

INFERÊNCIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL EFETIVA DE RIOS A PARTIR DO TEMPO DE VIAGEM DE CHEIAS

Pedro Frediani Jardim^{1} & Walter Collischonn² & Juan Martin Bravo³ & Ayan Santos Fleischmann⁴ & Vinícius Alencar Siqueira⁵ & Fernando Mainardi Fan⁶*

Resumo – A obtenção de parâmetros da geometria hidráulica de rios consiste em uma parte importante de estudos em hidrologia. Atualmente estas informações podem ser obtidas de maneiras diversas, mas nem sempre são capazes de representar o comportamento hidráulico do sistema. A importância informações de qualidade se reflete na melhora da modelagem hidrológica e na compreensão da forma como certos eventos ocorrem. Em locais onde há enchentes tais parâmetros adquirem uma importância ainda maior pela sua capacidade de definir o comportamento de ondas de cheia. Este trabalho apresenta uma metodologia capaz de estimar uma única geometria efetiva que permite a obtenção de celeridades muito próximas daquelas observadas. Para isto é proposta a utilização do modelo de propagação inercial com hidrogramas sintéticos de entrada associado ao algoritmo SCE-UA alterando os parâmetros desta geometria a fim de otimizá-los em função da minimização de erro entre celeridade calculada e observada. O método proposto foi avaliado em um trecho do rio Piquiri - PR onde existem dados horários de vazão a montante e jusante. Foi possível convergir para um bom resultado da função objetivo além de retornar valores de celeridade muito próximos aos observados e de uma calha condizente com os dados disponíveis do trecho.

Palavras-Chave – Seção transversal efetiva, celeridade, otimização.

INFERENCE OF RIVERS EFFECTIVE CROSS SECTION FROM FLOOD WAVES TRAVEL TIME

Abstract – Obtaining parameters of hydraulic geometry of rivers consists an important part of hydrological studies. Currently this information can be obtained in several ways without necessarily representing the hydraulic behavior of the system. The importance quality information is reflected in the improvement of hydrological modeling and the understanding of how certain events occur. In places where there are floods such parameters acquire an even greater importance for their ability to define the behavior of flood waves. This work presents a methodology capable of estimating a single effective geometry that allows the achievement of celerities very close to those observed. For this it is proposed the use of the inertial propagation model with synthetic input hydrograms associated with the SCE-UA algorithm that changes the parameters of this geometry in order to optimize them minimizing the error between calculated and observed celerity. The proposed method was evaluated in a section of the Piquiri river in Paraná state where upstream and downstream flow data exist. The method was able to converge to a good result of the objective function in addition to returning values of celerity very close to those observed and of a channel compatible with the available data of the section.

Keywords – Effective cross section, celerity, optimization.

^{1*} Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, pedro.fjar@gmail.com.

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, collischonn@iph.ufrgs.br.

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, jumabra@iph.ufrgs.br.

⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, ayan.fleischmann@gmail.com.

⁵ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, vinisiquera@gmail.com.

⁶ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, fernando.fan@ufrgs.br.

INTRODUÇÃO

A melhor compreensão e possibilidade de predição de inundações e enchentes assumiu um papel de grande importância à medida que a sociedade foi se desenvolvendo ao longo das margens de rios. Podendo causar efeitos catastróficos, de acordo com dados do EM-DAT apresentados por Vestena (2009), de 1970 a 2005 só no Brasil foram ao menos 13.115.144 pessoas afetadas por enchentes ou inundações, sendo 1.206.138 o número de desabrigados e 5.814 mortos.

Neste contexto torna-se fundamental entender como ocorrem e, mais do que isso, ser capaz de antever estes acontecimentos a fim de instalar sistemas de alerta e criar planos emergenciais. Para isto a representatividade adequada da velocidade de propagação das ondas de cheia, também conhecida como celeridade (C), torna-se um fator crucial para prever quando uma determinada região poderá ser afetada.

