

ESTIMATIVA DE VAZÃO MÁXIMA PARA PROJETOS DE BARRAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URAIM EM PARAGOMINAS/PA

Juliana Maia Duarte¹
Claudio José Cavalcante Blanco²
Laila Rover Santana³

RESUMO

O conhecimento das vazões máximas nas bacias hidrográficas, relacionado a um determinado risco hidrológico, é um fator essencial no dimensionamento de estruturas hidráulicas. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi definir vazões de projeto para barragens de concreto e terra com tempos de retorno de 500 e 1.000 anos, respectivamente, em pontos estratégicos da bacia hidrográfica do rio Uraim em Paragominas/PA. As vazões de projeto foram determinadas através da distribuição de probabilidade Generalizada de Valores Extremos (GEV), sendo os parâmetros estimados pelo Método da Máxima Verossimilhança. Os resultados demonstraram que a GEV gerou valores simulados com uma boa aderência aos valores observados. Para barragens de terra, a maior vazão obtida foi de 5,48 m³/s; e para barragens de concreto, a maior vazão foi de 5,42 m³/s no mesmo local analisado. As vazões máximas simuladas em função do tempo de retorno podem servir como ferramenta para futuros projetos, mais seguros, de barragens de terra e concreto na bacia hidrográfica do rio Uraim.

Palavras-chave: Tempo de retorno. Distribuição de probabilidade Generalizada de Valores Extremos. Rompimento de barragens. Amazônia.

¹ Engenheira Sanitarista e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Brasil E-mail: duartemaiajuliana@gmail.com

² Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Brasil. E-mail: blanco@ufpa.br

³ Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Brasil. E-mail: laila.santana@itec.ufpa.br

MAXIMUM FLOW ESTIMATE FOR DAM PROJECTS IN THE URAIM RIVER BASIN IN PARAGOMINAS/PA

ABSTRACT

The knowledge of the maximum flows in the river basins, related to a certain hydrological risk, is an essential factor in the design of hydraulic structures. In this context, the objective of this work was to define project flows for concrete and earth dams with 500 and 1,000 year return times, respectively, at strategic points of the Uraim river basin in Paragominas/PA. In order to obtain the project flows, the generalized probability distribution of extreme values (GEV) was applied, and the parameters were estimated by the Maximum Likelihood Method. The results showed that the GEV generated simulated values with a good adherence to the observed values. For earth dams, the highest flow rate was 5.48 m³/s; and for concrete dams, the highest flow rate was 5.42 m³/s in the same local analyzed. Simulated maximum flow rates as a function of the time of return can serve as a tool for future projects of earth and concrete dams in the Uraim river basin.

Keywords: Return time. Generalized probability distribution of extreme values. Dam rupture. Amazonia.

1 INTRODUÇÃO

Um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/97, é aquele definindo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão. O conhecimento sobre as vazões máximas, ou vazões de projetos, nas bacias hidrográficas tem por maior interesse a delimitação de zonas de cheias, dimensionamento de sistema de drenagem e o dimensionamento de estruturas hidráulicas, como vertedores de barragens (PRUSKI *et al.*, 2013; MONTE *et al.*, 2016). No último caso, as vazões de projeto podem ser determinadas a partir de uma série de dados observados e estimadas utilizando modelos probabilísticos, no qual este evento hidrológico é associado a um determinado tempo de retorno, ou seja, o intervalo de tempo que o evento é igualado ou superado ao menos uma vez. Devido à aleatoriedade dos processos hidrológicos, a modelagem estatística vem sendo usada frequentemente para quantificar variáveis temporais como: chuva, vazão, evaporação e velocidade do vento (HUSER & DAVISON, 2014; PROSDOCIMI *et al.*, 2014). Os resultados obtidos podem auxiliar na adoção de medidas direcionadas a prevenir e mitigar os danos causados pelas recorrentes inundações nas bacias

hidrográficas, estimando a probabilidade de ocorrência desses eventos (CAVALCANTI, 2014; XIONG, 2011; LANNA, 2012).

Barragens podem romper por fenômenos naturais ou por má gestão (ZHANG *et al.*, 2009). Segundo o *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (2017), 43,5% do número total de desastres naturais que ocorreram em todo mundo foram ocasionados por inundações. Foram 140 milhões de pessoas afetadas por este fenômeno durante o período de 2007 a 2017, com quase 9 mil mortes, aliada a uma perda econômica de cerca 57 bilhões de dólares. No Brasil são cadastradas 24.092 barragens para diferentes finalidades, dentre essas se destacam, 9.827 (41%) destinadas à irrigação, 790 (3,3%) a contenção de rejeitos de mineração e 1.803 (7,5%) para o abastecimento de água. No entanto, segundo o Relatório de Segurança de Barragens, estima-se que o número de represamentos artificiais espalhados pelo país seja pelo menos três vezes maior (ANA, 2017).

Zhang *et al.* (2009) analisaram a ocorrência de falhas em barragens localizadas em vários países. Com um banco de dados de aproximadamente 900 casos, 66% desses ocorreram em barragens de terra. Os resultados apontaram que a maioria das causas de rompimento é por galgamento (capacidade insuficiente do vertedor ou vazão superior ao estabelecido no projeto) e erosão e deslizamento (erosão interna ou deslizamento no corpo da barragem, erosão interna na fundação ou ao redor do vertedor e qualidade do vertedor).

Segundo dados do Sistema de Proteção da Amazônia, no município de Paragominas-PA, no dia 12 de abril de 2018, em apenas uma hora, choveu 110 mm, o que é considerado muito acima das médias já registradas para o município, sendo a média mensal de 154 mm. A elevada precipitação pluviométrica desse dia causou grandes inundações, ocorrendo também o rompimento de três barragens de terra localizadas a montante do rio Uraim, ocasionando um segundo processo, a enxurrada, onde cerca de 40% da cidade ficou alagada, causando impactos ambientais e sociais no município, entre eles, o rompimento da rodovia PA-256, 2.014 pessoas desabrigadas e, infelizmente, a morte de três pessoas que residiam às margens dos rios (CPRM, 2018).

