

Estudo de chuvas intensas para a cidade de Goiânia/GO por meio da modelação de eventos máximos anuais pela aplicação das distribuições de Gumbel e Generalizada de Valores Extremos

Intense rainfall study of Goiânia/GO by modeling maximum annual events using Gumbel and Generalized Extreme Value distributions

José Alexandre Pinto Coelho Filho^{1(*)}

Denise Christina de Rezende Melo²

Maisa de Lourdes Martins Araújo³

Resumo

O conhecimento das precipitações máximas em uma bacia hidrográfica pode viabilizar diversos projetos relacionados aos recursos hídricos, uma vez que pode servir como base para o dimensionamento de obras hidráulicas, tais como vertedores de barragens, canais, bueiros, bacias de retenção, dentre outras. No presente trabalho, a estimação das precipitações máximas foi realizada através da metodologia de análise de frequência local. Foram aplicadas as distribuições de probabilidades de Gumbel e Generalizada de Valores Extremos (GEV), com seus parâmetros obtidos pelo método dos momentos (MOM) e pelo método dos momentos-L (MML), proporcionando a estimativa das precipitações e intensidades de precipitação máxima para a cidade de Goiânia/GO. Na sequência, foram elaboradas as curvas PDF (precipitação-duração-frequência) e IDF (intensidade-duração-frequência) locais. Observou-se, pela ordem, um desvio de 18,6%, 17% e 18,5%, do quantil de precipitação máxima calculado para o tempo de retorno de 1000 anos pela distribuição GEV com parâmetros estimados pelo método MML, em relação àqueles obtidos pela utilização do método MOM, e da distribuição de Gumbel com parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML.

1 MSc.; Engenheiro Civil; Engenheiro Hidrólogo na Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM - Serviço Geológico do Brasil); Endereço: Rua 148, Setor Marista, CEP: 74170-110, Goiânia, Goiás, Brasil; E-mail: alexandre.coelho@cprm.gov.br (*) Autor para correspondência.

2 Engenheira Civil; Engenheira Hidróloga na Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (DEHID/SUREG-GO); Endereço: Rua 148, no 485, Setor Marista, CEP: 74170-110, Goiânia, Goiás, Brasil; E-mail: denise.melo@cprm.gov.br

3 Geógrafa; Analista em Geoprocessamento do Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais; Endereço: Rua Espírito Santo, 495, Sala 605, Barro Preto, CEP: 30160-030, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil; E-mail: maisaaraujo2007@gmail.com

Palavras-chave: Precipitação máxima; intensidade-duração-frequência; análise de frequência local.

Abstract

Knowledge of the maximum rainfall in a watershed can enable various projects related to water resources, since it can serve as the basis for the design of hydraulic structures such as spillways, channels, culverts, detention basins, and others. In this study, the estimation of maximum precipitation was carried out by the local frequency analysis methodology. It was applied Gumbel and Generalized Extreme Value (GEV) distributions, with parameters obtained by moments (MOM) and L-moments (MML) methods, providing the estimation of rainfall and maximum rainfall intensities for the city of Goiânia/GO. In sequence, the PDF (rainfall-duration-frequency) and IDF (intensity-duration-frequency) curves were designed. The results indicated, in order, a deviation of 18.6%, 17% and 18.5%, the maximum precipitation quantile calculated for the return period of 1.000 years by the GEV distribution with parameters estimated by the MML method, to those obtained by using the MOM method and the Gumbel distribution with parameters estimated by MOM and MML methods.

Key words: Maximum rainfall; intensity-duration-frequency; local frequency analysis.

Introdução

O conhecimento das precipitações máximas em uma bacia hidrográfica resulta em diversas aplicações no campo da engenharia de recursos hídricos. A obtenção dessas variáveis não tem apenas importância acadêmica, mas também prática, uma vez que pode servir como base para o dimensionamento de obras hidráulicas, tais como vertedores de barragens, canais, bueiros, bacias de retenção, dentre outras.

De acordo com Tucci (1993), a precipitação máxima pode ser entendida como uma ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma determinada região geográfica. Segundo Naghettini e Pinto (2007), a magnitude

de um evento extremo é inversamente relacionada à sua frequência de ocorrência, uma vez que quanto mais intenso é o evento, menor é sua probabilidade de ocorrência.

