

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### A HIDROLOGIA DA CABEÇA D'ÁGUA (3): SÍNTESE

*Walter Collischonn<sup>1</sup> & Masato Kobiyama<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Cheias súbitas, conhecidas em grande parte do Brasil como cabeça d'água, são relativamente frequentes e trazem perigos à vida humana em rios de montanhas. Em dois trabalhos anteriores descrevemos o que são e quais os processos que levam à ocorrência de cheias do tipo cabeça d'água. Neste terceiro trabalho apresentamos uma síntese, propondo um modelo perceptual da formação da cabeça d'água. De acordo com este modelo, uma cabeça d'água nasce como uma enxurrada e se transforma em uma cheia súbita, ou instantânea, à medida em que se propaga para jusante ao longo de um rio onde certas condições são satisfeitas. Entre as condições necessárias para o desenvolvimento da cabeça d'água está a ausência de chuva na parte de jusante da bacia. Isto contribui para que as cabeças d'água sejam extremamente letais, mesmo não sendo as cheias com as maiores vazões máximas em um determinado local.

**ABSTRACT** – Sudden floods, known in much of Brazil as a cabeça d'água, are relatively frequent and bring threats to human life in mountain rivers. In two previous papers we described this type of flood and the processes that lead to its occurrence. In the present paper (the third and last in the sequence) we present a synthesis, proposing a perceptual model of cabeça d'água formation. According to this model, a cabeça d'água is born as a relatively normal flash-flood, but then turns into a sudden or instant flood while it propagates downstream along a river where certain conditions are met. One of the conditions necessary for the development of the cabeça d'água is the occurrence of rain restricted to the basin headwaters. Due to the absence of rainfall on the downstream parts of the basin, this type of flood is highly lethal, even though they are not the ones with the highest maximum flows in a given location.

**Palavras-Chave** – Modelo perceptual, choque cinemático, bacia montanhosa.

### INTRODUÇÃO

Cabeça d'água é o nome dado, em grande parte do Brasil, a cheias súbitas que ocorrem em rios de montanha, e que representam um perigo substancial para vidas humanas de pessoas que se expõe no leito do rio, como banhistas, esportistas e turistas. Cheias deste tipo, com aumento quase instantâneo do nível e da vazão são, muitas vezes, associadas com rompimentos de açudes e de barragens. No entanto, a recorrente observação de cabeças d'água em locais cuja bacia não abriga nenhum reservatório, demonstram que cheias muito rápidas, em que a frente de onda apresenta uma

---

1) Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, collischonn@iph.ufrgs.br, (51) 3308-6415

2) Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, masato.kobiyama@ufrgs.br, (51) 3308-6324

clara descontinuidade da vazão e do nível da água, também podem se desenvolver naturalmente, sem que ocorra um rompimento de barragem.

O presente trabalho é a terceira parte da série de estudos sobre a cabeça d'água. No primeiro trabalho, apresentamos a terminologia, o conceito e exemplos de ocorrências do fenômeno cabeça d'água, bem como algumas características físicas relevantes (Collischonn e Kobiyama, 2019 submetido-a). No segundo trabalho, apresentamos uma análise do fenômeno com base nas teorias de onda cinemática e dinâmica (Collischonn e Kobiyama, 2019 submetido-b). O objetivo deste terceiro artigo é propor um modelo perceptual de formação natural de cabeça d'água a partir da chuva, com base nos dois trabalhos anteriores.

## MODELO PERCEPTUAL DE FORMAÇÃO DE CABEÇA D'ÁGUA

Um modelo perceptual em hidrologia é um resumo das percepções que temos sobre os processos relevantes de um fenômeno físico, e precede a elaboração de um modelo conceitual, que já exige a formulação matemática ou equacionamento (Beven, 2011). Com base na revisão de casos apresentada no primeiro artigo (Collischonn e Kobiyama, 2019 submetido-a), e com base na análise teórica, apresentada no segundo artigo desta série (Collischonn e Kobiyama, 2019 submetido-b), podemos construir um modelo perceptual do mecanismo de formação de uma cabeça d'água.