Nesse contexto, o trabalho tem como objetivo determinar as vazões de projeto para possíveis barragens de terra localizadas na bacia hidrográfica do rio Uraim,

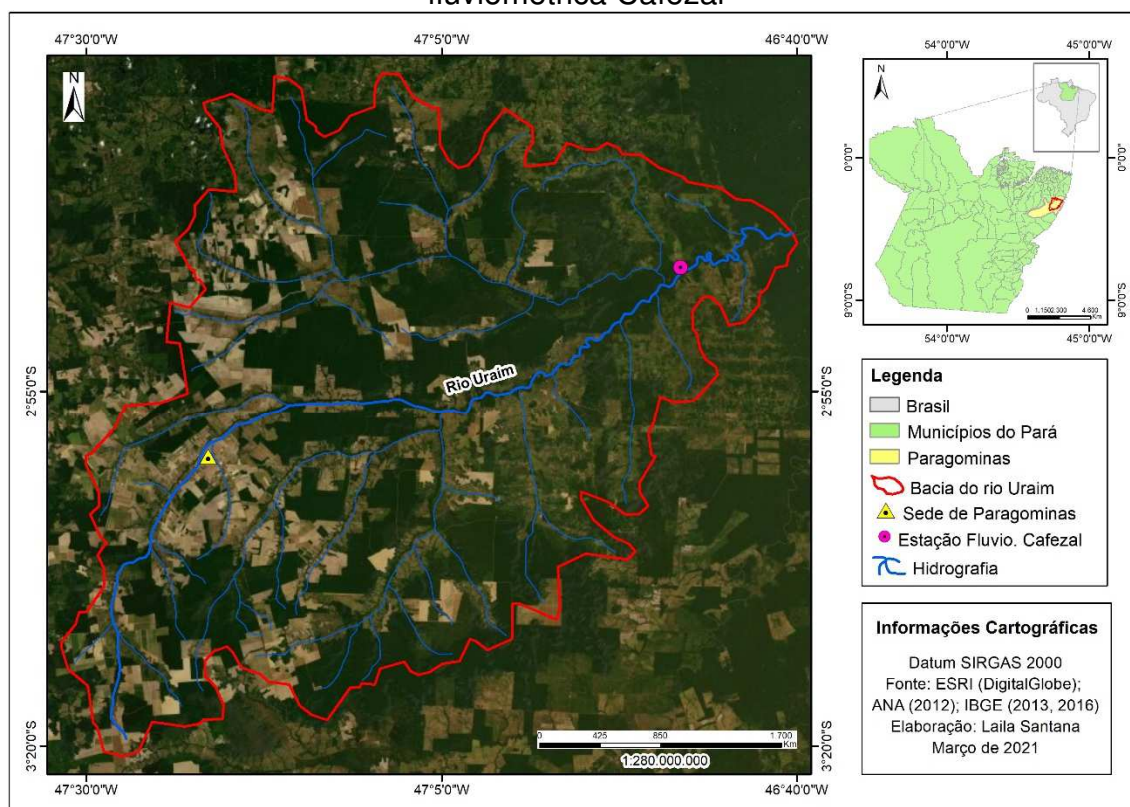
visando estabelecer um critério hidrológico importante para o dimensionamento de barragens, podendo ser utilizado pela comunidade do município.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Uraim possui uma área de 4.690 km² e está localizada, em grande parte, na cidade de Paragominas, no estado do Pará. Com uma vazão média anual de 268.423,35 m³/h, a bacia ocupa 21,75% da área total do município, e uma grande porção da malha urbana da cidade é cortada pelo rio Uraim (SANEPAR, 2014) (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Uraim e da estação fluviométrica Cafezal

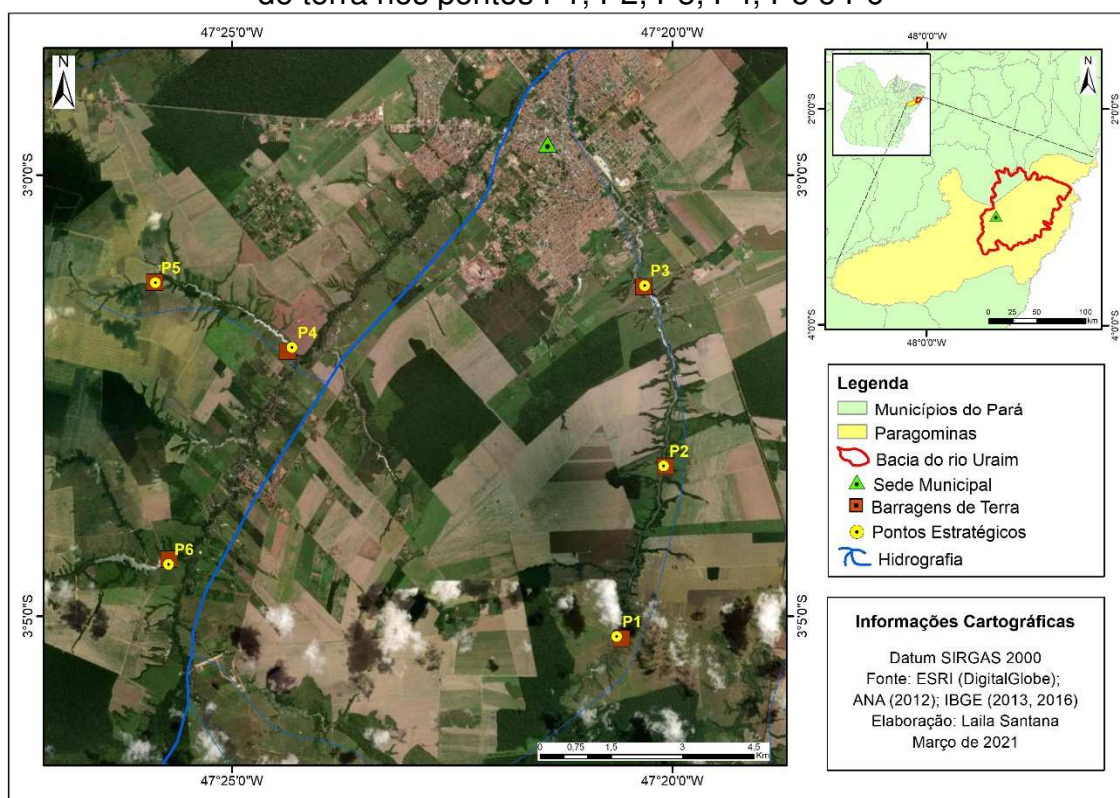


Foi realizada uma busca no Cadastro Nacional de Barragens (CNB), administrada pela Agência Nacional de Águas, que realiza o levantamento de informações para a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) nº 12.334/2010. Na bacia hidrográfica do rio Uraim foram encontradas quatro barragens cadastradas, sendo que não há informações suficientes dessas barragens para que as mesmas sejam classificadas de acordo com a PNSB. Devido a essa falta

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 10, n. 1, p. 262-281, mai. 2021.

de dados na bacia, foi necessário estimar as vazões de projeto em pontos com possíveis barragens de terra, as quais foram identificadas através de imagens de satélite. Assim, pela proximidade com a cidade de Paragominas e pela localização de possíveis barragens de terra, foram definidos 6 pontos dentro da bacia, identificados como P1, P2, P3, P4, P5 e P6 (Figura 2), para os quais foram estimadas as vazões máximas.

