1070 – ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PICO EM BACIAS NÃO MONITORADAS

Leonardo de Souza Lisboa[(1)]
Engenheiro Civil (UNESP) e mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR). Foi pesquisador e engenheiro civil no Instituto de Tecnológico de Transporte e Infraestrutura (ITTI/UFPR) e Universidade Livre do Meio Ambiente (UNILIVRE). Atualmente atua como Engenheiro Civil de Recursos Hídricos na G5 Engenharia.
Felipe Ferreira de Souza [(2)]
Engenheiro Civil (UFPR). Foi pesquisador no Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza (CEHPAR) e atua como Engenheiro Civil de Recursos Hídricos na G5 Engenharia.
Rodolfo Rosendo de Carvalho [(3)]
Engenheira Civil (UFPR) e mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR). Atua como Engenheiro Civil de Rescursos Hídricos na G5 Engenharia,
Giovanni Carvalho Marquesi [(4)]
Engenheiro Civil (UFPR). Atua como Diretor Executivo na G5 Engenharia.
Philipe Ratton [(5)]
Engenheiro Civil (UFPR), mestre e doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR). Atua como Coordenador Executivo no Instituto de Tecnológico de Transporte e Infraestrutura (ITTI/UFPR) e Universidade Livre do Meio Ambiente (UNILIVRE).

Endereço[(1)]**:** Avenida do Batel, 1330, Batel - Curitiba (PR) - 80420-090 - Brasil - Tel: +55 (14) 9172-9917 - e-mail: lsl@g5engenharia.com.br

RESUMO

A estimativa de vazões máximas é uma etapa necessária para o dimensionamento de obras hidráulicas, gestão de recursos hídricos e até no planejamento de ações de controle de cheias. Para bacias hidrográficas sem monitoramento hidrológico com medições diretas, torna-se essencial o uso de métodos indiretos que permitam a obtenção desses valores de forma confiável e tecnicamente fundamentada. Este estudo teve como objetivo estimar as vazões de pico associadas a diferentes tempos de recorrência (TR) na bacia do ribeirão Caatinga localizada no município de Bocaiúva (MG), a qual não possui monitoramento hidrológico. A metodologia adotada envolveu a aplicação do método SCS, que transforma chuva em vazão, utilizando chuvas geradas a partir de curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) regionalizadas. Paralelamente, foi realizada a regionalização de vazões máximas pela área de drenagem a partir de dados fluviométricos e pelo método dos parâmetros específicos, considerando as variáveis altitude e área de drenagem. Os resultados forneceram as equações IDF atualizadas para as estações pluviométricas selecionadas e a equação IDF representativa da área de estudo. Observou-se que, com o aumento do TR, as chuvas críticas tenderam a ocorrer em durações menores, concentrando os picos de vazão. A comparação entre os métodos de estimativa demonstrou coerência geral, com variações de até 30% nas vazões obtidas. O método dos parâmetros com área de drenagem apresentou, em geral, os maiores valores, enquanto o método dos parâmetros com área de drenagem e altitude resultou nas menores estimativas para a maioria dos tempos de retorno. Conclui-se que a aplicação de diferentes métodos é fundamental para fornecer subsídios técnicos à tomada de decisão em regiões sem monitoramento hidrológico. Recomenda-se a ampliação das redes de estações pluviométricas e fluviométricas, bem como o aprimoramento dos modelos com a incorporação de novas variáveis, visando à redução das incertezas nas estimativas hidrológicas.

PALAVRAS-CHAVE: Regionalização de vazões, Hidrograma unitário SCS, Estimativa de vazões máximas, Bacias hidrográficas não monitoradas, Análise hidrológica.

INTRODUÇÃO

A análise de frequência das vazões máximas em bacias hidrográficas integra o conjunto de informações utilizadas na gestão dos recursos hídricos, devendo ser considerada no planejamento territorial e nas estratégias de prevenção de desastres associados a eventos hidrológicos extremos (PANTHI et al., 2021). Esse dado constitui uma base técnica para o dimensionamento de obras de infraestrutura, como pontes, barragens e canais, além de subsidiar a delimitação de áreas suscetíveis a inundações e a elaboração de planos de contingência. Em regiões onde assentamentos urbanos estão localizados próximos a corpos hídricos, a determinação de vazões máximas e seus respectivos tempos de recorrência apresenta relevância direta para a segurança das populações e para a mitigação de impactos ambientais e socioeconômicos (BRUBACHER et al., 2020).

Entretanto, a ausência de estações fluviométricas em muitas bacias hidrográficas ou a existência de séries temporais incompletas e com falhas comprometem a obtenção de estimativas diretas e confiáveis das vazões (PEREIRA et al., 2022). Essa limitação se agrava ainda mais quando se consideram as dimensões continentais do Brasil e a diversidade de seus biomas, que resultam em uma disponibilidade hídrica heterogênea e de difícil monitoramento. Mesmo com os esforços para ampliação da rede de estações de medição de chuvas e vazões, é inevitável que persistam áreas não alcançadas por esse acompanhamento, sobretudo em regiões remotas. Além disso, a variabilidade das vazões nos rios nem sempre acompanha diretamente o comportamento das chuvas, uma vez que fatores como a operação de reservatórios, a presença de açudes e as alterações no uso e ocupação do solo exercem influência sobre o regime hidrológico. Esses aspectos intensificam a dificuldade de obter estimativas precisas de vazão, comprometendo a eficácia das análises hidrológicas e a gestão dos recursos hídricos no país (ANA, 2024).

Desta forma, torna-se imprescindível a adoção de técnicas de regionalização de vazões, que possibilitam a estimativa indireta em bacias não monitoradas ou parcialmente monitoradas a partir de informações disponíveis em áreas com dados observados. Entre os métodos mais utilizados, destacam-se duas categorias principais: os baseados em regressão e os fundamentados em bacias doadoras (KARKI et al., 2023). A primeira categoria estabelece relações estatísticas entre atributos físicos e climáticos das bacias e os parâmetros hidrológicos, com destaque para a regressão linear múltipla (MLR), amplamente utilizada em diferentes contextos geográficos (SONG et al., 2019). Devido à complexidade e à não linearidade dessas relações, estudos mais recentes têm incorporado algoritmos de aprendizado de máquina, visando maior precisão na estimativa das vazões (BAEZ-VILLANUEVA et al., 2021).

No Brasil, a regionalização por regressão múltipla é amplamente aplicada com base na metodologia desenvolvida pelo *Natural Environment Research Council* (NERC, 1975) e adaptada pela ELETROBRÁS (1985), que consiste na delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas e na correlação das vazões com variáveis fisiográficas e climáticas das bacias (FERREIRA et al., 2021). A segunda categoria envolve os métodos do tipo bacias doadoras, embora com diferentes nomenclaturas, também encontram aplicação nacional, sendo utilizados para transferir informações entre bacias vizinhas por meio de parâmetros como área de drenagem ou posição na rede hidrográfica, reforçando a similaridade conceitual entre as abordagens adotadas no Brasil e em outros países (ROCHA et al., 2024).

