

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE PROPOSTAS GEOMORFOLÓGICAS PARA O MODELO DE NASH COM BASE EM DIFERENTES FONTES DE INFORMAÇÕES DO RELEVO

Maíra Martim de Moura¹; Samuel Beskow²; Fabrício da Silva Terra³; Zandra Almeida da Cunha⁴; Carlos Rogério de Mello⁵; Felício Cassalho⁶; Ana Carolina Farias de Oliveira⁷; Francisco Mazzarolo Seger⁸

RESUMO – A necessidade de boas estimativas de vazões, combinadas com uma rede de monitoramento insuficiente que, geralmente, compreende grandes e médias bacias, têm favorecido a difusão de propostas geomorfológicas para a estimativa de hidrogramas de escoamento superficial direto (HESD). Foram avaliadas quatro propostas geomorfológicas para o Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash, tomando como base de análise a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (BHRJ), situada em Minas Gerais. As características necessárias foram computadas utilizando quatro modelos digitais de elevação (MDE): cartas topográficas 1:50.000 interpoladas em 25m, imagens do sensor ASTER com 30m e da missão SRTM com 30m e 90m. O objetivo do estudo foi verificar qual a melhor combinação entre proposta geomorfológica e MDE para a estimativa de HESD na BHRJ. Com base na metodologia avaliada, verificou-se que: i) as razões de Horton e de Schumm foram muito sensíveis ao MDE utilizado; ii) os MDEs SRTM 90m e ASTER associados à proposta de Wu (1963) resultaram em HESD satisfatórios; iii) as propostas geomorfológicas utilizadas estimaram com mais eficiência eventos de chuva concentrados e com maiores magnitudes; e iv) as propostas de Rosso (1984) e de Bhaskar et al. (1997) não são indicadas para aplicação na BHRJ.

ABSTRACT – The need for good streamflow estimates, combined with an insufficient monitoring network that generally comprises large and medium watersheds, have favored the diffusion of geomorphological approaches for the estimation of direct surface runoff hydrograph (DSRH). Four geomorphological approaches for the Nash's Instantaneous Unit Hydrograph were evaluated based on the Jaguará creek watershed (JCW), located in Minas Gerais. The necessary characteristics were computed employing four digital elevation models (DEM): topographical maps in the 1:50,000 scale interpolated every 25m, 30-meter ASTER image and 30-meter and 90-meter SRTM images. The purpose of this study was to verify the best combination between geomorphological approach and MDE for the estimation of DSRHs in the JCW. Based on the aforementioned methodology, it was found that: i) the Horton and Schumm's ratios were very sensitive to the DEM used; ii) the 90-meter SRTM and 30-meter ASTER combined with the geomorphological approach proposed by Wu (1963) resulted in satisfactory DSRHs; iii) the geomorphological approaches were more efficient for the events with concentrated rainfall and with higher magnitudes; and iv) the approaches developed by Rosso (1984) and Bhaskar et al. (1997) are not indicated for application in the JCW.

Palavras-Chave – Modelo digital de elevação; cheias; bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará

1) Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rua Gomes Carneiro, 1 – Centro, Pelotas/RS, (53) 3284-3840, martimdemoura@gmail.com

2) Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rua Gomes Carneiro, 1 – Centro, Pelotas/RS, (53) 3284-3840, samuel.beskow@ufpel.edu.br

3) Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Av. Vereador João Narciso, 1380 – Unai/MG, (38) 36779950, fabricio.terra@ufvjm.edu.br

4) Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rua Gomes Carneiro, 1 – Centro, Pelotas/RS, (53) 3284-3840, zandraacunha@gmail.com

5) Universidade Federal de Lavras (UFLA), Campus Universitário – Aquecida Sol, Lavras/MG, (35) 38291452, crmello@ufla.br

6) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Av. dos Astronautas, 1558, Jardim da Granja – São José dos Campos/SP, (35) 992582676, felicio.cassalho@inpe.br

7) Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rua Gomes Carneiro, 1 – Centro, Pelotas/RS, (53) 3284-3840, anacarolin4farias@gmail.com

8) Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rua Gomes Carneiro, 1 – Centro, Pelotas/RS, (53) 3284-3840, franciscoseger@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Devido às ações antrópicas e às mudanças climáticas, eventos hidrológicos extremos vêm sendo mais recorrentes, culminando em inúmeros problemas relacionados às cheias em bacias hidrográficas (Mikhailova et al., 2012). Assim, a estimativa apropriada de vazões máximas e os respectivos hidrogramas torna-se essencial para a compreensão dos processos hidrológicos, com intuito de atuar na mitigação e prevenção de eventos extremos e suas consequências (Ghumman et al., 2014): inundações, colapso de estruturas, transporte e deposição de sedimentos, que acarretam em prejuízo aos âmbitos social, econômico e ambiental.

