

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **COMPARAÇÃO ENTRE HEC-HMS E HEC-RAS NA MODELAGEM CHUVA-VAZÃO: DIFERENÇAS NAS RESPOSTAS DOS MODELOS**

*Leonardo de Souza Lisboa<sup>1</sup>; Felipe Ferreira de Souza<sup>2</sup>; Rodolfo Rosendo de Carvalho<sup>3</sup>*

*Joaquim Monteiro Garcez Duarte<sup>4</sup>*

**Abstract:** Hydrologic modeling plays a key role in infrastructure design and flood risk management. Among the widely adopted tools, HEC-HMS is traditionally used for rainfall-runoff transformation, whereas HEC-RAS, originally developed for hydraulic simulations, now includes Rain-on-Grid capabilities that allow direct runoff generation from rainfall inputs. This study presents a comparative assessment of these two models, using the same IDF equation, rainfall abstraction method (SCS Curve Number), and temporal rainfall distribution. Simulations were carried out for multiple return periods to evaluate peak discharges and corresponding critical storm durations. Results show substantial differences between the hydrographs generated by each model: HEC-HMS tends to overestimate flows for frequent events due to its simplified structure, while HEC-RAS, despite being more computationally intensive and sensitive to input parameters such as surface roughness and topography, yields higher peaks in extreme events. Findings highlight the importance of selecting a modeling approach based not only on physical accuracy but also on project goals, data availability, and computational feasibility. This research contributes to the ongoing discussion on the strengths and limitations of hydrologic versus hydrodynamic approaches in rainfall-runoff modeling.

**Resumo:** A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e para a gestão de riscos associados a eventos extremos. Entre os modelos disponíveis, o HEC-HMS é amplamente utilizado na transformação chuva-vazão, enquanto o HEC-RAS, tradicionalmente voltado à análise hidráulica, passou a incorporar capacidades de simulação direta a partir da chuva por meio de sua funcionalidade *Rain-on-Grid*. Este estudo realiza uma comparação sistemática entre os dois modelos, mantendo constantes a equação IDF, a metodologia de determinação da precipitação efetiva (SCS) e a distribuição temporal da chuva. A partir de simulações para diferentes tempos de recorrência, avaliaram-se as vazões máximas e as durações críticas associadas, identificando diferenças nos hidrogramas gerados. Os resultados indicaram que o HEC-HMS apresenta maior tendência à superestimação das vazões para eventos frequentes, enquanto o HEC-RAS gera estimativas mais elevadas em eventos extremos, diferenças explicadas principalmente pelo método de propagação do escoamento durante a simulação. As análises sugerem que a escolha do modelo deve considerar não apenas a fidelidade física, mas também os objetivos do estudo, o tempo de processamento e as incertezas envolvidas. O trabalho contribui para a discussão sobre a aplicabilidade e as limitações de cada abordagem na modelagem chuva-vazão.

**Palavras-Chave** – Modelagem hidrológica, Transformação chuva-vazão, HEC-HMS e HEC-RAS.

1) Afiliação: Engenheiro de Recursos Hídricos na G5 Engenharia, rua Nunes Machado nº 68, Curitiba, (14) 98172-9917, lsl@g5engenharia.com.br

2) Afiliação: Engenheiro de Recursos Hídricos na G5 Engenharia, rua Nunes Machado nº 68, Curitiba, (41) 8750-7857, ffs@g5engenharia.com.br

3) Afiliação: Coordenador de Recursos Hídricos na G5 Engenharia, rua Nunes machado nº68, Curitiba, (41) 99925-2649, rrc@g5engenharia.com.br

4) Afiliação: Diretor Técnico da G5 Engenharia, rua Nunes machado nº68, Curitiba, (41) 3402-1707, jd@g5engenharia.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

A análise de frequência das vazões máximas em bacias hidrográficas constitui uma base essencial para o planejamento territorial, prevenção de desastres e dimensionamento de obras hidráulicas (PANTHI *et al.*, 2021). No Brasil, entretanto, a carência de séries fluviométricas completas, especialmente em regiões remotas, compromete a confiabilidade das estimativas (PEREIRA *et al.*, 2022; ANA, 2024). Tal limitação é agravada pela diversidade climática e pelas alterações antrópicas no uso do solo, que afetam diretamente a resposta hidrológica das bacias.