Figura 2 – Mapa de localização da cidade de Paragominas e de possíveis barragens de terra nos pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6



2.2 ESTIMATIVAS DE VAZÕES NOS AFLUENTES DO RIO URAIM

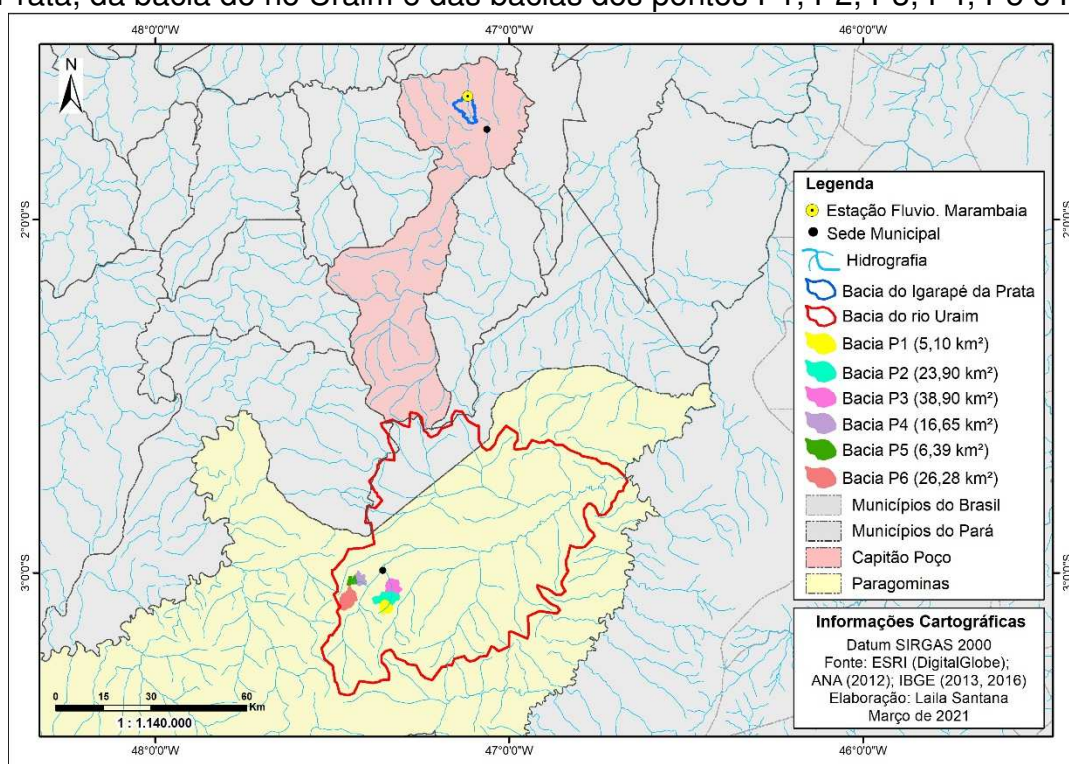
A estimativa das vazões, para os pontos da Figura 2, foi realizada através do método baseado na interpolação linear, que faz uso da proporcionalidade entre áreas de drenagem e as vazões das estações fluviométricas mais próximas (ELETROBRÁS, 2000) (Equação 1).

$$Q_1 = \frac{A_1}{A_2} \times Q_2 \quad (1)$$

Sendo, Q_1 a vazão a ser estimada (m^3/s); A_1 área de drenagem da bacia sem medida de vazão (km^2); A_2 a área de drenagem da bacia do posto existente (km^2); e Q_2 a vazão do posto existente (m^3/s).

Na bacia hidrográfica do rio Uraim existe uma única estação fluviométrica, a estação Cafezal (código ANA: 32550000), que drena uma área de 4.690 km² e está localizada próxima à foz da bacia (Figura 1). No entanto, não foi possível utilizar os dados dessa estação para estimar as vazões máximas nos pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6 (Figura 2), os quais possuem áreas de drenagem que variam de 5,10 a 38,90 km², uma vez que o método baseado na interpolação linear deve ser aplicado em bacias com áreas de drenagem com limite de diferença de 3 a 4 vezes maior. Nesse contexto, a Estação Fluviométrica Marambaia (Código ANA: 31600000), localizada na bacia do Igarapé da Prata, foi selecionada, por ser a estação fluviométrica mais próxima da bacia do rio Uraim. Essa bacia está localizada no município de Capitão Poço a 143 km em linha reta do município de Paragominas (Figura 3). A área de drenagem, referente às vazões medidas pela estação Marambaia é de 32,7 km², mesmo sendo bem menor que a área de drenagem da estação Cafezal, extrapola o limite de diferença entre áreas para as bacias dos pontos P1 e P5 (Figura 3). Contudo, não existe outra estação que atenda o limite do método e que possa ser usada em lugar da estação Marambaia.

Figura 3 – Mapa de localização e hidrografia da bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, da bacia do rio Uraim e das bacias dos pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6



Além disso, a bacia do Igarapé da Prata está inserida na mesma região climática da bacia hidrográfica do rio Uraim, que segundo a classificação de Köppen é do tipo *Am*, sendo úmido com pequena estação seca entre setembro e novembro. Outra característica semelhante entre as bacias é o tipo de solo, sendo o Latossolos Amarelos predominante tanto na área da bacia do rio Uraim (FAPESPA, 2016) quanto na área da bacia do Igarapé da Prata (SANTOS *et al.*, 2015). As vazões máximas para os pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6 foram estimadas a partir da série histórica de 30 anos (1986 a 2015) de dados da estação Marambaia, disponibilizados no Sistema de Informações Hidrológicas – *HidroWeb* da ANA.

2.3 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

A distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV - *Generalized Extreme Value*) foi utilizada para a estimativa de vazões de projeto, pois tem sido amplamente utilizada para eventos extremos de precipitação e vazão, resultando em bons ajustes (RULFOVÁ *et al.*, 2016; FARANDA *et al.*, 2011; TRAMBLAY *et al.*, 2012; FENDEKOVÁ *et al.*, 2018; KJELDSSEN *et al.*, 2018; GOMES & JÚNIOR, 2018; MARTINS *et al.*, 2018; COTTA *et al.*, 2016). A GEV incorpora as três formas assintóticas de valores extremos em uma única expressão, ou seja, pode fornecer os seguintes comportamentos no gráfico da distribuição: forma dupla exponencial, forma exponencial simples e a forma exponencial com limite superior (NAGHETTINI & PINTO, 2007). A Função Acumulada de Probabilidades (FAP) da distribuição GEV e a Função Densidade de Probabilidade (FDP) são dadas pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$FAP(y) = e^{\left\{-\left[1-k\left(\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}}\right\}} \quad (2)$$

$$FDP(y) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - k \left(\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] e^{\left\{-\left[1-k\left(\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}}\right\}} \quad (3)$$

Sendo, β o parâmetro de posição; α o parâmetro de escala; e k o parâmetro de forma. O valor e o sinal de k determinam a forma assintótica de valores extremos máximos. Se $k < 0$, a GEV representa a distribuição do Tipo II, definida apenas para $y > (\beta + \alpha) / k$. Se $k > 0$, a GEV representa a distribuição do Tipo III, definida para $y < (\beta + \alpha) / k$.