Considerando as limitações impostas pela ausência ou fragilidade de dados fluviométricos, os métodos de regionalização assumem um papel estratégico na superação dessas lacunas. No entanto, por se tratar de abordagens indiretas e dependentes de premissas estatísticas ou espaciais, é imprescindível que os resultados sejam avaliados quanto à coerência e à aplicabilidade nas condições específicas de cada bacia. A multiplicidade de metodologias disponíveis reforça a necessidade de análises críticas que considerem as incertezas envolvidas, bem como os padrões de convergência entre diferentes estimativas. Esse exercício analítico fortalece a confiança nas informações produzidas e apoia decisões mais seguras em contextos de monitoramento limitado, sobretudo quando sustentado pela aplicação de múltiplas metodologias e pela utilização de indicadores estatísticos que permitam aferir a consistência dos resultados obtidos.

OBJETIVOS

Comparar diferentes técnicas de regionalização de vazões aplicadas ao exutório do ribeirão Caatinga, localizado no município de Bocaiúva, estado de Minas Gerais, desprovido de dados fluviométricos e pluviométricos nas proximidades de sua bacia hidrográfica, utilizando o método do hidrograma unitário SCS, a transferência por área de drenagem e o método dos parâmetros.

METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido aplicando as metodologias descritas a seguir nabacia hidrográfica do ribeirão do Caatinga, no município de Bocaiúva, região norte do estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Figura 1.. A bacia possui uma área de drenagem de 395,5 km² e está inserida em uma zona de transição climática entre os tipos Cwa e Aw, de acordo com a classificação de Köppen (GEIGER, 1954).

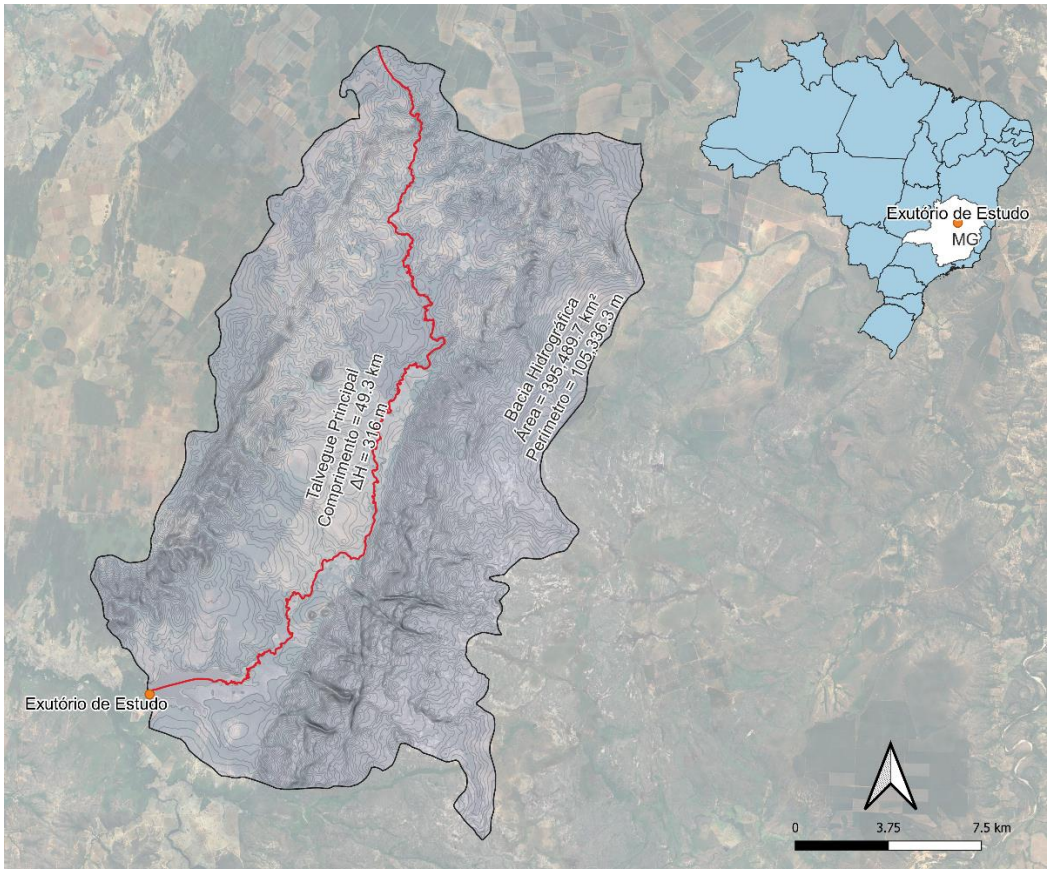

Figura 1: Bacia Hidrográfica do ribeirão Caatinga.

A fim de estimar as vazões máximas associadas a diferentes tempos de recorrência na bacia hidrográfica em estudo, foram adotadas três abordagens metodológicas complementares, selecionadas com base nas características físicas da área e na disponibilidade de dados hidrológicos e pluviométricos. As metodologias aplicadas incluem o método do Hidrograma Unitário do Serviço de Conservação do Solo (SCS) e regionalização de vazões por dois métodos: transferência por área de drenagem e pelo Método dos Parâmetros.

MÉTODO SCS

A bacia hidrográfica do ribeirão Caatinga não possui estações pluviométricas em sua extensão. Dessa forma, a estimativa da intensidade de precipitação na região foi realizada a partir da regionalização das equações de intensidade-duração-frequência (IDF) de seis estações pluviométricas localizadas no entorno da bacia. As informações dessas estações foram obtidas na plataforma HidroWeb, da Agência Nacional de Águas e

Saneamento Básico (ANA), sendo consideradas as estações mais próximas e com séries históricas consistentes. A seleção levou em conta a distância em relação ao centro geométrico da bacia e a qualidade dos dados disponíveis, conforme apresentado na Figura 2.