Frente à indisponibilidade de dados observados, metodologias indiretas como a regionalização de vazões ou a aplicação de modelos chuva-vazão tornam-se alternativas viáveis (KARKI *et al.*, 2023; FERREIRA *et al.*, 2021). Nesse contexto, destacam-se os modelos desenvolvidos pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do Corpo de Engenheiros dos EUA, especialmente o HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) e o HEC-RAS (River Analysis System), ambos amplamente utilizados na engenharia de recursos hídricos.

O HEC-HMS é consolidado como principal ferramenta de simulação hidrológica, com estrutura modular e grande flexibilidade na escolha de métodos de perdas, transformação, propagação e baseflow (BABU; KUMAR, 2024; YU; ZHANG, 2023). Já o HEC-RAS, tradicionalmente voltado à modelagem hidráulica, passou a incorporar, nas versões mais recentes, o módulo Rain-on-Grid, que permite simular a geração de escoamento superficial a partir da chuva, integrando em um único ambiente computacional as etapas hidrológicas e hidráulicas (SMITH *et al.*, 2024; JOHNSON; LEE, 2022).

Ainda que ambos os programas sejam amplamente empregados, os estudos comparativos focados na etapa de transformação chuva-vazão ainda são limitados. A possibilidade de integrar a geração e a propagação do escoamento no HEC-RAS representa um avanço, mas também levanta questionamentos sobre sua sensibilidade à rugosidade do terreno. Além disso, a resolução e a precisão altimétrica do modelo digital do terreno (MDT) utilizado também afeta os resultados obtidos.

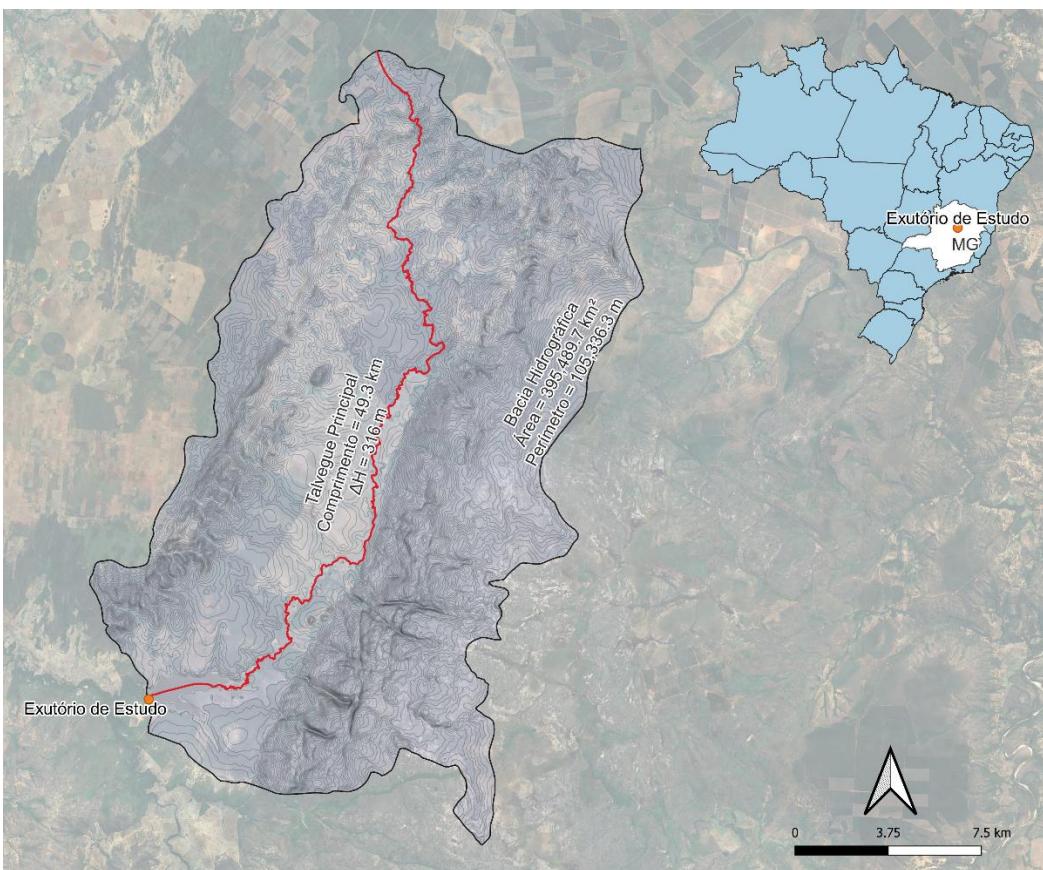
Em continuidade aos esforços de comparação de métodos para estimar vazões máximas, como nos trabalhos de Lisboa *et al.* (2025) e Pukan e Lasminto (2020), este estudo concentra-se na análise das respostas hidrológicas produzidas por cada modelo, utilizando a mesma equação IDF, método SCS para determinação da precipitação efetiva e distribuição temporal da chuva (HUFF, 1990). Ao comparar os hidrogramas gerados por cada abordagem, busca-se identificar diferenças metodológicas