Correlacionando-se intensidades e durações das chuvas, verifica-se, que quanto mais intensa for uma precipitação, menor será a sua duração (TUCCI, 1993). Nesse contexto, o procedimento da análise de frequência de variáveis hidrológicas pode ser aplicado para relacionar a magnitude de um determinado evento (precipitação, por exemplo), com sua probabilidade de ocorrência, por meio da aplicação de uma distribuição de probabilidades.

A análise de frequência pode ser classificada em local ou regional, conforme seja a extensão espacial das informações

envolvidas. Quando são agrupadas informações de diversas estações de monitoramento, localizadas em pontos distintos de uma região geográfica, desde que essa região seja considerada homogênea, ou seja, apresente características semelhantes do ponto de vista hidrológico, climatológico e geomorfológico, configura-se a análise de frequência regional.

Na análise de frequência local, tem-se a definição dos quantis de igualdade ou superação de um determinado valor estimado, utilizando uma série de registros hidrometeorológicos observados em uma determinada estação de monitoramento, tal como é o caso do presente estudo, no qual considerou-se uma única estação pluviométrica, por se tratar de uma análise pontual de chuvas intensas em escala local, abrangendo apenas a área urbana da cidade de Goiânia/GO.

Existem diversas distribuições de probabilidades as quais podem ser empregadas para a modelagem de eventos máximos anuais. De acordo com Cândido (2003), cabe ao analista a decisão em escolher uma determinada distribuição de probabilidades, mencionando a inexistência de leis dedutivas que justifiquem o emprego de uma distribuição, ou de uma família de distribuições, na aplicação da análise de frequência de máximos anuais.

Neste trabalho, optou-se pela aplicação das distribuições de Gumbel e Generalizada de Valores Extremos (GEV), uma vez que essas distribuições são derivadas da teoria clássica de valores extremos (Gumbel, 1958) e possuem justificativas teóricas em sua utilização para a modelagem de valores máximos de dados hidrológicos, conforme relatado por Naghettini e Pinto (2007).

O presente estudo pretende apresentar

os resultados do ajuste das distribuições de Gumbel e GEV aos dados de precipitação máxima anual registrados pela estação pluviométrica Goiânia (01649013), operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na cidade de Goiânia, permitindo a estimativa de quantis de precipitação máxima para diferentes probabilidades de ocorrência (ou tempos de retorno).

Na sequência, os quantis de precipitação foram desagregados conforme metodologia apresentada por Silveira (2000), proporcionando a elaboração das curvas IDF (intensidade-duração-frequência) e PDF (precipitação-duração-frequência) dos eventos de precipitação máxima e intensidade de precipitação máxima para a área urbana da cidade de Goiânia/GO.

Material e Métodos

Área de estudo e dados de precipitação

A cidade de Goiânia, capital do estado de Goiás, está inserida na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte, a qual abrange 39 municípios e é a bacia mais densamente povoada do Estado de Goiás (Cunha, 2007). A figura 1 mostra a localização geográfica da área da cidade de Goiânia, inserida na bacia do rio Meia Ponte, e da estação pluviométrica Goiânia (01649013).

O estudo de chuvas intensas para a cidade de Goiânia consiste na análise de frequência local das alturas de chuvas máximas anuais de diversas durações, por meio do ajuste das distribuições de probabilidade de Gumbel e GEV, e posterior elaboração das curvas PDF e IDF.

A qualidade e a aplicabilidade da análise de frequência dependem diretamente dos dados utilizados para estimação de

valor (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A verificação do ajuste da distribuição de probabilidades aos dados amostrais (dados registrados pela estação pluviométrica analisada) foi realizada pela aplicação dos testes do Qui-Quadrado e Komogorov-Smirnov, conforme apresentado em Costa Neto (1977) e Haan (1979).

Dessa forma, os valores das precipitações máximas anuais registradas pela estação pluviométrica Goiânia (01649013) serão ajustados aos modelos distributivos de Gumbel e GEV, para o cálculo das precipitações máximas associadas a diversos tempos de retorno.

