

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VOLUMES, DURAÇÕES E PICOS DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO MEARIM-MA

Franciele Zanandrea^{1}; Gean Paulo Michel²; Héctor Raul Muñoz Espinosa³*

Resumo – O Tempo de Retorno (Tr) de eventos hidrológicos extremos é algo bastante utilizado na engenharia de recursos hídricos. A maior parte das análises de frequência é realizada apenas para a vazão de pico anual. Os volumes e durações das inundações, que não são comumente abordados, também podem ser utilizados para caracterizar estes eventos. Assim, o presente artigo tem como objetivo comparar as análises de frequência para as variáveis vazão de pico, volume e duração da inundação, com o intuito de analisar as similaridades e diferenças dos Tr's para cada análise. Os estudos probabilísticos das variáveis volume e duração foram realizados através da abordagem das séries de duração parcial pelo modelo de Poisson-Pareto e das vazões máximas anuais através do modelo de Gumbel para duas diferentes localidades no estado do Maranhão. Os resultados apontam que a análise de frequência de volumes e durações fornece informações adicionais que não podem ser obtidas pela análise de uma única variável de inundação, como os Tr das vazões de pico. Estas observações podem ser de grande utilidade na análise e avaliação do risco associado a inundações.

Palavras-Chave – Vazões máximas; inundação; análise de frequência.

FREQUENCY ANALYSIS OF VOLUMES, DURATIONS AND PEAK FLOW IN THE MEARIM-MA RIVER BASIN

Abstract – The recurrence time (Tr) of extreme hydrological events is usually used in water resources engineering. Most of frequency analyses are performed only for the annual peak flow. The volume and duration of flood, which are not commonly addressed, can also be used to characterize these events. Thus, the present paper aimed to compare the results of frequency analyses for the peak flow, volume and duration of floods. The probabilistic studies of volume and duration were carried out through the partial duration series method using the Poisson-Pareto model, while the probabilistic study of the annual maximum flow was performed using the Gumbel model. All the studies were performed for two different locations in the Maranhão State. The results indicate that the frequency analyses of volume and duration provide additional information that cannot be obtained by the analysis of a single flood variable, such as the Tr related to peak flows. These observations can be very useful in the analysis and assessment of the risk associated with flooding.

Keywords – Maximum flow; flood; frequency analysis.

^{1*} autor correspondente. IPH/UFRGS: e-mail: franciele.zanan@gmail.com

² IPH/UFRGS: e-mail: gean.michel@ufrgs.br

³ CTTMar/Univali: e-mail: hrmuñoz@th.com.br

INTRODUÇÃO

As inundações representam um grande problema em muitos lugares do mundo, causando danos econômicos, mortes, ferimentos, entre outros impactos sociais (Ward *et al.*, 2016). Muitas obras de engenharia são realizadas com o intuito de diminuir esses danos. Segundo Shiau (2003) o Tempo de Retorno (Tr) de eventos hidrológicos extremos é algo muito utilizado na engenharia em projetos de drenagem urbana e inundações. O Tr se refere ao período de tempo médio que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez, ou seja, o inverso de sua probabilidade de ocorrência em um ano qualquer, realizado através de análises de frequência.

A utilização de ajustes estatísticos na análise de frequência de eventos extremos permite a estimativa das magnitudes das inundações além do período de dados observado e ainda melhora a confiabilidade das estimativas dentro do período registrado (Nagy *et al.*, 2017). Segundo Bhunya *et al.* (2012) duas abordagens são utilizadas na análise de frequência de inundações, a primeira é baseada na série de vazões máximas anuais e a outra em séries de duração parcial. Alguns autores já realizaram estudos a fim de avaliar as diferenças, vantagens e desvantagens do uso dessas metodologias na análise de frequência de eventos máximos (Bhunya *et al.*, 2012; Bhunya *et al.*, 2013; Nagy *et al.*, 2017). No estudo produzido por Nagy *et al.* (2017) observou-se que análises de frequência de inundações pela abordagem de séries de duração parcial retorna magnitudes semelhantes as produzidas por séries máximas anuais utilizando dados históricos. Os autores sugerem a preferência por séries de duração parcial nos casos em que séries longas de dados de vazão não estejam disponíveis, ou seja, quando as metodologias tradicionais não podem ser aplicadas por falta de valores amostrais.