Se $k = 0$, a GEV corresponde à distribuição de Gumbel com parâmetro de escala α e parâmetro de posição β .

Os parâmetros da GEV podem ser estimados por uma variedade de métodos, entre os quais se destacam o Método dos Momentos (MM), o Método da Máxima Verossimilhança (MMV) e o Método dos Momentos-L (MML). Contudo, o MMV tem demonstrado maior eficiência, pois produz estimadores de menor variância e de não tendenciosidade (HARTMANN *et al.*, 2011; SOCCOL *et al.*, 2010; AYANG *et al.*, 2019; BLAIN, 2011; YALÇINKAYA *et al.*, 2018; SONG *et al.*, 2018), sendo o método adotado neste estudo. O MMV consiste basicamente em maximizar uma função dos parâmetros da distribuição, conhecida como “Função de Verossimilhança”. Essa função determina o ponto de máximo, que é obtido pela derivação parcial em relação a cada um dos parâmetros da distribuição de probabilidade (Equação 4) (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

$$L(\theta_1, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^N f_y(y_1, \theta_1, \dots, \theta_k) \quad (4)$$

Sendo θ o vetor de parâmetros; y_1 valores da variável observada; e $f_y(y_1, \theta_1, \dots, \theta_k)$ a distribuição de probabilidade ajustada à série de valores y_1 .

O equacionamento para a condição de máximo resulta em um sistema de igual número de equações e incógnitas, cujas soluções produzem os estimadores de máxima verossimilhança. Os parâmetros β , α e k da distribuição de GEV podem ser encontrados através do seguinte sistema:

$$\frac{1}{\alpha} [\sum_{i=1}^N \exp(-y_i - ky_i) - (1 - k) \sum_{i=1}^N \exp(ky_i)] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{k\alpha} [\sum_{i=1}^N \exp(-y_i - ky_i) - (1 - k) \sum_{i=1}^N \exp(ky_i) + N - \sum_{i=1}^N \exp(-y_i)] = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{k^2} [\sum_{i=1}^N \exp(-y_i - ky_i) - (1 - k) \sum_{i=1}^N \exp(ky_i) + N - \sum_{i=1}^N \exp(-y_i)] + \frac{1}{k} [-\sum_{i=1}^N y_i + \sum_{i=1}^N y_i \exp(y_i) + N] = 0 \quad (7)$$

Sendo $y_i = \frac{1}{k} \ln \left[1 - k \left(\frac{x_i - \beta}{\alpha} \right) \right]$.

Para verificar a adequação entre as frequências calculadas por um modelo de distribuição de probabilidade e as frequências observadas são utilizados os “Teste de Aderência”. Assim, o teste de Filliben foi utilizado, pois apresenta resultados satisfatórios em estudos relacionados à estimativa de valores extremos (JUNQUEIRA *et al.*, 2015; FRANCISCO *et al.*, 2015; FRANCO *et al.*, 2013; MARQUES *et al.*, 2014). A estatística do teste de Filliben é dada pela eventual existência de uma forte associação linear entre as observações (x_i) e os quantis teóricos (w_i) (Equação 8).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2}} \quad (8)$$

Sendo, x_i a vazão observada no tempo i ; \bar{x} a média das vazões observadas; w_i a vazão estimada no tempo i ; e \bar{w} a média das vazões estimadas.

Quanto mais próximo r é de 1, mais "normais" são os dados. Se $r > r_{crit,\alpha}$, a aderência entre os dados observados e calculados foi aceita pelo método. Para este estudo o nível de significância adotado foi de $\alpha = 0,05$, sendo o ajuste da distribuição obtida a um nível de confiança de 95%.

Para quantificar a variabilidade presente nas estimativas dos quantis de interesse, foi calculado o Erro Padrão de Estimativa (EPE) (KITE, 1977) (Equação 9). Essa medida é frequentemente utilizada para indicar a confiabilidade das estimativas de quantis de variáveis hidrológicas (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_{ei})^2}{n-m}} \quad (9)$$

Sendo x_i a vazão observada no tempo i ; X_{ei} é a vazão estimada no tempo pela distribuição teórica de probabilidade; n é o número de elementos da série; e m é o número de parâmetros estimados para a distribuição de probabilidade.

2.4 TEMPO DE RETORNO

O tempo de retorno (TR) é associado a um risco hidrológico de que o evento X seja igualado ou superado ao menos uma vez, em um período de N anos. Segundo Villela & Mattos (1975) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) (2006), o tempo de retorno para barragens estão em um intervalo de 50 a 10.000 anos, conforme o tipo de construção e usos afins (Tabela 1).

Tabela 1 – Período de retorno para diferentes tipos de barragens

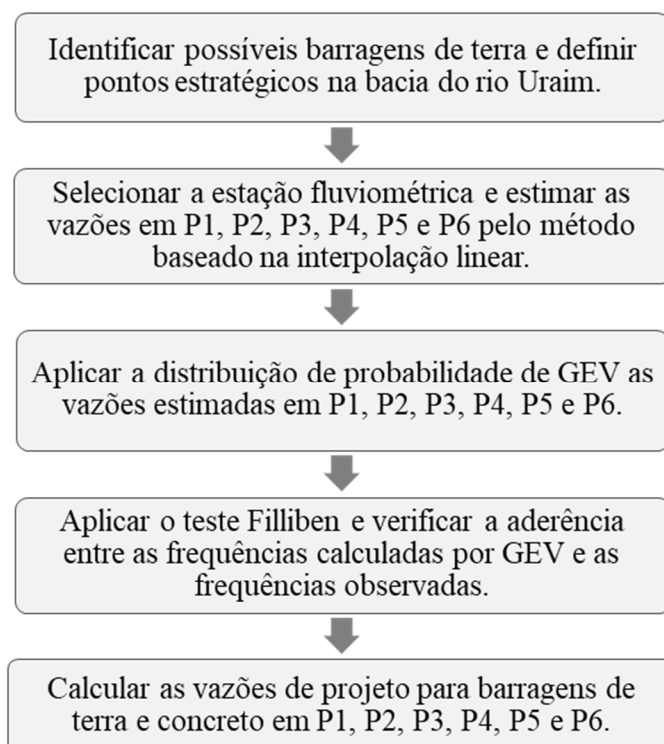
Obra Hidráulica	Período de retorno (anos)
Pequenas barragens para abastecimento de água	50 a 100
Barragem de concreto	500
Extravasor de barragem de terra	1.000
Vertedor de grandes barragens	10.000

Fonte: Vilella & Mattos (1975) e DAEE (2006)

Neste trabalho foram utilizados os tempos de retorno para barragens de terra, pois são construídas com maior frequência na bacia hidrográfica de estudo. Também foram calculadas as vazões de projeto para barragens de concreto, com TR igual a 500 anos, já que também são barragens bastante utilizadas e mais seguras.

