



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

APLICAÇÃO DO MODELO HEC-HMS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA ORIENTADA POR EVENTOS PARA TRANSFERÊNCIA DE VAZÕES

Víctor Luís Padilha^{1}; Sílvio Luís Rafaeli Neto²; Guilherme da Silva Ricardo³; Mariane Melo de Liz⁴; Paula Andrade⁵; Nadia Bernardi Bonumá⁶*

Resumo – Amplamente utilizado por muitos hidrólogos em todo o mundo, o HEC-HMS é uma ferramenta essencial para a compreensão do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas na modelagem orientada por eventos. Neste contexto, a cidade de Lages (SC) registrou eventos de extremos nos últimos anos que causaram desastres por inundação. Este trabalho empregou três eventos diferentes (2005, 2008 e 2011) para calibrar e testar o modelo HEC-HMS para o sistema Caveiras Montante 1 composto por 7 sub-bacias hidrográficas. Por fim, foram avaliadas as respostas das duas sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá por meio da transferência de vazões e gerado suporte científico para o gerenciamento e planejamento de recursos hídricos da região.

Palavras-Chave – eventos; sub-bacias urbanas; inundações.

APPLICATION OF HEC-HMS MODEL IN EVENT-ORIENTED HYDROLOGICAL MODELLING FOR FLOW TRANSFER

Abstract – Widely used by many hydrologists around the world, the HEC-HMS is an essential tool for understanding watershed hydrological behavior in event-oriented modelling. In this context, the city of Lages (SC) recorded extreme events in recent years which produced disasters by flood. This paper employed three different events (2005, 2008 and 2011) to calibrate and test the HEC-HMS model to Caveiras Montante 1 system composed by 7 sub-catchments. Therefore, it was evaluated the responses for the two urban sub-catchments Ponte Grande and Carahá through flow transfer and generated scientific support for the management and planning of water resources in the region.

Keywords – events; urban sub-catchments; floods.

^{1*} Engenheiro ambiental, MSc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Caixa Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis-SC, Brasil. E-mail: victor.padilha@posgrad.ufsc.br

² Professor Dr. Associado do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, CEP 88520-000, Lages-SC, Brasil. E-mail: silvio.rafaeli@udesc.br

³ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, CEP 88520-000, Lages-SC, Brasil. E-mail: guilhermericardo@terra.com.br

⁴ Mestranda do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, CEP 88520-000, Lages-SC, Brasil. E-mail: mari-di-liz@hotmail.com

⁵ Acadêmica do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, CEP 88520-000, Lages-SC, Brasil. E-mail: pawandrade@outlook.com

⁶ Professora Dra. do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Caixa Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis-SC, Brasil. E-mail: nadia.bonuma@ufsc.br



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

1. INTRODUÇÃO

Os desastres ambientais por inundação ocorrem frequentemente em diferentes regiões do mundo. À medida que a gravidade e a frequência das inundações aumentam consideravelmente, existe uma crescente preocupação global com a necessidade de diminuir as mortes relacionadas com as inundações e as perdas econômicas associadas (SARHADI et al., 2012). No Brasil, grandes prejuízos sociais, econômicos e ambientais têm uma tendência crescente por conta de eventos extremos causadores de alagamentos e inundações nos municípios. De acordo com os planos diretores, as cidades brasileiras geralmente não levam em conta o impacto da urbanização na drenagem das águas pluviais. As áreas impermeáveis associadas ao desenvolvimento urbano à montante podem transferir seus efeitos à jusante, proporcionando um agravamento das inundações.

A inundação é um fenômeno geográfico que ocorre no tempo e no espaço, cujos problemas tendem a ser difíceis de resolver porque envolvem variáveis de natureza geográfica (domínio espacial do problema), técnicas (conhecimento científico e tecnologia), organizacionais (públicas ou privadas), social e temporal (RAFAELI NETO e RODRIGUES, 2000). Para a gestão eficaz de inundações em uma área urbana, a estimativa dos tempos do hidrograma, da vazão de pico e volume de escoamento superficial são muito importantes (GUL et al., 2009). Desta forma, a modelagem hidrológica é uma ferramenta comumente utilizada para estimar a resposta hidrológica da bacia hidrográfica devido à precipitação (HALWATURA e NAJJIM, 2013).