A análise de frequência de inundações enfrenta desafios importantes quanto à sua aplicação (Nagy *et al.*, 2017). As metodologias normalmente utilizadas para projetos de engenharia baseados em eventos extremos de inundação são realizadas a partir da avaliação da vazão de pico anual. Porém, quando se há interesse na maior inundação de um local, essa pode não ter ocorrido no ano do maior pico, pois, como descrito por Goel *et al.* (1998) e Yue *et al.* (1999), as inundações são eventos multivariados descritos também pelo volume e pela duração da cheia, além do pico. Alguns autores abordaram as variáveis volume e duração de inundações na análise de distribuições multivariadas (Ashkar & Rousselle, 1982; Goel *et al.*, 1998; Yue *et al.*, 1999; Shiau, 2003; Ward *et al.*, 2016).

Os municípios de Barra do Corda e Pedreiras, localizados no estado do Maranhão, na bacia hidrográfica do rio Mearim, foram afetados por grandes inundações ao longo de sua história. As maiores inundações, com o maior número de prejuízos para estes locais ocorreram nos anos de 1974, 1985 e 2009, nesta ordem, porém observa-se que os maiores picos registrados não seguem a mesma ordem. Assim, o presente estudo tem como objetivo comparar as análises de frequência para as variáveis vazão de pico, volume e duração da inundação, com o intuito de analisar as similaridades e diferenças dos períodos de retornos para cada variável.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Mearim possui uma área de aproximadamente 99 mil km² e está localizada no estado do Maranhão, onde diversos municípios sofrem com problemas de inundações, entre eles Barra do Corda e Pedreiras que se encontram as margens do rio Mearim (Figura 1). Registros da região mostram que o ano de 1985 foi o ano com maior total precipitado, seguido por

1986 (Carvalho *et al.*, 2010), sendo marcado na história dos municípios como anos de grandes inundações do rio Mearim, nos quais muitas pessoas foram atingidas. Mais recentemente, em 2009, os municípios foram atingidos por outra grande inundação, também registrada como uma das maiores dentre as ocorridas.

Segundo CEPED (2013), o município de Pedreiras foi um dos mais atingidos por inundações entre os anos de 1991 e 2012, apresentando 5 ocorrências de inundação em 2006, 2008, 2009, 2010 e 2011, causando 3 mortes, afetando aproximadamente 14.688 e atingindo 1.995 residências; e 3 ocorrências classificadas como enxurradas em 1995, 1996 e 1998. Ainda segundo CEPED (2013), o município de Barra do Corda, sofreu com inundações apenas no ano de 2009 durante o período de análise, sendo um município que sofre também com episódios de seca e estiagem. Em 1974, 1978, 1985 e 2009 foram os anos em que ocorreram as inundações mais intensas da região segundo Brito *et al.* (2010).

O Rio Mearim possui cerca de 400 metros de desnível entre a nascente e a foz, com vazão média total de 557 m³/s em sua foz e os totais precipitados anuais chegam a 1900 mm em algumas regiões, com período chuvoso de janeiro a junho, quando ocorrem as inundações.