Apesar da tendência a aumentar com o incremento da vazão (Q), Wong e Laurenson (1983) demonstraram como, no momento em que há extravasamento da água para fora da calha do rio em uma planície de inundação, ocorre o decréscimo da celeridade com o aumento da vazão. Já onde não há planície de inundação a celeridade tende sempre a aumentar com a vazão. No trabalho de Sriwongsitanon *et al.* (1998) também é mostrada a dependência da evolução da celeridade com a forma da seção transversal. Além disso, foi mostrado por Fleischmann *et al.* (2016) como a celeridade tem a capacidade de alterar e definir como será a forma de um hidrograma de cheia, sendo portanto de grande importância a relação $C \times Q$ em estudos hidrológicos, funcionando como uma assinatura do comportamento hidrodinâmico de um trecho estudado.

Assim, uma vez que a velocidade de propagação da onda de cheia depende das características da seção transversal na qual está inserida é de se esperar que possamos alterar as características desta de forma a buscar que a onda chegue a determinado ponto no intervalo de tempo que desejamos em uma simulação, obtendo assim uma geometria hidráulica efetiva para modelagem. Já para uma série de vazões torna-se mais difícil obter exatamente aos mesmos valores de celeridade observados, porém ainda assim pode-se tentar encontrar uma calha que melhor aproxime celeridades calculadas das observadas.

Desta forma o presente trabalho busca propor uma metodologia capaz de fornecer uma geometria efetiva com a qual seja possível representar satisfatoriamente o comportamento e valores de celeridades observadas para um determinado trecho de rio. Também é apresentado um estudo de caso para validação do método em um trecho do rio Piquiri - PR.

METODOLOGIA

Com nos conceitos apresentados o método proposto neste trabalho visa minimizar a diferença entre celeridades observadas daquelas calculadas. Para isto o método inercial de propagação de vazões existente no modelo de transformação chuva-vazão MGB-IPH (Pontes *et al.*, 2017) foi adaptado para funcionar puramente com o módulo da propagação inercial e inserção de hidrogramas de entrada em um ponto a montante de um trecho de rio. Uma vez propagadas as vazões, são calculadas as celeridades das ondas de cheia com base na diferença entre o intervalo de tempo de ocorrência da maior vazão na entrada e a maior de saída no ponto a jusante do trecho observado.

A forma da calha proposta bem como os parâmetros que a definem são mostrados na Figura 1. Nesta existe uma calha retangular de largura W , altura de calha cheia H , um ângulo de abertura “ a ” e ainda um número de Manning (n) igual para toda a geometria. Assim propõem-se alterar estes

quatro parâmetros com uso do algoritmo SCE-UA idealizado por Duan (1991) a fim de aproximar celeridades calculadas das observadas.

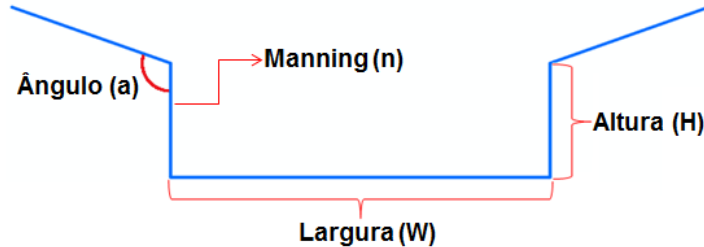


Figura 1 – Seção proposta, com calha retangular e extravasamento.

Modelo Inercial

Recentemente foi incorporado ao modelo MGB-IPH o modelo de propagação inercial (Bates *et al.*, 2010) e este tem apresentado resultados muito satisfatórios nos testes realizados, em particular em regiões com planícies (eg. Pontes *et al.*, 2017). O método, de forma intermediária entre o método de Muskingun-Cunge e o hidrodinâmico completo, apresenta uma aproximação das equações de Saint Venant, desprezando apenas o termo de inércia advectiva na equação dinâmica uma vez que este geralmente apresenta valores desprezíveis frente aos demais (Moussa e Bocquillon, 1996).