Na Figura 4 estão descritas, de forma simplificada, as etapas da metodologia utilizadas nesse estudo.

Figura 4 – Esquema da metodologia utilizada no estudo.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

A Tabela 2 apresenta as vazões máximas estimadas para os pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6. Nesse caso, a estação Marambaia foi considerada como posto existente na Equação 1.

Tabela 2 – Vazões máximas anuais estimadas para os pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6

Ano	Estação Marambaia	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1986	2,60	0,41	1,90	3,09	1,32	0,51	2,09
1987	1,68	0,26	1,23	2,00	0,86	0,33	1,35
1988	3,55	0,55	2,60	4,22	1,81	0,69	2,85
1989	2,56	0,40	1,87	3,05	1,30	0,50	2,06
1990	4,10	0,64	3,00	4,88	2,09	0,80	3,30
1991	3,77	0,59	2,76	4,48	1,92	0,74	3,03
1992	1,04	0,16	0,76	1,24	0,53	0,20	0,84
1993	1,24	0,19	0,91	1,48	0,63	0,24	1,00
1994	2,73	0,43	2,00	3,25	1,39	0,53	2,19
1995	3,38	0,53	2,47	4,02	1,72	0,66	2,72
1996	2,07	0,32	1,51	2,46	1,05	0,40	1,66
1997	2,61	0,41	1,91	3,10	1,33	0,51	2,10
1998	1,43	0,22	1,05	1,70	0,73	0,28	1,15
1999	2,86	0,45	2,09	3,40	1,46	0,56	2,30
2000	3,02	0,47	2,21	3,59	1,54	0,59	2,43
2001	3,54	0,55	2,59	4,21	1,80	0,69	2,84
2002	4,39	0,68	3,21	5,22	2,24	0,86	3,53
2003	2,52	0,39	1,84	3,00	1,28	0,49	2,03
2004	1,90	0,30	1,39	2,26	0,97	0,37	1,53
2005	1,60	0,25	1,17	1,90	0,81	0,31	1,28
2006	3,42	0,53	2,50	4,07	1,74	0,67	2,75
2007	2,07	0,32	1,52	2,47	1,06	0,41	1,67
2008	3,24	0,51	2,37	3,85	1,65	0,63	2,60
2009	3,38	0,53	2,47	4,02	1,72	0,66	2,72
2010	2,43	0,38	1,78	2,89	1,24	0,47	1,95
2011	3,21	0,50	2,34	3,81	1,63	0,63	2,58
2012	1,99	0,31	1,45	2,36	1,01	0,39	1,60
2013	3,38	0,53	2,47	4,02	1,72	0,66	2,72
2014	2,94	0,46	2,15	3,50	1,50	0,57	2,36
2015	3,31	0,52	2,42	3,94	1,69	0,65	2,66

O Método da Máxima Verossimilhança foi aplicado às vazões estimadas da Tabela 2, sendo obtidos os parâmetros α , β e k para a distribuição de GEV, e a partir dessas informações, foram geradas as vazões simuladas para cada ponto determinado na área de estudo (Tabela 3).

Tabela 3 – Parâmetros estimados para as distribuições pelo Método da Máxima Verossimilhança para os pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6

Estação	α	β	k
P1	0,138	0,387	0,398
P2	0,639	1,809	0,379
P3	1,039	2,942	0,379
P4	0,445	1,259	0,376
P5	0,171	0,483	0,377
P6	0,702	1,989	0,378

Utilizando o teste de aderência de Filliben, foi possível analisar o ajuste dos dados observados e simulados, e para as vazões estimadas dos pontos analisados, o teste apresentou uma boa aderência aos dados observados. Estes resultados foram ratificados pelos resultados do erro padrão de estimativa (EPE) (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados do teste de aderência e do erro padrão de estimativa do modelo probabilístico para os pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6

Estação	$r_{(crit,0,05)}$	$r_{calculado}$	EPE (m ³ /s)
P1	0,967	0,993 ^A	0.02
P2	0,967	0,993 ^A	0.09
P3	0,967	0,993 ^A	0.15
P4	0,967	0,993 ^A	0.06
P5	0,967	0,993 ^A	0.02
P6	0,967	0,993 ^A	0.10