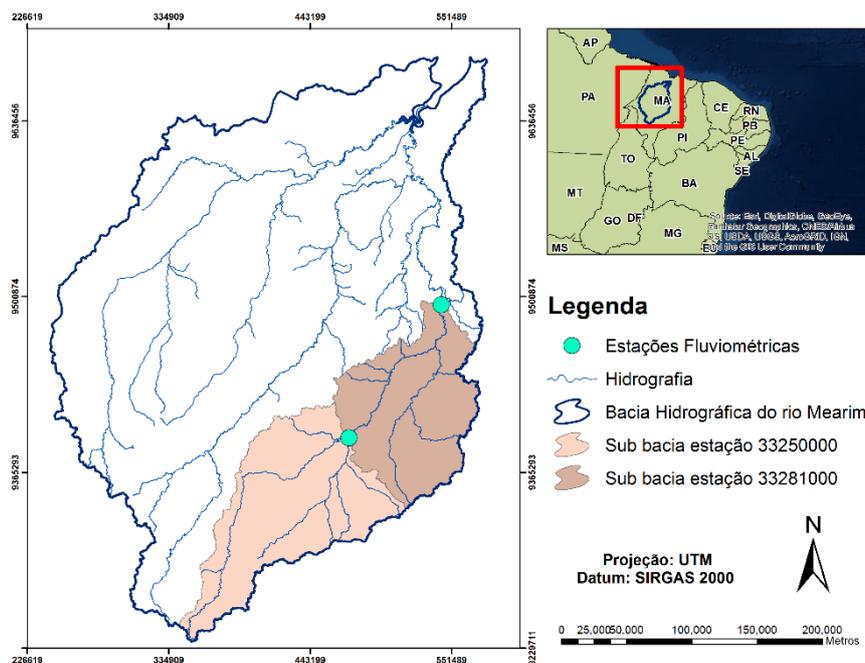


Figura 1. Localização da área de estudo, bacia hidrográfica do rio Mearim e estações fluviométricas.

A bacia do rio Mearim, além da sua significativa extensão e baixa declividade, está submetida a um regime sazonal de precipitações que se prolongam durante longos períodos, mas sempre na mesma época do ano. Estas precipitações geram eventos hidrológicos geralmente de longa duração. Neste contexto, a análise de frequência tradicional de vazões de pico máximas anuais pode não ser suficientemente representativa na associação com os possíveis danos. Assim, as durações e volumes dos eventos hidrológicos críticos podem ser mais representativos nestes casos.

Análise de Frequência

No presente trabalho foram estabelecidos os tempos de recorrência dos volumes e das durações das inundações registradas, além da vazão de pico, em duas diferentes localidades no estado do Maranhão, nas cidades de Barra do Corda e Pedreiras. O produto diferencia-se de uma análise comum de tempo de recorrência, pois utiliza o volume ou a duração dos hidrogramas, na parcela que está acima de determinado limiar de vazão, para caracterizar a frequência do evento.

Os estudos probabilísticos das variáveis hidrológicas volume e duração (de forma independente) foram realizadas através da abordagem das séries de duração parcial (SDP), também denominadas de séries acima de um limiar (POT, da expressão inglesa *Peaks over Threshold*), as quais incluem todos os valores que superaram um certo valor de referência ou limiar estabelecido. Nagy *et al.* (2017) comentam que uma das maiores dificuldades no uso de séries de duração parcial, está na determinação de um limiar para os dados analisados. O valor de referência ou limiar utilizado neste artigo foi a vazão de calha cheia, extraída a partir da cota de extravasamento da calha conforme a seção da estação fluviométrica da ANA (Agência Nacional de Águas), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores limiares de extravasamento da calha do rio nas estações.

Código da Estação	Nome da Estação	Valores Limiares ou de Referência
		Vazão (m ³ /s)
33250000	Barra do Corda	225
33281000	Pedreiras II	300

Com isso, foram calculados os volumes e durações de excedência dos hidrogramas a partir do alcance do limiar para cada evento da série de dados em que houve extravasamento. Para cada evento em que os valores de vazão diária ultrapassaram o limiar definido, os volumes/durações de excedência foram somados representando o volume/duração total de excedência referente ao evento hidrológico. Devido a característica da bacia de estudo, onde os hidrogramas tem variabilidade anual, considerou-se que anualmente têm-se todos as excedências pertencem ao mesmo evento.

Os cálculos foram realizados para o ano hidrológico (setembro a setembro) das séries das 2 estações da ANA (Figura 1) retirados do Hidroweb. Na Tabela 2 apresenta-se os dados das estações fluviométricas, o período de dados utilizados, a altitude e a área de drenagem do posto.

Tabela 2 – Dados das estações fluviométricas utilizadas.

Código da Estação	Nome da Estação	Nome do Rio	Período	Altitude (m)	Área (km ²)
33250000	Barra do Corda	Rio Mearim	1971-2014 (43 anos)	85	13.200
33281000	Pedreiras II	Rio Mearim	1978-2014 (37 anos)	58	24.000

Primeiramente verificou-se se as excedências seguem o modelo de Poisson. Esta verificação foi realizada com o teste de Cunnane (1979) a um nível de significância 5%, aos dados das séries. Conforme Stedinger *et al.* (1993) a distribuição de Poisson é frequentemente utilizada para modelar a taxa de excedência dos eventos, enquanto a distribuição exponencial é empregada para descrever a magnitude dos excedentes sobre o limiar estabelecido.