relevantes, avaliar a sensibilidade dos modelos a parâmetros de entrada e discutir suas possíveis aplicações preferenciais.

## 2. METODOLOGIA

A área de estudo deste trabalho corresponde à bacia hidrográfica do ribeirão do Caatinga, localizada no município de Bocaiúva, na região norte do estado de Minas Gerais, conforme ilustrado na Figura 1. Com uma área de drenagem de aproximadamente 395,5 km<sup>2</sup>, a bacia está inserida em uma zona de transição climática entre os tipos Cwa (clima subtropical com inverno seco) e Aw (clima tropical com estação seca no inverno), segundo a classificação climática de Köppen (GEIGER, 1954).

Figura 1 – Bacia hidrográfica Ribeirão Caatinga



Fonte: Lisboa *et al.* (2025)

A partir da caracterização dessa bacia, foram desenvolvidas simulações hidrológicas com os programas HEC-HMS e HEC-RAS, com o objetivo de avaliar e comparar o comportamento dos hidrogramas gerados por cada modelo. Ambos os softwares, desenvolvidos pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE), são amplamente utilizados em estudos hidrológicos e hidráulicos, mas se diferenciam quanto ao enfoque

e ao nível de detalhamento. O HEC-HMS foi projetado para simular os processos de precipitação-vazão em sistemas de bacias hidrográficas, oferecendo modelos matemáticos para representar precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial, vazão de base e propagação de fluxo em canais abertos. Já o HEC-RAS, tradicionalmente voltado à modelagem hidráulica de rios, permite simulações de escoamentos 1D e 2D, tanto em regime permanente quanto não-permanente, e inclui funcionalidades de transporte de sedimentos e qualidade da água.

Neste estudo, o foco recai sobre a etapa de transformação da chuva em vazão, comparando-se especificamente o método do Hidrograma Unitário do *Soil Conservation Service* (SCS), utilizado no HEC-HMS, e a Aproximação de Onda Difusiva (*Diffusion Wave Approximation*), aplicada no HEC-RAS. Enquanto o método SCS é uma abordagem hidrológica direta que transforma a chuva efetiva em hidrogramas de escoamento com base em parâmetros como o *Curve Number* e o tempo de concentração, a *Diffusion Wave* é uma simplificação das Equações de Águas Rasas (*Shallow Water Equations*), formulação hidráulica que utiliza termos fonte, tal qual a chuva excedente (após perdas por infiltração), como condição de contorno de entrada e resolve a propagação do escoamento sobre a superfície da bacia hidrográfica.