O modelo HEC-HMS (*Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System*), utilizado neste trabalho, é um modelo matemático discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico, desenvolvido pelo USACE (*US Army Corps of Engineers*) e disponibilizado gratuitamente na rede mundial de computadores. Sucessor do modelo HEC-1, é amplamente utilizado na análise de engenharia hidrológica para simular chuva-vazão (KNEBL et al., 2005), podendo representar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica em diversos estudos de drenagem urbana, previsão de vazões, impactos da urbanização, áreas de inundações, entre outros (USACE, 2000). Além disso, o modelo gera hidrogramas e informações referentes ao volume de escoamento superficial, vazão de pico e tempos do hidrograma, possuindo como vantagem a utilização de poucos parâmetros na calibração, bem como a adoção de diferentes combinações de métodos para representar os processos hidrológicos em diferentes locais e condições (CASTRONOVA e GOODALL, 2013).

A cidade de Lages, principal polo econômico do Planalto sul de Santa Catarina, encontra-se na posição média de 27°49' de latitude sul e 50°20' de longitude oeste, possui uma altitude média de 940 m e seu núcleo urbano principal espalha-se por uma área aproximada de 88 km² (CORDEIRO; RAFAELI NETO, 2015). Registraram-se diversos eventos que proporcionaram desastres por inundação, como nos anos de 1997, 2005, 2008, 2011, 2013 e 2017, o que exige a pesquisa para mitigar os impactos das inundações, tal como praticado na União Europeia e nos Estados Unidos. Apesar da estrutura estatal já criada e da disponibilidade de dados de monitoramento atual, existe pouco conhecimento científico desses eventos para esta região na literatura.

Deste modo, devido a ocorrência de eventos extremos ocorrem inundações nos rios urbanos provenientes da ausência de uma drenagem de águas pluviais eficiente, o que gera alagamentos em bairros da cidade, ou devido à ocorrência de remanso hidráulico do rio Caveiras nos exutórios dos rios Ponte Grande e Carahá, que provoca o represamento e elevação da cota dos mesmos, atingindo uma grande parcela da população do município (PADILHA, 2017). O conhecimento dos dados

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

hidrológicos, como o volume de escoamento superficial e a vazão de pico durante os eventos estudados, representam uma visão detalhada sobre os mecanismos que geram inundações e, conseqüentemente, fornecem suporte técnico, com a aplicação da modelagem hidrológica orientada por eventos, para execução de medidas estruturais e não-estruturais visando a mitigação dos prejuízos causados pelos desastres.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo envolve o sistema Caveiras Montante 1, sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Caveiras, que possui seu exutório localizado na estação fluviométrica Ponte Velha, onde a CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) realiza o monitoramento fluviométrico. De acordo com a disponibilidade de estações dentro do sistema considerado, o sistema foi delimitado em sete sub-bacias ou reservatórios conceituais (HEC-HMS). Dentre elas, as sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá (Figura 1) possuem áreas de 27,15 km² e 30,16 km², respectivamente.

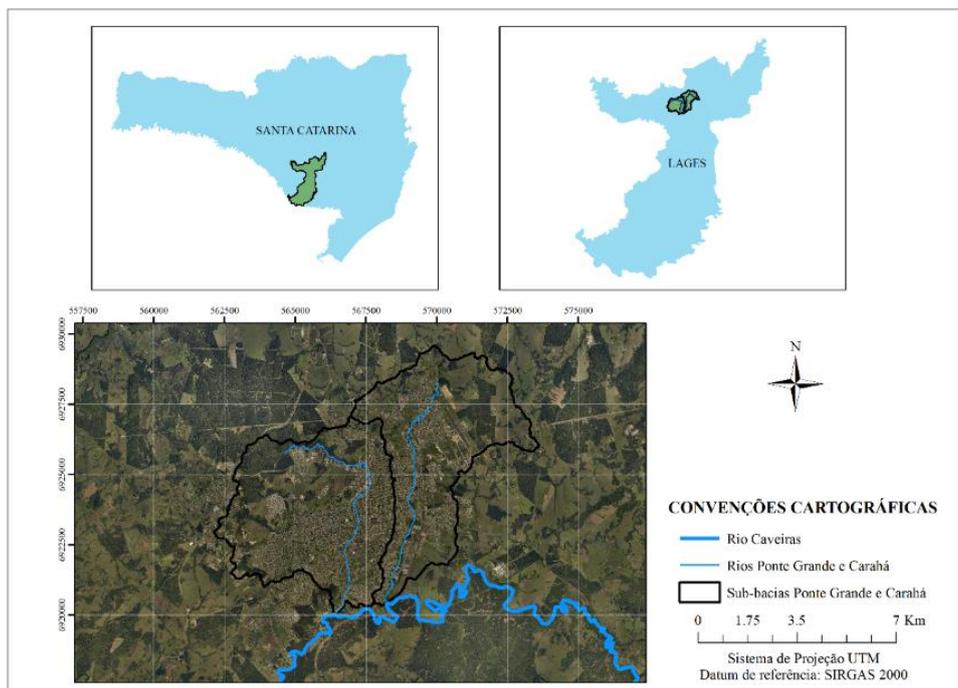


Figura 1 – Sub-bacias urbanas e manchas de inundação dos anos de 2005, 2008 e 2011 em Lages (SC).