Dentre as demais considerações utilizadas para formulação do método de propagação tal qual implementado no modelo MGB-IPH cabe destacar a aproximação do raio hidráulico pela profundidade. Isto é possível já que normalmente em seções naturais de grandes rios a largura é muito maior do que a profundidade. Assim, após uma série de formulações detalhadas nos trabalhos de Pontes *et al.* (2015), chegasse à Equação 1. Nela foram destacados os parâmetros que dependem da geometria da calha do rio bem como o coeficiente de Manning.

$$Q_i^{t+\Delta t} = \left(\frac{((Q_i^t) - g \cdot W \cdot \Delta t \cdot (hflow_i \cdot Sflow_i))}{1 + \left(\frac{g \cdot \Delta t \cdot hflow_i \cdot (Q_i^t \cdot n^2)}{W \cdot (hflow_i)^2} \right)} \right) \quad (1)$$

Onde Q é a vazão, W é a largura da calha do rio, n é o coeficiente de Manning, Sflow é a declividade da linha d'água e hflow é a profundidade na seção transversal localizada entre um trecho simulado de montante i e outro a jusante i+1. Já o tamanho do passo de tempo é definido de acordo com a condição de Courant-Friedrichs-L Levy (CFL) a fim de evitar instabilidades.

Modelo SCE-UA

O algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*) foi criado por Duan (1991) como uma combinação da estratégia de busca do método Simplex (Nelder e Mead, 1965), com conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva e mistura de complexos. O algoritmo opera com uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de uma única função, através de sucessivas iterações e avaliações da função-objetivo. Este algoritmo tem se mostrado eficiente na localização de ótimos globais em modelos chuva-vazão como o *Tank Model* conforme descrito por Diniz (1999).

Neste trabalho é proposta a variação dos parâmetros de largura, profundidade, ângulo de abertura fora da calha e número de Manning até que a soma dos erros quadrados entre celeridade

observada e calculada seja mínimo. Esta é a função objetivo do método SCE-UA que chama a rotina de propagação inercial para o cálculo da celeridade.

Na etapa inicial do SCE-UA é gerada, de forma aleatória, uma população de valores no espaço de busca para os parâmetros analisados. Esta população é separada em conjuntos (chamados de complexos) que evoluem baseados em um processo de reprodução baseado no método Simplex no qual novas soluções candidatas são criadas. O processo de geração de novas soluções candidatas se repete até que um critério de parada seja atendido e o ótimo global seja obtido.

Todos os passos executados pelo algoritmo são descritos por Duan (1991) e Duan et al. (1992). Diniz (1999) ainda apresenta um exemplo de aplicação do SCE-UA para calibração da Bacia do Rio Mamuaba com a utilização do modelo *Tank Model* bem como as etapas necessárias para implementação do método e suas particularidades.

ESTUDO DE CASO PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO

Para avaliar a aplicabilidade e o desempenho do método desenvolvido neste trabalho foi selecionado um trecho de rio onde pudessem ser extraídos valores de celeridade de ondas de cheias com pelo menos uma hora de certeza. Assim seriam necessários ao menos dois postos telemétricos definindo um trecho de rio.

Desta forma foi escolhido o rio Piquiri, afluente do rio Paraná, entre as estações fluviométricas de Novo Porto 2, no par de coordenadas -24:24:15 e -53:9:27, e Balsa Santa Maria localizada na latitude -24:9:58 e longitude -53:44:9. A primeira tem área de drenagem de aproximadamente 12100 km² enquanto que a segunda possui aproximadamente 20900km² de acordo com os dados da ANA- Agência Nacional de Águas. A Figura 2 mostra a localização do trecho estudado.