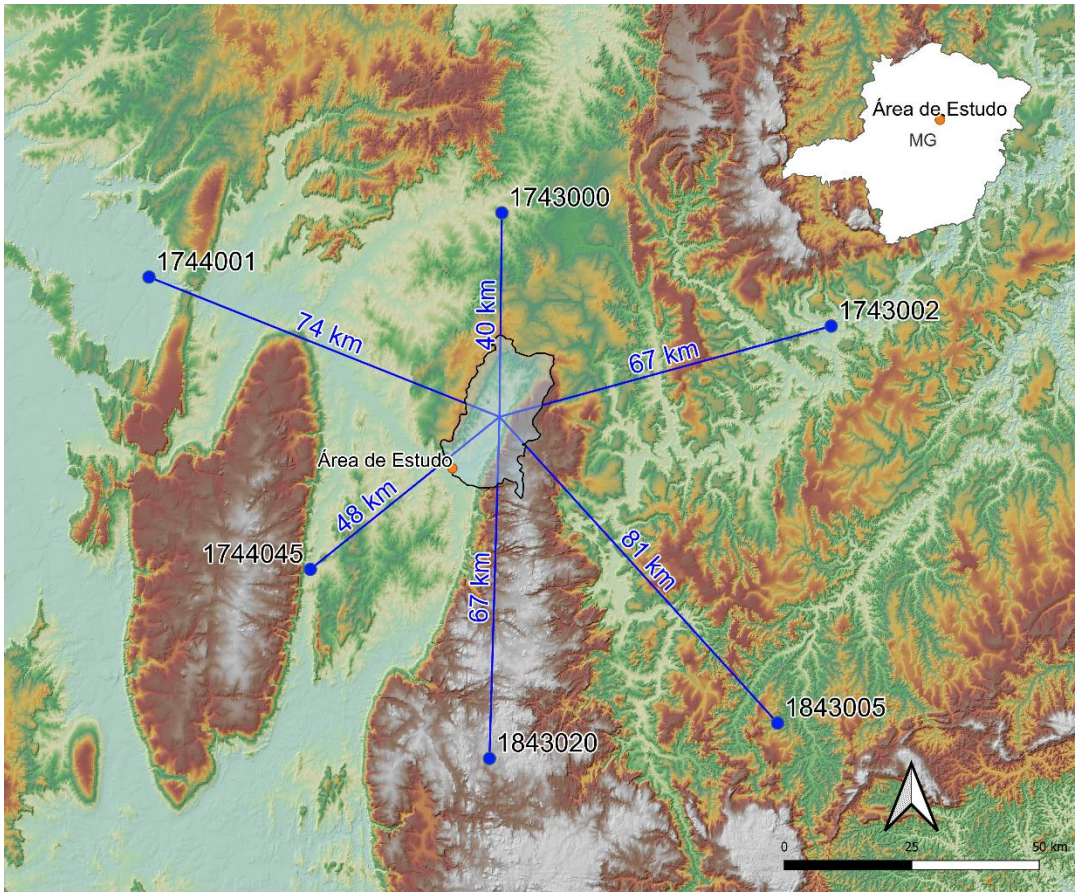

Figura 2: Estações pluviométricas selecionadas.

A caracterização do regime de chuvas extremas foi realizada com base nas séries de totais diários máximos anuais das estações selecionadas, considerando-se o ano hidrológico como o período de outubro a setembro, e desconsiderando da análise anos com falhas nos dados durante o período chuvoso (outubro a abril). As séries geradas permitiram a avaliação estatística por meio de diferentes distribuições teóricas de frequência de cheias, tais como Exponencial, Gumbel, LogNormal, Pearson III e LogPearson III, escolhendo a distribuição mais representativa para cada estação por meio dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, ambos com nível de significância de 5%. Na Tabela XX é apresentado o período dos dados utilizados nas estações pluviométricas selecionadas, a quantidade total de anos hidrológicos, desconsiderando os com falhas, e a distribuição estatística selecionada para cada estação.

Tabela 1: Informações das estações pluviométricas e distruibuição estatística adotada.

Código	Estação	Período dos dados	Anos	Distribuição selecionada
1743000	Bocaiúva	1941 a 1999	29	Gumbel
1744001	Jequitaí	1964 a 1995	28	Exponencial
1744045	Joaquim Felício	2004 a 2023	20	Gumbel
1843020	São João da Chapada	2004 a 2023	20	Gumbel
1843005	Felisberto Caldeira	1947 a 1965	19	Gumbel
1743002	Vila Terra Branca - Jusante	1999 a 2023	25	Exponencial

Em razão do tempo de concentração da bacia ser de aproximadamente 14 h, para determinação da duração da chuva crítica foi também necessário avaliar as distribuições de totais máximos acumulados de 2, 3 e 4 dias, com as respectivas distribuições estatísticas ajustadas a cada intervalo de acumulação, permitindo a estimativa das precipitações associadas a tempos de recorrência que variam de 2 a 10.000 anos.

Para transformar as precipitações diárias em valores subdiários, necessários para a modelagem hidrológica, foi adotada a metodologia de desagregação de Taborga (1974), que propõe coeficientes de desagregação dependentes do tempo de retorno e das características físico-climáticas da região, organizadas em isozonas. A área de estudo está localizada em uma zona de transição entre as isozonas B, C e D. Com base nessa classificação, foram atribuídos coeficientes de desagregação às estações pluviométricas, considerando inclusive a extrapolação por regressão logarítmica para tempos de retorno não originalmente contemplados por Taborga, como 2, 200 e 500 anos. Além disso, foi adotado um coeficiente adicional de desagregação diária (1d/24h = 1,14), conforme recomendado pela CETESB (1980), com o objetivo de majorar as alturas de chuva devido à defasagem dos horários convencionais de medição.

A partir das precipitações subdiárias obtidas, foram calculadas as intensidades associadas a diferentes durações e tempos de retorno, permitindo o ajuste das equações intensidade-duração-frequência (IDF) para cada uma das seis estações pluviométricas, conforme o formato da Equação 1:

$$i = \frac{K \cdot TR^a}{(t+b)^c} \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:

i (mm/h) – Intensidade da chuva;

k, a, b, c – Coeficientes que dependem da localização;

TR (anos) – Tempo de Recorrência;

t (min) – Duração do evento.

As equações foram ajustadas por meio da ferramenta *Solver* do Excel, utilizando o método de otimização GRG Não Linear. O critério de ajuste foi o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, que resulta em valores no intervalo [-∞,1], onde valores próximos a 1 indicam melhor desempenho da equação ajustada.

A fim de obter uma equação IDF representativa da bacia hidrográfica do ribeirão Caatinga, foi realizada a regionalização dos parâmetros das equações IDF individuais por meio do método do inverso da enésima potência da distância. Essa abordagem permitiu interpolar os coeficientes K, a, b e c com diferentes potências, conforme recomendado por Cecílio & Pruski (2003), garantindo uma estimativa mais representativa das intensidades de chuva na área de interesse. A equação resultante foi utilizada como base para a simulação hidrológica da bacia.