A vazão observada diária na estação fluviométrica Ponte Velha caracteriza a resposta de todo o sistema de sub-bacias e permite a transferência de vazão para as sub-bacias urbanas à montante, de acordo com a estrutura conceitual do HEC-HMS (Figura 2) para o sistema Caveiras Montante 1. Da mesma forma, as duas sub-bacias urbanas em que ocorrem inundações, Ponte Grande e Carahá, fazem parte deste sistema com seus próprios elementos hidrológicamente conectados.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

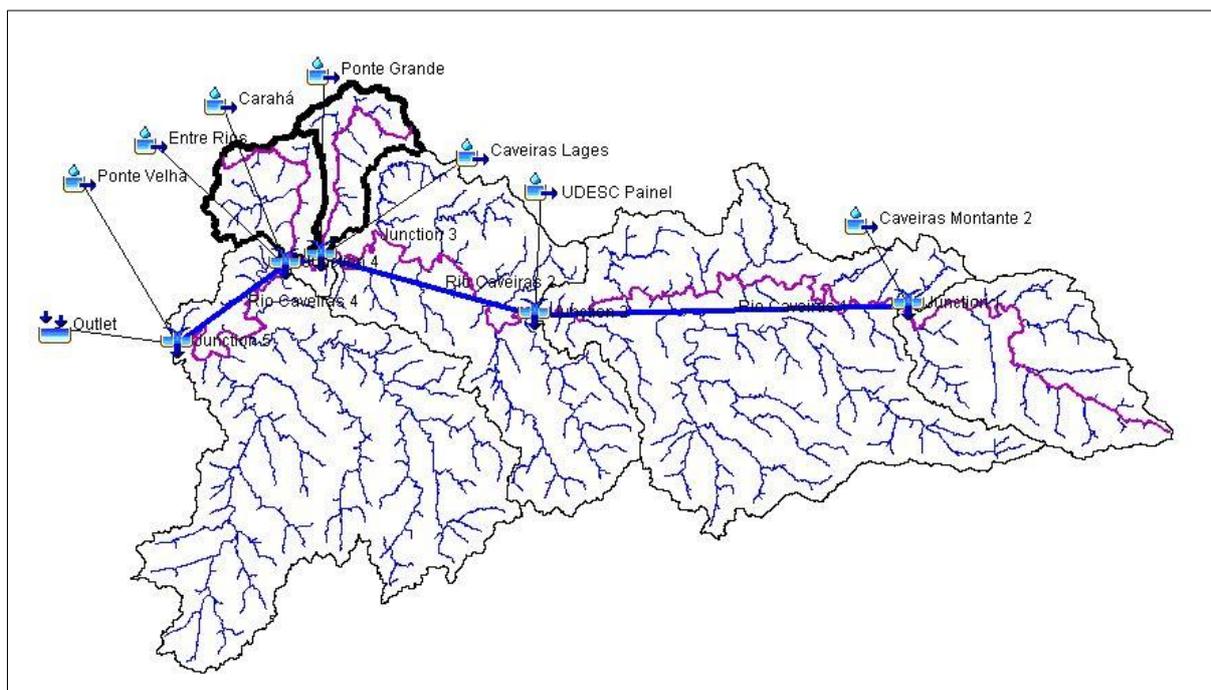


Figura 2 – Estrutura conceitual das sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1 na interface do HEC-HMS.

Os métodos de cálculo escolhidos para simulação dos processos hidrológicos no modelo foram definidos de acordo com a disponibilidade de dados para os parâmetros específicos, sendo determinados para cada sub-bacia ou trecho de canal que fazem parte do sistema. O método para cálculo da chuva efetiva foi o da Curva Número do *Soil Conservation Service* – SCS (atual NRCS) ou SCS-CN, para a transformação chuva-vazão foi o Hidrograma Unitário da SCS ou SCS-UH, para separação do escoamento de base foi a Recessão Exponencial e para propagação de onda nos canais foi o *Muskingum-Cunge*.

