AVALIAÇÃO DA RESPOSTA HIDROLÓGICA A PARTIR DA MUDANÇA NO TAMANHO MÁXIMO DOS VALES EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

José Lucas Ferreira de Oliveira [1] & Iran Eduardo Lima Neto [2]

Palavras-Chave – altura máxima de vales, resposta hidrológica, estudo probabilístico.

INTRODUÇÃO

O presente estudo irá analisar a resposta nas vazões a montante de uma ponte na BR-230 na cidade de Farias Brito/CE, próximo à Chapada do Araripe. O objetivo é avaliar o efeito do tamanho dos vales na delimitação da área da bacia hidrográfica, parâmetro crucial para a estimativa de vazões usando modelos hidrológicos.

METODOLOGIA

Diante do cenário proposto, usou-se o software de sistemas de informações geográficas (SIG), *Global Mapper*, como ferramenta de apoio na geração das bacias. Dentro do programa, existem, na janela de criação de BH, três parâmetros fundamentais que subsidiam a geração das bacias, são eles: contagem de células de drenagem, podendo ser em valor absoluto ou em área; comprimento mínimo de cursos d'água; e, por fim, a altura máxima de vales. O primeiro só tem serventia quando não se determina um ponto como exutório, ou seja, para este estudo, é irrelevante. Em compensação, os outros dois alteram a criação das bacias. Porém, o segundo não causa grandes efeitos em BHs de larga escala (>10 km²), alterando, sutilmente, somente o resultado do maior rio [Tucci (1997)]. Desse modo, decidiu-se focar somente no terceiro. Em outras palavras, a altura dos vales é o quão poder-se-á acumular água em uma determinada depressão geográfica; o *default* do programa é 15 m e recomenda, no seu manual, usar valores na faixa de 15 a 20 m.

Escolheu-se a equação de chuva ou de intensidade-duração-frequência (IDF), ver Equação 1, que representa a pluviometria do município de Farias Brito, obtida por Batista *et al*. (2025). Optou-se por utilizar cinco valores de tempos de retorno (TR): 10, 25, 50, 100 e 200 anos, tanto por questões práticas devido à proximidade com o Rio Cariús. Ademais, foram usadas durações de chuva (t) iguais aos quatro tempos de concentração (t_c) das BHs.

$$i = \frac{24{,}351(2{,}1-TR)^{0{,}103}}{(t-9{,}832)^{0{,}794}} \quad (1)$$

Realizou-se um estudo probabilístico das vazões medidas no Rio Cariús pela estação fluviométrica 361300000 da ANA, a qual possui 42 anos de dados, no fito de estimar as vazões atreladas à sua frequência de ocorrência pela distribuição de Gumbel, Log-Normal e Log-Pearson III. A escolhida será a que mais se aderiu aos dados, através dos critérios de Kolmogorov-Smirnov (K-S), de Chi-Quadrado (χ^2) e de Anderson-Darling (A-D) [Kroll, Croteau, Vogel (2015); Zeng, Wang, Wu (2021)]. Vale salientar que, caso haja divergência entre todos os resultados dos testes, a distribuição escolhida será a com o menor valor pelo critério A-D, haja visto que é o mais adequado para casos de eventos extremos [Shin *et al*. (2010)].

1) Universidade Federal do Ceará (UFC), lucasfer1227@alu.ufc.br.
2) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA-UFC), iran@deha.ufc.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra as quatro BHs geradas para o exutório próximo à ponte da BR-230. Além disso, a Tabela 1 apresenta os dados físicos de todas as BHs analisadas.

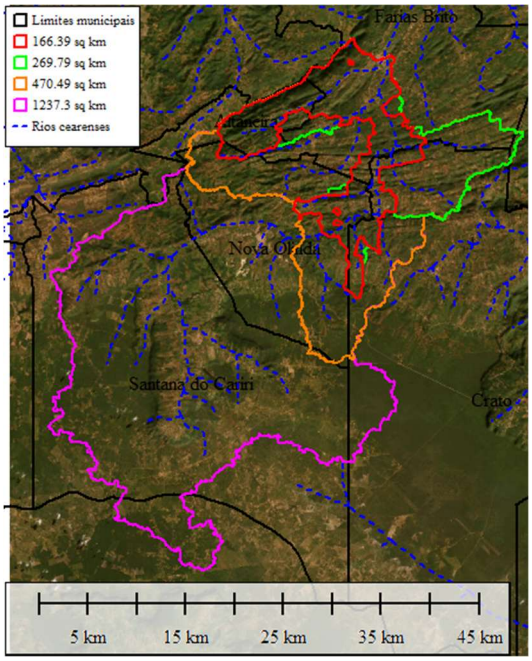


Figura 1. Mapa com BHs analisadas de Farias Brito. Fonte: autoria própria.