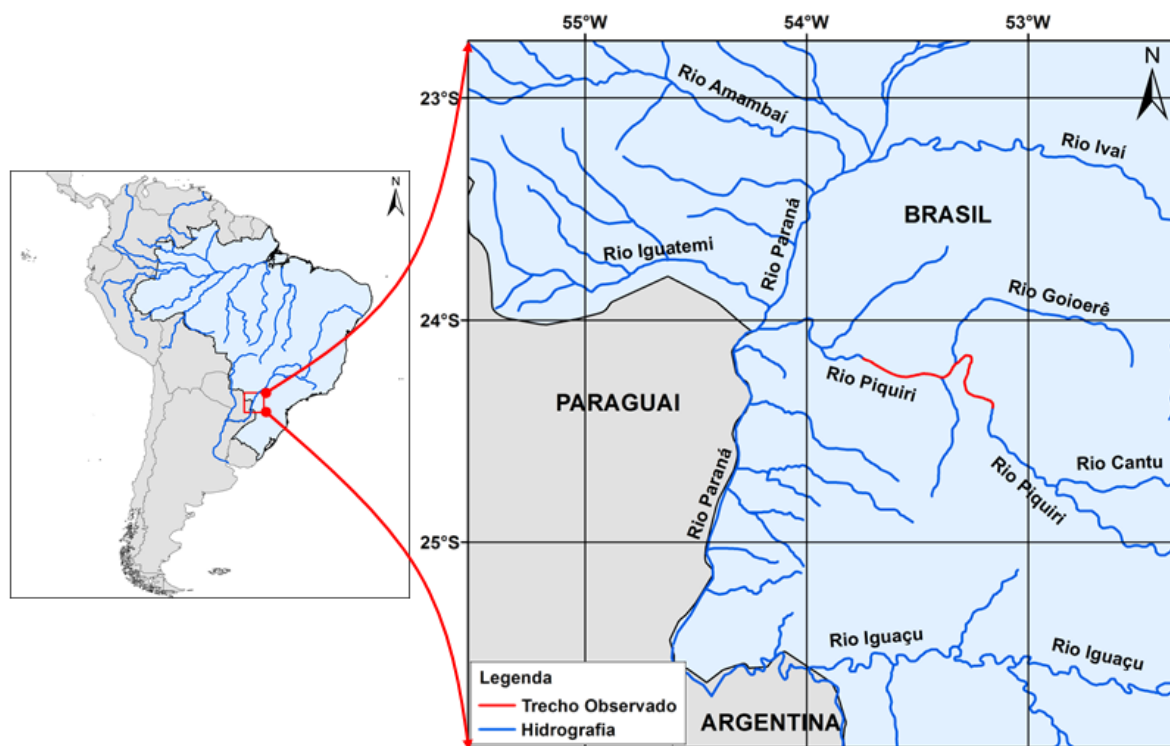


Figura 2 – Localização do rio Piquiri e do seu trecho estudado.

A partir da avaliação entre o tempo de deslocamento de 40 picos de cheias entre as estações e sabendo que a distância entre elas é de aproximadamente 115km foi possível calcular a celeridade de cada vazão de pico apenas dividindo-se a distância pelo tempo. A Figura 3 mostra as celeridades calculadas versus suas respectivas vazões em Porto Novo 2. É possível reparar como o comportamento segue o observado em locais onde há inundação conforme preconizado por Wong e Laurenson (1983), nos quais a celeridade aumenta até o ponto em que ocorre o extravasamento da calha e, a partir daí, passa a diminuir com a vazão até que seja encontrado um novo limitador topográfico.