O tempo de retorno T (anos) e a probabilidade de excedência, $P(Q \geq q)$, estão relacionados pela seguinte equação:

$$P(Q \geq q) = \frac{1}{T(\text{anos})} \quad (1)$$

A formulação matemática da função inversa da função acumulada de probabilidades (FAP) do modelo distributivo GEV é dada por:

$$x(T) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \left\{ 1 - \left[-h \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^\kappa \right\} \quad (2)$$

Onde α , β e κ são, pela ordem, os parâmetros de escala, forma e posição, os quais descrevem a distribuição GEV. De maneira semelhante, pode-se descrever matematicamente a equação de quantis (ou função inversa da FAP) do modelo de Gumbel:

$$x(T) = \beta - \alpha h \left[-h \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

Onde α e β são, respectivamente, os parâmetros de escala e forma que definem a distribuição de Gumbel.

Para a estimativa dos parâmetros das distribuições de probabilidade, foram utilizados o método dos momentos (MOM) e o método dos momentos-L (MML). De acordo com Naghettini e Pinto (2007), o método MOM consiste em igualar os momentos populacionais aos momentos amostrais.

Assim, sejam x_1, x_2, \dots, x_n , os valores observados constituintes de uma amostra aleatória simples retirada de uma população de variável aleatória distribuída conforme a função densidade $f_X = y; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$, de k parâmetros, com momentos populacionais μ_i . Se m_i representam os momentos amostrais, o sistema de equações do método dos momentos baseia-se em:

$$\mu_i = \theta_i, \theta_2, \dots, \theta_k = m_i; \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

As soluções $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_k$ do sistema formado pelas k equações 4 fornecem as estimativas dos parâmetros da distribuição.

O método dos momentos-L para a estimação de parâmetros de distribuições de probabilidade assemelha-se ao método dos momentos convencionais, consistindo em igualar os primeiros momentos-L amostrais aos seus respectivos correspondentes momentos populacionais, por meio da aplicação das estatísticas-L, conforme descrito por Hosking e Wallis (1993, 1995 e 1997).

De acordo com Vogel e Fennessey (1993), o método dos momentos-L apresenta, como maior vantagem, estimadores mais robustos, enquanto Davis e Naghettini (2001) citam um crescimento significativo do número de aplicações em análise de frequência de variáveis hidrológicas devido às

vantagens potenciais inseridas pela aplicação do método de estimação de parâmetros utilizando os momentos-L.

Maiores detalhes acerca dos métodos para a estimação de parâmetros de distribuições de probabilidade, bem como sua formulação matemática e seus resultados de estimativa para as principais distribuições usuais em hidrologia, podem ser verificados em Clarke (1994), Rao e Hamed (2000) e Naghettini e Pinto (2007).

Desagregação dos dados de chuva

Na desagregação dos quantis de precipitação obtidos pelo ajuste dos modelos distributivos de Gumbel e GEV aos dados de precipitação máxima anual registrados pela estação Goiânia (01649013), foi aplicada a metodologia proposta por Silveira (2000).

Silveira (2000) apresenta uma equação que reproduz os coeficientes diretos de desagregação obtidos a partir dos coeficientes de desagregação em cascata médios para o Brasil, fornecidos por DAEE/CETESB (1980).

$$C_{24}(d) = e^{1,5 \ln \left(\frac{\ln(d)}{7,3} \right)} \quad (5)$$

Onde C_{24} é o coeficiente direto de desagregação a partir da chuva máxima de 24

horas, e d é a duração da chuva em minutos.

Conforme mencionado por Silveira (2000), a aplicação da equação 5 permite o cálculo do coeficiente de desagregação a partir da chuva de 24 horas e de durações inferiores.

Resultados e Discussão

Cálculo dos quantis de precipitação

O cálculo dos quantis de precipitação máxima foi feito pela metodologia de análise de frequência, onde se relacionou a magnitude dos eventos de precipitação máxima com sua frequência de ocorrência, utilizando-se as funções de probabilidades de Gumbel e GEV, as quais foram aceitas pela aplicação dos testes do Qui-Quadrado e Komogorov-Smirnov.