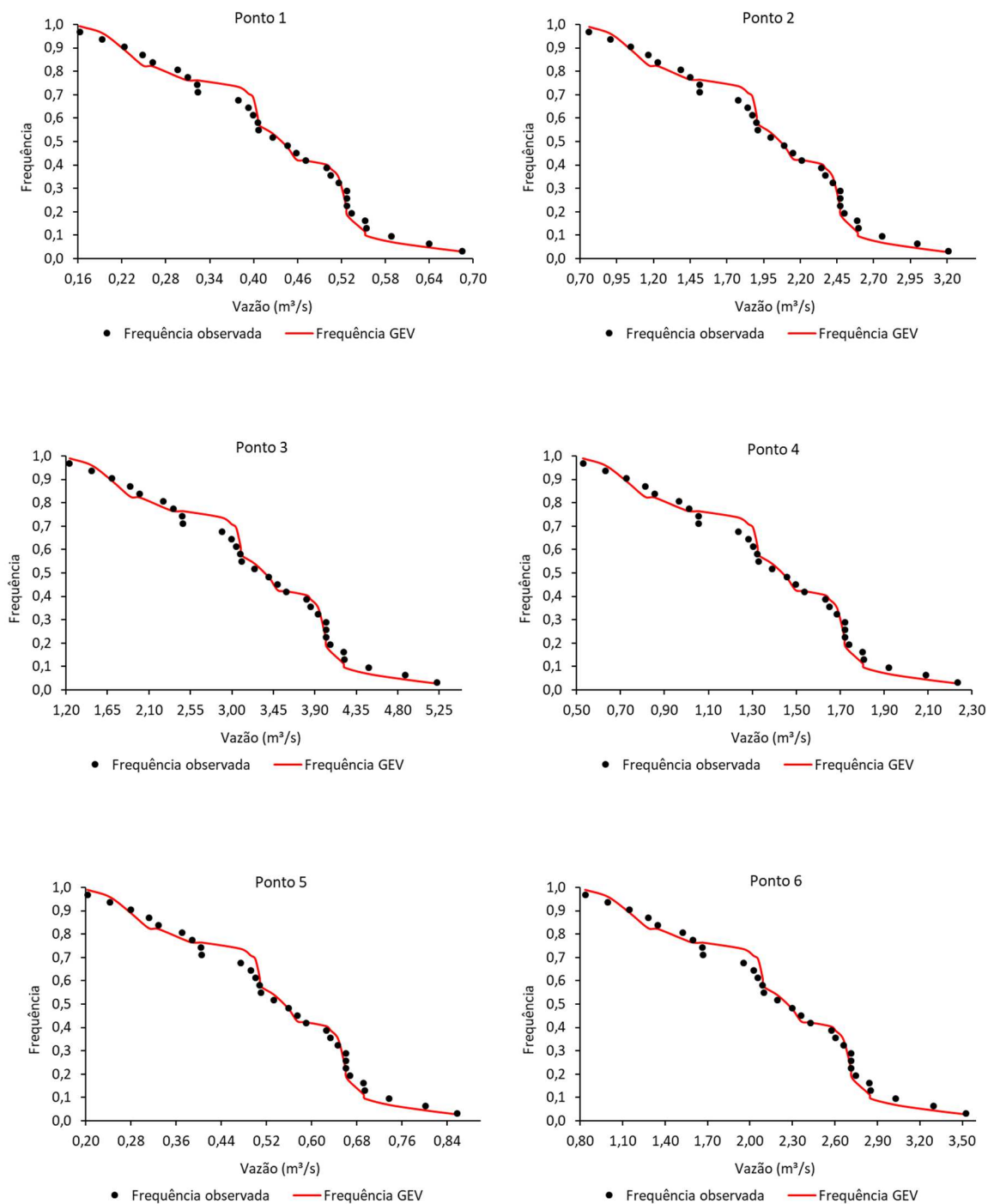
*R- Rejeitado pelo teste; A- Aceito pelo teste

Os valores baixos do EPE demonstram que existe uma variação pequena entre as vazões observadas e calculadas pelo modelo probabilístico de GEV, e este resultado indica que o modelo apresenta um bom desempenho para estimativa de vazões máximas na bacia hidrográfica do rio Uraim.

As frequências observadas e estimadas foram plotadas em gráficos para melhor visualização do ajuste (Figura 5). A importância da escolha da distribuição que apresente melhor ajuste é importante para a confiabilidade na previsão dos resultados de vazões de projeto, visto que, o subdimensionamento pode acarretar em altos riscos

de rompimento da barragem. Além disso, o superdimensionamento pode onerar a obra ou torná-la inviável financeiramente.

Figura 5 – Gráfico das frequências das vazões máximas anuais observadas e simuladas via distribuição GEV dos pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6 da bacia hidrográfica do rio Uraim

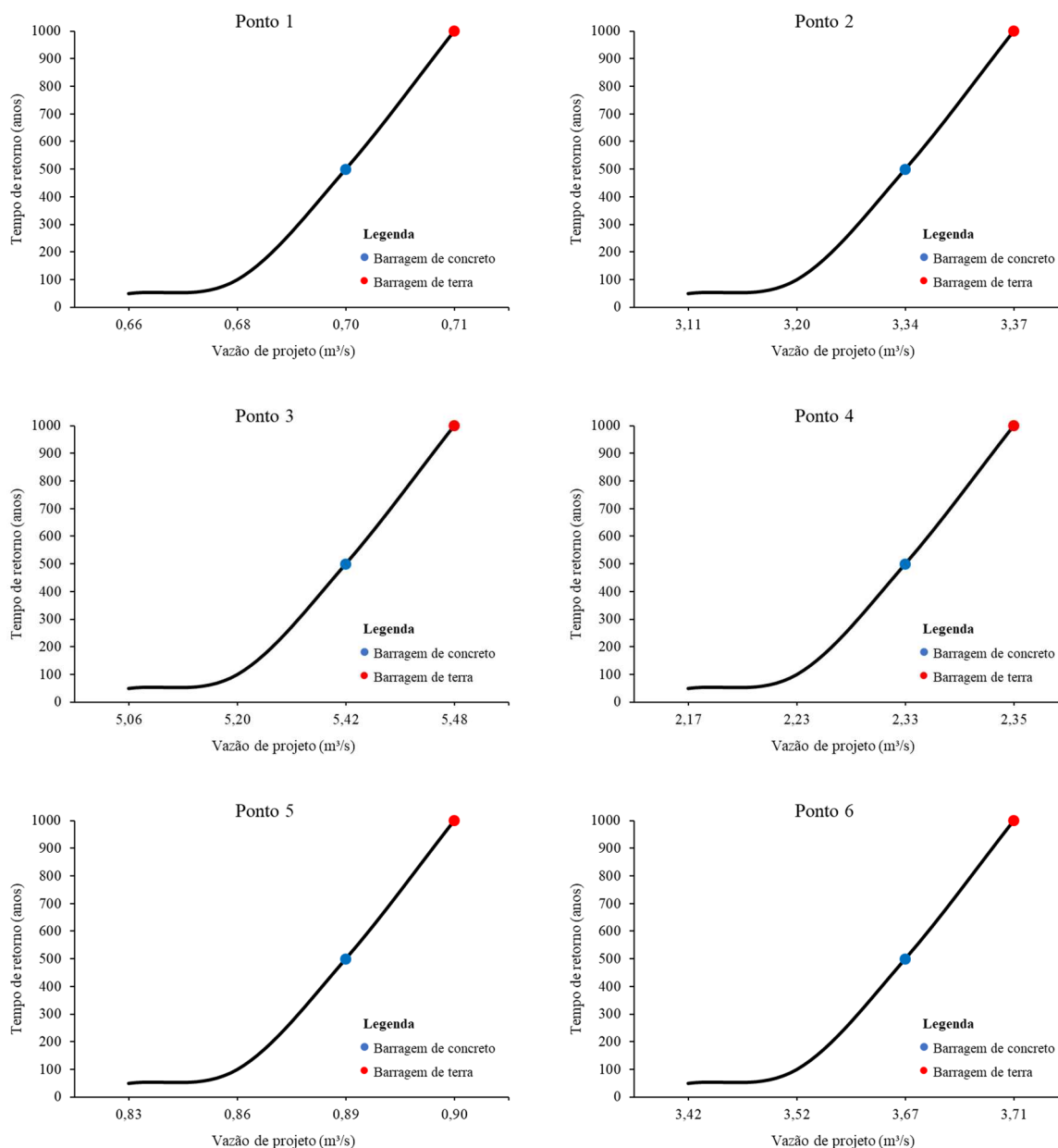


Observa-se que em todos os gráficos houve um bom ajuste entre as frequências observadas e as simuladas pela distribuição GEV, confirmando os resultados do teste de aderência de Filliben. Nesse contexto, Costa *et al.* (2019) aplicaram três distribuições de probabilidade, entre elas a GEV, às séries de vazões máximas do reservatório de Furnas, e verificaram que a Log-normal e a GEV mostraram-se mais adequadas na estimativa dessa variável hidrológica. Nagy *et al.* (2017) e Ding *et al.* (2016) também encontraram bons ajustes entre as frequências observadas e simuladas pela distribuição GEV, contudo ressalta-se que nesses estudos os parâmetros da função foram estimados pelo método de Momentos-L. Ainda sobre o estudo de Nagy *et al.* (2017), para verificar a adequação das funções de probabilidade aos dados observados, os autores utilizaram três testes, sendo um deles o Teste de Filliben, o mesmo utilizado no presente estudo, que indicou um bom ajuste entre os dados observados e simulados. Os parâmetros da função GEV foram estimados pelo método da Máxima Verossimilhança nos estudos de Wilcox *et al.* 2018 e Zhang *et al.* 2017, mesmo método utilizado neste estudo, dando bons ajustes entre as frequências estimadas e observadas.

3.2 VAZÕES DE PROJETO DE BARRAGENS DO RIO URAIM

Para os pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6 foram calculadas as vazões de projeto para as possíveis barragens de terra e concreto (Figura 6). As maiores vazões obtidas foram do P3, sendo igual a 5,42 m³/s para barragem de concreto e 5,48 m³/s para barragem de terra, enquanto as menores vazões foram determinadas para P1, igual a 0,70 m³/s (barragem de concreto) e 0,71 m³/s (barragem de terra). Os valores de projeto para os dois tipos de barragem são muito próximos, podendo-se assumir apenas o valor de projeto para barragens de terra, o qual é maior.

Figura 6 – Gráficos das vazões de projeto dos pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6



No P3, que é o ponto mais próximo da cidade, as vazões de projeto ultrapassam os 5 m³/s para ambos os tipos de barragens. De acordo com informações de jornais (PREFEITURA..., 2018) e da população local, as barragens que romperam em Paragominas, no ano de 2018, estão localizadas à montante desse ponto. Efeitos danosos de fortes chuvas, como os ocorridos em Paragominas, ocorreram também na cidade de Oroville, nos Estados Unidos, nos primeiros meses do ano de 2017. Nesse caso, a estrutura do vertedouro principal da barragem do lago Oroville foi

danificada. Segundo Koskinas *et al.* (2019), esses eventos aumentaram as vazões no lago, causando prejuízos materiais a jusante da barragem. Nos pontos P1 e P5 (Figura 6) foram encontrados os menores valores de vazões da bacia do rio Uraim. Contudo, vale destacar que se ocorrer o rompimento das barragens localizadas nesses pontos, aquelas que estão a jusante poderão sofrer danos estruturais e possível rompimento. Estudos semelhantes, que buscaram identificar a ocorrência de inundações em áreas localizadas a jusante de barragens foram realizados por Medeiros e Zanella (2019) e Costa *et al.* (2019). Os autores também estimaram as vazões máximas para diferentes tempos de retorno variando de 2 a 100 anos. Eles ainda reforçaram a importância de estudos hidrológicos no dimensionamento de obras hidráulicas, a fim de prevenir que eventos extremos de precipitação causem inundações em cidades à jusante de barragens, igual ao ocorrido no município de Paragominas.

4 CONCLUSÃO

Vazões de projeto para barragens de terra e concreto via função probabilística GEV foram estimadas para sub-bacias do rio Uraim, apresentando bons resultados. Dentre os quais, destaca-se a maior vazão de projeto (5,48 m³), que foi determinada para o ponto P3, sendo o mais próximo à cidade de Paragominas. Portanto, o rompimento da possível barragem, localizada nesse ponto, pode ocasionar danos ambientais e sociais ao município. Além disso, é sabido que pequenas bacias hidrográficas são as menos monitoradas, fato que também ocorre com as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Uraim. Assim, as vazões de projeto determinadas são de grande valia para o dimensionamento hidráulico e estrutural adequado de barragens de terra e concreto na bacia hidrográfica do rio Uraim em Paragominas/PA. A Política Nacional de Segurança de Barragens ainda possui muitas dificuldades em sua implantação, apesar do grande avanço deste assunto no Brasil, percebe-se que é necessário avançar muito em pesquisa e em fiscalização das barragens existentes. Em relação ao presente trabalho, é necessário verificar *in loco* as possíveis barragens identificadas através de imagens de satélite.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório Segurança de Barragens 2017**. ANA. Brasília. 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em ><http://hidroweb.ana.gov.br/><. Acesso em 16 dez 2018.

AYANG, A.; WAMKEUE, R.; OUHROUCHE, M.; DJONGYANG, N.; SALOMÉ, N. E.; POMBE, J. K.; EKEMB, G. Maximum likelihood parameters estimation of single-diode model of photovoltaic generator. **Renewable energy**, v.130, p.111-121, 2019.

BLAIN, G. C. Cento e vinte anos de totais extremos de precipitação pluvial máxima diária em Campinas, Estado de São Paulo: análises estatísticas. **Bragantia**, v. 70, n. 3, 2011.

CAVALCANTI, D. L. O. **Estudo comparativo de métodos de estimação de vazões máximas de projeto para grandes bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2014.

CHOW, V. T. Section 8-I. Statistical and probability analysis of hydrologic data. Part I – Frequency Analysis. In: Handbook of Applied Hydrology. McGrawHill. USA. 1964.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. DEPARTAMENTO DE GESTÃO TERRITORIAL. **Relatório de Setorização de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa, Enchentes e Inundações**. Paragominas, 2018.

COSTA, M. S. de; BEIJO, L. A.; AVELAR, F. G. Comparação de distribuições de probabilidades na previsão de vazões máximas do reservatório de Furnas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, 13(1), 3190-3202, 2019.

COTTA, H. H. A.; CORREA, W. S. C.; ALBUQUERQUE, T. T. A. Aplicação da distribuição de Gumbel para valores extremos de precipitação no município de Vitória-ES. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

DAAE. Departamento de águas e energia elétrica. **Guia Prático Para Projetos de Pequenas Obras Hidráulica**. São Paulo, 2006. Disponível em: >http://www.daae.sp.gov.br/index.php?option=com_content&id=124:guia-pratico<. Acesso em 24 jan 2019.