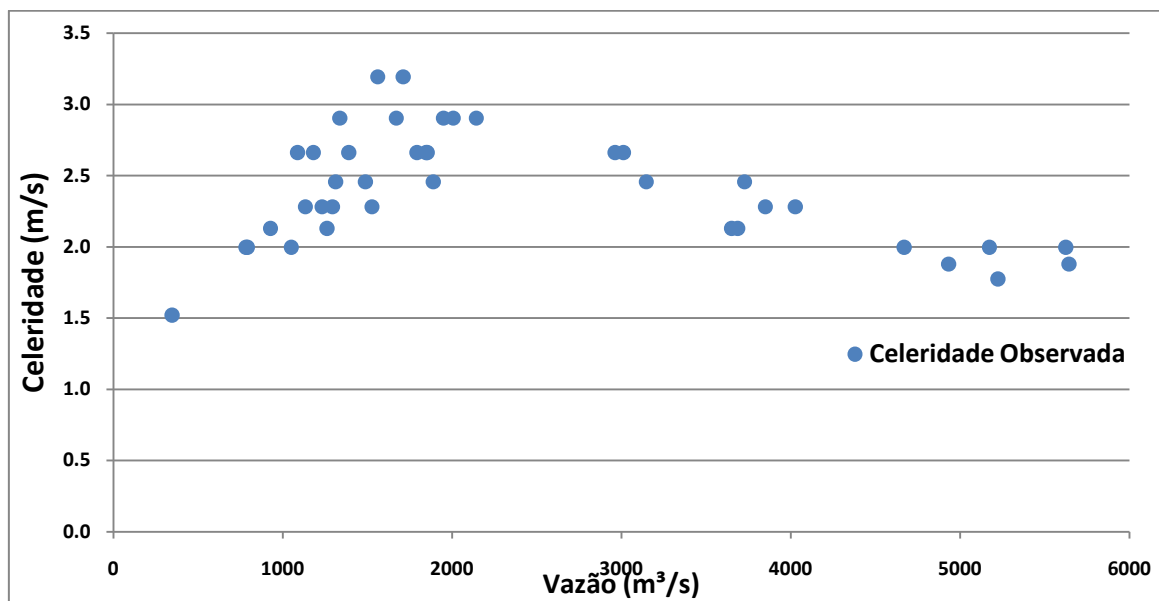


Figura 3 – Celeridades observadas para cada vazão de pico analisada.

Assim, através da equação 2 de Todini (2007), foram gerados 40 hidrogramas sintéticos com picos (Q_{pico}) equivalentes àqueles observados no cálculo das celeridades para serem propagados com o modelo inercial. Na Eq. 2 foram ainda utilizados um tempo de ascensão T_p igual a 120h, vazão de base (Q_{base}) em Porto Novo 2 de 37.65 m³/s e um beta igual à 30. Os hidrogramas horários foram ainda subdivididos linearmente em intervalos de 15 em 15 minutos a fim de possibilitar maior sensibilidade na análise do tempo de propagação da cheia e, portanto, na celeridade calculada.

$$Q_t = Q_{base} + (Q_{pico} - Q_{base}) \cdot \left[\frac{t}{T_p} \cdot e^{(1 - \frac{t}{T_p})} \right]^\beta \quad (2)$$

A fim de evitar eventuais instabilidades numéricas e refinar a modelagem o trecho avaliado foi subdividido em 23 subtrechos de 5km de extensão sendo que para cada um deles retirou-se a declividade da linha d'água do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução espacial de 30 metros conforme indicados na Figura 4. Por fim, no sub-trecho 12 foi inserida uma vazão constante igual a 50 m³/s equivalente à vazão média do rio Goioerê que ali deságua.