Posteriormente, identificou-se que as magnitudes dos eventos que superam o limiar estabelecido seguiram a distribuição Generalizada de Pareto. Essa identificação foi conduzida através da taxa de excedência e dos parâmetros da distribuição Generalizada de Pareto, estimados a partir das excedências do limiar estabelecido. Então, os quantis anuais foram calculados por meio da equação (1) ajustando o modelo Poisson-Pareto à série.

$$x = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[-\frac{\ln[F(x)]}{v} \right]^k \right\} F(x) = 1 - \frac{1}{Tr} \quad (1)$$

onde ε é o parâmetro de posição, α é o parâmetro de escala, k é o parâmetro de forma e Tr o tempo de retorno em anos.

O cálculo da posição de plotagem (q_i) foi realizado com a fórmula de Gringorten (2), o tempo de retorno parcial (T_p) foi estimado com equação (3), e o seu correspondente anual (T_a) pela (4):

$$q_i = \frac{i-0,44}{n+0,12} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{1}{vq_i} \quad (3)$$

$$T_a = \frac{1}{\left(1 - \exp\left(-\frac{1}{T_p}\right)\right)} \quad (4)$$

onde n é o tamanho da amostra e v é o somatório de anos com excedência dividido pelo número de anos.

Para o cálculo da análise de frequência dos valores extremos das vazões diárias máximas anuais, utilizou-se a distribuição de probabilidade de Gumbel (Equação 5), tendo em conta o valor do coeficiente de assimetria da série das vazões máximas anuais, que é positivo e constante. A distribuição de Gumbel se ajusta satisfatoriamente às distribuições de valores extremos de grandezas hidrológicas, tais como séries de vazões observadas e é a mais utilizada no estudo de vazões de inundações (Naghetini & Pinto, 2007), por isso foi escolhida para comparação.

$$x(Tr) = \beta - \alpha \left(\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right) \right) \quad (5)$$

onde $\alpha = 0,779 * s$; $\beta = \bar{x} - 0,45 * s$; s é o desvio padrão da amostra; \bar{x} a média aritmética amostral; e Tr o tempo de retorno em anos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de Poisson-Pareto adaptou-se melhor para as durações do que para os volumes em Barra do Corda e Pedreiras. Este também se demonstrou eficiente para os volumes como observado nas Figura 2 e Figura 3. Uma boa relação é observada entre as distribuições teóricas e observadas.

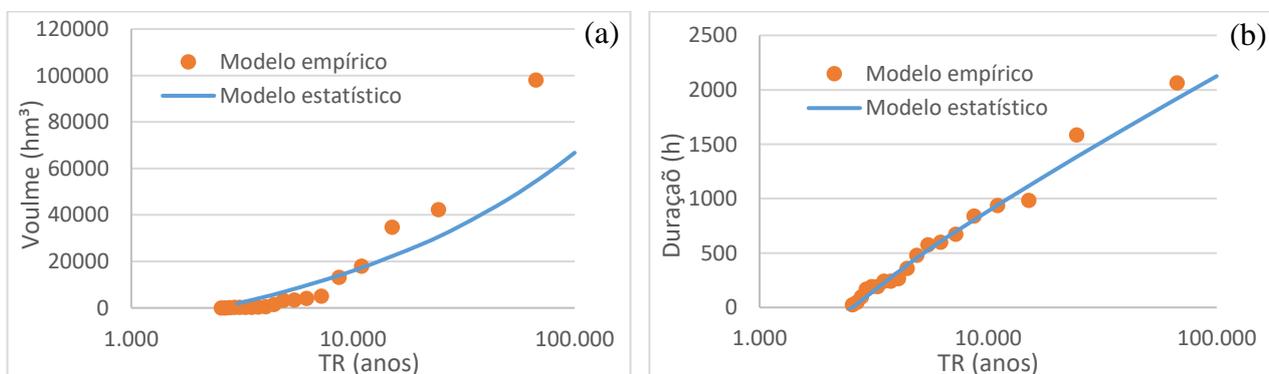


Figura 2. Ajuste do modelo em Pedreiras II para: (a) volume e (b) duração de inundações, respectivamente.