Neste contexto, a quantificação das vazões por meio de modelagem hidrológica tem culminado no desenvolvimento de várias metodologias, com destaque para o Hidrograma Unitário (HU) (Sherman, 1932). Pelo fato desta metodologia necessitar de dados provenientes de monitoramento hidrológico, o que dificulta a aplicação em bacias sem ou com monitoramento insuficiente, como é o caso do Brasil e das pequenas bacias (Beskow et al., 2013), modelos empíricos foram desenvolvidos, tais como os hidrogramas unitários triangular (HUT) e adimensional (HUA), propostos pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos. Com base na teoria do HU, Clark (1945) propôs o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI) e Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979) propuseram relações empíricas para o tempo e a vazão de pico do HUI utilizando características fisiográficas das bacias hidrográficas, introduzindo o conceito do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico (HUIG).

Um dos modelos de HUI que vem sendo amplamente utilizado é o de Nash (HUIN) (Nash, 1957), o qual considera a bacia hidrográfica por um conjunto de reservatórios lineares em cascata, sendo representado por dois parâmetros (número de reservatórios – n e coeficiente de armazenagem – k), os quais são normalmente obtidos a partir de eventos observados de chuva-vazão. Assim, alguns autores apresentaram propostas para estimativa destes parâmetros com base em características geomorfológicas, tais como a área da bacia, declividade média da bacia e do curso d'água principal (Nash, 1960; Wu, 1963), e as razões de Horton e Schumm (Rosso, 1984; Bhaskar et al., 1997).

O principal dado de entrada para a modelagem das propostas geomorfológicas é o modelo digital de elevação (MDE). Os MDEs podem ser adquiridos de diferentes fontes como, por exemplo, imagens obtidas pelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); pela interpolação de curvas de nível e/ou pontos cotados (cartas topográficas); pelo sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). De acordo com Moura et al. (2017), as diferentes fontes e escalas com as quais são gerados os MDEs influenciam nos atributos físicos das bacias hidrográficas, contudo, pouco se sabe sobre o impacto dessas diferenças na modelagem hidrológica.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes propostas geomorfológicas para a determinação dos parâmetros do HUIN visando à estimativa de hidrogramas

de cheias, bem como investigar a influência de diferentes fontes de informações do relevo sobre a determinação dos parâmetros físicos da bacia necessários para o uso destas propostas. A metodologia foi avaliada com base em eventos monitorados na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará, localizada no sul de Minas Gerais.

METODOLOGIA

O estudo compreende a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (BHRJ), com aproximadamente 31,8 km², localizada na região do Alto Rio Grande, em Minas Gerais (Figura 1). A BHRJ encontra-se predominantemente no bioma Mata Atlântica, porém, com transição para o bioma Cerrado. De acordo com Alvares et al. (2014), o clima da região é do tipo Cwa, caracterizado como mesotérmico, com verões brandos e chuvosos e estiagem de inverno. Segundo Andrade et al. (2013), a BHRJ apresenta características pedológicas, hidrológicas e de ocupação dos solos típicas da região do Alto Rio Grande, predominando Latossolos e Cambissolos e, basicamente, culturas e pastagem.