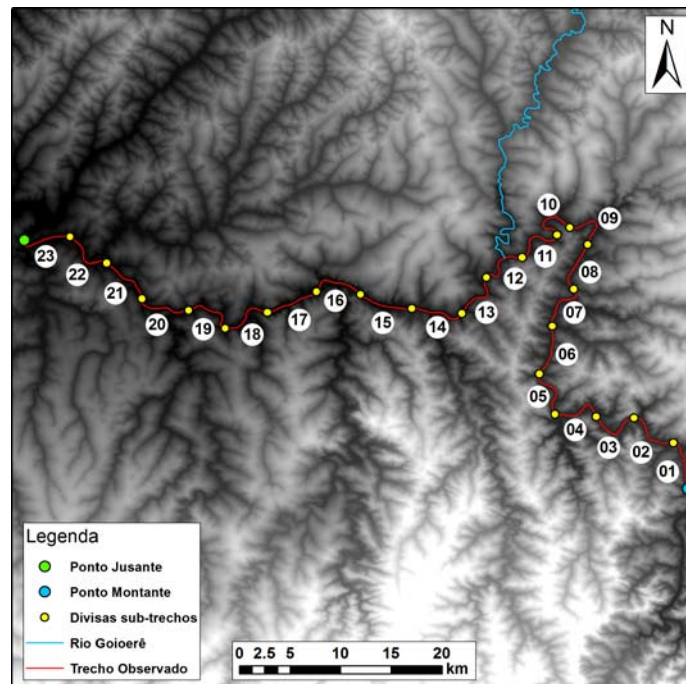


Figura 4 – Subdivisão do trecho estudado sobre o MDE do SRTM de 30 metros.

Desta forma foi possível rodar o algoritmo SCE-UA realizando 200 iterações até a parada e utilizando 8 complexos. A cada iteração o modelo propagava cada um dos 40 hidrogramas de entrada, comparava a celeridade obtida à observada e então alterava os parâmetros da calha da Figura 1 para então iniciar uma nova interação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao fim de diversas rodadas do modelo obteve-se o mínimo global entre a soma das diferenças ao quadrado entre celeridades calculadas e observadas de 1.55. As celeridades obtidas podem ser visualizadas na Figura 5. É possível observar como a distribuição ficou semelhante à observada, representando o efeito da planície de inundação, além de os valores calculados em si também terem ficado muito próximos aos observados.

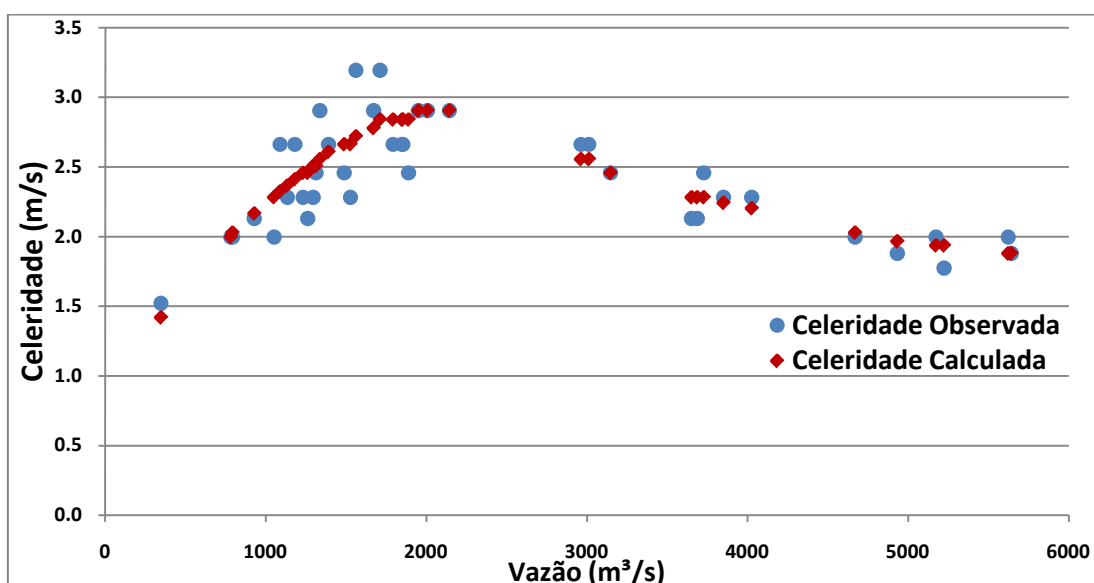


Figura 5 – Celeridades observadas e calculadas para cada vazão de pico analisada.

A Tabela 1 mostra os resultados finais dos parâmetros otimizados pelo método SCE-UA. Nela a largura é comparada à divisão da área da lâmina d'água pelo comprimento total do trecho enquanto que a altura da calha foi comparada à maior profundidade obtida nos dados de resumo de descarga da estação Porto Novo 2. Nota-se que, apesar do grande intervalo em que se permitiu os parâmetros variarem, os resultados convergiram para valores muito próximos aos observados. Além disso, o valor de 1.64° de abertura (a) da geometria proposta representa uma planície de inundação, como era esperado pelo comportamento da celeridade.