Ambos os modelos adotaram, neste trabalho, os mesmos parâmetros de entrada: a equação IDF proposta por Lisboa *et al.* (2025), o método SCS para determinação da chuva efetiva e a distribuição temporal baseada na proposta de Huff (1990). Essa uniformidade metodológica assegura condições comparáveis para a análise dos hidrogramas gerados por cada software.

## 2.1. HEC-HMS

O método do Hidrograma Unitário SCS é um modelo paramétrico implementado no HEC-HMS. Ele foi desenvolvido com base em médias de Hidrogramas Unitários derivados de dados de chuva e escoamento observados em um grande número de pequenas bacias agrícolas em todo o território dos EUA. A descrição detalhada desse método pode ser encontrada em publicações como o *SCS Technical Report 55* (1986) e o *National Engineering Handbook* (1971).

A estimativa do hidrograma é construído com base na premissa de que assumir que precipitações efetivas maiores ou menores que a unidade resultam em hidrogramas múltiplos lineares do hidrograma unitário. Além disso, os volumes precipitados efetivos são uniformes em toda a bacia hidrográfica e constantes em um determinado intervalo de tempo.

A partir de observações do comportamento das bacias hidrográficas dos EUA, o *Soil Conservation Service* obteve a Equação 1, que relaciona a vazão de pico ( $Q_p$ ), em  $\text{m}^3/\text{s}$ , do hidrograma unitário com tempo de pico ( $t_p$ ), em horas, e a área da bacia hidrográfica ( $A$ ), em  $\text{km}^2$ .

$$Q_p = 2,08 \cdot A / t_p \quad (1)$$

Onde o tempo de pico é o resultado da soma de 50% do tempo de duração da precipitação e o *Lag Time* da bacia hidrográfica, adotado igual a 60% do tempo de concentração conforme sugere a própria metodologia do Hidrograma Unitário SCS (CHOW, 1964). A acumulação de diversos hidrogramas unitários consecutivos multiplicados pela precipitação efetiva em cada intervalo de tempo gera o hidrograma resultante do evento. Verifica-se, desta forma, que o modelo depende essencialmente de quatro fatores: tempo de concentração, área da bacia, precipitação efetiva, calculada a partir do Curve Number e do método de distribuição temporal da chuva. Outras variáveis, como o formato da bacia, as declividades dos canais de drenagem e a propagação do escoamento estão incorporadas no coeficiente constante que acompanha a Equação 1, ou seja, não causam impacto no resultado obtido.

Neste trabalho, obteve-se o tempo de concentração ( $t_c$ ), em minutos, da bacia hidrográfica utilizando a consagrada equação de Kirpich Modificada (DNIT, 2018), conforme apresenta-se na Equação 2.

$$t_c = 85,2 \cdot (L^3 / \Delta h)^{0,385} \quad (2)$$

Onde  $L$  representa o comprimento do talvegue principal, em km, e  $\Delta h$  o seu desnível, em metros.

## 2.2. HEC-RAS

O HEC-RAS, originalmente voltado à modelagem hidráulica unidimensional, passou a incorporar capacidades de simulação com malha celular bidimensional (2D) não permanente, permitindo uma abordagem espacialmente distribuída da propagação do escoamento superficial. No contexto de eventos pluviais, o HEC-RAS 2D pode simular diretamente a transformação da chuva em escoamento, considerando a precipitação efetiva como entrada para as equações governantes da dinâmica do fluxo.