Para o cálculo da vazão pela precipitação efetiva, foi necessário considerar as características do uso e cobertura do solo, representado pelo Curve Number (CN). A partir do mapa de uso e cobertura do solo do projeto MapBiomas, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2003) realizou a determinação dos valores de CN para todas as áreas ottocodificadas do território brasileiro. No caso da bacia contribuidora ao exutório do ribeirão Caatinga, considerou-se os 45 valores de CN interceptados na área da bacia para realizar uma média ponderada, que resultou em um CN médio de 66.

Com os parâmetros de precipitação e do solo estabelecidos, foi aplicada a modelagem hidrológica com o método do Hidrograma Unitário do Soil Conservation Service (SCS), implementado no programa HEC-HMS (versão 4.11), onde o valor do Lag Time adotado correspondeu a 60% do tempo de concentração da bacia.

Como as precipitações obtidas a partir da equação IDF são referentes a chuvas pontuais, foram aplicados fatores de redução para obtenção das precipitações médias sobre a área da bacia hidrográfica, conforme proposto por Chow (1998). A distribuição temporal dos eventos de chuva foi baseada nos perfis de Huff (1990), e o passo de tempo adotado foi de 10 minutos, para durações de chuva inferiores a 24 h, e 30 minutos, para durações de chuva superiores a 24 h. Ambos os passos de tempo adotados são inferiores ao valor limite de 30% do Lag Time, que resulta em aproximadamente 2,5 h. Diversos cenários foram testados com o objetivo de identificar os hidrogramas críticos, ou seja, os hidrogramas que resultam a maior vazão de pico para cada tempo de recorrência em função da duração da chuva, sendo a variação do pico de vazão caracterizada pela abstração da capacidade drenante do solo e pelo transporte cinemático do volume de água constante.

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

O procedimento teve início com a seleção e análise de dados de estações fluviométricas, cujas informações foram obtidas por meio da base de dados disponíveis na plataforma HidroWeb (ANA, 2024). Embora não existam estações localizadas diretamente no ribeirão Caatinga, foram selecionadas estações situadas em bacias hidrográficas próximas, buscando similaridade em termos de características físicas, como área de drenagem e altitude. A escolha priorizou estações com séries históricas suficientemente longas e dados consistidos de cota, vazão e descarga líquida, necessários para suportar análises hidrológicas e probabilísticas. A localização das estações fluviométricas selecionadas está apresentada na Figura 3.

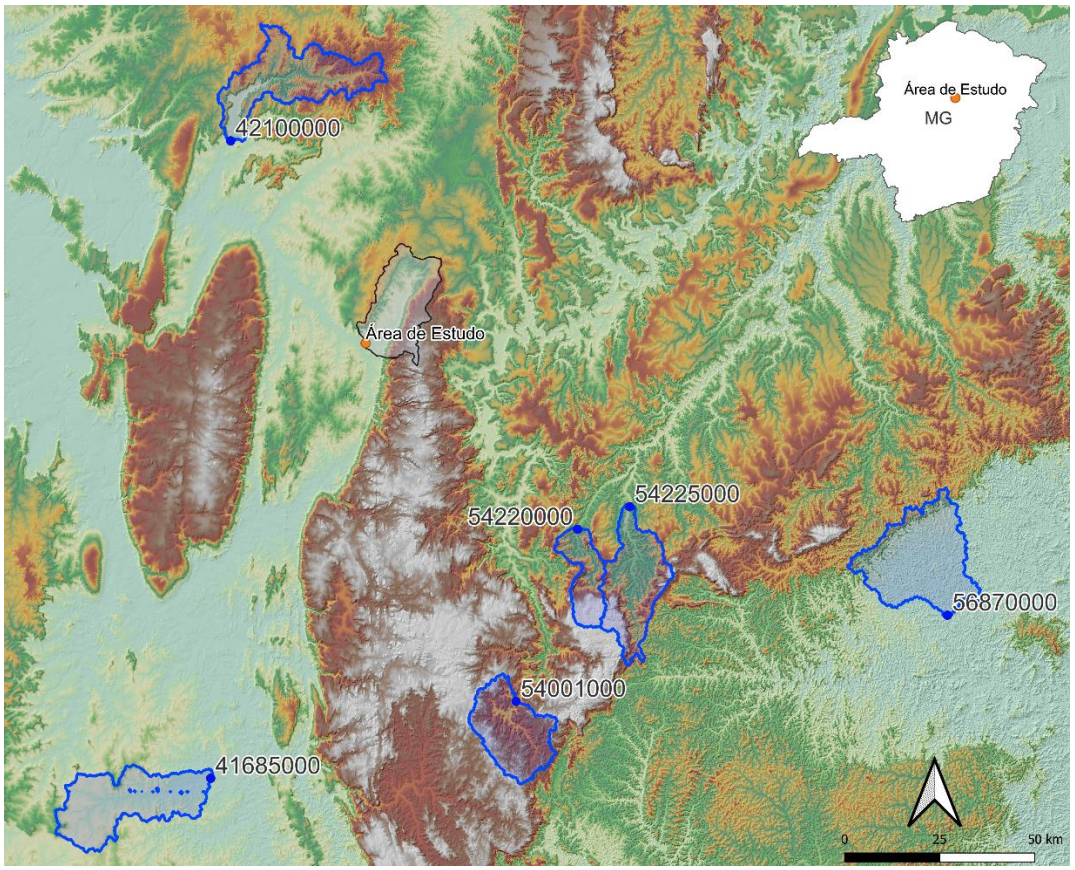

Figura 3: Localização das estações fluviométricas selecionadas e suas áreas de drenagem.

A análise das séries históricas priorizou o uso de dados consistidos, complementando-os com dados brutos apenas para ampliar o período de observação nos anos mais recentes. Os dados de cota e descarga foram analisados por meio da verificação entre as curvas de descarga das estações e as medições de descarga líquida, de forma a validar a consistência das vazões estimadas. Após essa verificação, foi feita a seleção das vazões máximas anuais com base no ano hidrológico, definido de outubro a setembro, como referência para as análises de frequência.

Com a série de vazões máximas anuais definida para cada estação selecionada, foram testadas as distribuições estatísticas Exponencial, Gumbel, LogNormal, Pearson III e LogPearson III, visando a caracterização da frequência das vazões extremas. Os testes de aderência adotados incluíram Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, com nível de significância de 5%, sendo selecionada para cada estação a distribuição que apresentou melhor desempenho estatístico. A Tabela XX apresenta, para cada estação fluviométrica, o número de anos com dados brutos e consistidos, o total de anos utilizados na análise, o intervalo de tempo correspondente e a distribuição estatística adotada.

Tabela 2: Informações das estações fluviométricas e distruibuição estatística adotada.