Tabela 1. Resumo dos resultados encontrados para o trecho simulado.

Parâmetro	Largura – W(m)	Altura – H(m)	Ângulo - a	Manning - n
Observado	189.3	6.65	-	-
Intervalo de busca	20 – 1000	0.5 - 20	$0^\circ - 90^\circ$	0.025 – 0.045
Calculado	180.8	7.01	1.64°	0.0338

Desta forma obteve-se o que se pode considerar uma geometria hidráulica efetiva, capaz de representar o comportamento médio do trecho analisado através da propagação inercial. Desta forma pode-se estudar a aplicação do método em outros trechos, com comportamento similar ou não, para validação do método. Uma limitação atual da metodologia proposta é a necessidade de postos fluviométricos para medição da celeridade. Deve-se também estudar a influência de contribuições laterais no sistema para atestar seu efeito e reprodutibilidade dentro da modelagem.

CONCLUSÕES

A importância do conhecimento do tempo de propagação de ondas de cheia tem caráter social, econômico e até mesmo ecológico. Tão importante quanto saber a magnitude daquelas é saber sua velocidade de deslocamento sendo fundamental para a criação de sistemas de alerta contra inundações e enchentes que visem prevenir ou minimizar danos pessoais e materiais. Simultaneamente o desenvolvimento científico e tecnológico permite hoje, através da modelagem hidrológica, simular o comportamento de ondas de cheia desde que subsidiado por informações a respeito do rio estudado.

Desta forma o presente trabalho propôs uma metodologia capaz de fornecer uma geometria efetiva de calha na qual foi possível representar com sucesso as celeridades de diversas ondas de cheia e de diferentes magnitudes. Para isto a propagação inercial se mostrou eficiente e capaz de simular o efeito de uma planície de inundação sobre a velocidade da cheia.

O método SCE-UA conseguiu convergir os parâmetros da calha de forma que estes não apenas ficaram muito próximos aos valores observados como também foi representada uma planície de inundação através do ângulo de abertura fora da calha, o que evidencia seu efeito sobre o tempo de deslocamento da onda. Assim os resultados encontrados são animadores e motivam testar a metodologia proposta em outros trechos de rios onde não existam dados in situ de profundidade a fim de avaliar a eficácia do método e suas possíveis limitações.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – e ao IPH/UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS – pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1), pp. 33-45.
- DINIZ, L. S. (1999). Calibragem de modelos hidrológicos. In *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 151 – 164
- DUAN, Q. (1991). A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models. The University of Arizona. Tese de doutorado.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), pp. 1015-1031.
- MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. (1996). Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology*, 186(1-4), pp. 1-30.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4), pp. 308-313.
- PONTES, P. R. M. ; COLLISCHONN, W. ; FAN, F. M. ; PAIVA, R. C. D. ; BUARQUE, D. C. (2015). Modelagem Hidrológica e Hidráulica de Grande Escala com Propagação Inercial de Vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20, pp. 888-904.
- PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; DE PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 94, pp. 1-20.
- SRIWONGSITANON, N.; J.E. BALL; I. CORDERY (1998), An investigation of the relationship between the flood wave speed and parameters in runoff routing models, *Hydrological Sciences Journal*, 43(2), pp. 197-213.
- TODINI, E. (2007). A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(3), pp. 1549-1592.
- VESTENA, L. R. (2009). A importância da hidrologia na prevenção e mitigação de desastres naturais The importance of hydrology in the prevention and mitigation of natural disasters. *AMBIÊNCIA*, 4(1), pp. 151-162.
- WONG, T.; LAURENSEN E. (1983), Wave speed-discharge relations in natural channels, *Water Resour. Res.*, 19(3), pp. 701–706.