Dado	BH–V7	BH–V10	BH–V13	BH–V15	BH–V20	BH–V60
Área	165,9 km²	269,8 km²	470,5 km²	1237,3 km²	1237,3 km²	1237,3 km²
Perímetro	173,62 km	186,74 km	184,58 km	320,41 km	320,41 km	320,41 km
Declividade média	18,06 %	17,55 %	16,54 %	12,61 %	12,64 %	12,64 %
Tamanho do maior rio	33.355 m	33.355 m	50.861 m	88.445 m	88.445 m	88.445 m
CN ponderado	70,29	70,13	69,32	67,05	67,05	67,05
Tempo de concentração	1,91 h	1,93 h	2,73 h	4,64 h	4,64 h	4,64 h

Tabela 1. Dados físicos das bacias hidrográficas. Fonte: autoria própria.

Nota-se que, a partir da BH-V15 e da BH-V20, a mudança na altura máxima dos vales resulta em diferenças desprezíveis. Ao passo que, na mudança da BH-V15 para a BH-V13, os resultados foram severamente reduzidos. Comparando a BH-V13 até a BH-V7, verifica-se que a redução na altura do vale causou um impacto mais relevante nos resultados, ou seja, a linha tênue entre a mudança brusca e a suave, na geração das bacias, parece estar entre 13 e 15 m de altura de vale máximo.

Dentre a distribuição de Gumbel, Log-Normal e Log-Pearson III, a que melhor aderiu aos dados da estação fluviométrica foi a de Gumbel, conforme pode ser observado na Tabela 2, a qual reportou os menores valores para todos os testes de aderência.

Distribuição	Critério K-S	Critério χ^2	Critério A-D	Vazões (m³/s)				
				TR-10	TR-25	TR-50	TR-100	TR-200
Gumbel	0,69896	29,356	2,6125	451,02	582,54	680,11	776,96	873,45
Log–Normal	0,70666	29,680	2,6413	596,65	1014,0	1428,4	1944,0	2577,5
Log–Pearson III	0,94776	39,806	3,5424	431,83	536,12	593,20	633,13	657,75

Tabela 2. Análise probabilística da estação fluviométrica 36130000. Fonte: autoria própria.

Vale destacar que a máxima vazão medida na estação foi de 766,34m³/s no ano de 2004, época em que o estado do Ceará passou por uma cheia histórica.

A Figura 2 mostra somente dois hidrogramas para exemplificar a premissa de usar t igual a t_c.

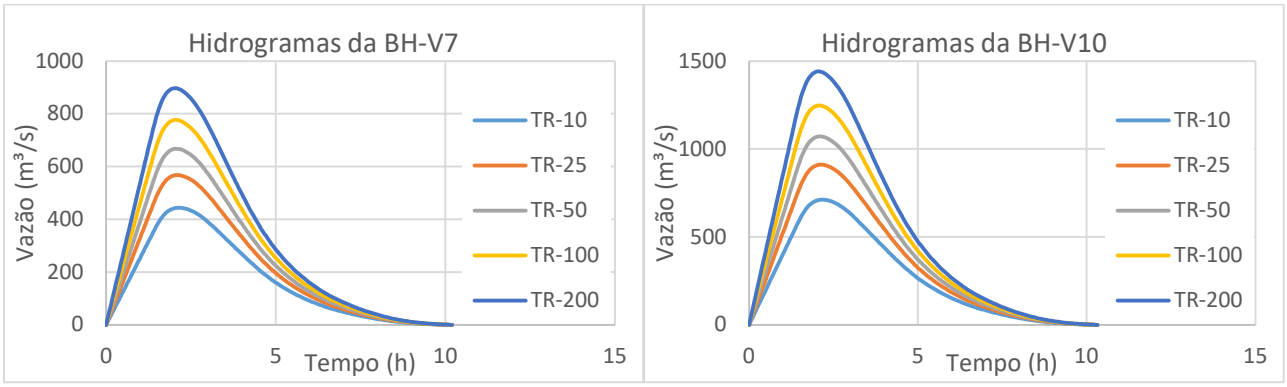


Figura 2. Hidrogramas das bacias com alturas máximas de vales de 7 e de 10 m. Fonte: autoria própria.

Nota-se que a principal diferença entre os gráficos acima deve-se exclusivamente à maior área da BH-V10, a qual elevou os picos de vazões em quase 62%, sendo condizente com a razão entre ambas as áreas presente na Tabela 1. Além disso, como o t_c é praticamente igual para ambas, a duração dos hidrogramas também foi bastante similar. Vale ressaltar que, para todos os hidrogramas, incluindo o das BH-V13 e das BH-V15+, a razão entre os tempos de pico (t_p) e tc foi de exatamente 109%.