Os três eventos selecionados são amostras representativas dos eventos extremos que geralmente causam inundações em Lages. Sua distribuição espacial pode ser avaliada de acordo com a figura 2. A precipitação acumulada diária tem seus valores estabelecidos por meio do método de polígonos de Thiessen, que medem o peso de cada uma das cinco estações pluviométricas localizadas no sistema Caveiras Montante 1 (Bocaina do Sul, Lages, Coxilha Rica, Painel e Vila Canoas). Após a ponderação por polígonos de Thiessen, os volumes acumulados de chuva para as duas sub-bacias urbanas são apenas da estação de Lages, monitorada pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e operadas pela EPAGRI / CIRAM (Centro de Informações de Recursos ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina).

Quanto à distribuição espacial dos eventos, em 2005 e 2011 esta foi espalhada por todo o sistema Caveiras Montante 1, enquanto que em 2008 foi concentrada nas sub-bacias urbanas apenas. A caracterização detalhada dos eventos observados, de acordo com Cardoso *et al.* (2014) e Padilha (2017), encontram-se na Tabela 1.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

Tabela 1 – Dados coletados dos eventos selecionados.

Eventos	Acumulado (mm)	Duração (h)	Intensidade média (mm.h ⁻¹)	Tempo de Retorno (anos)
18 e 19/05/2005	183,6	32	5,74	384
15 e 16/02/2008	104,0	4,5	23,11	29
08 e 09/08/2011	123,6	35	3,53	22

Para avaliação dos resultados do modelo, utilizou-se o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ou NSE (NASH e SUTCLIFFE, 1970), indicando quanto maior for o índice (de $-\infty$ para 1), melhor a qualidade da representação (Eq. 1), ou seja, da comparação entre os dados simulados e observados. Indicado para vazões extremas (KRAUSE *et al.*, 2005), explica-se que é eficiente devido à normalização da variância dos dados observados. Portanto, o uso do índice de NSE para avaliar a qualidade do desempenho do modelo HEC-HMS em três eventos extremos isolados se adequa ao escopo deste trabalho.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_i (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

onde, \bar{Q}_{obs} é a vazão média das séries históricas observadas que compõem todo o período de simulação, Q_{obs} é a vazão observada em um determinado período de tempo, e Q_{sim} é a vazão simulada num determinado período de tempo.

Além da avaliação da eficiência do modelo, outros índices para a análise da representação do modelo foram a vazão de pico e o volume residual, que representa a diferença entre o volume observado e o volume simulado resultante do escoamento superficial no processo de calibração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os períodos de calibração e testes adotados do modelo, para alcançar assim uma simulação o mais próximo possível da realidade, foram alternados entre os três eventos considerados, buscando permitir discussões sobre as diferenças entre os mesmos. A Tabela 2 apresenta o índice de NSE e o volume residual absoluto entre os eventos calibrados e os períodos de teste na estação fluviométrica Ponte Velha. Em negrito, encontram-se os eventos onde foi realizada a calibração, o que significa que eles têm os melhores resultados.

Em seguida, com resultados considerados aceitáveis (KRAUSE *et al.*, 2005) para os resultados na estação fluviométrica Ponte Velha, deu-se maior ênfase para as saídas do modelo HEC-HMS para as outras sub-bacias do sistema sem dados monitorados, em especial, a transferência de vazões para as sub-bacias urbanas Ponte Grande e Carahá (Figura 3) durante os períodos calibrados.

Tabela 2 – Índice de NSE e volume residual para períodos de calibração e teste na estação fluviométrica Ponte Velha.

Eventos de calibração	Nash-Sutcliffe (NSE)			Volume Residual (m ³)		
	Testes			Testes		
	2005	2008	2011	2005	2008	2011
2005	0,965	0,025	0,258	-8,95 x 10⁵	-9,01 x 10 ⁶	7,43 x 10 ⁷
2008	0,131	0,906	0,411	1,90 x 10 ⁸	100,00	2,55 x 10 ⁷
2011	0,594	0,625	0,725	1,10 x 10 ⁸	-3,72 x 10 ⁶	900,00