De acordo com os testes estatísticos aplicados, a série de dados de precipitações máximas anuais atende aos requisitos de independência, estacionariedade e homogeneidade a um nível de significância de 5%, 2,5% e 5%, respectivamente.

Foram utilizados os métodos MOM e MML para estimar os parâmetros das distribuições de probabilidades. A tabela 1 apresenta os resultados dos quantis de precipitação máxima calculados para diferentes tempos de retorno, utilizando os modelos distributivos de Gumbel e GEV.

Tabela 1 – Quantis de precipitação máxima (em milímetros) calculados utilizando as distribuições de probabilidade de Gumbel e GEV, com parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML

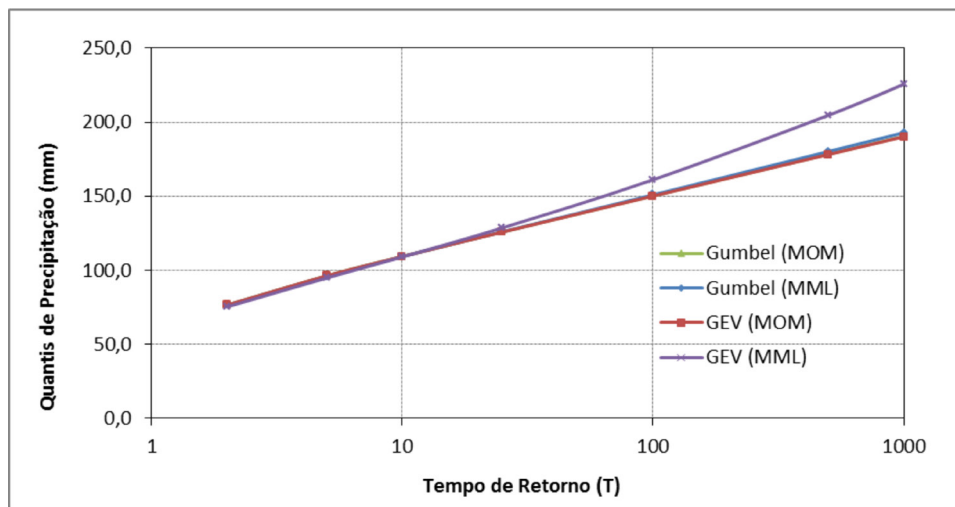
Distribuição	Tempo de Retorno						
	2	5	10	25	100	500	1000
Gumbel (MOM)	76,6	96,3	109,4	125,9	150,3	178,3	190,4
Gumbel (MML)	76,5	96,1	109,2	125,9	151,0	180,2	192,9
GEV (MOM)	76,6	96,3	109,3	125,8	150,1	178,2	190,2
GEV (MML)	75,3	94,9	109,1	128,6	161,1	204,6	225,6

Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Para uma melhor visualização dos dados contidos na tabela 1, os mesmos são relacionados em formato gráfico, conforme apresenta a figura 2. Os testes de aderência

realizados (Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov, usando um nível de significância de 5%), apontaram a aplicabilidade dos modelos distributivos utilizados.

Figura 2 – Quantis de precipitação máxima para diversos tempos de retorno utilizando-se as distribuições de Gumbel e GEV, com seus parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML



Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Pode-se perceber, pela análise conjunta da figura 2 e tabela 1, que os quantis obtidos pela aplicação do modelo de Gumbel e GEV, com parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML, apresentam valores que não diferem significativamente. Entretanto, o ajuste da distribuição GEV com os parâmetros estimados pelo método MML apresenta quantis de precipitação ligeiramente superiores a partir do tempo de retorno de 25 anos.

Para o quantil de precipitação estimado para o tempo de retorno de 1000 anos, observa-se um desvio de 18,6% entre a estimativa utilizando o modelo GEV pelo método MML em relação ao método MOM, 17% em relação ao modelo de Gumbel utilizando o método MML, e 18,5% em

relação ao modelo de Gumbel utilizando o método MOM.

Desagregação dos quantis de precipitação

Após a estimação dos quantis de precipitação, tem-se a desagregação da chuva, ou seja, a obtenção dos valores de intensidade de precipitação para diferentes tempos de retorno. Para a desagregação dos quantis de precipitação, foi aplicada a metodologia proposta por Silveira (2000).