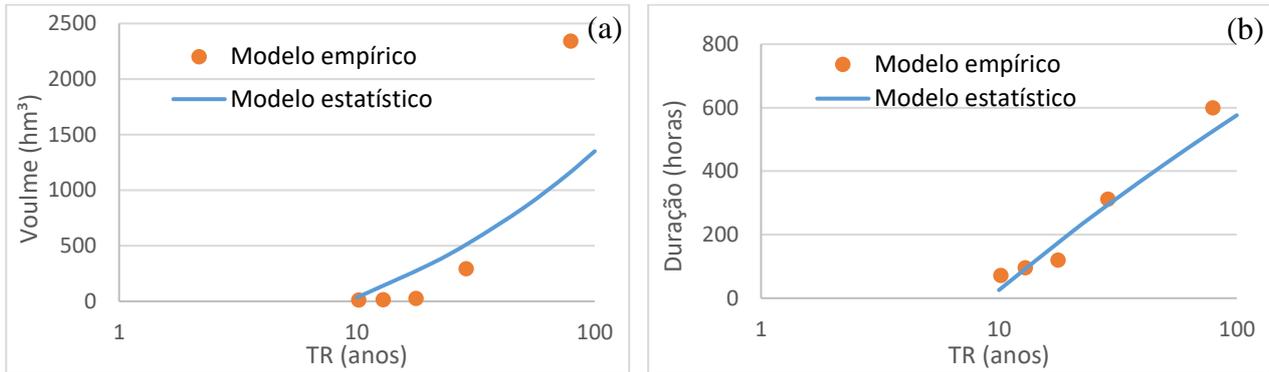


Figura 3. Ajuste do modelo em Barra do Corda para: (a) volume e (b) duração de inundações, respectivamente.

Os tempos de retorno obtidos para as variáveis volume, duração e vazão de pico das inundações anuais para o município de Pedreiras e Barra do Corda encontram-se apresentados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente. É importante destacar que nas imagens do Google Earth observa-se que o crescimento da área urbanizada não teve grande expansão em termos de território do ano de 1985 para 2009 e a pequena expansão ocorrida não foi em áreas ribeirinhas. Essa observação corrobora para o fato do comportamento da inundação não estar sendo fortemente afetado pela urbanização com o passar dos anos, tornando a série equiparável.

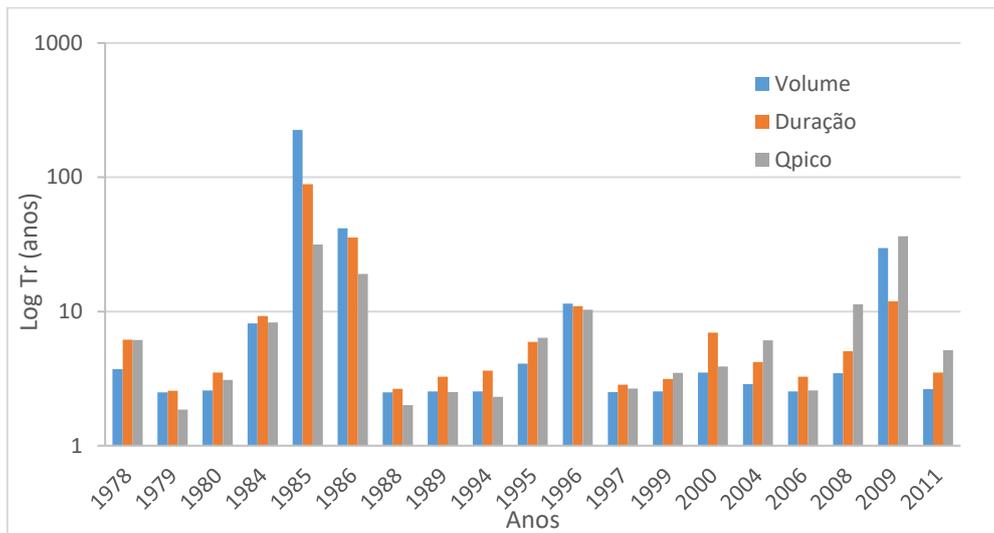


Figura 4. Tempo de retorno (Tr) para o volume, duração e vazão de pico na estação de Pedreiras II.