De uma forma bem geral, pode se dizer que uma cabeça d'água é, inicialmente, uma cheia com características de *flash flood* ou enxurrada, com resposta rápida às chuvas, que se transforma em uma cheia súbita, ou instantânea, à medida em que se propaga para jusante ao longo de um rio onde certas condições são satisfeitas.

Uma cabeça d'água é formada a partir de um evento de chuva intenso, porém concentrado na cabeceira de uma bacia hidrográfica (Figura 1). Este evento provoca uma onda de cheia no ponto A, cuja vazão de pico é muitas vezes maior do que a vazão antecedente, e a ascensão do hidrograma é rápida, mas não instantânea.

O hidrograma formado pela chuva se propaga do ponto A para o ponto B ao longo de um curso d'água relativamente seco, porque a chuva ocorreu de forma concentrada a montante do ponto A. O leito do rio é encaixado e tem alta rugosidade de fundo, o que faz com que a celeridade cinemática aumente muito com a vazão. Assim, o pico da onda de cheia tem uma celeridade muito maior do que o início da onda de cheia, fazendo com que a forma do hidrograma se modifique, diminuindo o tempo de ascensão, enquanto a cheia se propaga para jusante. Isto resulta em que a parte ascendente do hidrograma se torna mais rápida e mais nítida, isto é, o tempo decorrido desde o início do aumento da vazão até o instante do pico da vazão é menor no ponto B do que no ponto A.

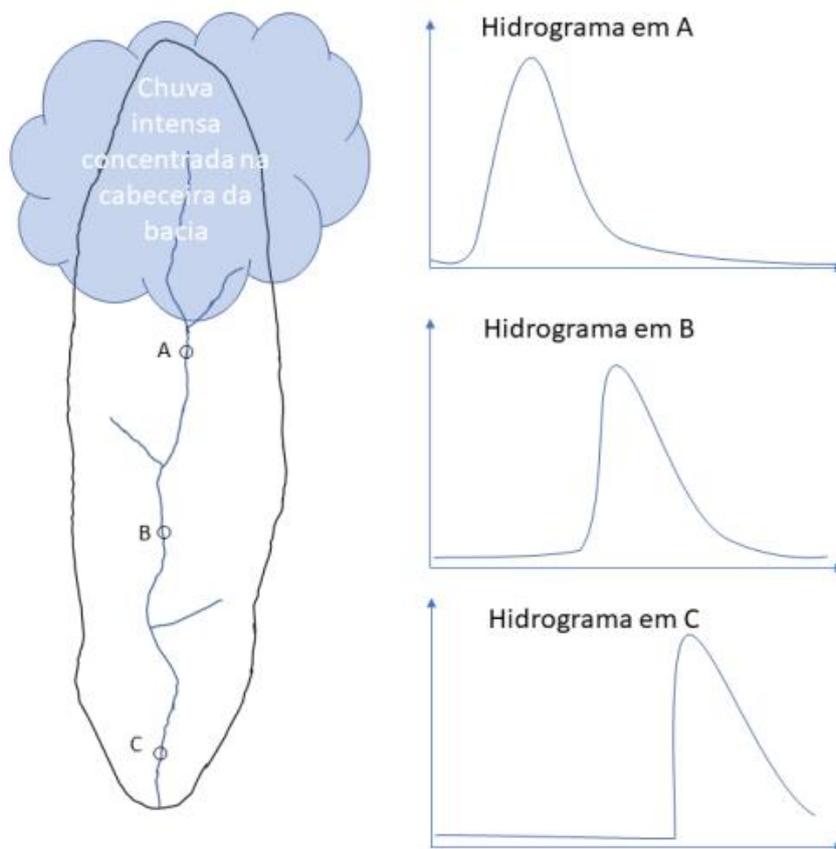


Figura 1: Esquema conceitual do processo de formação de uma cabeça d'água.

Mantidas as mesmas condições ao longo do trecho entre os pontos B e C, o processo persiste, com a onda de cheia se deformando mais ainda, até que uma frente de onda abrupta se forma, com descontinuidade visível da vazão e do nível da água. Esta frente de onda pode chegar ao ponto C sem nenhum sinal anterior, como água turva ou detritos na água. Então, no ponto C, um observador não consegue prever a chegada da onda.