A transformação chuva-vazão no HEC-RAS 2D foi feita pela resolução das equações de Saint-Venant simplificadas pela *Diffusion Wave Approximation*. A formulação geral para o escoamento superficial bidimensional considera o expresso na Equação 3.

$$\frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} - \sum \alpha \nabla H \cdot n + Q = 0 \quad (3)$$

Onde  $V$  é o volume na célula, em  $\text{m}^3$ ;  $\Delta t$  é o intervalo de tempo, em segundos;  $\alpha$  é um fator que relaciona parâmetros geométricos de cada face da célula com a rugosidade definida pelo coeficiente

de Manning-Strickler e o gradiente de nível de água;  $\nabla H \cdot n$  é o gradiente do nível de água na direção de união dos centroides de células adjacentes; e  $Q$  representa termos fonte e sumidouro na célula, que, para este estudo, equivale ao acréscimo de vazão pela chuva.

Como a solução envolve a representação espacial contínua da topografia da bacia, verifica-se que o formato da bacia hidrográfica, as declividades intermediárias dos talvegues e de áreas adjacentes, a sinuosidade dos corpos hídricos e a propagação e amortecimento das ondas de cheia são simulados pelo modelo computacional. Com isso, o HEC-RAS tende a representar de forma mais assertiva os efeitos topográficos e a propagação do escoamento, enquanto o HEC-HMS adota simplificações conceituais que favorecem agilidade computacional e clareza na parametrização. Entretanto, ainda assim a metodologia não é totalmente precisa, sendo necessário boa representação da topobatimetria da bacia hidrográfica e a estimativa da rugosidade do solo para a região, além de exigir maior custo computacional e tempo de execução.

Neste trabalho, considerou-se os coeficientes de Manning-Strickler médios referenciados pelo manual técnico do HEC-RAS, com utilização do mapa de uso e ocupação do solo disponibilizado pela iniciativa mapBiomas, e a topografia do Modelo Digital do Terreno ANADEM, com resoluções espacial de 30 m e altimétrica de 5 a 15 m, a depender da densidade de cobertura vegetal.

A malha quadrada bidimensional base foi obtida através de uma análise de sensibilidade entre elementos de 200 m, 100 m e 50 m de largura, avaliando-se a alteração no comportamento do hidrograma de saída do modelo computacional. A malha de 100 m apresentou resultados com diferenças menores que 1% em relação a malha de 50 m, valor considerado aceitável para a análise proposta. Desse modo, para a bacia hidrográfica de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>, obteve-se uma malha computacional de aproximadamente 40.000 elementos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram conduzidas para diferentes tempos de recorrência (TR), com variações nas durações das chuvas. Os resultados obtidos por meio das simulações nos modelos HEC-HMS e HEC-RAS revelam diferenças tanto nas vazões máximas estimadas quanto nas durações críticas associadas a cada tempo de recorrência (TR).

Nota-se que o HEC-HMS forneceu valores sistematicamente mais elevados de vazão máxima para os eventos de menor magnitude (TR entre 2 e 100 anos). Para o TR de 2 anos, o modelo hidrológico indicou uma vazão de pico de 379 m<sup>3</sup>/s, praticamente o dobro da estimada pelo HEC-

RAS ( $185 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Essa diferença, com redução relativa, se mantém até o TR de 100 anos, podendo ser visualizada na Tabela 1, com os valores de vazão de pico obtidos para cada TR nos dois modelos.

Tabela 1 – Vazões de pico obtidas no HEC-HMS e no HEC-RAS em cada tempo de recorrência

| TR<br>(anos) | HEC-HMS                                   |                          | HEC-RAS                                   |                          |
|--------------|---|--------------------------|---|--------------------------|
|              | Vazão Máxima<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | Duração Crítica<br>(min) | Vazão Máxima<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | Duração Crítica<br>(min) |
| 2            | 379                                       | 3.600                    | 185                                       | 13.920                   |
| 5            | 456                                       | 3.360                    | 247                                       | 12.000                   |
| 10           | 522                                       | 3.120                    | 305                                       | 9.600                    |
| 25           | 621                                       | 3.120                    | 403                                       | 7.680                    |
| 50           | 706                                       | 2.880                    | 500                                       | 6.720                    |
| 100          | 800                                       | 2.760                    | 612                                       | 6.480                    |
| 1.000        | 1.189                                     | 2.400                    | 1.122                                     | 3.600                    |
| 10.000       | 1.718                                     | 2.160                    | 1.986                                     | 3.120                    |