No caso de Pedreiras, por exemplo, observa-se que a inundação de 1985, que em termos de duração do extravasamento das águas apresenta uma recorrência de aproximadamente 90 anos e de volume de 225 anos, corresponde a uma recorrência de somente 32 anos quando a variável a ser considerada é a vazão de pico. Já a máxima vazão de pico registrada no período de observações (1978 a 2014), isto é, a de 2009, corresponde a uma recorrência de 36 anos e de volume de 30 anos, mas em termos de duração apresenta uma recorrência de somente 12 anos. Neste sentido, do ponto de vista daqueles que ficaram inundados, o evento de 1985 pode ter sido mais crítico que aquele de 2009, embora este último tenha apresentado um pico de vazão maior. Em Barra do Corda observa-se que a maior

inundação em termos de volume, duração e vazão de pico ocorreu em 1974, tendo o maior tempo de retorno para volume dentre as três variáveis. Já nas demais grandes inundações, como a 1985, observa-se que o maior tempo de retorno ocorre para duração. Observa-se também que o volume e vazão de pico acabam por obterem tempos de retorno próximos nas menores cheias, diferenciando-se da duração que apresenta sempre o maior Tr .

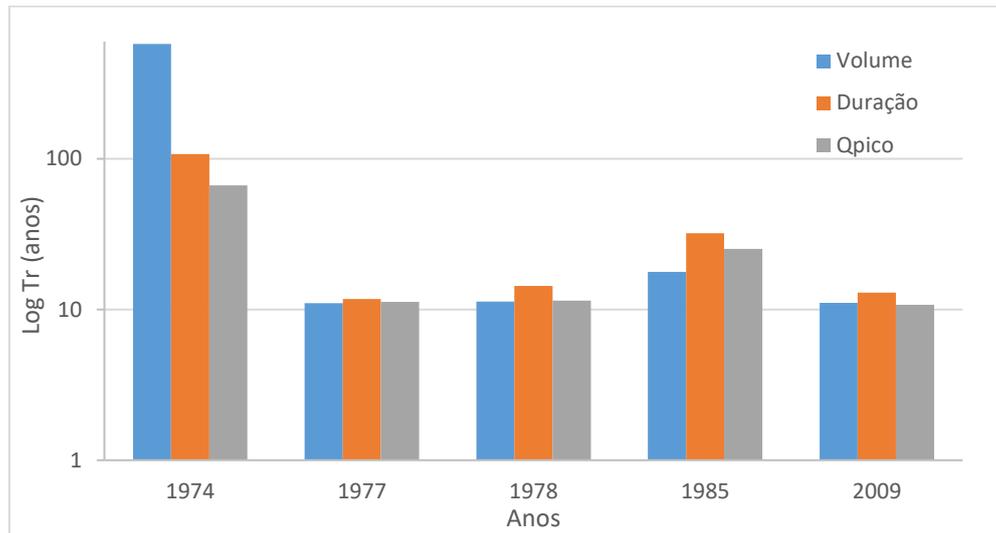


Figura 5. Tempo de retorno (Tr) para o volume, duração e vazão de pico na estação de Barra do Corda.

Nas duas estações, o evento com maior tempo de retorno coincidiu em volume e duração, sendo o ano de 1985 para Pedreiras II (visto que não existem dados de 1974 para a estação) e 1974 para Barra do Corda, sendo o segundo maior 1985. O maior evento em termos de vazão de pico foi o ano de 2009 para Pedreiras II e se manteve 1974 para Barra do Corda, seguido por 1985.

Observando a ampla distinção dos tempos de retorno das 3 variáveis para os maiores eventos de cheia destaca-se a importância do conhecimento detalhado das características do evento de inundação, como vazão de pico, volume e duração da inundação. Conforme Yue *et al.* (1999) a análise de frequência de inundação muitas vezes se concentra apenas em valores de pico de inundação e, portanto, fornece uma avaliação limitada desses eventos, o que pode ocasionar problemas de planejamento, gerenciamento e projetos de engenharia.

CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma comparação entre os Tr calculados para as vazões de pico e para volumes e durações de excedência em relação a certo limiar estabelecido em duas localidades situadas na bacia do Mearim. O modelo estatístico utilizado adaptou-se bem para as durações e volumes nas estações analisadas, considerando-se satisfatória a metodologia para a estimativa dos tempos de retorno de volume e duração da inundação, cujos valores tiveram boa representação.

Comparando-se as duas grandes inundações registradas no município de Pedreiras (1985 e 2009), observa-se que os valores de Tr de vazão de pico são similares, enquanto que os valores de Tr de duração e volume são significativamente discrepantes. Esta observação demonstra como os resultados da análise de frequência a partir de dados de volume e duração podem gerar resultados distintos e proporcionar informações adicionais para projetos na engenharia de recursos hídricos.

Os resultados apontam que o método proposto fornece informações adicionais que não podem ser obtidas pela análise de uma única variável de inundação, como os períodos de retorno das vazões de pico. Estas observações podem ser de grande utilidade na análise e avaliação do risco associado a diversos problemas hidrológicos, como o projeto de vertedouros e o controle de inundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa MPB Engenharia pela parceria.

REFERÊNCIAS

- BHUNYA, P. K.; SINGH, R. D.; BERNDTSSON, R.; PANDA, S. N. (2012). Flood analysis using generalized logistic models in partial duration series. *Journal of Hydrology*, 420-421, pp. 59-71.
- BRITO, C. D. S. B.; ARAGÃO, L. S.; CARVALHO, M. L. P.; SOUZA, A. M. A.; ALMEIDA, R. C. de; TAVARES, S. J. (2010). As transformações socioespaciais urbanas ocorridas nos municípios de Pedreiras e Trizidela do Vale ocasionadas pelas enchentes do rio Mearim. In: Encontro Nacional de Geógrafos, XVI., 2010, Porto Alegre. *Anais...*. Porto Alegre: AGB, 2010. pp. 1 - 8.
- CARVALHO, V. R. O. de; CARVALHO, A. C. C.; RANGEL, M. E. S.; ARAÚJO, R. R. (2010). Análise do comportamento das chuvas no município de Bacabal-MA e a formação de enchentes no ano de 2009. In: Encontro Nacional de Geógrafos, XVI., 2010, Porto Alegre. *Anais...*. Porto Alegre: AGB, 2010. pp. 1 - 10.
- CEPED. (2013). *Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 /Volume Maranhão*. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED/UFSC). 2. ed., Florianópolis: CEPED UFSC, 2013, 107 p.
- CUNNANE, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resources Research*, 15 (2), pp. 489-494.
- BHUNYA, P. K.; BERNDTSSON, R.; JAIN, S. K.; KUMAR, R. (2013). Flood analysis using negative binomial and Generalized Pareto models in partial duration series (PDS). *Journal of Hydrology*, 497, pp. 121-132.
- GOEL, N. K.; SETH, S. M.; CHANDRA, S. (1998). Multivariate modeling of flood flows. *Journal of Hydraulic Engineer*, 124 (2), pp. 146-155.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte, Brasil. 552p.
- NAGY, B.K.; MOHSEN, M.; HUGHEY, K.F.D. (2017). Flood frequency analysis for a braided river catchment in New Zealand: Comparing annual maximum and partial duration series with varying record lengths. *Journal of Hydrology*, 547, pp. 365-374.
- SHIAU, J. T. (2003). Return period of bivariate distributed extreme hydrological events. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 17 (1-2), pp.42-57.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. *Handbook of Hydrology*, D. R. Maidment, Ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., N. Y.
- YUE, S.; OUARDA, T. B. M. J.; BOBEE, B.; LEGENDRE, P.; BRUNEAU, P. (1999). The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 226, pp. 88-100.
- WARD, P. J.; KUMMU, M.; LALL, U. (2016). Flood frequencies and durations and their response to El Niño Southern Oscillation: Global analysis. *Journal of Hydrology*, 539, pp.358-378.