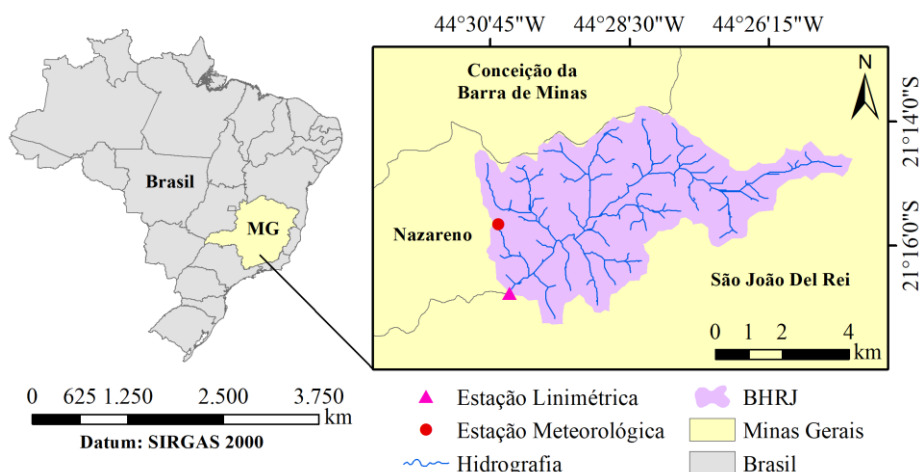


Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará e de sua rede de monitoramento.

A rede de monitoramento da BHRJ (Figura 1) compreende uma estação meteorológica automática e um linígrafo automático, ambos registrando dados em intervalos de 30 minutos. Para a conversão dos níveis monitorados em vazões, fez-se uso da curva-chave da seção de controle, obtida a partir de campanhas hidrológicas realizadas na bacia.

Foram selecionados eventos de precipitação com diferentes durações, totais precipitados e intensidades médias, dando ênfase aos eventos de maiores magnitudes e cujos respectivos hidrogramas fossem unimodais. Visando à análise dos hidrogramas de ESD, foi realizada a separação do ESD com base na metodologia das inflexões (Chow et al., 1988), computado o volume de ESD por integração numérica e obteve-se a precipitação efetiva total ($P_{e, total}$) de cada evento. A distribuição temporal da P_e foi realizada utilizando o modelo Número da Curva - CN (SCS, 1986), de forma que, a soma dos incrementos de P_e do hietograma do evento resultasse no mesmo valor computado de

$P_{e, total}$. Para isso, fez-se a calibração do valor de CN evento a evento, considerando o valor observado da abstração inicial da precipitação (I_a) para cada evento (Beskow et al., 2018).

O modelo de HUI proposto por Nash (1957) (HUIN) foi avaliado em relação à transformação chuva efetiva em vazões de ESD. O HUIN considera uma precipitação uniforme ao longo da bacia, propagada até a seção de controle por n reservatórios lineares idênticos em cascata, com tempo médio de esvaziamento representado pelo parâmetro k . Frente às dificuldades geralmente encontradas em relação à utilização de modelos que necessitam de eventos chuva-vazão monitorados, combinadas com a existência de uma rede consolidada para a BHRJ, quatro diferentes propostas geomorfológicas para o HUIN foram analisadas neste estudo: P_1 (Nash, 1960), P_2 (Wu, 1963), P_3 (Rosso, 1984) e P_4 (Bhaskar et al., 1997).

As propostas P_1 (Equações 1 e 2) e P_2 (Equações 3, 4 e 5) foram obtidas a partir da regressão de variáveis físicas de bacias hidrográficas. Nash (1960) fez a aproximação das variáveis com os momentos do HUIN tomando como base 90 bacias britânicas, enquanto que, Wu (1963) relacionou-as com os parâmetros tempo de pico (t_p) e k para 21 pequenas bacias do estado de Indiana, nos Estados Unidos.

$$n = 2,44 \cdot L^{0,1} \quad (1)$$

$$k = \frac{11,31 \cdot A^{0,3}}{S^{0,3} \cdot L^{0,1}} \quad (2)$$

$$t_p = (n - 1) \cdot k \quad (3)$$

$$n = \frac{31,42 \cdot A^{1,085}}{L^{1,233} \cdot S^{0,668}} \quad (4)$$

$$k = \frac{780 \cdot A^{0,937}}{L^{1,474} \cdot S^{1,473}} \quad (5)$$

Em que, n é o número de reservatórios, k é o tempo de esvaziamento dos reservatórios (h), t_p é o tempo de pico (k), L é o comprimento do curso d'água principal (mi), A é a área da bacia hidrográfica (mi^2), S é a declividade média da bacia (partes/10.000) e S_r é a declividade média do curso d'água principal (partes/10.000).