A descontinuidade da vazão e do nível da água formam o que é denominado por Lighthill e Whitham (1955) como choque cinemático. Esse choque cinemático pode persistir enquanto a velocidade de propagação (celeridade cinemática) da frente da onda for superior a velocidade com que ondas dinâmicas dissipam a energia da frente abrupta. Para que isto ocorra, é necessário que seja respeitada a seguinte condição (Chow, 1959; Collischonn e Kobiyama, 2019 submetido-b):

$$c_f > v + \sqrt{g \cdot y} \quad (1)$$

onde  $c_f$  é a celeridade cinemática da frente de onda;  $v$  é a velocidade da água no rio antes da chegada da onda;  $g$  é a aceleração da gravidade; e  $y$  é a profundidade inicial no rio na condição de vazão inicial no rio, ou seja, a jusante da frente de onda. Em outras palavras, a frente abrupta pode persistir enquanto a declividade for alta e a profundidade inicial de água no rio ou córrego for baixa.

Em termos de perfil da linha da água, o processo é semelhante ao da formação da pororoca, conforme a descrição dada por Chanson (2012) (Figura 2). Inicialmente, no momento em que a

cheia está se formando, a linha d'água tem um perfil como ilustrado pela linha azul na Figura 2. Enquanto se propaga para jusante, se mantida a condição dada pela equação (1), o perfil da linha d'água pode se modificar, gerando uma frente abrupta, conforme o perfil da linha vermelha na Figura 2. Aqui salientamos que a Figura 2 é uma adaptação do modelo desenvolvido por Chanson (2012) que descreveu pororocas.

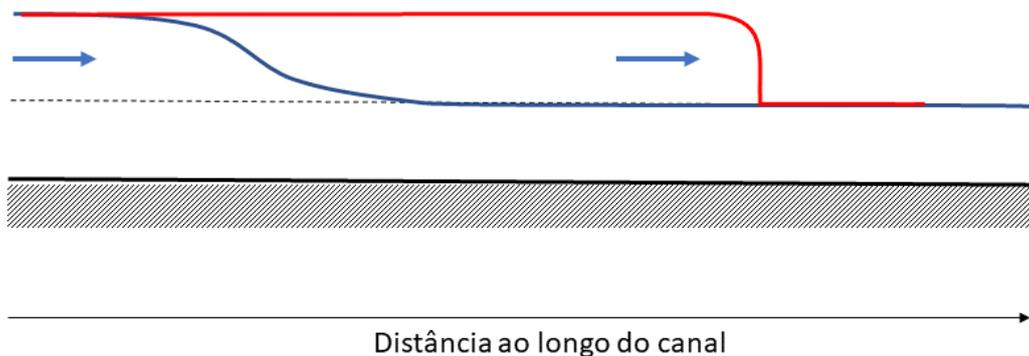


Figura 2: Esquema do desenvolvimento de uma cabeça d'água na forma de perfis da linha d'água ao longo do rio em sucessivos instantes de tempo: linha azul – perfil no tempo inicial; linha vermelha – perfil no tempo final (adaptado de Chanson, 2012)

A cabeça d'água desaparece assim que o rio diminui sua declividade, ou assim que a seção transversal do rio for menos encaixada, ou assim que a profundidade inicial for suficientemente alta. A partir deste momento, a equação (1) não é mais satisfeita, e a cheia passa a ter características de uma cheia normal, com rápido aumento de vazão, mas sem descontinuidade visível nas variáveis hidráulicas.

Resumindo todas as discussões nessa série de três estudos, podemos apresentar as seguintes condições que favorecem a formação de cabeças d'água:

- 1) Alta declividade do leito;
- 2) Seção transversal encaixada;
- 3) Alta rugosidade do fundo;
- 4) Profundidade inicial baixa;
- 5) Chuva intensa, porém, concentrada na cabeceira da bacia;
- 6) Um rio principal suficientemente longo, sem afluentes significativos.