Para averiguar, de forma mais precisa, o grau de resposta hidrológica, por meio da mudança no tamanho máximo dos vales, elaborou-se a Figura 3, onde os valores de vazões apurados pela distribuição de Gumbel foram plotados para efeito de comparação.

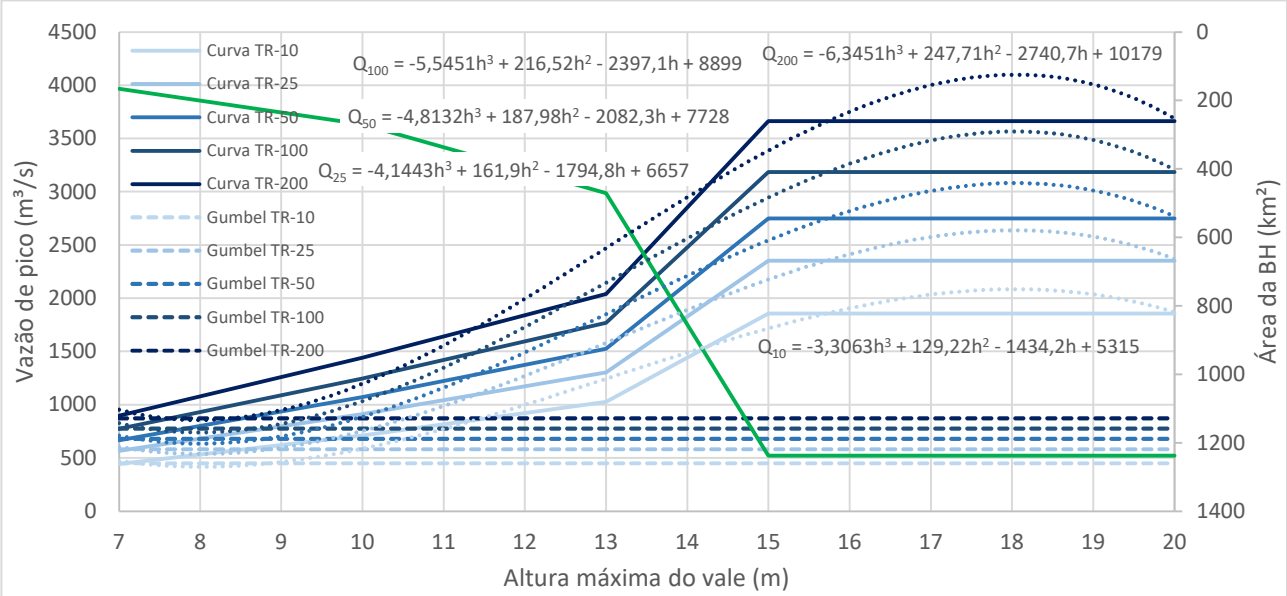


Figura 3. Curvas de respostas hidrológicas. Fonte: autoria própria.

É importante destacar que, apesar da verossimilhança com os resultados da BH-V7, a estação fluviométrica usada está cerca de 44 km a jusante do exutório. Nesse sentido, ao se retirar a contribuição extra, as cinco linhas horizontais seriam reduzidas, ou seja, desceriam no gráfico acima.

Na Tabela 3, visando à parametrização da duração de chuva em relação aos tempos de concentração, foi-se estudada a magnitude de se investigar, em um intervalo de 10% a 200%, de t/t_c para cada BH e observar o seu impacto na relação entre a vazão de projeto (Q_p) com a vazão extraída pela distribuição de Gumbel (Q_{dg}). É válido mencionar que valores de 66 a 70% de t_p/t_c são mais verossímeis [Mockus (1972)]. Ou seja, fica necessária, ainda mais, a parametrização de t/t_c, uma vez que o tempo de pico dos hidrogramas é um dado implícito do modelo chuva-deflúvio ao contrário da duração da chuva que é explícito.