As propostas P_3 (Equações 6 e 7) e P_4 (Equações 8 e 9) foram desenvolvidas tomando como referência a metodologia do HUI Geomorfológico, proposta por Rodriguez-Iturbe e Valdes (1979). Ambas propostas analisam variáveis dependentes do delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica e variam entre os eventos, uma vez que utilizam a velocidade do escoamento para a determinação dos parâmetros. A proposta de Rosso (1984) tomou como base cinco bacias do sul da Itália, enquanto que a de Bhaskar et al. (1997) foi aplicada em vários eventos de uma bacia indiana.

$$n = 3,29 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,78} \cdot R_L^{0,07} \quad (6)$$

$$k = 0,70 \cdot \left(\frac{R_A}{R_B \cdot R_L}\right)^{0,48} \cdot \frac{L_\Omega}{v^*} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\Gamma(n)} \cdot (n-1)^n \cdot e^{-(n-1)} = 0,5764 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{0,05} \quad (8)$$

$$k = \frac{0,44}{(n-1)} \cdot \frac{L_\Omega}{v} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{-0,38} \quad (9)$$

Em que, n é o número de reservatórios, k é o tempo de esvaziamento dos reservatórios (h), L_Ω é o comprimento do curso d'água de maior ordem (km), R_B , R_L e R_A são as razões de bifurcação, comprimento e entre áreas, respectivamente, v é a velocidade máxima de ESD (m/s; *km/h).

Tendo em vista que as propostas selecionadas são altamente dependentes do MDE utilizado, este trabalho visou avaliar o impacto das seguintes fontes de informações espaciais: a) imagens da missão SRTM com resoluções espaciais de 30 m e 90 m; b) imagens do sensor ASTER com resolução espacial de 30 m e c) curvas de nível e pontos cotados vetorizados na escala 1:50.000 e interpolados em células de 25 m. Todos os MDEs foram georreferenciados para o sistema de projeção cartográfica UTM fuso 23S e datum SIRGAS 2000.

A delimitação da BHRJ foi realizada de forma automática no software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014) e os atributos extraídos do relevo foram: a) área de drenagem; b) declividade média da bacia e c) declividade média e comprimento do curso d'água principal. As hidrografias extraídas numericamente foram organizadas de forma hierárquica (Strahler, 1952) e, posteriormente, foram obtidos os comprimentos de cursos d'água de ordem mais alta e os valores médios das razões de bifurcação (R_B) e de comprimento (R_L) (Horton, 1945), e da razão entre áreas (R_A) (Schumm, 1956). Todos os processos foram realizados para todos os MDEs utilizados neste estudo.

De posse dos hietogramas observados de precipitações efetivas e dos HUIs estimados de acordo com as diferentes propostas, realizou-se o processo de convolução, originando o hidrograma de ESD para cada combinação de proposta, MDE e evento. Estes hidrogramas foram confrontados com os hidrogramas observados, cuja análise de desempenho foi realizada com base no coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) (Nash; Sutcliffe, 1970) e no erro relativo na estimativa da vazão de pico (ER_{Qp}). Conforme Motovilov et al. (1999), o C_{NS} pode ser classificado da seguinte forma: $C_{NS} \geq 0,75$: bom; $0,75 > C_{NS} \geq 0,36$: satisfatório e $C_{NS} < 0,36$: insatisfatório. Para o ER_{Qp} , Van Liew et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação: $|ER_{Qp}| < 10\%$: muito bom; $10\% < |ER_{Qp}| < 15\%$: bom; $15\% < |ER_{Qp}| < 25\%$: satisfatório e $|ER_{Qp}| > 25\%$: inadequado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados 20 eventos chuva-vazão com precipitação efetiva e vazão máxima de ESD variando de 3,6 a 18,5 mm e 5,3 a 22,9 m³/s, respectivamente. As características da BHRJ utilizadas para a obtenção dos parâmetros do HUIN estão apresentadas na Tabela 1, e os valores obtidos para os parâmetros n e k pelas diferentes propostas geomorfológicas, na Tabela 2. Os valores mínimos,

máximos e médios obtidos para o C_{NS} e o ER_{QP} , para os hidrogramas obtidos pelas diferentes combinações proposta-fonte (MDE) encontram-se na Tabela 3.

