica em bacias com escassez de dados. Modelos como HEC-HMS, UBC, SWAT e HBV permanecem amplamente utilizados, enquanto abordagens híbridas baseadas em redes neurais artificiais e arquiteturas de aprendizado profundo vêm sendo empregadas para reduzir erros estruturais das simulações.

Além disso, o aprimoramento do método SCS–Curve Number (SCS-CN), especialmente por meio da formulação assintótica do CN e da atualização dinâmica das condições de umidade antecedente, tem permitido representar de forma mais consistente os processos de infiltração e geração de escoamento superficial em bacias com elevada variabilidade hidrológica.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre métodos de simulação de vazões aplicados a bacias pouco monitoradas ou não monitoradas, com ênfase em modelos conceituais, regionalização hidrológica, sensoriamento remoto, aprendizado de máquina e

avanços recentes relacionados ao método SCS-CN. O estudo busca identificar tendências, limitações e potencialidades dessas abordagens, com foco na aplicação ao contexto hidrológico brasileiro..

REFERENCIAL TEÓRICO

A necessidade de estimar vazões em bacias hidrográficas com escassez de dados impulsionou o desenvolvimento de diferentes abordagens de modelagem hidrológica ao longo das últimas décadas. Nesse contexto, a modelagem hidrológica tornou-se uma ferramenta fundamental para representar matematicamente os processos de transformação da precipitação em escoamento superficial e subsuperficial, permitindo simular o comportamento hidrológico de bacias mesmo em condições de monitoramento limitado (TUCCI, 2005). Entre essas abordagens, os modelos chuva–vazão possuem ampla aplicação em estudos de drenagem, previsão de cheias e gestão de recursos hídricos, especialmente em regiões onde séries históricas de vazão são insuficientes ou inexistentes (RAZAVI; COULIBALY, 2016).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com a representação espacial, a base conceitual e a natureza dos parâmetros utilizados. Em relação à representação espacial, os modelos podem ser concentrados, semi-distribuídos ou distribuídos, variando conforme o nível de discretização da bacia hidrográfica. Quanto à base conceitual, distinguem-se modelos empíricos, conceituais e físico-baseados. Os modelos empíricos utilizam relações derivadas de observações experimentais, como ocorre no método SCS-CN, desenvolvido a partir de estudos conduzidos pelo Soil Conservation Service nos Estados Unidos. Já os modelos conceituais representam os processos hidrológicos por meio de reservatórios e fluxos simplificados, mantendo coerência física sem a necessidade de resolver equações diferenciais completas. Entre os principais exemplos estão o HEC-HMS, o HBV, o UBC Watershed Model e o Tank Model. Por sua vez, os modelos físico-baseados utilizam equações diferenciais fundamentadas nos princípios de conservação de massa e energia, como ocorre nos modelos SWAT e MIKE SHE, demandando maior quantidade de dados de entrada e maior esforço de calibração (ARNOLD et al., 2012).

O modelo UBC *Watershed Model*, de caráter semi-distribuído, divide a bacia em zonas altimétricas e utiliza dados de temperatura, precipitação e características do solo para estimar o escoamento superficial e de base. Essa estrutura favorece aplicações em regiões montanhosas ou em áreas com elevada variabilidade topográfica. Outro modelo amplamente utilizado é o HEC-HMS, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, reconhecido pela flexibilidade em integrar diferentes métodos de perdas, como SCS-CN e *Green–Ampt*, além de rotinas de transformação chuva–vazão, como Clark, Snyder e hidrograma unitário (USACE, 2010).

Em bacias pouco monitoradas, os modelos conceituais são frequentemente empregados devido à menor exigência de dados de entrada e ao menor custo computacional quando comparados a modelos físico-baseados. Entretanto, a confiabilidade das simulações depende diretamente da definição adequada dos parâmetros hidrológicos e da capacidade de regionalização entre bacias hidrologicamente semelhantes.

Nesse contexto, o método SCS–CN possui papel relevante na modelagem chuva–vazão por estimar a parcela da precipitação convertida em escoamento superficial. Apesar de sua ampla utilização, estudos recentes apontam limitações relacionadas à representação das perdas iniciais e da saturação do solo, especialmente em eventos extremos. Hawkins et al. (2009) e Mishra et al. (2025) destacam que a formulação tradicional do método tende a apresentar inconsistências na relação entre infiltração, armazenamento e geração de escoamento. Como alternativa, a formulação assintótica do CN passou a incorporar relações dinâmicas entre armazenamento e saturação do solo, reduzindo vieses sistemáticos em eventos de elevada precipitação.

Outra limitação associada ao método SCS-CN refere-se à representação das condições de umidade antecedente (*Antecedent Moisture Condition* – AMC). Tradicionalmente, o método utiliza três classes fixas de umidade (AMC I, II e III), o que nem sempre representa adequadamente a variabilidade temporal da umidade do solo. Estudos recentes propõem abordagens dinâmicas baseadas em balanço hídrico contínuo, curvas de retenção e dados de sensoriamento remoto para atualização contínua do CN, permitindo maior estabilidade dos parâmetros hidrológicos em bacias com monitoramento limitado (BAGLEY et al., 2023; MISHRA et al., 2025).