Contudo, para os eventos mais extremos (TR de 1.000 e 10.000 anos), o comportamento se inverte: o HEC-RAS passa a gerar vazões superiores às do HEC-HMS. Para TR de 10.000 anos, o HEC-RAS alcança  $1.986 \text{ m}^3/\text{s}$ , enquanto o HEC-HMS apresenta  $1.718 \text{ m}^3/\text{s}$ . Essa inversão pode estar relacionada ao maior detalhamento espacial, à consideração do formato da bacia hidrográfica e, principalmente, ao tipo de propagação cinemática do HEC-RAS, que se torna mais sensível à intensidade e à duração do evento em cenários extremos.

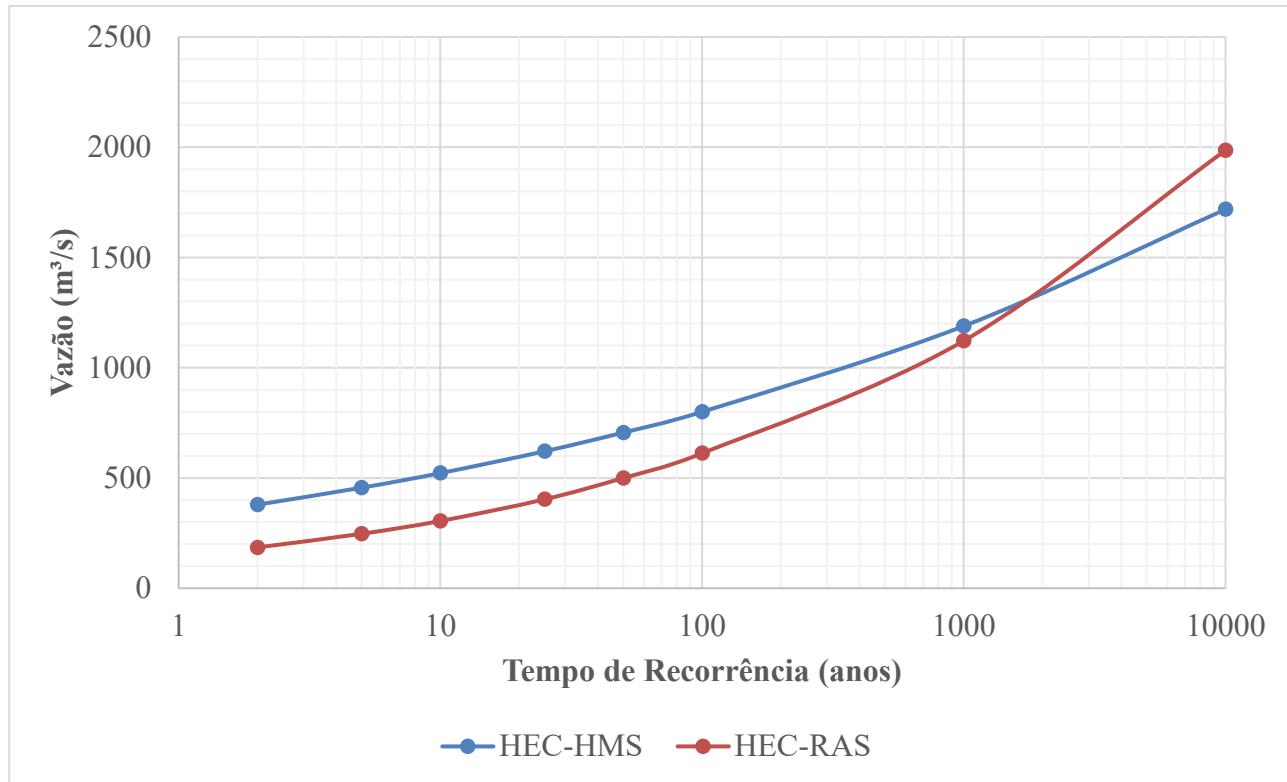
Outro ponto importante é a variação da duração crítica da chuva. Enquanto no HEC-HMS os valores variam de forma mais contida, de 3600 min (TR 2 anos) para 2160 min (TR 10000 anos), o HEC-RAS apresenta variações muito mais acentuadas, partindo de 13920 min para TR 2 e chegando a 3120 min para TR 10.000. Isso indica que o HEC-RAS é capaz de ajustar o tempo crítico de resposta da bacia com maior sensibilidade à intensidade do evento, o que reforça sua robustez na simulação da dinâmica hidrológica complexa.