É importante destacar que a ausência de chuva na região de jusante (ponto C na Figura 1), não é apenas um fator que contribui para tornar a cheia surpreendente para as pessoas que estão no leito do rio ou nas suas proximidades, mas também é o fator que torna a formação da possível frente abrupta. Se ocorrer chuva também na região de jusante, a vazão inicial e o nível inicial nesta região, antes da chegada da onda vinda de montante, serão mais altos, significativamente dificultando a formação da frente abrupta que caracteriza a cabeça d'água.

A ausência de chuva na região de jusante da bacia (região do ponto C na Figura 1) é uma condição necessária para a formação da cabeça d'água. Esta ausência de chuva tem duas consequências importantes. Em primeiro lugar, as cheias do tipo cabeça d'água não são as cheias com maiores valores de vazão máxima em um determinado local. Isto ocorre porque a chuva foi restrita a uma parte da bacia. Por outro lado, a ausência de chuva na região do ponto C contribui para que potenciais vítimas da cabeça d'água sejam surpreendidas tanto pela rapidez do aumento da vazão e elevação dos níveis como pela própria ocorrência da cheia em si.

Finalmente, algumas testemunhas relatam que é possível perceber antecipadamente, em alguns minutos ou segundos, a chegada de uma cabeça d'água pela mudança de coloração da água, por pequenos aumentos de vazão, ou pela presença de material flutuante. Entretanto, com base na análise teórica apresentada aqui, é necessário considerar válida a hipótese que uma cabeça d'água pode chegar a um determinado local sem nenhum sinal anterior tal como aumento de turbidez da água, presença de folhas ou detritos flutuando no rio. Esta discrepância entre estes relatos e o modelo perceptual proposto por o presente trabalho deverá ser investigada por meio de diversos tipos de estudos científicos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cabeça d'água é uma cheia em que o aumento da vazão e do nível da água se dá tão rapidamente que é praticamente instantâneo. Cheias deste tipo, com aumento quase instantâneo do nível e da vazão são, muitas vezes, associadas com rompimentos de açudes e de barragens. No entanto, a recorrente observação de cabeças d'água em locais cuja bacia não abriga nenhum reservatório, demonstra que cheias muito rápidas, em que a frente de onda apresenta uma clara descontinuidade da vazão e do nível da água, também podem se desenvolver naturalmente, sem que ocorra um rompimento de barragem.

Para explicar o processo natural de formação natural de cabeças d'água a partir da ocorrência de chuvas foi proposto e apresentado aqui um modelo perceptual em que a frente de onda abrupta, típica da cabeça d'água, se forma por um processo não linear de propagação de onda de cheia em rios. Foi demonstrado também que a frente de onda pode se manter abrupta se a celeridade da frente de onda for maior do que a velocidade com que se propagam pequenas ondas a jusante da frente, que tem o efeito de atenuar a frente de onda.

De acordo com o modelo perceptual, cheias do tipo cabeça d'água tendem a ocorrer em rios de alta declividade, com leito encaixado. Além disso, para o desenvolvimento de cheias do tipo cabeça d'água é necessário que uma onda de cheia relativamente normal se propague por um certo tempo e por uma certa distância ao longo de um rio inicialmente raso, e com alta declividade.

Para que o rio esteja inicialmente raso na região de jusante da bacia atingida por uma cabeça d'água, é fundamental que a ocorrência de chuva se restrinja à região de montante da bacia. Isto efetivamente é o que ocorre na maior parte dos relatos apresentados no primeiro artigo da série (Collischonn e Kobiyama, 2019 submetido-a).

A chuva concentrada na parte alta da bacia tem outras duas consequências. A primeira consequência é que as cheias do tipo cabeça d'água possivelmente não estão entre as maiores cheias em um dado local, se analisadas do ponto de vista da vazão máxima. Isto ocorre porque nem toda a bacia está recebendo chuva. A segunda consequência é que pessoas concentradas na parte baixa da bacia não percebem que a bacia está recebendo chuva, pois no local em que estão não chove e pode até haver tempo ensolarado. Como consequência, estas pessoas são surpreendidas pela chegada da onda de cheia tanto pela sua rapidez, como pela ocorrência de uma cheia em si, já que não foi sinalizada pela chuva.