Tabela 1 – Características geomorfológicas da BHRJ obtidas a partir dos MDEs selecionados e o coeficiente de variação (CV) obtido para cada uma delas

Fonte	A (km ²)	L (km)	S (%)	S _r (%)	R _B	R _L	R _A	L _Ω (km)
Cartas 25	31,77	12,33	11,46	0,28	4,33	2,24	1,98	4,05
SRTM 30	32,32	11,92	11,34	0,31	4,48	3,72	3,85	8,27
SRTM 90	32,12	12,42	9,42	0,38	4,37	2,36	2,00	3,80
ASTER 30	32,34	11,65	13,47	0,45	5,08	3,60	3,38	8,07
CV (%)	0,83	2,95	8,61	21,12	7,60	26,44	34,22	40,57

Com base nos valores apresentados na Tabela 1, percebe-se que as características L_{Ω} , R_A , R_L e S_r apresentaram as maiores variações entre os valores obtidos a partir dos diferentes MDEs, enquanto que as menores variações foram observadas para as características A e L. Devido ao fato de as fontes utilizadas resultarem em cursos de maior ordem com valores muito discrepantes, as razões R_L e R_A , altamente dependentes dessa classificação, também apresentaram grandes variações. Outra característica impactada pela fonte foi a S_r que, além de variar com o valor de L, depende das altitudes do MDE que, neste caso, foram captadas de diferentes formas pelas fontes utilizadas.

Tabela 2 – Parâmetros do HUIN obtidos pelas combinações de propostas geomorfológicas com os MDEs

Fonte	P ₁		P ₂		P ₃		P ₄	
	n	k (h)	n	k (h)	n	k (h)	n	k (h)
Cartas 25	2,99	2,37	2,40	3,00	6,41	0,11 - 0,30	6,51	0,11 - 0,30
SRTM 30	2,98	2,39	2,52	2,70	4,06	0,23 - 0,66	3,98	0,24 - 0,67
SRTM 90	2,99	2,52	2,80	1,88	6,44	0,10 - 0,28	6,54	0,10 - 0,28
ASTER 30	2,97	2,28	3,02	1,65	4,94	0,21 - 0,58	4,88	0,21 - 0,58

Tabela 3 – Valores mínimos, máximos e médios obtidos para as estatísticas utilizadas para verificação da acurácia dos hidrogramas estimados

Proposta/ Fonte		C_{NS}			ER_{QP} (%)			Proposta/ Fonte		C_{NS}			ER_{QP} (%)		
		Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd			Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd
P ₁	Cartas 25	-0,52	0,85	0,14	10,5	49,8	27,5	P ₃	Cartas 25	-11,71	-0,03	-4,51	77,6	446,7	224,1
	SRTM 30	-0,53	0,84	0,13	11,2	50,2	27,9		SRTM 30	-8,34	0,62	-2,58	46,8	363,8	155,2
	SRTM 90	-0,63	0,78	0,03	15,3	52,6	31,2		SRTM 90	-12,07	-0,20	-4,84	76,2	476,6	238,0
	ASTER 30	-0,43	0,89	0,22	7,0	47,7	24,7		ASTER 30	-8,40	0,60	-2,57	49,5	383,5	159,9
P ₂	Cartas 25	-0,32	0,86	0,27	16,6	53,2	32,1	P ₄	Cartas 25	-11,70	-0,02	-4,49	78,2	443,0	222,7
	SRTM 30	-0,29	0,89	0,31	11,7	50,3	28,2		SRTM 30	-8,34	0,62	-2,59	47,6	361,4	154,8
	SRTM 90	0,00	0,98	0,58	1,4	35,3	13,1		SRTM 90	-12,06	-0,18	-4,82	77,2	473,5	237,2
	ASTER 30	0,05	0,97	0,60	0,0	30,7	12,4		ASTER 30	-8,40	0,60	-2,57	48,7	382,7	159,6