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

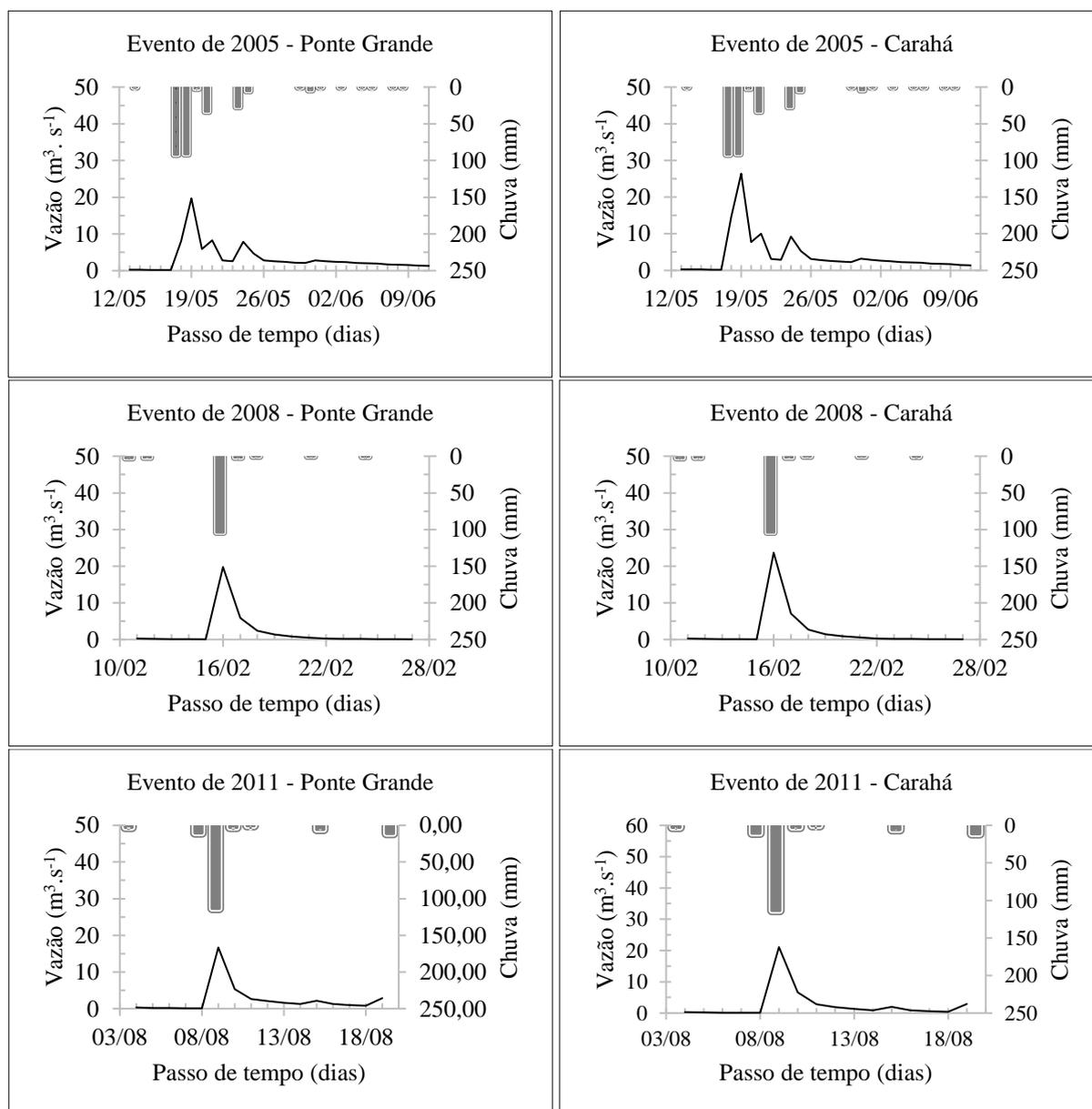


Figura 3 – Hidrogramas calculados para as sub-bacias Ponte Grande e Carahá nos eventos de 2005, 2008 e 2011.

Com base na análise dos hidrogramas apresentados, a Tabela 3 mostra uma síntese dos resultados calculados com o modelo HEC-HMS, destacando o volume de escoamento superficial e vazão de pico para cada evento, indicando o comportamento hidrológico dessas sub-bacias durante o período dos eventos.



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

Tabela 3 – Volume e vazão de pico para as sub-bacias urbanas durante os eventos de 2005, 2008 e 2011.