Muitos relatos mostram que cabeças d'água relativamente pequenas, em termos de vazão máxima, podem resultar em grandes impactos. Isto ocorre porque neste tipo de cheia os prejuízos são mais relacionados à magnitude da taxa de aumento da vazão ao longo do tempo, que torna a cheia surpreendente, do que à vazão de pico da cheia (Archer e Fowler, 2014, 2018). Cheias com vazões máximas relativamente pequenas, porém com taxas de aumento da vazão extremamente altas, potencialmente podem causar mais impactos em termos de perdas de vidas humanas do que as cheias com as maiores vazões de pico, porém com ascensão mais lenta do hidrograma.

Também é fundamental reconhecer que as cabeças d'água são, ainda, um fenômeno muito pouco compreendido. Para aumentar o entendimento sobre os processos que levam a sua ocorrência, e para reduzir os impactos destes eventos, sobretudo para reduzir as fatalidades associadas, seria interessante que novas pesquisas fossem realizadas.

Algumas ideias que podem contribuir para a redução de impactos das cabeças d'água são:

- A chuva na cabeceira da bacia pode ser monitorada e relacionada com a ocorrência de cabeças d'água, através de um modelo baseado em limiares. Com base nisso, pode ser possível prever, com razoável acurácia, se uma cabeça d'água vai ocorrer com um tempo de antecedência que pode chegar a algumas horas.
- A formação de uma cabeça d'água exige o trânsito da onda de cheia por distâncias consideráveis (da ordem de alguns km, com base nas características dos locais em que estes eventos foram registrados). Isso significa que sistemas de alerta baseados em medidores de nível da água simples e sirenes poderiam ser instalados em balneários, por exemplo, permitindo antecipar em vários minutos a chegada da frente de onda, o que seria suficiente para que as pessoas deixem o leito do rio e procurem as margens do mesmo, em posição mais elevada.

- A alteração da relação entre celeridade e vazão em alguns trechos do rio pode ser obtida mediante a construção de estruturas de retenção temporária com descarregadores de fundo semelhantes a bueiros. Uma ou mais destas estruturas imediatamente a montante de um balneário, pode reduzir a frequência e a amplitude das cabeças d'água.

Além dessas ideias, outra iniciativa que poderia auxiliar na melhor compreensão do fenômeno seria ampliar o seu monitoramento com base na ciência cidadã (*citizen science*), que pode ser uma grande ferramenta para construir um banco de dados (Starkey *et al.*, 2017; Cunha *et al.*, 2017).

## REFERÊNCIAS

- ARCHER, D.R.; FOWLER, H.J. (2014). “Do floods cause more loss of life from the peak or from their rate of rise?”. *Circulation* 120, pp.5–7.
- ARCHER, D.R.; FOWLER, H.J. (2018). “Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain”. *Journal of Flood Risk Management* 11, pp.S121-S133.
- BEVEN, K.J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons New York, 488p.
- CHANSON, H. (2012). *Tidal bores, eagr, mascaret, pororoca: Theory and observations*. World Scientific Singapore, 220p.
- CHOW, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill New York, 680p.
- COLLISCHONN, W.; KOBIYAMA, M. (submetido-a). “A hidrologia da cabeça d'água (1): Ocorrências e observações no Brasil” in *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, Nov. 2019, 1, 9p.*
- COLLISCHONN, W.; KOBIYAMA, M. (submetido-b). “A hidrologia da cabeça d'água (2): Formação de frente de onda abrupta” in *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, Nov. 2019, 1, 10p.*
- CUNHA, D.G.F.; MARQUES, J.F.; RESENDE, J.C., FALCO, P.B.; SOUZA, C.M.; LOISELLE, S.A. (2017). “Citizen science participation in research in the environmental sciences: key factors related to projects' success and longevity”. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 89(3 Suppl.), pp.2229-2245.
- LIGHTHILL, M.J.; WHITHAM, G.B. (1955). “On kinematic waves I. Flood movement in long rivers”. *Proc. R. Soc. London A*, 229(1178), pp.281-316.
- STARKEY, E.; PARKIN, G.; BIRKINSHAW, S.; LARGE, A.; QUINN, P.; GIBSON, C. (2017). “Demonstrating the value of community-based (‘citizen science’) observations for catchment modelling and characterization”. *Journal of hydrology* 548, pp.801-817.