Além dos avanços relacionados ao SCS-CN, a literatura recente evidencia crescimento no uso de abordagens híbridas que integram modelos conceituais e técnicas de aprendizado de máquina. Essas metodologias buscam reduzir erros estruturais das simulações por meio de redes neurais artificiais, modelos LSTM e técnicas de regionalização apoiadas por inteligência artificial. Estudos de Loukas e Vasiliades (2014), Arsenault et al. (2023) e Budhathoki et al. (2024) demonstram que a combinação entre coerência física e aprendizado de padrões hidrológicos pode aumentar a robustez das simulações em bacias pouco monitoradas.

Nesse cenário, observa-se uma convergência entre modelagem conceitual, regionalização hidrológica, sensoriamento remoto e aprendizado de máquina como estratégia para ampliar a capacidade preditiva de modelos chuva–vazão em regiões com escassez de dados observacionais.

MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica estruturada sobre métodos de simulação de vazões aplicados a bacias pouco monitoradas ou não monitoradas. O levantamento teve como foco estudos relacionados à modelagem chuva–vazão, regionalização de parâmetros, sensoriamento remoto, modelos híbridos e aprimoramentos do método SCS-CN.

A revisão foi conduzida entre setembro e novembro de 2025, considerando publicações a partir de 2014, ano do estudo de Loukas e Vasiliades (2014), adotado como uma das referências centrais deste trabalho. Foram consultadas as bases Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library e Google Scholar, utilizando combinações de termos como ungauged basins, poorly gauged basins, rainfall-runoff modeling, streamflow simulation, HEC-HMS, SCS-CN, regionalization, remote sensing e hybrid models.

Foram priorizados estudos que apresentassem aplicação de modelos hidrológicos em bacias com escassez de dados, uso de calibração regionalizada, integração com dados orbitais ou aplicação de técnicas híbridas. Após a triagem por título, resumo e aderência temática, foram selecionadas 30 publicações para análise. As informações extraídas foram organizadas em planilhas, considerando autor, ano, modelo utilizado, base de dados, estratégia metodológica e principais resultados. Essa sistematização permitiu comparar as abordagens identificadas e discutir suas contribuições para a simulação de vazões em bacias brasileiras com monitoramento limitado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos analisados evidenciam que a simulação de vazões em bacias pouco monitoradas tem avançado principalmente a partir de quatro frentes: regionalização de parâmetros, aprimoramento de modelos conceituais, uso de dados de sensoriamento remoto e integração com técnicas de aprendizado de máquina. Entre os modelos mais recorrentes na literatura estão HEC-HMS, UBC, HBV e SWAT, escolhidos principalmente pela possibilidade de aplicação em diferentes escalas e pela flexibilidade na representação dos processos chuva–vazão.

Loukas e Vasiliades (2014) compararam duas abordagens derivadas do UBC *Watershed Model*: o UBCREG, baseado em regionalização de parâmetros, e o UBCANN, que utiliza redes neurais artificiais para correção de resíduos do modelo determinístico. Conforme apresentado na Tabela 1, o UBCANN apresentou melhor desempenho em relação ao UBCREG, com aumento do NSE médio de 0,53 para 0,72 e redução dos erros de volume e de pico.

Tabela 1 – Comparação entre UBCREG e UBCANN (Loukas & Vasiliades, 2014).

Indicador de desempenho	UBCREG	UBCANN
NSE médio	0,53	0,72
Coeficiente de correlação (R^2)	0,61	0,81
Erro de volume (%DV)	18–30	10–15
Erro de pico (%AMAFE)	25	<15

Esses resultados indicam que modelos híbridos podem contribuir para melhorar a estimativa de vazões em bacias com escassez de dados, desde que existam informações suficientes para treinamento e validação das redes neurais. Estudos recentes, como Budhathoki et al. (2024) e Arsenault et al. (2023), também apontam ganhos de desempenho quando modelos conceituais são combinados com técnicas de aprendizado de máquina.

Outro aspecto relevante identificado na revisão é o aprimoramento do método SCS-CN. Hawkins et al. (2009) e Mishra et al. (2025) destacam limitações da formulação tradicional na representação das perdas iniciais e da saturação do solo. Nesse sentido, a formulação assintótica do CN e a atualização dinâmica das condições de umidade antecedente têm sido propostas como alternativas para reduzir incertezas em bacias pouco monitoradas. No Brasil, Thomaz (2025) demonstrou que a aplicação do CN assintótico, associada à estimativa contínua da umidade do solo, melhora a estabilidade dos parâmetros hidrológicos em bacias semiáridas.

A integração entre sensoriamento remoto e modelagem hidrológica também se mostrou uma tendência importante. Produtos como GPM IMERG, TRMM e CHIRPS têm sido utilizados para suprir limitações de dados pluviométricos, especialmente em regiões semiáridas e montanhosas. Estudos como os de Bao, Wu e Zhang (2022) e Moura, Ferreira e Andrade (2020) indicam que esses dados podem apoiar a modelagem chuva–vazão quando associados a critérios adequados de calibração e regionalização.