Variável	Saídas HEC-HMS		
	Pico do evento	Ponte Grande	Carahá
Volume (m ³)	19/05/2005	2,94 x 10 ⁶	4,25 x 10 ⁶
	16/02/2008	2,30 x 10 ⁶	2,75 x 10 ⁶
	09/08/2011	1,93 x 10 ⁶	2,45 x 10 ⁶
Vazão de pico (m ³ .s ⁻¹)	19/05/2005	19,7	26,4
	16/02/2008	19,8	23,7
	09/08/2011	16,7	21,1

Em relação ao volume de água nas sub-bacias urbanas, que é o volume de chuva efetiva que escoia nas sub-bacias, os mesmos ocorrem de acordo com a severidade dos eventos. Quanto aos picos, na sub-bacia Ponte Grande, eles não seguem a escala de severidade, pois é um resultado mais sensível à otimização específica dos parâmetros da bacia hidrográfica. Diferentemente, na sub-bacia Carahá segue o mesmo padrão de crescimento que o volume, o que significa o crescimento da severidade do evento, deve-se à maior área impermeável expressa nos parâmetros otimizados.

Por fim, todos os eventos alcançaram índices de NSE aceitáveis e respectivos volumes residuais na otimização dos parâmetros para representação dos eventos que causaram inundação, proporcionando valores de vazão de pico e volume de escoamento superficial que podem ser utilizados para estudos técnicos e pesquisas futuras. Além disso, a modelagem hidrológica orientada por eventos relacionada com manchas de inundação mapeadas pode ser utilizada, por meio de modelos hidrodinâmicos, para previsões de propagação de desastres por inundação na cidade de Lages.

4. CONCLUSÕES

A discussão dos volumes de escoamento e vazão de pico do hidrograma puderam ajudar na avaliação dos mecanismos que geram inundação. Pôde-se realizar a transferência de vazões de jusante para montante a fim de estimar dados hidrológicos em bacias sem monitoramento e com ocorrência de inundações. Assim, a recomendação de monitorar variáveis como precipitação e vazão para a aplicação de técnicas de modelagem hidrológica para auxílio na tomada de decisão frente a desastres ambientais por inundação, torna-se imprescindível com base no trabalho apresentado.

O suporte científico, por meio da modelagem hidrológica, representam informações prévias para gerenciamento de recursos hídricos e aumento da prevenção e mitigação de impactos. Com base na estrutura conceitual de sub-bacias do sistema Caveiras Montante 1, foi possível melhorar o conhecimento sobre o comportamento hidrológico da região, o que significa que a resposta das sub-bacias durante a modelagem orientada por eventos podem ter seu uso experimental na modelagem hidrodinâmica para estimativa de manchas de inundação em pesquisas futuras.



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

REFERÊNCIAS

CARDOSO, C.O.; BERTOL, I.; SOCCOL, O.J.; SAMPAIO, C.A. de P. (2014). Generation of Intensity Duration Frequency Curves and Intensity Temporal Variability Pattern of Intense Rainfall for Lages/SC. *Braz. Arch. of Biol. and Technol.* 57(2), p. 274-283.

CASTRONOVA, M.; GOODALL, J.L. (2013). Simulating watersheds using loosely integrated model components: Evaluation of computational scaling using OpenMI. *Environ. Model. and Softw.* 39, p. 304-313.

CORDEIRO, M. T. A.; RAFAELI NETO, S. L (2015). Análise do comportamento de sistemas urbanos por meio de componentes de sistemas hidrológicos. *GEOUSP – Espaço e Tempo*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 142-155.

GUL, G.O; HARMANCIOLU, N.; GUL, A. (2009). A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. *Nat. Hazard.* 54(2), p. 245-260.

HALWATURA, D.; NAJJIM, M.M.M (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environ. Model. and Softw.* 46, 155-162.

KNEBL, M.; YANG, Z.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D.R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio river basin summer 2002 storm event. *J. of Environ. Manag.* 75(4), p. 325-336.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5, p. 89-97.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, p. 282-290.

PADILHA, V. L. (2017). Modelagem hidrológica orientada por eventos de inundação em Lages/SC. 2017. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.

RAFAELI NETO, S.L.R.; RODRIGUES, M. (2000). A taxonomy of strategies for developing spatial decision support systems. In: *Systems development methods for databases, enterprise, modelling, and workflow management*. Org. por W. Wojtkowski, W. G. Wojtkowski, S. Wrycza, J. Zupancic (Eds.). Kluwer Academic/Plenum, New York pp. 139-155.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. (2012). Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *J. of Hydrol.* 458-459, p. 68-86.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Technical Reference Manual. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis.