



## COMPREENDENDO ONDAS DE CHEIA: ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE CELERIDADE E VAZÃO EM RIOS BRASILEIROS

*Aline Meyer*<sup>1\*</sup> & *Ayan Fleischmann*<sup>2</sup> & *Walter Collischonn*<sup>3</sup> & *Rodrigo Paiva*<sup>4</sup>

**Resumo** - A velocidade de propagação da onda de cheia (celeridade) é um parâmetro importante em estudos hidrológicos, tais como modelagem hidrológica, sistemas de alerta ou definição da forma do hidrograma. Entretanto, estudos avaliando celeridade em rios brasileiros são escassos. O presente estudo analisa empiricamente o comportamento da celeridade para quatro trechos de rios brasileiros – Piquiri, Iguaçu, Cuiabá e Miranda, com base em dois métodos: (i) estimativa da celeridade em escala de trecho, com base no tempo de viagem da onda de cheia entre dois pontos; e (ii) estimativa em escala local, que considera a celeridade calculada como a derivada da vazão com relação à área em estações fluviométricas. Resultados indicam que em escala de trecho um padrão crescente da celeridade com a vazão foi identificado para o rio Iguaçu, que apresenta seção transversal bem definida, enquanto que comportamentos decrescentes foram identificados para rios com presença de planícies de inundação. Em escala local, foram identificados comportamentos crescentes em 7 estações fluviométricas, o que pode ser associado às medições serem realizadas em seções transversais bem definidas. O uso de seção transversal in-situ para cálculo da curva de celeridade x vazão mostrou-se um estimador insatisfatório para o comportamento médio da curva observado no trecho.

**Palavras-Chave** – celeridade; onda de cheia; propagação de vazões;

## UNDERSTANDING FLOOD WAVES: ANALYSIS OF THE RELATION BETWEEN CELERITY AND DISCHARGE IN BRAZILIAN RIVERS

**Abstract** - The flood wave speed (celerity) is a key parameter in hydrological studies, such as hydrologic modeling, forecasting systems and hydrograph skewness definition. Nonetheless, studies that evaluate celerity in Brazilian rivers are scarce. The current study aims to empirically analyze the behavior of celerity for four Brazilian river reaches – Piquiri, Iguaçu, Cuiabá and Miranda, based on two different methods: (i) estimative of celerity in a reach scale, based on the travel time of the flood wave between two gauging stations; and (ii) estimative of celerity in a local scale, which considers celerity as the derivative of discharge with respect to area at gauging stations. Results indicate that an increasing pattern of celerity with discharge was identified for Iguaçu, a river that presents regular cross sectional area, while decreasing patterns were identified in rivers that present floodplains. In a local scale, an increasing behavior of the celerity-discharge relation identifies in 7 gauging stations, which may be associated to discharge measurements being provided for locations without floodplains. The use of in-situ measurements of discharge to estimate celerity x discharge relations was shown to be insufficient to estimate the behavior of the pattern that has been identified in a reach scale.

**Keywords** – celerity; flood wave; flood routing;

<sup>1\*</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, [alinemey@gmail.com](mailto:alinemey@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, [ayan.fleischmann@gmail.com](mailto:ayan.fleischmann@gmail.com)

<sup>3</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, [collischonn@iph.ufrgs.br](mailto:collischonn@iph.ufrgs.br)

<sup>4</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, [rodrigocdpaiva@gmail.com](mailto:rodrigocdpaiva@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

Cheias e inundações são processos responsáveis por danos na ordem de 26 bilhões de dólares por ano no mundo inteiro, de 2000 a 2015 (EM-DAT, 2016). Soluções mais eficientes para controle de cheias podem estar associadas a um melhor entendimento científico dos processos hidrológicos envolvidos na propagação de ondas de cheia em rios (Di Baldassarre et al., 2012). Neste caso, o tempo de viagem da onda de cheia entre dois pontos de interesse surge como um importante parâmetro na gestão de recursos hídricos para controle de cheias, dado que a qualidade de simulações hidráulicas e hidrológicas dependem fortemente de uma correta estimativa desse parâmetro (Price, 1982), além de ser de extrema relevância para previsões empíricas da propagação de cheias.

Em termos hidráulicos, ondas de cheia são compostas por uma parcela cinemática e uma parcela dinâmica, sendo que há predominância de ondas cinemáticas sobre as dinâmicas no escoamento subcrítico (Lighthill & Whitam, 1955), ou seja, normalmente cheias em rios se comportam como cinemáticas. A velocidade de propagação da onda cinemática (celeridade) em rios naturais pode ser estimada através do tempo de viagem da onda de cheia que percorre uma distância “L”, entre dois pontos de interesse, de acordo com a Equação 1.

$$c = \frac{L}{t} \quad (1)$$

A análise do comportamento empírico da celeridade – estimada com a Equação 1 - de acordo com a variação da vazão foi estudada por diversos autores, como Price (1973), que apresenta curvas empíricas para rios britânicos, Wong & Laurenson (1983, 1984) para rios na Austrália, e Fleischmann et al. (2016), para o rio Piquiri, no Brasil. O principal padrão relatado por esses autores é um aumento da celeridade com a vazão, seguido de um decréscimo após o ponto de extravasamento de calha do rio, e um posterior leve aumento da celeridade com a vazão (Figura 1a).

Por outro lado, de acordo com a equação da continuidade, e considerando que a vazão em um rio é uma função apenas da área da seção transversal do rio, a celeridade pode ser estimada pela Equação 2, que geralmente é aplicada a seções transversais bem definidas dos rios.

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (2)$$

De acordo com a Equação (2), o aumento da vazão em rios de seção transversal constante leva a um comportamento crescente da celeridade com a vazão (Figura 1b). No entanto, existem rios com planícies de inundação, isto é, rios que apresentam aumento da seção transversal decorrente da chegada da onda de cheia onde o acréscimo de vazão é pequeno frente ao à área da seção, de modo que um comportamento decrescente da celeridade com a vazão é observado após extravasamento da calha do rio (Figura 1a). O efeito destes distintos padrões da curva celeridade x vazão influencia, por exemplo, a forma do hidrograma observado em rios (Fleischmann et al., 2016).

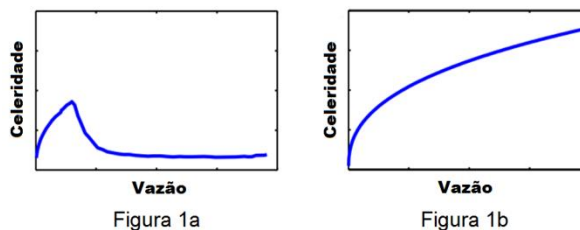


Figura 1 – Curvas de celeridade vs. vazão calculadas com a Equação (2) para rios com planícies de inundação (1a) e rios sem planícies de inundação (1b). Fonte: adaptado de Fleischmann et al., 2016.

Considerando a ausência na literatura de estudos que avaliem os valores de celeridade e a relação entre celeridade e vazão em rios brasileiros, e dado que essas análises são de importância para a melhor compreensão de ondas de cheias, o presente trabalho visa a analisar empiricamente o comportamento da celeridade com a vazão para quatro trechos de rios brasileiros: rio Piquiri, rio Iguaçu, rio Miranda e rio Cuiabá. Objetiva-se também estimar valores de celeridade para esses rios, através de dois métodos: (1) estimativa da celeridade em escala de trecho do rio, considerando o tempo de viagem da onda de cheia (Equação 1); e (2) estimativa local da celeridade nas estações fluviométricas através da aplicação da Equação 2.

## 2. MÉTODOS

A localização dos quatro trechos de rios analisados está apresentada na Figura 2. Os trechos são delimitados por estações fluviométricas com medições horárias de vazão, de acordo com a disponibilidade de dados fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). Os rios Piquiri e Iguaçu estão localizados no estado do Paraná, o rio Miranda no Mato Grosso do Sul, e o rio Cuiabá no Mato Grosso.

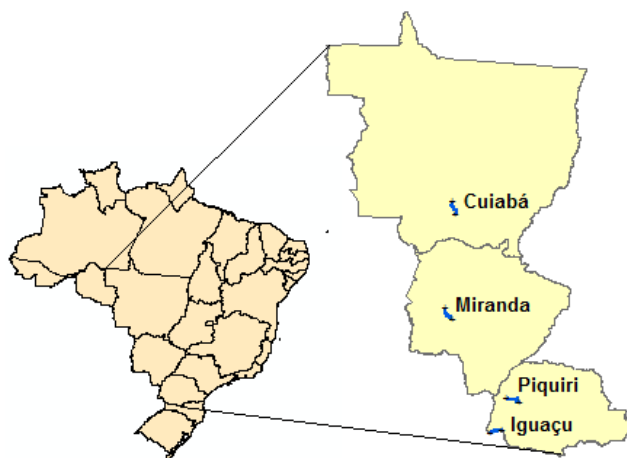


Figura 2 - Localização dos trechos de rios analisados.

Características morfológicas dos trechos são observadas na Figura 3 com imagens do satélite Sentinel-2, em composição RGB, bandas 04, 03 e 02, respectivamente, com 10m de resolução espacial. A máscara d'água foi delimitada através da classificação por NDWI (índice de diferença normalizada da água), que relaciona as bandas 03 e 08, isto é, verde e infravermelho próximo do satélite Sentinel-2. A Figura 3 ilustra a sinuosidade do rio Miranda, que está situado no Pantanal, bioma brasileiro característico por suas planícies de inundação. Os rios Piquiri e Cuiabá também apresentam extravasamento da calha em período de cheia, enquanto que o rio Iguaçu não apresenta características indicativas da presença de planícies de inundação. A Tabela 1 apresenta a caracterização das estações fluviométricas que definem os trechos (estação de montante e de jusante).

Os dois métodos utilizados para a estimativa da celeridade nos trechos de rios analisados são descritos nas próximas seções.

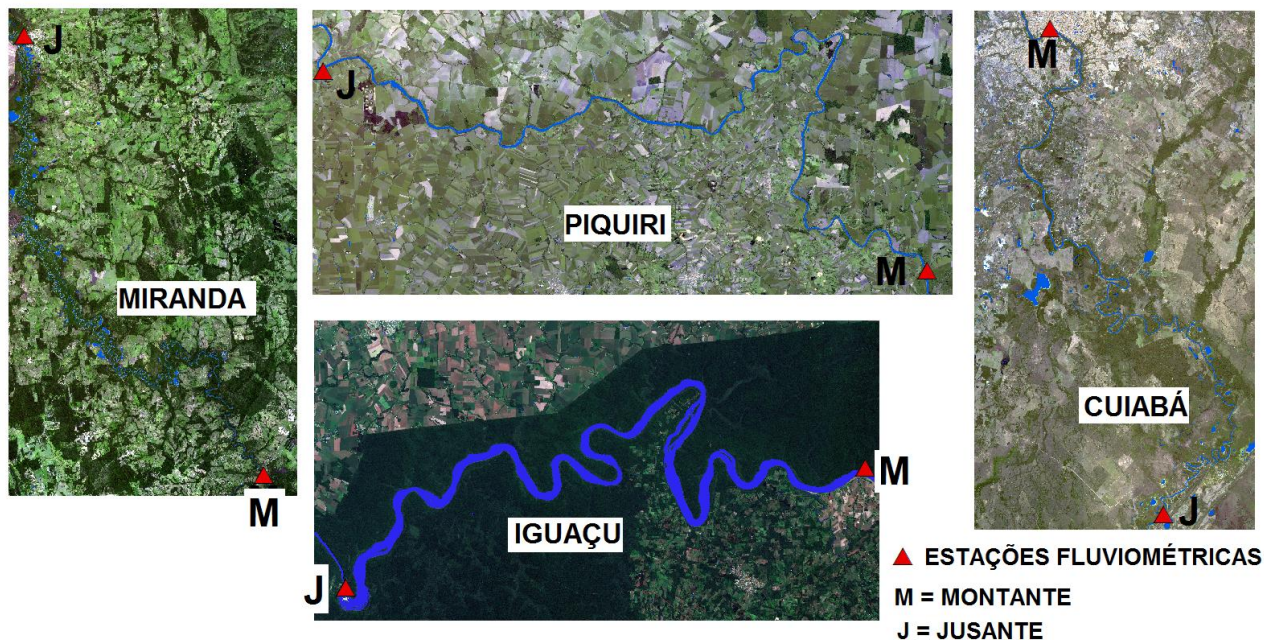


Figura 3 - Imagens do satélite Sentinel 2 em composição RGB para trechos analisados com máscara d'água delimitada por NDWI, e localização das estações utilizadas.

Tabela 1. Caracterização dos trechos de rios analisados. “M” designa estações de montante e “J” designa estações de jusante.

Trecho	L (km)	Estação fluviométrica	Código	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Latitude	Longitude
Piquiri	110	Novo Porto 2 (M)	64799500	12100	24°24'15"S	53°9'27"W
		Balsa Santa Maria (J)	64830000	20900	24°11'17"S	53°44'46"W
Iguaçu	110	UHE Itaipu Porto Capanema (M)	65987000	63900	25°35'04"S	53°55'59"W
		UHE Itaipu Hotel Cataratas (J)	65992500	67100	25°40'59"S	54°26'26"W
Miranda	177	Estrada MT-738 (M)	66900000	11600	20°45'43"S	56° 5'28"W
		Miranda (J)	66910000	15000	20°14'27"S	56°23'57"W
Cuiabá	134	Cuiabá (M)	66260001	23500	15°36'56"S	56° 6'31"W
		Barão de Melgaço (J)	66280000	28900	16°11'34"S	55°58'01"W

## 2.1. Estimativa da celeridade em escala de trecho

A celeridade ao longo dos trechos de rio foi estimada através da equação (1), em que o comprimento do trecho de rio ( $L$ ) é dividido pelo tempo de viagem da onda de cheia ( $t$ ). O comprimento do trecho de rio ( $L$ ) foi estimado através de imagens de satélite fornecidas pelo software Google Earth. O tempo de viagem da onda de cheia ( $t$ ) foi estimado considerando dados horários de vazão obtidos através de estações telemétricas, fornecidos pelo portal da Agência Nacional de Águas (ANA). A partir dos hidrogramas de dois postos fluviométricos subsequentes, foi extraída visualmente a informação do tempo de viagem dos picos dos hidrogramas que não apresentassem significativa variação de volume.

## 2.2. Estimativa da celeridade em escala local

Dados de vazão ( $Q$ ) e respectiva área molhada da seção transversal ( $A$ ) dos trechos de rio foram obtidos através dos resumos de descarga disponíveis no portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), para as mesmas estações fluviométricas analisadas pelo Método 2.1.

Curvas polinomiais de segundo grau foram ajustadas para as dispersões de  $A \times Q$ , de forma a gerar polinômios em termos de  $Q=f(A)$ . A seguir, a celeridade foi estimada através da Equação 2. A Figura 4 exemplifica esse procedimento para uma estação fluviométrica da ANA.

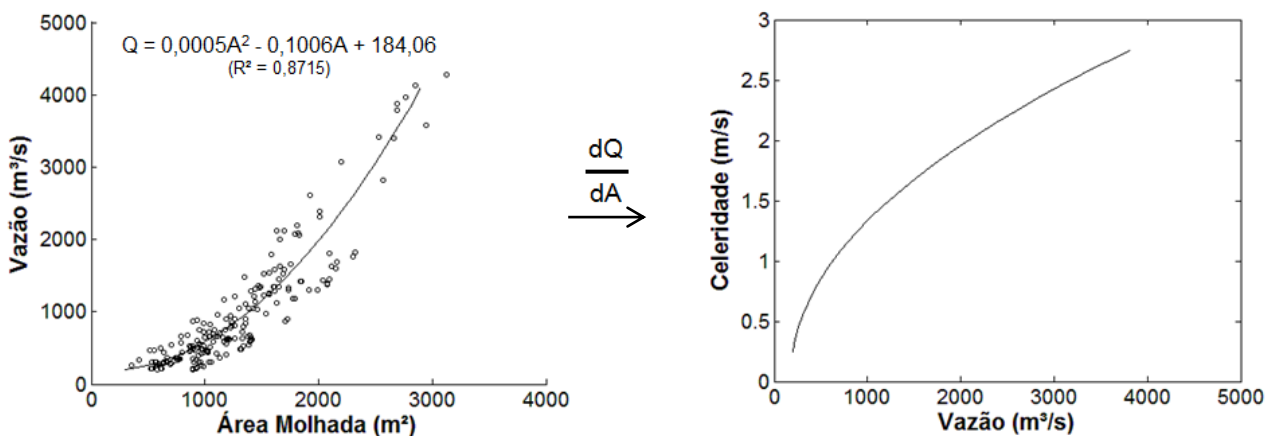


Figura 4 - Ilustração da aplicação do método 2.2 para estimativa da curva celeridade-vazão.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das curvas celeridade-vazão para os trechos dos rios Piquiri, Iguçu, Miranda e Cuiabá, estimadas pelos métodos 2.1 (em escala de trecho) e 2.2 (em escala local), são apresentados na Figura 5.

A comparação do comportamento da celeridade estimada a nível local com relação à estimada em escala de trecho, para os quatro trechos analisados, permite identificar que, em escala local, a variação da celeridade com a vazão apresenta comportamento mais simples e regular, enquanto que em escala de trecho o comportamento é mais disperso. Essa característica é visível em trechos como o Piquiri, em que a vazão de 2000 m<sup>3</sup>/s pode apresentar valores de celeridade variando entre aproximadamente 2 m/s e 3.5 m/s em escala de trecho. Por outro lado, a regularidade do comportamento da celeridade com a vazão em estimativas locais tem relação com a metodologia adotada para sua estimativa, que aproxima as medições de vazão e de área das estações fluviométricas com equações polinomiais de segundo grau.

Apenas a estimativa da celeridade na estação Estrada MT-738, do rio Miranda, apresentou comportamento decrescente da celeridade com a vazão, enquanto que as estimativas em escala local nos outros trechos analisados predominantemente apresentam comportamento ascendente da curva  $c \times Q$ . Essa característica sugere que as localidades das estações fluviométricas correspondem a trechos dos rios com seções transversais bem definidas, que seguem o comportamento típico apresentado na Figura 1b.