Em geral, a P_2 resultou nos menores valores de n e, a P_3 e P_4 , nos menores valores de k (Tabela 2). Pode-se perceber que as propostas P_1 e P_2 apresentaram valores de n e k aproximados, com maiores variações nos valores de n para a P_2 , visto as diferenças acentuadas no parâmetro S_r . Com relação às propostas P_3 e P_4 , observa-se valores similares, variando mais entre as fontes que entre as propostas. Os valores obtidos de acordo com as propostas P_3 e P_4 indicam um conjunto de reservatórios com esvaziamento muito rápido. Nestes casos, a resposta a um evento de precipitação se dá de forma mais rápida do que quando utilizadas as propostas P_1 e P_2 , que simularam um número menor de reservatórios, porém, com tempo de esvaziamento muito maior. Além disso, por apresentar valores de n maiores que a P_2 , a P_1 tende a atenuar as vazões de pico dos hidrogramas, o que não ocorreu para as propostas P_3 e P_4 devido ao fato de os valores de k serem muito menores. O impacto desses valores pode ser visualizado na Figura 2, a qual apresenta os hidrogramas estimados para o Evento 15, utilizando as quatro propostas geomorfológicas, combinadas com os MDEs SRTM 90 e ASTER. É possível visualizar o excelente desempenho da P_2 e da P_1 (a) frente ao desempenho da P_3 e da P_4 (b), bem como a resposta antecipada dos hidrogramas obtidos a partir da P_3 e da P_4 .

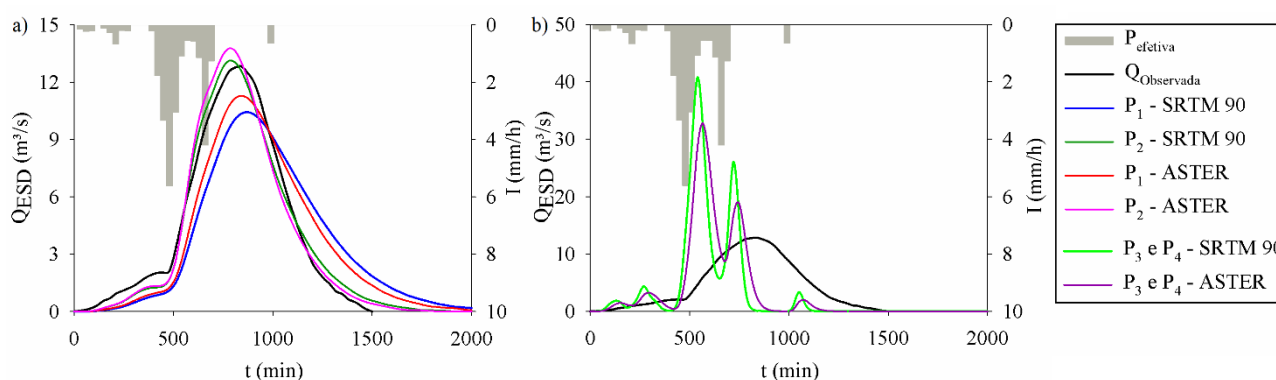


Figura 2 – Hidrogramas estimados para o Evento 15 a partir de: (a) P_1 e P_2 e (b) P_3 e P_4 , combinadas com os MDEs SRTM 90 e ASTER.

Com base nas estatísticas médias é possível observar o ótimo desempenho da P_2 em relação às demais, principalmente quando combinada aos MDEs ASTER e SRTM 90 m. Nestes casos, dos 20 eventos, somente 3 não foram considerados pelo menos, satisfatórios. As piores estimativas foram obtidas quando do uso do HUIN combinado com a P_3 e a P_4 , independente do MDE utilizado. A P_1 teve um desempenho intermediário, com algumas boas estimativas. O baixo desempenho dos hidrogramas obtidos a partir das propostas geomorfológicas, em alguns eventos, pode estar relacionado ao fato de que estes apresentaram períodos com chuva, seguidos de períodos sem chuva e depois com chuva novamente, o que dificultou a modelagem dos hidrogramas de ESD.

Analisando os valores de C_{NS} e ER_{Qp} obtidos (Tabela 3), pode-se observar que as propostas P_3 e P_4 resultaram em estimativas insatisfatórias para todos os eventos, independente do MDE utilizado. Em relação ao C_{NS} , a P_1 e a P_2 resultaram em 11 e 4 eventos classificados como insatisfatórios, enquanto que, para o ER_{Qp} , este número foi igual a 9 e 3 eventos, respectivamente. Para ambas as

estatísticas utilizadas, a P_2 , com os MDEs SRTM 90 e ASTER, e a P_1 com o MDE ASTER foram as combinações que resultaram nos melhores valores.