O HEC-HMS apresenta uma curva suavemente crescente, refletindo sua lógica mais simplificada e dependente da equação IDF. Já o HEC-RAS apresenta uma tendência semelhante à de uma curva potência, a destacar seu comportamento crescente a partir da TR 100, que ultrapassa os valores do HMS, mas apenas nos eventos mais extremos.

Essa inflexão pode estar associada ao maior realismo físico da propagação bidimensional e à incorporação de aspectos como morfologia da bacia, gradientes de escoamento e propagação da onda de cheia, que o HEC-HMS trata de forma parametrizada ou simplificada. A influência do coeficiente de Manning-Strickler também contribui para esse comportamento mais dinâmico, ainda que introduza

um grau de incerteza na simulação. A curva de tendência apresentada no gráfico da Figura 2, evidencia o comportamento divergente entre os modelos conforme o tempo de recorrência aumenta.

Figura 2 – Vazões de pico para cada tempo de retorno obtidas no HEC-HMS e no HEC-RAS



Apesar da base comum, o tempo de processamento e a natureza das parametrizações divergem substancialmente entre os programas. O HEC-HMS concluiu todas as simulações em menos de 24 horas, enquanto o HEC-RAS, com sua malha bidimensional e maior complexidade de cálculo, demandou aproximadamente uma semana para executar as mesmas simulações. Esse fator de tempo computacional pode ser determinante para o projetista, especialmente em estudos exploratórios ou que envolvam múltiplas bacias hidrográficas.

Outro ponto de distinção é a forma como cada programa trata os parâmetros hidrológicos. Enquanto o HEC-HMS permite inserir apenas um valor ponderado de Curve Number (CN) para toda a bacia, salvo a subdivisão em sub-bacias, o HEC-RAS possibilita a inserção de múltiplos valores de CN distribuídos espacialmente, compatíveis com o mapa de uso e ocupação do solo. Essa flexibilidade aumenta o potencial de realismo da simulação no HEC-RAS, desde que os dados de entrada, como topografia e cobertura do solo, sejam confiáveis e adequadamente processados.

Adicionalmente, o modelo do HEC-HMS apresenta diversas simplificações estruturais: a transformação chuva-vazão pelo hidrograma unitário SCS depende de poucos parâmetros (área da

bacia, CN e Lag Time), e o tempo de concentração é obtido por equações empíricas. Já o HEC-RAS internaliza o tempo de concentração de forma dinâmica, como resultado das interações hidráulicas entre as células, sendo sensível à intensidade do evento, à duração da chuva e à topografia da bacia.

#### 4. CONCLUSÃO

A comparação entre o HEC-HMS e o HEC-RAS mostrou que, mesmo com entradas padronizadas, como a equação IDF, método SCS para estimativa da chuva excedente e distribuição temporal da chuva, os modelos geraram hidrogramas distintos. O HEC-HMS, com abordagem mais simplificada, apresentou vazões de pico maiores em eventos frequentes, sendo mais conservador para fins de projeto. Já o HEC-RAS, por incorporar maior detalhamento espacial e hidráulico, respondeu de forma mais sensível às características da bacia, especialmente em eventos extremos.