As tabelas 2 a 5 apresentam os quantis de precipitação e intensidade de precipitação máxima aplicando-se a distribuição de Gumbel e GEV, com seus parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML.

Tabela 2 – Desagregação da precipitação (mm) e intensidade (mm/h) obtidas pela aplicação da distribuição de Gumbel com parâmetros estimados pelo método MOM

Duração	Precipitação (mm)							Intensidade (mm/h)						
	Tempo de retorno							Tempo de retorno						
-	2	5	10	25	100	500	1.000	2	5	10	25	100	500	1.00
5 min	8,9	11,2	12,7	14,6	17,4	20,7	22,1	106,6	134,1	152,3	175,3	209,3	248,2	265,1
10 min	15,3	19,2	21,8	25,1	29,9	35,5	37,9	91,5	115,1	130,7	150,5	179,6	213,1	227,5
15 min	19,5	24,5	27,8	32,0	38,2	45,4	48,4	78,0	98,0	111,3	128,1	153,0	181,5	193,8
20 min	22,7	28,5	32,4	37,3	44,5	52,8	56,4	68,1	85,6	97,2	111,9	133,6	158,5	169,2
25 min	25,3	31,8	36,1	41,6	49,6	58,9	62,9	60,7	76,3	86,7	99,8	119,1	141,3	150,9
30 min	27,5	34,6	39,3	45,2	53,9	64,0	68,3	55,0	69,1	78,5	90,4	107,9	128,0	136,6
1 h	36,4	45,7	51,9	59,8	71,4	84,6	90,4	36,4	45,7	51,9	59,8	71,4	84,6	90,4
2 h	46,0	57,9	65,8	75,7	90,3	107,2	114,5	23,0	28,9	32,9	37,8	45,2	53,6	57,2
4 h	56,5	71,0	80,6	92,8	110,8	131,4	140,4	14,1	17,7	20,2	23,2	27,7	32,9	35,1
6 h	62,9	79,1	89,8	103,4	123,4	146,4	156,3	10,5	13,2	15,0	17,2	20,6	24,4	26,1
8 h	67,6	85,0	96,5	111,1	132,6	157,3	168,0	8,4	10,6	12,1	13,9	16,6	19,7	21,0
10 h	71,3	89,6	101,8	117,2	139,9	166,0	177,2	7,1	9,0	10,2	11,7	14,0	16,6	17,7
12 h	74,4	93,5	106,2	122,3	146,0	173,2	184,9	6,2	7,8	8,9	10,2	12,2	14,4	15,4
14 h	77,0	96,9	110,0	126,6	151,2	179,3	191,5	5,5	6,9	7,9	9,0	10,8	12,8	13,7
24 h	87,3	109,8	124,7	143,5	171,3	203,3	217,1	3,6	4,6	5,2	6,0	7,1	8,5	9,0

Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Tabela 3 – Desagregação da precipitação (mm) e intensidade (mm/h) obtidas pela aplicação da distribuição de Gumbel com parâmetros estimados pelo método MML