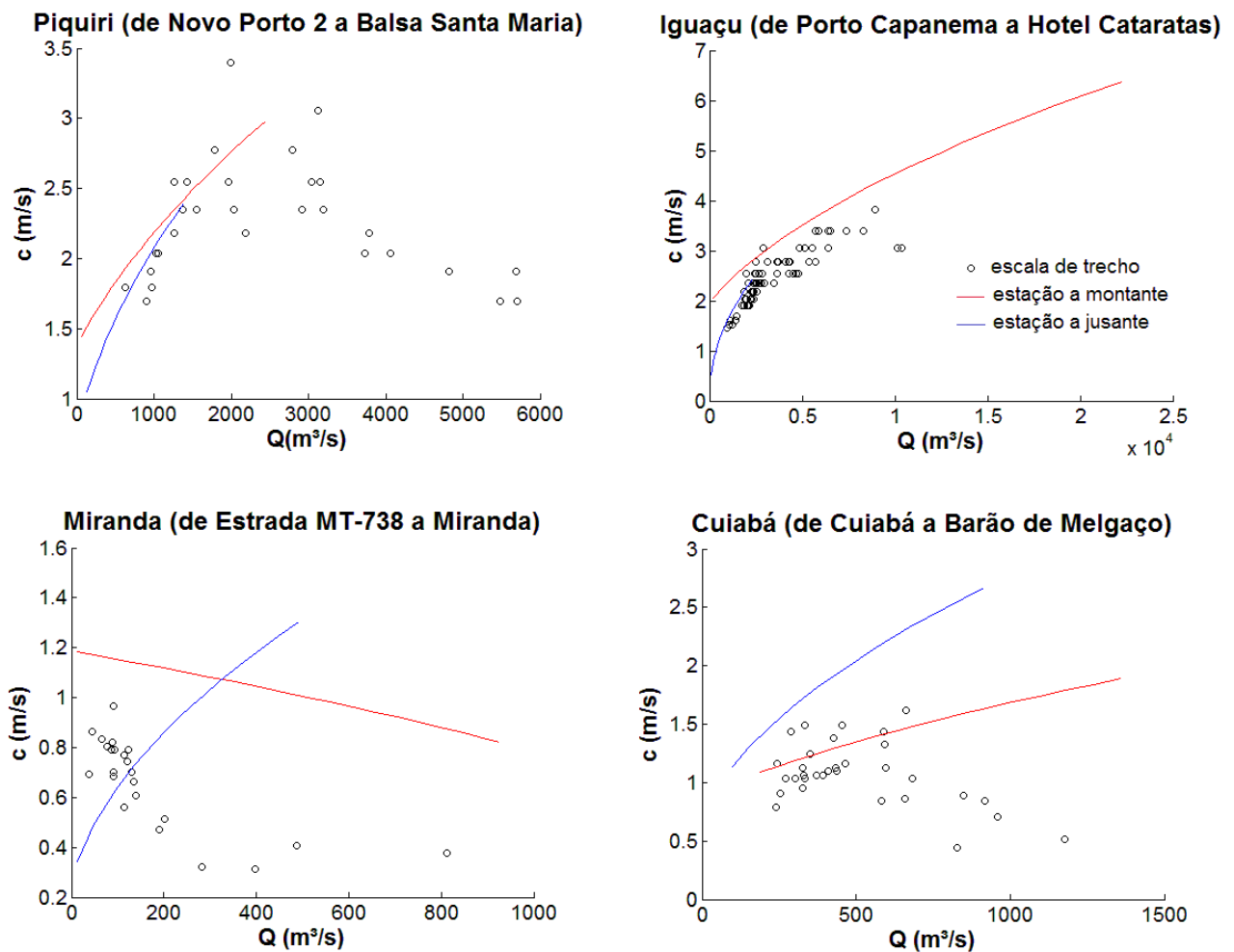


Figura 5 - Curvas celeridade-vazão para os trechos dos rios Piquiri, Iguazu, Miranda e Cuiabá. As linhas representam relações entre celeridade e vazão obtidas em postos fluviométricos e os pontos representam a relação entre celeridade e vazão obtida a partir da observação do tempo de deslocamento do pico de cheias entre dois postos fluviométricos.

Em termos de estimativa na escala de trecho, o comportamento da curva  $c \times Q$  varia de acordo com o trecho de rio: o rio Piquiri apresenta o comportamento já descrito anteriormente por Wong e Laurenson (1984), apresentado na Figura 1a, característico de rio com presença de planície de inundação. O ponto onde a celeridade passa a diminuir com a vazão é indicativo da vazão de extravasamento de calha. Por outro lado, o rio Iguazu apresenta um comportamento crescente da celeridade com a vazão, que pode estar associado ao trecho analisado apresentar característica de seção transversal regular, reproduzindo comportamento semelhante ao gráfico apresentado na Figura 1b, em que, mesmo a altas vazões, não há extravasamento da calha. O rio Cuiabá apresenta maior dispersão de pontos, e portanto um comportamento impreciso sobre a variação da celeridade

com a vazão. O rio Miranda apresenta claro comportamento decrescente da celeridade com o aumento da vazão à escala de trecho, provavelmente associado ao extravasamento da calha e à presença de planícies de inundação, característico da região do Pantanal.