Apesar da robustez, o HEC-RAS exige maior esforço computacional, dados mais refinados, e maior disponibilidade de tempo de execução, o que pode limitar seu uso. A escolha entre os modelos deve considerar o objetivo do estudo, o nível de detalhe necessário e a disponibilidade de dados. Estudos futuros podem explorar a calibração dos parâmetros hidráulicos e a integração entre as ferramentas para maior precisão nas simulações.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à G5 Engenharia pelo respaldo técnico e institucional oferecido durante o desenvolvimento deste estudo, bem como pelo incentivo a publicação e à participação em eventos técnicos e acadêmicos.

#### REFERÊNCIAS

- CHOW, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology: A Compendium of Water-Resources Technology*. McGraw-Hill.
- CRUZ, C. B. M.; CASTRO, M. B. O.; NASCIMENTO, C. A. (2022). “Avaliação da aplicação do modelo HEC-HMS na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Cascavel/PR” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2022, 1.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). (2018). *Manual de Obras de Arte Especiais – Volume I: Drenagem*. Brasília: DNIT.

DERDOUR, A.; BOUANANI, A. (2019). “Integration of HEC-HMS and HEC-RAS models for simulating flash floods in semi-arid watershed: Case of Rhumel River (Northeast of Algeria)”. *Journal of Water and Land Development*, v. 40, n. 1, pp. 57–64.

ELLITHY, K. M.; KAMEL, M. A.; EL-GENEDY, M. (2022). “Application of HEC-RAS 2D rain-on-grid model for simulating flooding in an urban watershed”. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 13, n. 2, 101641.

GEORGE, R.; JOSEPH, A.; P., R. K. (2022). “Application of Hydrologic Engineering Centers Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) Model for Modelling Flood in Sub Basin of Meenachil River, Kerala, India”. *International Journal of Environment and Climate Change*, v. 12, n. 12, pp. 1251–1262. DOI: 10.9734/ijecc/2022/v12i121564.

JOHNSON, M.; LEE, K. (2022). “A balanced watershed decomposition method for rain-on-grid simulations in HEC-RAS”. *Journal of Hydroinformatics*, v. 24, n. 3, pp. 210–225.

LISBOA *et al.* (2025). “Análise comaprativa de métodos para estimativas de vazões de pico em bacias não monitoradas” in Anais do 33º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Brasília, 2025.

REDDIT – r/HECRAS. (2025). Comparisons between Rain-on-Grid and HMS. Discussão técnica em fórum especializado.

SHRUTHI, H. B.; KUMAR, D. S. (2024). “Application of the HEC-HMS model to generate a flood hydrograph of an extreme event in a tropical basin”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1326, n. 1, 012145.

SMITH, J.; BROWN, A.; WILLIAMS, R. (2024). “Runoff Hydrograph Analysis of HEC-RAS 2D Flow Hydrodynamics Meteorological Rain-on-Grid on Observed Watershed: A Case Study of Wiroko Sub-Watershed”. *International Journal of Hydrology*, v. 18, n. 1, pp. 45–59.

UNITED STATES. Army Corps of Engineers. (2025). *HEC-HMS Technical Reference Manual*. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 427 p.

UNITED STATES. Army Corps of Engineers. (2025). *Hydraulic Reference Manual: HEC-RAS, River Analysis System*. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 482 p.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). (2020). *HEC-RAS 2D Modeling Best Practices*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 176 p.

YILMAZ, D.; AKSOY, H.; UZAL, H. (2023). “Effect of DEM resolution on 2D flood modelling using HEC-RAS Rain-on-Grid: Göksu River case study”. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 48, 101455.

YU, X.; ZHANG, J. (2023). “The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Flood Simulation under the Condition of River Basin Urbanization”. *Water*, v. 15, n. 12, 2249.