t/t_c	Q_p/Q_{dg} da BH-V7					Q_p/Q_{dg} da BH-V10					Q_p/Q_{dg} da BH-V13					Q_p/Q_{dg} da BH-V15+				
	10	25	50	100	200	10	25	50	100	200	10	25	50	100	200	10	25	50	100	200
0,10	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,07	0,11	0,13	0,16	0,18	0,21	0,27	0,31	0,35	0,39	0,66	0,77	0,85	0,93	1,02
0,25	0,32	0,35	0,37	0,40	0,43	0,51	0,56	0,60	0,64	0,69	0,89	0,94	0,99	1,04	1,11	1,87	1,95	2,03	2,12	2,24
0,50	0,64	0,65	0,67	0,70	0,73	1,03	1,05	1,08	1,12	1,17	1,56	1,58	1,62	1,67	1,73	2,97	2,99	3,04	3,12	3,24
0,75	0,84	0,84	0,86	0,88	0,91	1,35	1,35	1,37	1,41	1,46	1,98	1,97	1,99	2,03	2,09	3,64	3,61	3,64	3,70	3,80
1,00	0,98	0,98	0,98	1,00	1,03	1,58	1,56	1,58	1,61	1,65	2,27	2,24	2,24	2,28	2,33	4,12	4,04	4,04	4,10	4,19
1,50	1,18	1,15	1,15	1,16	1,19	1,89	1,85	1,85	1,87	1,91	2,67	2,60	2,59	2,61	2,65	5,18	5,02	5,00	5,03	5,12
2,00	1,31	1,27	1,26	1,27	1,29	2,10	2,04	2,02	2,04	2,07	2,94	2,84	2,81	2,82	2,86	5,74	5,53	5,48	5,50	5,57

Tabela 3. Parametrização das respostas hidrológicas. Fonte: autoria própria.

Cabe ressaltar que os valores de t, os quais satisfazem a condição de $t_p/t_c = 68\%$ para a BH-V7, a BH-V10, a BH-V13 e a BH-V15+, foram, respectivamente, 12, 12, 19 e 35 min. Nesse sentido, para que uma determinada BH com altura máxima de vale seja adequada para a condição supracitada, as durações de chuva, convertidas para a relação t/t_c, isto é, 0,11, 0,11, 0,12 e 0,13, devem coincidir, mesmo que de forma aproximada, com o t/t_c que reportou os valores de Q_p/Q_{dg} destacados em verde.

CONCLUSÕES

Percebe-se que o relevo de chapada presente na área de estudo induziu uma insignificância para valores máximos de altura de vales superiores à 15 m (mínimo recomendado pelo manual). Assertivamente, para relevos planificados, é bem provável que não ocorra nesse patamar ou, na hipótese mais mirabolante, aconteça o exato oposto.

Outrossim, ao se observar os hidrogramas e as curvas de respostas hidrológicas, seria mais assertivo uma BH com vales máximos por volta de 5 m, excluindo a contribuição dos 44 km e mantendo o dado de entrada da equação IDF inalterado, isto é, t igual t_c. Concomitantemente, ao se analisar as curvas de respostas hidrológicas, a estimativa inicial de altura máxima de vales foi ratificada, uma vez que, com 14 m, ocorreu a mudança de magnitude das respostas hidrológicas.

Por fim, após análise da parametrização das respostas hidrológicas, identifica-se que as bacias hidrográficas com alturas máximas de vales superiores a 15 m foram as que mais trouxeram resultados compatíveis com a literatura no que se refere à premissa na razão entre t_p e t_c. Ademais, à medida que se reduz a proporção de t/t_c, faz-se necessário o incremento de área nas bacias, a fim de se manter o volume dos hidrogramas na mesma ordem de grandeza. Vale salientar que a BH-V7 apresentou as melhores proporções de Q_p sobre Q_{dg}, porém com um t_p/t_c igual a 109%.

REFERÊNCIAS

[1] BATISTA, T. L; TAVARES, P. R. L.; LOPES, M. C. & LIMA NETO, V. S. (2025). *"Equações IDF dos municípios cearenses geradas a partir de dados pluviométricos"*. Revista Brasileira de Geografia Física, v.18, p.702-722.

[2] KROLL, C. N., CROTEAU, K. E., & Vogel, R.M. (2015). "*Hypothesis tests for hydrologic alteration*". Journal of Hydrology, v.530, p.117-126. Elsevier.

[3] MOCKUS, V. (1972). "*Hydrology Guide for Use in Watershed Planning*". USDA Soil Conservation Service.

[4] SHIN, H., KIM, T., KIM, S., JUNG, Y., & HEO, J. (2009)." *Derivation of the Modified Anderson-Darling Test Statistics for the Generalized Extreme Value and Generalized Logistic Distributions*". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, p. 2371-2378. Springer.

[5] TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH, 1997.

[6] ZENG, X., WANG, D., & WU, J. (2015). "*Evaluating the Three Methods of Goodness of Fit Test for Frequency Analysis*". Journal of Risk Analysis and Crisis Response, v.5, ed.3, p.178-187. Atlantis Press.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Ambiental Ceará pelo apoio financeiro e pelo fornecimento de dados e informações que subsidiaram a elaboração do presente estudo.