Código	Estação	Anos Consistidos	Anos Brutos	Total Anos	Período	Distribuição Estatística
41685000	Ponte do Picão	58	0	58	1965-2022	LogPearson III
42100000	Claro dos Poções	35	2	37	1973-2009	Exponencial
54001000	Povoado de Vau	22	3	25	1999-2023	Person III
54220000	São Gonçalo do Rio Preto	23	0	23	1995-2017	Gumbel
54225000	Senador Modestino	23	2	25	1999-2023	LogPearson III
56870000	Santa Maria do Suaçuí	57	2	59	1965-2023	Exponencial

A partir das séries ajustadas, a regionalização das vazões foi realizada por dois métodos complementares. O primeiro consistiu na transferência direta de vazões por área de drenagem, utilizando a razão entre a área da bacia da barragem e a da estação de referência. O segundo método envolveu a regionalização por parâmetros estatísticos, que considera relações entre características fisiográficas das bacias, como área de drenagem e altitude, e os parâmetros estatísticos das séries de vazões, notadamente a média e o desvio padrão, conforme metodologia descrita por Tucci (2001). A análise foi conduzida com base em três estações fluviométricas (42100000, 54001000 e 54220000), selecionadas por apresentarem maior consistência nas relações entre as variáveis analisadas.

No caso da regionalização por parâmetros, os valores médios e os desvios-padrão específicos (obtidos pela razão com a área de drenagem) foram correlacionados com as variáveis fisiográficas por meio de regressões lineares no padrão da Equação 2. Após ajuste das equações, foi possível estimar os parâmetros para a bacia do ribeirão Caatinga, sendo eles a média das vazões máximas específicas e o desvio padrão das vazões máximas específicas.

$$\text{Parâmetro} = a + b.H + c.A \qquad \text{Equação (2)}$$

Onde:

a, b, c – Coeficientes ajustados;

H (m) – Altitude;

A (km²) – Área de Drenagem.

A seguir, aplicou-se novamente o ajuste de distribuição de probabilidade às séries de vazões geradas com os parâmetros regionalizados, de forma a obter as vazões associadas a diferentes tempos de recorrência, entre 2 e 10.000 anos. A seleção da distribuição mais representativa foi baseada na análise da assimetria ponderada das séries das estações utilizadas, adotando-se a Exponencial, devido a assimetria resultante superior a 1,5, conforme definido pela Eletrobrás (1999).

Por fim, tendo em vista que os dados de vazão provenientes das estações fluviométricas correspondem a valores médios diários, foi necessário estimar as vazões máximas instantâneas, que representam os picos reais de escoamento ao longo do dia. Para essa transformação, aplicou-se o critério empírico de Fuller (1914), que consiste na multiplicação da vazão diária máxima por um fator dependente da área de contribuição da bacia hidrográfica. Considerando a área da bacia do ribeirão Caatinga, as vazões foram acrescidas pelo fato 1,44.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF), desenvolvidas para as estações pluviométricas da região e regionalizadas para a bacia hidrográfica em estudo, encontram-se na Tabela XX. Essas equações abrangem durações de precipitação de 6 a 96 h e períodos de recorrência entre 2 e 10.000 anos. Também é apresentado, para cada equação, o respectivo coeficiente de desempenho de Nash-Sutcliffe, que expressa o grau de ajuste da equação aos dados observados.

Tabela 3: Equações IDF geradas para as estações pluviométricas selecionadas e para a área de estudo.

Código	Equação IDF	Nash-Stucliffe $[-\infty, 1]$
1743000	$i = \frac{922{,}972 \cdot TR^{0{,}104}}{(t + 0{,}000)^{0{,}744}}$	0,989
1744001	$i = \frac{1.367{,}575 \cdot TR^{0{,}160}}{(t + 12{,}779)^{0{,}780}}$	0,974
1744045	$i = \frac{1.051{,}962 \cdot TR^{0{,}121}}{(t + 0{,}000)^{0{,}750}}$	0,986
1843020	$i = \frac{745{,}325 \cdot TR^{0{,}096}}{(t + 0{,}000)^{0{,}708}}$	0,983
1843005	$i = \frac{958{,}204 \cdot TR^{0{,}111}}{(t + 0{,}000)^{0{,}759}}$	0,992
1743002	$i = \frac{2.580{,}285 \cdot TR^{0{,}144}}{(t + 72{,}752)^{0{,}869}}$	0,982
Área de estudo (regionalizada)	$i = \frac{1.034{,}637 \cdot TR^{0{,}120}}{(t + 7{,}501)^{0{,}751}}$	-

As equações IDF específicas das estações pluviométricas possuem relevância para as regiões adjacentes a essas estações, pois oferecem estimativas mais precisas das intensidades de chuva, considerando as características locais, em comparação com equações genéricas desenvolvidas para macrorregiões, que muitas vezes se baseiam em dados desatualizados e não refletem as variações recentes nos regimes hidrológicos, como as causadas pelas mudanças climáticas. Em áreas isoladas sem monitoramento hidrológico, a utilização de equações IDF de outras localidades pode comprometer a precisão dos estudos hidrológicos, afetando o dimensionamento adequado de estruturas hidráulicas e a gestão eficiente dos recursos hídricos regional. A partir da aplicação do método SCS, permitiu-se identificar os tempos críticos de duração da chuva para diferentes períodos de recorrência, bem como as respectivas vazões máximas associadas, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Equações IDF geradas para as estações pluviométricas selecionadas e para a área de estudo.

Tempo de Recorrência (anos)	Tempo de Duração da Chuva Crítico (horas)	Vazão Máxima (m^3/s)
2	60	379
5	56	456
10	52	522
25	52	621
50	48	706
100	46	800
200	44	904
500	40	1.058
1.000	40	1.189
10.000	36	1.718

A relação entre o tempo de recorrência (TR) e a duração crítica da chuva pode ser observada na Figura 4, que mostra que, à medida que o TR aumenta, os picos de vazão máxima ocorrem em durações de chuva progressivamente menores. Esse comportamento é consistente com a teoria hidrológica, que indica que eventos extremos de precipitação tendem a ser mais intensos e de curta duração. Além disso, estudos como o de Lopes et al. (2016) na bacia do rio Ivaí (PR) demonstraram que, para cheias de menor frequência, as chuvas mais intensas ocorrem em intervalos mais curtos, corroborando a tendência observada neste estudo.