De forma geral, os resultados apontam que a combinação entre modelos conceituais, regionalização, sensoriamento remoto e métodos híbridos representa uma das principais tendências para estimativa de vazões em bacias pouco monitoradas. Contudo, a confiabilidade dessas abordagens ainda depende da qualidade dos dados de entrada, da representatividade das bacias doadoras e da coerência física dos parâmetros utilizados.

CONCLUSÃO

A revisão realizada evidenciou que a estimativa de vazões em bacias pouco monitoradas ainda depende da combinação entre diferentes estratégias metodológicas. Modelos conceituais, como HEC-HMS, UBC, HBV e SWAT, permanecem amplamente utilizados, mas sua confiabilidade está diretamente associada à qualidade dos dados de entrada, à definição adequada dos parâmetros e à possibilidade de calibração ou regionalização.

Os estudos analisados indicam que abordagens híbridas, dados de sensoriamento remoto e aperfeiçoamentos do método SCS-Curve Number têm contribuído para reduzir incertezas em ambientes com escassez de dados. Em especial, a formulação assintótica do CN e a atualização das condições de umidade antecedente representam avanços relevantes para melhorar a representação dos processos de infiltração e geração de escoamento superficial.

De forma geral, os resultados apontam que a integração entre coerência física, regionalização hidrológica, produtos orbitais e técnicas de aprendizado de máquina constitui uma tendência promissora para a modelagem hidrológica em bacias brasileiras com monitoramento limitado. Ainda assim, a aplicação dessas abordagens deve considerar as limitações dos dados disponíveis, a representatividade das bacias doadoras e a necessidade de validação sempre que houver informações observadas.

AGRADECIMENTOS

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2023). *Plano Nacional de Recursos Hídricos* 2023–2040. Brasília/DF: ANA.

ARNOLD, J. G. et al. (2012). *"SWAT: Model use, calibration, and validation"*. Transactions of the ASABE, v.55, n.4, pp.1491–1508.

ARSENAULT, R. et al. (2023). *"Deep learning for streamflow prediction in ungauged basins using regional LSTM architectures"*. Journal of Hydrology, v.623, pp.129–142.

BAGLEY, J. E.; KUMAR, S.; PARINUSSA, R.; ZHANG, Y. (2023). *"Soil moisture dynamics and improvements to Curve Number estimation using remote sensing and hydrologic modeling"*. Water Resources Research, v.59, e2023WR033451.

BAO, H.; WU, J.; ZHANG, Q. (2022). *"Performance of HEC-HMS for flood simulation in ungauged basins using remote sensing rainfall data"*. Hydrology Research, v.53, pp.751–764.

BLÖSCHL, G. et al. (2019). *"Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH): a community perspective"*. Hydrological Sciences Journal, v.64, n.10, pp.1141–1158.

BUDHATHOKI, D.; ISHIDAIRA, H.; BASTOLA, S. (2024). *"Multi-model hydrological assessment (HEC-HMS, HBV, SPHY) for partially gauged basins of Nepal"*. Hydrological Sciences Journal, v.69, n.3, pp.345–361.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E. (2009). *"Curve Number Hydrology: State of Practice"*. Journal of Hydrologic Engineering, v.14, n.11, pp.1219–1225.

HRACHOWITZ, M. et al. (2013). *"A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB): a review"*. Hydrological Sciences Journal, v.58, n.6, pp.1198–1255.

KOWALIK, T.; WALEGA, A. (2015). *"Modification of the SCS Curve Number method for small agricultural catchments in Poland"*. Journal of Hydrology and Hydromechanics, v.63, n.2, pp.136–144.

LOUKAS, A.; VASILIADES, L. (2014). *"Streamflow simulation methods for ungauged and poorly gauged watersheds"*. Environmental Modelling & Software, v.59, pp.122–139.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P.; HAWKINS, R. H. et al. (2025). *"Revisiting the SCS Curve Number method: asymptotic behavior, soil moisture dynamics, and new formulations"*. Journal of Hydrology, v.632, pp.130–152.

MOURA, J. P.; FERREIRA, R. A.; ANDRADE, G. F. (2020). *"Aplicação de dados CHIRPS em modelos hidrológicos do semiárido"*. Revista de Meteorologia Aplicada, v.45, n.2, pp.187–199.

RAZAVI, T.; COULIBALY, P. (2016). *"Regionalization in hydrological modeling: a review"*. Progress in Physical Geography, v.40, n.6, pp.738–758.

THOMAZ, R. C. (2025). *Avaliação de metodologias de modelagem hidrológica com aplicação do Curve Number assintótico em bacias semiáridas brasileiras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hídrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG.

TUCCI, C. E. M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. 2.ed. Porto Alegre/RS: Editora UFRGS.

USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*. Davis/CA: Hydrologic Engineering Center.