Assim, diferenças entre as estimativas locais das curvas  $c \times Q$  e as estimativas em escala de trecho são perceptíveis para os quatro trechos observados, com destaque para o rio Miranda que, para um mesmo valor de vazão (aproximadamente 300 m<sup>3</sup>/s, por exemplo), pode apresentar celeridade de 0.3 m/s se estimada em escala de trecho ou mais de 1 m/s em escala local. O rio Cuiabá também apresenta diferenças expressivas entre os dois métodos adotados para a estimativa da celeridade. O rio Iguaçu apresenta coerência entre o comportamento da variação da celeridade com a vazão estimados pelos dois métodos, provavelmente associada à ausência de planície de inundação. O rio Piquiri também é coerente entre as duas estimativas, mas a estimativa local não é capaz de representar o comportamento decrescente do gráfico a vazões mais elevadas, provavelmente associado ao extravasamento da calha.

Sendo assim, o presente trabalho indica que a estimativa local da celeridade pode não ser uma abordagem adequada para a compreensão do comportamento da onda de cheia em rios brasileiros, tanto em termos do comportamento da curva  $c \times Q$ , quanto aos valores de celeridade estimados. É importante ressaltar, no entanto, dificuldades existentes no processo de estimar a curva  $c \times Q$  em escala de trecho para rios brasileiros, como, por exemplo, a disponibilidade de dados horários de vazão, a influência de tributários ou a identificação da propagação da onda de cheia no hidrograma.

#### 4. CONCLUSÃO

A compreensão do comportamento da celeridade com a vazão em escala de trecho, bem como a comparação dessa estimativa com estimativas locais, apresenta importantes implicações em modelagem hidrológica, dado que permite a adoção de um parâmetro de celeridade mais acurado. É também relevante para sistemas de alerta de desastres relacionados com fenômenos naturais, considerando que a celeridade está intimamente relacionada ao tempo de viagem das ondas de cheia. Além disso, estudos mais recentes mostram que o comportamento da celeridade em rios está relacionado à forma do hidrograma (Fleischmann et al., 2016).

O presente estudo apresenta uma primeira estimativa de valores de celeridade e curvas celeridade  $\times$  vazão para quatro trechos de rios brasileiros, com base em uma abordagem de escala local e uma abordagem de escala de trecho. Desenvolvimento futuro desta pesquisa irá ampliar o número de trechos analisados, buscando compreender a relação da celeridade com características geomorfológicas de diversos rios brasileiros.

#### 5. REFERÊNCIAS

- DI BALDASSARRE, G., UHLENBROOK, S. (2012). Is the current flood of data enough? A treatise on research needs for the improvement of flood modelling. *Hydrological Processes*, 26(1), pp. 153-158.
- FLEISCHMANN, A. S., PAIVA, R. C., COLLISCHONN, W., SORRIBAS, M. V., PONTES, P. R. (2016). On river-floodplain interaction and hydrograph skewness. *Water Resources Research*, 52(10), pp. 7615-7630.
- GUHA-SAPIR, D., BELOW, R., & HOYOIS, P. (2015). EM-DAT: International disaster database. *Catholic University of Louvain: Brussels, Belgium*.
- LIGHTHILL, M. J., WHITHAM, G. B. (1955) On kinematic waves. I. Flood movement in long rivers. *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, Vol. 229, No. 1178, pp. 281-316.

PRICE, R. K. (1973) Flood routing methods for British rivers. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 55(4), pp. 913-930.

PRICE, R. K. (1982). A nonlinear theory of flood wave propagation. Applied Mathematical Modelling, 6(5), pp. 338-342.

TANG, X., KNIGHT, D.W., SAMUELS, P.G, (2001). Wave speed-discharge relationship from cross-section survey. Water & Maritime Engineering 148(2), pp. 81-96.

WONG, T. H., LAURENSEN, E. M. (1984). A model of flood wave speed—Discharge characteristics of rivers. Water Resources Research, 20(12), pp. 1883-1890.