Outra característica observada com base na modelagem realizada foi que, apesar de apresentarem valores baixos de ER_{Qp} para vários eventos, os valores de C_{NS} não foram satisfatórios. Esta constatação ressalta que, a proposta permitiu estimar as vazões de forma satisfatória, contudo, há uma defasagem no tempo entre as vazões observadas e as estimadas, afetando o C_{NS} .

As boas estimativas de hidrogramas de ESD obtidas com algumas propostas utilizadas, como a P_1 e a P_2 , evidenciam a importância de estudos semelhantes. Por necessitarem apenas de dados extraídos do relevo da bacia e de eventos de precipitação, a utilização destas propostas se torna promissora, principalmente em bacia não-monitoradas ou com dados escassos. Nestas bacias, a falta de eventos observados dificulta a utilização de modelos mais complexos, pois estes geralmente necessitam de calibração e atualização periódica das informações necessárias.

Os resultados obtidos para a BHRJ se assemelham aos obtidos por Zakizadeh; Malekinezhad (2015), na bacia iraniana Manshad (60 km²), utilizando a P_1 e a P_3 . Para a P_1 , os autores obtiveram C_{NS} variando de -0,98 a 0,65, e ER_{Qp} variando de 6,95 a 65,97%. Para a P_3 , os autores também encontraram valores insatisfatórios de C_{NS} (-5,15 a -0,87), e de ER_{Qp} (2,44 a 134,46%). O fato de os valores de k da bacia Manshad ficarem muito próximos dos obtidos para a BHRJ pode ter corroborado com estas semelhanças. Beskow et al. (2018) também obtiveram desempenho insatisfatório utilizando a P_4 para a simulação de eventos da BHRJ, com $C_{NS, \text{médio}} = -4,66$ e $ER_{Qp, \text{médio}} = 193,9\%$.

Por outro lado, os valores da BHRJ se diferem dos obtidos por Ghumman et al. (2019), que verificaram o impacto de um MDE com 30 m e 90 m na estimativa de hidrogramas a partir da P_3 . Os autores analisaram uma área de captação pertencente à bacia hidrográfica do rio Nandna, no Paquistão, com 202 km², e obtiveram boas estimativas com o MDE de 30m ($C_{NS, \text{médio}} = 0,80$; $ER_{Qp, \text{médio}} = 4,67\%$) e algumas com o MDE de 90m ($C_{NS, \text{médio}} = 0,69$; $ER_{Qp, \text{médio}} = 12,64\%$). Um dos fatores que pode justificar a diferença no desempenho dos hidrogramas dos autores em relação aos da BHRJ pode ser a precipitação. Ghumman et al. (2019) utilizaram somente eventos concentrados, ou seja, não existem intervalos do evento sem chuva entre outro com chuva, o que aconteceu em alguns eventos da BHRJ, principalmente aqueles nos quais as propostas não tiveram um bom desempenho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os MDEs resultaram em características geomorfológicas com valores bastante diferenciados, sendo as razões R_L e R_A , o L_Ω e a S_r as que apresentaram as maiores variações. Os parâmetros n e k variaram mais entre as propostas do que entre os MDEs, o que se deve ao fato de as propostas utilizarem características diferentes para a obtenção dos mesmos.

A P_2 combinada com os MDEs SRTM 90 e ASTER permite estimar de forma satisfatória hidrogramas de ESD resultantes de precipitações com intensidades elevadas e/ou concentradas. Mesmo sendo de mais fácil aplicação em virtude das características necessárias e de não dependerem de informação da velocidade, as propostas P_1 e P_2 , as quais foram aplicadas pela primeira vez na região de estudo, apresentaram superioridade em relação às baseadas na teoria do HUIG. Esta análise deve ser realizada em mais bacias hidrográficas com o intuito de verificar se os comportamentos das combinações propostas-MDEs permanecerão ou irão variar com base em características locais.