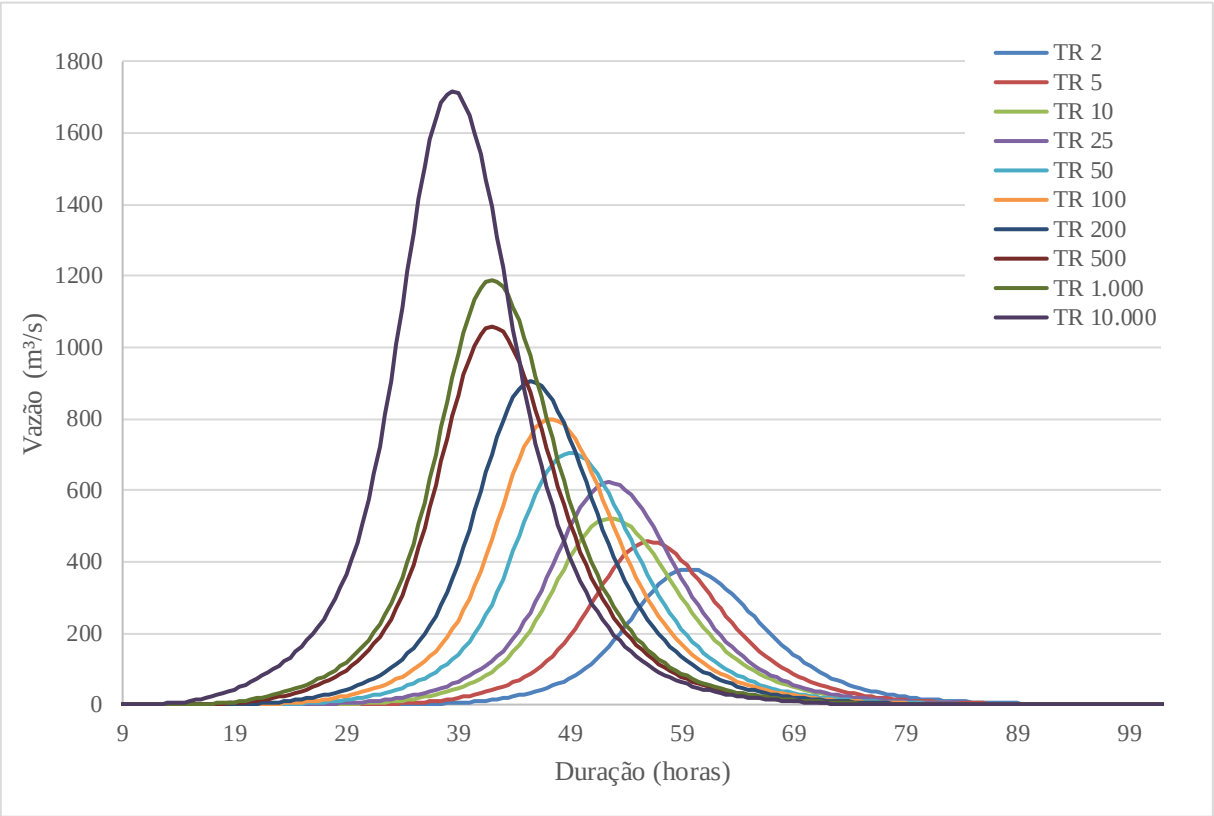

Figura 4: Hidrogramas resultantes para o tempo de duração crítico.

Para permitir a estimativa das vazões máximas de estações fluviométricas, foram desenvolvidas equações de regionalização com base no método dos parâmetros. Essas equações estabelecem relações lineares entre os parâmetros estatísticos das vazões (média e desvio padrão) e variáveis fisiográficas das bacias, como a área de drenagem e a altitude. Os coeficientes ajustados conforme modelo da Equação 2 e os valores de R^2 estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Coeficientes para regionalização de vazões por relação de altitude e área de drenagem.

Parâmetro	a	b	c	R^2
Média das vazões máximas específicas	0,5352	-	$- 3{,}0 \cdot 10^{-4}$	1
Desvio Padrão das vazões máximas específicas	0,1961	-	$3{,}0 \cdot 10^{-4}$	1
Média das vazões máximas específicas	0,4762	$6{,}8 \cdot 10^{-5}$	$- 2{,}7 \cdot 10^{-4}$	1
Desvio Padrão das vazões máximas específicas	- 0,0574	$2{,}9 \cdot 10^{-4}$	$- 3{,}8 \cdot 10^{-4}$	1

Legenda: a – coeficiente linear; b – multiplica a altitude; c – multiplica a área de drenagem (conforme Equação 2).

A partir das equações desenvolvidas pelo método dos parâmetros, é possível estimar a média e o desvio padrão das vazões máximas em outras localidades com base na altitude e na área de drenagem. Para isso, é necessário que as bacias estejam geograficamente próximas às estações fluviométricas 42100000, 54001000 e 54220000 e que apresentem características físicas semelhantes, especialmente em relação à altitude e à área de contribuição. A aplicação dessas equações permite gerar informações hidrológicas mais representativas das condições locais,

contribuindo para estudos mais precisos e para o dimensionamento adequado de estruturas hidráulicas, além de apoiar projetos de saneamento e infraestrutura com maior confiabilidade.

Por fim, a aplicação dos coeficientes da Tabela 5 na Equação 2 permitiu estimar os parâmetros necessários ao cálculo das vazões máximas com base na distribuição estatística exponencial. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6, juntamente com as demais estimativas geradas pelos métodos adotados neste estudo.

Tabela 6: Valores de Vazão Máxima (m³/s) para tempos de recorrência sob diferentes métodos.

TR (anos)	Método SCS	Transferência por Área de Drenagem	Método dos Parâmetros	
			Média e Desvio Padrão Específicos em função da Área	Média e Desvio Padrão Específicos em função da Área e Altitude
2	379	156	183	186
5	456	324	347	327
10	522	451	471	434
25	621	618	636	575
50	706	745	760	681
100	800	872	885	788
1.000	1.189	1.294	1.298	1.142
10.000	1.718	1.715	1.712	1.496

De modo geral, para a maioria dos períodos de retorno analisados, os valores obtidos pelos métodos de transformação chuva-vazão (SCS), transferência por área de drenagem e regionalização com base em parâmetros estatísticos (média e desvio padrão em função da área e/ou altitude) apresentaram ordem de grandeza semelhante. As maiores discrepâncias foram observadas para os tempos de retorno mais baixos, com destaque para o método SCS, que estimou vazões mais elevadas nesse intervalo, refletindo a sensibilidade do modelo às características da chuva de curta duração e à concentração rápida do escoamento superficial. Essas características dos resultados de cada método podem ser visualizadas na Figura 5.

Ao comparar os dois enfoques da regionalização por parâmetros, observa-se que as equações desenvolvidas considerando apenas a área de drenagem tendem a superestimar as vazões em relação às equações que incorporam também a altitude. Essa diferença é perceptível na maioria dos tempos de retorno e evidencia a importância da inclusão de variáveis físicas adicionais no ajuste das equações, contribuindo para uma representação mais fiel das particularidades morfológicas da bacia.