DING, J.; WALLNER, M.; MÜLLER, H.; HABERLANDT, U. Estimation of instantaneous peak flows from maximum mean daily flows using the HBV hydrological model. **Hydrological Processes**, 30(9), 1431-1448, 2016.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, RJ: ELETROBRÁS, 2000.

EM-DAT: THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE/ CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED. Disaster profile. Available at: www.emdat.be/disaster_profiles/index.html. Acesso em 03 dez 2018.

FARANDA, D.; LUCARINI, V.; TURCHETTI, G.; VAIENTI, S. Generalized Extreme Value distribution parameters as dynamical indicators of stability. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, v. 22, n. 11, 2012.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; MELO, V. S. M.; SANTOS, D. S. Probabilidades de ocorrência de chuvas para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

FRANCO, C. S.; MARQUES, R. F.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, L. F. Distribuição de probabilidades para precipitação máxima diária na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, n. 7, 2014.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS (FAPESPA). **Estatísticas Municipais Paraenses: Paragominas**. Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação. Belém, n. 1, jul. / dez, 2016.

GOMES, G. J. C.; JÚNIOR, E. A. V. A coupled system based on Differential Evolution for the determination of Rainfall intensity equations. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, 2018.

HARTMANN, M; MOALA, F. A.; MENDONÇA, M. A. Estudo das precipitações máximas anuais em Presidente Prudente. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, p. 561-568, 2011.

HUSER, R.; DAVISON, A. C. Space–time modelling of extreme events. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)**, v. 76, n. 2, p. 439-461, 2014.

JUNQUEIRA J. J. A.; MELLO, C. R.; ALVES, G. J. Eventos extremos de precipitação no Alto Rio Grande, MG: Análise probabilística. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, 2015.

KITE, G. H. **Frequency and risk analyses in hydrology**. Fort Collins: Water Resources Publication, 1977. 224p.

KJELDSEN, T. R.; AHN, H.; PROSDOCIMI, I.; HEO, JH. Mixture Gumbel models for extreme series including infrequent phenomena. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 13-14, p. 1927-1940, 2018.

KOSKINAS, A.; TEGOS, A.; TSIRA, P.; DIMITRIADIS, P.; ILIOPOULOU, T.; PAPANICOLAOU, P.; KOUTSOYIANNIS, D.; WILLIAMSON, T. Insights into the Oroville Dam 2017 Spillway Incident. **Geosciences**, 9(1), 37, 2019.

LANNA, A. E. **Elementos de estatística e probabilidades**. In: TUCCI, C. E. M (org.). Hidrologia: Ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, p.79-176, 2012.

MARQUES, R. F. D. P. V.; MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D., Franco, C. S., & Oliveira, A. S. D. (2014). Performance of the probability distribution models applied to heavy rainfall daily events. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 8, n. 4, p. 335-342, 2014.

MARTINS, T. B.; ALMEIDA, G. C.; AVELAR, F. G.; BEIJO, L. A. Predição da precipitação máxima no município de Silvianópolis, MG: abordagens clássica e bayesiana. **Revista Irriga**, v. 23, n. 3, p. 467-47, 2018.

DE MEDEIROS, M. D.; ZANELLA, M. E. ESTUDO DAS VAZÕES E ESTIMATIVAS DE INUNDAÇÕES NO BAIXO-AÇU-RN. **Geo UERJ**, (34), 40946, 2019.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. 2008. **Portaria MMA n.º 28/2008**. Disponível em: <<http://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=205491>>. Acesso em 26 dez 2018.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone áreas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 152-167, 2016.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte, MG: CPRM, 552 p., 2007.

NAGY, B. K.; MOHSSEN, M.; HUGHEY, K. F. D. 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, 365-374, 2017.

NAVA, F. R. **Pequenas barragens: uma oportunidade de desenvolvimento científico, técnico e regulador**. Dissertação (mestrado) no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Universidade Federal do Pará, 2018.

PREFEITURA de Paragominas confirma rompimento de represas em fazendas na região após enxurrada. G1 Pará, 13 abril 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/prefeitura-de-paragominas-confirma-rompimento-de-barragens-de-fazendas-na-regiao-apos-enxurrada.ghtml>. Acesso em: 26/05/ 2019.

PROSDOCIMI, I.; KJELDEN, T. R.; SVENSSON, C. Nonstationarity in annual and seasonal series of peak flow and precipitation in the UK. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 5, p. 1125-1144, 2014. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-1125-2014>.

PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. G. Improved Regionalization of Streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 52–71, 2013.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 10, n. 1, p. 262-281, mai. 2021.

RULFOVÁ, Z.; BUIHAND, A.; ROTH, M.; KYSELÝ, J. A two-component generalized extreme value distribution for precipitation frequency analysis. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 569-668, 2016.

SANEPAR. Agencia de Saneamento de Paragominas. **Bacia do Uraim**. 2014. Disponível em: http://saneparagominas.com.br/agua/bacia_uraim/> Acesso em: 03/03/2021.

SANTOS, D. B. O.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. RUSLE para Determinação da Tolerância de Perda de Solo. **Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)**, 5(4), 78-83, 2015.

SOCCOL, O. J.; CARDOSO, C. O.; MIQUELLUTI, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 6, p. 569-574, 2010.

SONG, X.; LU, F.; WANG, H.; XIAO, W.; ZHU, K. Penalized maximum likelihood estimators for the nonstationary Pearson type 3 distribution. **Journal of Hydrology**, v. 567, p. 579-589, 2018.

TRAMBLAY, Y.; BADI, W.; DRIOUECH, F.; ADLOUNI, S. EL; NEPPEL, L.; SERVAT, E. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. **Global and Planetary Change**, v. 82-83, n. n/d, p. 104–114, Fev. 2012.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. McGraw-Hill, 1975.

WILCOX, C.; VISCHÉL, T.; PANTHOU, G.; BODIAN, A.; BLANCHET, J.; DESCROIX, L.; QUANTIN, G.; CASSÉ, C.; TANIMOUN, B.; KONE, S. Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers. **Journal of hydrology**, 566, 531-545, 2018.

XIONG, Y. A dam break analysis using HEC-RAS. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, n. 06, p. 370, 2011.

YALÇINKAYA, A.; ŞENOĞLU, B.; YOLCU, U. Maximum likelihood estimation for the parameters of skew normal distribution using genetic algorithm. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 38, p. 127-138, 2018.

ZHANG, L. M., XU, Y., JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: A database approach. **Georisk**, 3(3), 184-189, 2009.

ZHANG, W.; CAO, Y.; ZHU, Y.; WU, Y.; JI, X.; HE, Y.; XU, Y.; WANG, W. Flood frequency analysis for alterations of extreme maximum water levels in the Pearl River Delta. **Ocean Engineering**, 129, 117-132, 2017.