O HUIN combinado com as propostas geomorfológicas apresenta potencial para auxiliar em projetos de drenagem urbana e rural e para compor sistemas simplificados de alertas a enchentes, sem a necessidade de calibração e utilizando apenas características geomorfológicas e eventos de chuva.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Pesquisa Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Lavras, pela disponibilização dos dados de monitoramento. Ao CNPq, à CAPES (Código de Financiamento 001) e à FAPERGS pelo apoio financeiro de projetos relacionados a este estudo.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. (2014). “*Koppen’s climate classification map for Brazil*”. Meteorologische Zeitschrift 22(6), pp. 711–728.
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. (2013). “*Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG*”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 17(1), pp.69–76.
- BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. (2013). “*Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model*”. Water Resources Management, 27(2), pp. 341–363.
- BESKOW, S.; NUNES, G. S.; MELLO, C. R.; CALDEIRA, T. L.; NORTON, L. D.; STEINMETZ, A. A.; VARGAS, M. M.; ÁVILA, L. F. (2018). “*Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics*”. Anais da Academia Brasileira de Ciências 90(2), pp. 1873-1890.
- BHASKAR, N. R.; PARIDA, B. P.; NAYAK, A. K. (1997). “*Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH*”. Journal of Water Resources Planning and Management 123, pp. 228-238.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1998). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York - EUA, 571 p.
- CLARK, C. O. (1945). “*Storage and the Unit Hydrograph*”. Transactions American Society Civil Engineers 110, pp. 1419-1488.
- ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri), 2014. CD-ROM.

- GHUMMAN, A. R.; GHAZAW, Y.; ABDEL-MAGUID, R. H.; ZAFAR, A. (2019). *“Investigating Parameters of Geomorphic Direct Runoff Hydrograph Models”*. Water Resources and the Regime of Water Bodies 46(1), pp. 19–28.
- GHUMMAN, A. R.; KHAN, Q. U.; HASHMI, H. N.; AHMAD, M. M. (2014). *“Comparison of Clark, Nash Geographical Instantaneous Unit Hydrograph Models for Semi Arid Regions”*. Water Resources and the Regime of Water Bodies 41(4), pp. 364–371.
- HORTON, R. E. (1945). *“Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology”*. Bulletin of the Geological Society of America 56, pp. 275-370.
- MIKHAILOVA, M. V; MIKHAILOV, V. N.; MOROZOV, V. N. (2012). *“Extreme Hydrological Events in the Danube River Basin over the Last Decades”*. Water Resources and the Regime of Water Bodies 39(2), pp. 161–179.
- MOTOVILOV, Y. G.; GOTTSCHALK, L.; ENGELAND, K.; RODHE, A. (1999). *“Validation of a distributed hydrological model against spatial observations”*. Agricultural and Forest Meteorology 98-99, pp. 257-277.
- MOURA, M. M.; BESKOW, S.; CUNHA, Z. A.; TERRA, F. S.; CASSALHO, F. (2017). *“Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo na caracterização de bacias hidrográficas visando à modelagem de cheias”* in Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Nov. 2017, PAP022765, pp. 1-8
- NASH, J. E. (1957). *“The form of the instantaneous unit hydrograph”*. International Association of Scientific Hydrology 45(3), pp. 114-121.
- NASH, J. E. (1960). *“A unit hydrograph study, with particular reference to British Catchments”*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 17(3), pp. 249-282.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). *“River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles”*. Journal of Hydrology 10(3), pp. 282-298.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. (1979). *“The Geomorphologic Sctructure of Hydrologic Response”*. Water Resources Research 15(6), pp. 1409-1420.
- ROSSO, R. (1984). *“Nash Model Relation to Horton Order Ratios”*. Water Resources Research 20(7), pp. 914-920.
- SCHUMM, S. A. (1956). *“Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey”*. Bulletin of the Geological Society of America 67, pp. 697-646.
- SCS - SOIL CONSERVATION SERVICE. (1986). *Technical Release 55: Urban hydrology for small watersheds*, National Engineering Handbook, Washington – EUA, 164 p.
- SHERMAN, L. K. (1932). *“Streamflow from rainfall by the unit-graph method”*. Engineering News Record, 108, pp.501-505.
- STRAHLER, A. N. (1952). *“Dynamic basis of geomorphology”*. Bulletin of the Geological Society of America 63, pp. 923 –938.
- VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. (2007). *“Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds”*. Journal of Hydrological Engineering 12(2), pp. 173-189.
- WU, I. (1963). *“Design hydrographs for small watersheds in Indiana”*. Journal of the Hydraulics Division, 89(6), pp. 35-66.
- ZAKIZADEH, F.; MALEKINEZHAD, H. (2015). *“Comparison of Methods for Estimation of Flood Hydrograph Characteristics”*. Russian Meteorology and Hydrology 40(12), pp. 828-837.