Estudos anteriores realizados no semiárido brasileiro reforçam a importância de avaliar diferentes modelos matemáticos para estimativa de vazões. Na Bacia do Rio Pardo (BA), a ausência de estações fluviométricas em afluentes exigiu o uso de regressões múltiplas lineares para estimar as vazões máximas, tendo o modelo com equação potencial apresentado melhor desempenho para esses eventos, enquanto o modelo exponencial se mostrou mais adequado para estimativas de Q95 (SANTOS et al., 2023). Esse resultado evidencia a importância de se testar diferentes distribuições estatísticas, uma vez que a representação hidrológica pode variar conforme a região e o tipo de vazão analisada. Tanto nesse estudo quanto no presente trabalho, a área de drenagem foi uma variável-chave nas equações de regionalização, contudo, outros parâmetros morfométricos também podem ser incorporados para melhorar a acurácia das estimativas. Um exemplo é o estudo de Sousa, Nascimento e Pereira (2023), na Bacia do Rio Grande (BA), que incluiu variáveis como perímetro, comprimento da rede de drenagem e declividade média, ampliando as variáveis das equações desenvolvidas.

O método do hidrograma unitário do SCS, embora amplamente utilizado, foi originalmente desenvolvido com base em dados e condições de bacias rurais dos Estados Unidos (SCS, 1986; NEH, 1971). A aplicação do modelo em bacias brasileiras, como a do presente estudo, demanda cautela, pois há diferenças relevantes nas características físicas, como uso do solo, topografia e regime pluviométrico. Ainda assim, o SCS permanece como uma ferramenta importante, sobretudo quando há escassez de dados, por sua simplicidade operacional e pelo fato de, em muitos casos, ser a única alternativa viável para estimar vazões de pico.

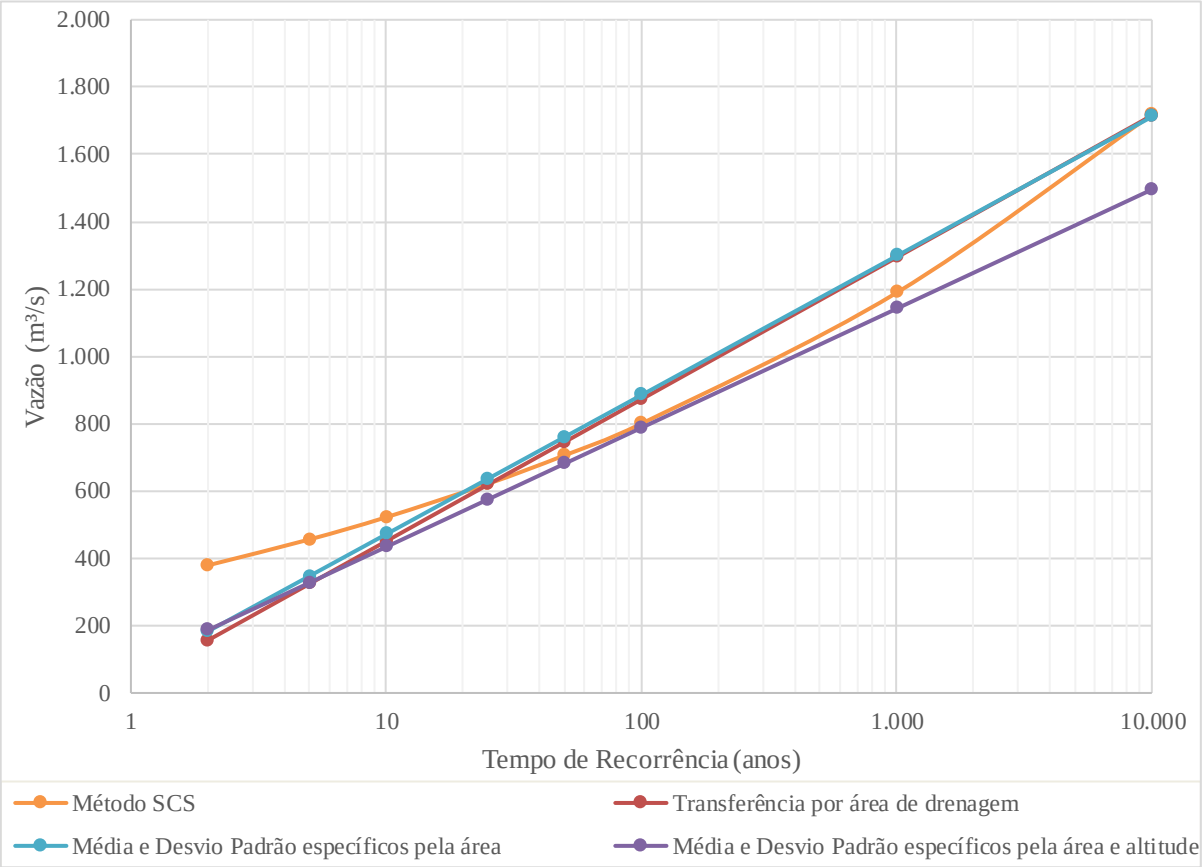

Figura 5:.Vazões máximas estimadas por diferentes métodos.

A distribuição temporal da chuva foi modelada segundo Huff (1990), metodologia derivada de análises empíricas da resposta hidrológica de diversas bacias norte americanas. Devido à ausência de estações pluviométricas na área de estudo, os dados foram obtidos por interpolação a partir de estações adjacentes, o que introduz incertezas. As influências topográficas, especialmente em regiões montanhosas, afetam a distribuição espacial da precipitação e, portanto, podem comprometer a precisão dos dados utilizados na simulação do escoamento.

No caso da regionalização por dados fluviométricos, as equações foram baseadas em estações localizadas em rios com características diversas, o que inclui diferenças de relevo, cobertura vegetal e regime de chuvas. Tais fatores também representam limitações, já que os padrões hidrológicos entre bacias vizinhas podem divergir substancialmente.

Dessa forma, é evidente que tanto os métodos baseados em transformação chuva-vazão quanto aqueles fundamentados em regionalização de vazões envolvem abstrações e incertezas inerentes. A interpretação criteriosa desses resultados exige experiência técnica, sendo essencial que o analista identifique as limitações de cada abordagem e, sempre que necessário, recorra a metodologias complementares, adote margens de segurança ou proponha novas campanhas de medição hidrológica. Essa postura técnica é indispensável para garantir análises consistentes e seguras, especialmente quando os resultados servirão de base para obras com potencial impacto socioambiental.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos aplicados no presente estudo permitiram estimar vazões de pico para diferentes tempos de recorrência em uma bacia hidrográfica sem monitoramento fluviométrico direto. A análise dos resultados indicou que as vazões obtidas apresentaram a mesma ordem de grandeza, com variações relativamente pequenas entre os métodos utilizados, evidenciando a consistência geral das abordagens.

Os métodos baseados em regionalização de vazões demonstraram potencial para estimativas indiretas. O método dos parâmetros específicos em função apenas da área de drenagem apresentou as maiores vazões de pico, enquanto a inclusão da altitude como variável adicional resultou, para a maioria dos tempos de retorno, em valores mais conservadores.

Como ciência fundamentada em estatística e probabilidade, a hidrologia naturalmente apresenta variabilidade nos resultados. Métodos de regionalização ampliam essas incertezas por dependerem da extrapolação de dados de outras localidades, geralmente com características físicas e climáticas distintas. Ainda assim, são ferramentas viáveis e frequentemente indispensáveis para estimativas hidrológicas em bacias sem monitoramento direto, desde que aplicadas com critérios técnicos e análise crítica.

Adicionalmente, destaca-se que a escassez de estações fluviométricas e pluviométricas adequadas continua sendo um dos principais entraves para a aplicação de modelos mais robustos. Assim como observado em estudos semelhantes, a carência de dados hidrológicos locais compromete a precisão das estimativas e reforça a necessidade de investimentos em redes de monitoramento como elemento central para o avanço da regionalização de vazões no país.

Os resultados deste estudo podem servir como base comparativa para pesquisas futuras em outras regiões com características semelhantes. Contudo, ressalta-se que a escolha do método de estimativa deve considerar as particularidades da bacia hidrográfica e os objetivos do projeto, sempre priorizando a segurança das obras hidráulicas e a viabilidade técnica das soluções propostas.

Recomendações

- Ampliação da rede hidrometeorológica nacional, com instalação de novas estações fluviométricas e pluviométricas em áreas atualmente desassistidas, especialmente em bacias com relevância para projetos de infraestrutura;
- Incorporação de novas variáveis nos modelos de regionalização e chuva-vazão, como o comprimento da rede de drenagem, declividade média, cobertura do solo e parâmetros de uso e ocupação do território, buscando melhor ajuste aos diferentes contextos regionais;
- Adoção de múltiplas metodologias em paralelo, permitindo análises comparativas que ajudem a identificar convergências e divergências entre os métodos e, assim, reforçar a confiabilidade dos resultados;
- Desenvolvimento e disseminação de estudos de calibração regional para métodos como o SCS, adaptando-os à realidade das bacias brasileiras, com base em dados observados localmente;
- Incentivo à formação técnica e científica continuada para profissionais da área de recursos hídricos, ampliando a capacidade analítica e crítica no uso de modelos hidrológicos e na interpretação de seus resultados.

AGRADECIMETNOS

Agradeço 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 BIBLIOGRÁFICAS

ANA MapBiomas. 2023. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/905223d9-e516-41a7-aebc-ae337954f029

BAEZ-VILLANUEVA, O.M.; ZAMBRANO-BIGIARINI, M.; MENDOZA, P.A.; McNAMARA, I.; BECK, H.E.; THURNER, J.; NAUDITT, A.; RIBBE, L.; THINH, N.X. On the selection of precipitation products for hydrological model parameter regionalization. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, 2021, p. 5805–5837.

BRUBACHER, J.P.; OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 4, 2020, p. 615–629.

CETESB. Departamento de Água e Energia Elétrica – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Drenagem Urbana: Manual de Projeto*. São Paulo: CETESBASCETESB, 1980. 466 p.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. *Metodologia para regionalização de vazões*. Rio de Janeiro, 1985.

ELETROBRAS. *Manual de Estudos Hidrológicos para Aproveitamentos Hidrelétricos: estudos básicos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 1999. 258 p.

FERREIRA, R.G. et al. Geostatistical modeling and traditional approaches for streamflow regionalization in a Brazilian Southeast watershed. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 108, 2021.

FULLER, W.E. Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, n. 1293, v. 77, 1914, p. 564–617.

GEIGER, R. Klassifikationen der Klimate nach W. Köppen. In: LANDOLT-BÖRNSTEIN. *Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*. Berlin: Springer, v. 3, 1954, p. 603–607.

HUFF, F.A. *Time distributions of heavy rainstorms in Illinois*. Department of Energy and Natural Resources, 1990.

KARKI, N.; SHAKYA, N.M.; PANDEY, V.P.; DEVKOTA, L.P.; PRADHAN, A.M.S.; LAMICHHANE, S. Comparative performance of regionalization methods for model parameterization in ungauged Himalayan watersheds. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 47, 2023.

LOPES, T.R.; DO PRADO, G.; ZOLIN, C.A.; PAULINO, J.; ANTONIEL, L.S. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí - PR. *Irriga*, v. 21, n. 1, 2016, p. 188-201.

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL. *Flood Studies Report*. London: Her Majesty's Stationary Office, 1975.

PANTHI, J.; TALCHABHADEL, R.; GHIMIRE, G.R.; SHARMA, S.; DAHAL, P.; BANIYA, R.; BOVING, T.; PRADHANANG, S.M.; PARAJULI, B. Regionalização hidrológica em situação de escassez de dados: implicações para a previsão de vazão. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 26, 2021.

PEREIRA, M.A.F.; BARBIEIRO, B.L.; QUEVEDO, D.M. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para uma gestão integrada dos recursos hídricos. *Sociedade & Natureza*, v. 32, 2022, p. 292-303.

PETRUCCI, E.; OLIVEIRA, L.A. Relações entre intensidade, duração e frequência das precipitações máximas de 24 h e equação de chuvas intensas para a cidade de Uberlândia-MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, 2019, p. 1–14.

ROCHA, S.C.; SILVA, D.P.; SILVA, J.B.L.; COELHO, D.A.; NOVAIS BRANDÃO, D. Regionalização de vazões da região baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo, Brasil. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 12, n. 1, 2024.

SANTOS, J.G.; LIMA, J.R.P.; MELO, C.E.F. Regionalização de vazões na Bacia do Rio Pardo, Bahia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 28, n. 1, 2023, p. e4.

SONG, J.-H.; HER, Y.; SUH, K.; KANG, M.-S.; KIM, H. Regionalization of a Rainfall-Runoff Model: Limitations and Potentials. *Water*, v. 11, 2019.

SOUSA, R.S.; NASCIMENTO, M.C.; PEREIRA, R.M. Regionalização de vazões de permanência na Bacia do

Rio Grande, Bahia. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 28, n. 3, 2023, p. 491-500.

TABORGA, J.T. *Práticas Hidrológicas*. Rio de Janeiro: Transcon Consultoria Técnica Ltda., 1974.

TUCCI, C.E.M. *Regionalização de vazões*. Porto Alegre: ABRH, 2001.