Duração	Precipitação (mm)							Intensidade (mm/h)						
	Tempo de retorno							Tempo de retorno						
-	2	5	10	25	100	500	1.000	2	5	10	25	100	500	1.00
5 min	8,9	11,1	12,7	14,6	17,5	20,9	22,4	106,5	133,8	152,0	175,3	210,2	250,9	268,6
10 min	15,2	19,1	21,8	25,1	30,1	35,9	38,4	91,4	114,8	130,5	150,5	180,5	215,4	230,5
15 min	19,5	24,4	27,8	32,0	38,4	45,8	49,1	77,9	97,8	111,1	128,1	153,7	183,4	196,3
20 min	22,7	28,5	32,4	37,3	44,7	53,4	57,2	68,0	85,4	97,1	111,9	134,2	160,2	171,5
25 min	25,3	31,7	36,1	41,6	49,9	59,5	63,7	60,6	76,2	86,5	99,8	119,7	142,8	152,9
30 min	27,5	34,5	39,2	45,2	54,2	64,7	69,2	54,9	69,0	78,4	90,4	108,4	129,3	138,4
1 h	36,3	45,6	51,8	59,8	71,7	85,5	91,6	36,3	45,6	51,8	59,8	71,7	85,5	91,6
2 h	46,0	57,8	65,6	75,7	90,8	108,3	116,0	23,0	28,9	32,8	37,8	45,4	54,2	58,0
4 h	56,4	70,8	80,5	92,8	111,3	132,8	142,2	14,1	17,7	20,1	23,2	27,8	33,2	35,5
6 h	62,8	78,9	89,7	103,4	124,0	147,9	158,4	10,5	13,1	14,9	17,2	20,7	24,7	26,4
8 h	67,5	84,8	96,3	111,1	133,2	159,0	170,2	8,4	10,6	12,0	13,9	16,7	19,9	21,3
10 h	71,2	89,5	101,6	117,2	140,6	167,7	179,6	7,1	8,9	10,2	11,7	14,1	16,8	18,0
12 h	74,3	93,3	106,1	122,3	146,6	175,0	187,3	6,2	7,8	8,8	10,2	12,2	14,6	15,6
14 h	76,9	96,6	109,8	126,6	151,9	181,2	194,0	5,5	6,9	7,8	9,0	10,8	12,9	13,9
24 h	87,2	109,6	124,5	143,5	172,1	205,4	219,9	3,6	4,6	5,2	6,0	7,2	8,6	9,2

Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Tabela 4 – Desagregação da precipitação (mm) e intensidade (mm/h) obtidas pela aplicação da distribuição GEV com parâmetros estimados pelo método MOM

Duração	Precipitação (mm)							Intensidade (mm/h)						
	Tempo de retorno							Tempo de retorno						
-	2	5	10	25	100	500	1.000	2	5	10	25	100	500	1.00
5 min	8,9	11,2	12,7	14,6	17,4	20,7	22,1	106,6	134,1	152,2	175,1	209,0	248,1	264,8
10 min	15,3	19,2	21,8	25,1	29,9	35,5	37,9	91,5	115,1	130,6	150,3	179,4	213,0	227,3
15 min	19,5	24,5	27,8	32,0	38,2	45,3	48,4	78,0	98,0	111,2	128,0	152,8	181,4	193,6
20 min	22,7	28,5	32,4	37,3	44,5	52,8	56,4	68,1	85,6	97,2	111,8	133,4	158,4	169,1
25 min	25,3	31,8	36,1	41,5	49,6	58,8	62,8	60,7	76,3	86,6	99,7	119,0	141,2	150,7
30 min	27,5	34,6	39,2	45,1	53,9	63,9	68,3	55,0	69,1	78,4	90,3	107,7	127,9	136,5
1 h	36,4	45,7	51,9	59,7	71,3	84,6	90,3	36,4	45,7	51,9	59,7	71,3	84,6	90,3
2 h	46,0	57,9	65,7	75,6	90,2	107,1	114,3	23,0	28,9	32,9	37,8	45,1	53,6	57,2
4 h	56,5	71,0	80,6	92,7	110,6	131,4	140,2	14,1	17,7	20,1	23,2	27,7	32,8	35,1
6 h	62,9	79,1	89,7	103,3	123,2	146,3	156,2	10,5	13,2	15,0	17,2	20,5	24,4	26,0
8 h	67,6	85,0	96,4	111,0	132,4	157,2	167,8	8,4	10,6	12,1	13,9	16,6	19,7	21,0
10 h	71,3	89,6	101,7	117,1	139,7	165,9	177,0	7,1	9,0	10,2	11,7	14,0	16,6	17,7
12 h	74,4	93,5	106,1	122,2	145,8	173,1	184,7	6,2	7,8	8,8	10,2	12,1	14,4	15,4
14 h	77,0	96,9	109,9	126,5	151,0	179,2	191,3	5,5	6,9	7,9	9,0	10,8	12,8	13,7
24 h	87,3	109,8	124,6	143,4	171,1	203,1	216,8	3,6	4,6	5,2	6,0	7,1	8,5	9,0

Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Tabela 5 – Desagregação da precipitação (mm) e intensidade (mm/h) obtidas pela aplicação da distribuição GEV com parâmetros estimados pelo método MML

Duração	Precipitação (mm)							Intensidade (mm/h)						
	Tempo de retorno							Tempo de retorno						
-	2	5	10	25	100	500	1.000	2	5	10	25	100	500	1.00
5 min	8,7	11,0	12,7	14,9	18,7	23,7	26,2	104,8	132,1	151,9	179,0	224,3	284,9	314,1
10 min	15,0	18,9	21,7	25,6	32,1	40,8	44,9	90,0	113,4	130,4	153,7	192,5	244,5	269,6
15 min	19,2	24,1	27,8	32,7	41,0	52,1	57,4	76,6	96,6	111,0	130,9	163,9	208,2	229,6
20 min	22,3	28,1	32,3	38,1	47,7	60,6	66,8	66,9	84,4	97,0	114,3	143,2	181,9	200,5
25 min	24,9	31,3	36,0	42,5	53,2	67,6	74,5	59,7	75,2	86,5	101,9	127,7	162,1	178,8
30 min	27,0	34,1	39,1	46,1	57,8	73,4	81,0	54,0	68,1	78,3	92,3	115,6	146,8	161,9
1 h	35,7	45,1	51,8	61,1	76,5	97,1	107,1	35,7	45,1	51,8	61,1	76,5	97,1	107,1
2 h	45,3	57,0	65,6	77,3	96,8	123,0	135,6	22,6	28,5	32,8	38,7	48,4	61,5	67,8
4 h	55,5	70,0	80,4	94,8	118,8	150,8	166,3	13,9	17,5	20,1	23,7	29,7	37,7	41,6
6 h	61,8	77,9	89,6	105,6	132,3	168,0	185,2	10,3	13,0	14,9	17,6	22,0	28,0	30,9
8 h	66,4	83,7	96,3	113,5	142,1	180,5	199,0	8,3	10,5	12,0	14,2	17,8	22,6	24,9
10 h	70,1	88,3	101,6	119,7	150,0	190,5	210,0	7,0	8,8	10,2	12,0	15,0	19,0	21,0
12 h	73,1	92,2	106,0	124,9	156,5	198,7	219,1	6,1	7,7	8,8	10,4	13,0	16,6	18,3
14 h	75,7	95,4	109,7	129,3	162,0	205,8	226,9	5,4	6,8	7,8	9,2	11,6	14,7	16,2
24 h	85,8	108,2	124,4	146,6	183,7	233,2	257,2	3,6	4,5	5,2	6,1	7,7	9,7	10,7

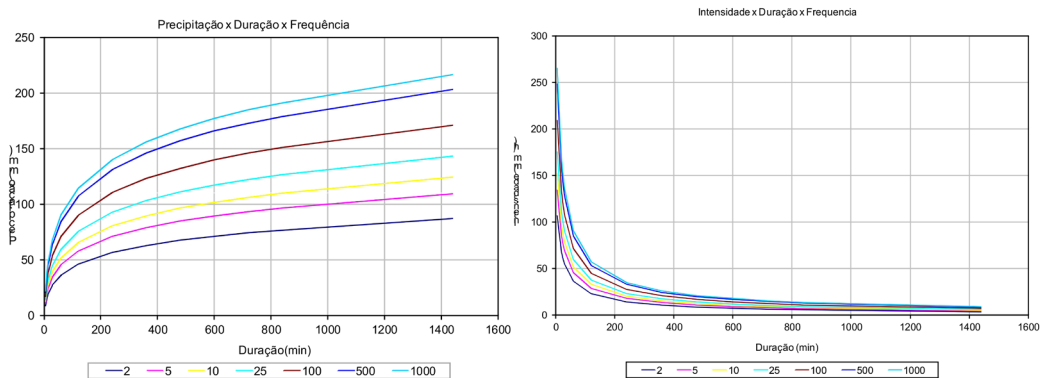
Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Os dados contidos nas tabelas 2 a 5 foram postos em formato gráfico, permitindo a elaboração das curvas que relacionam a precipitação, sua duração e frequência (PDF) e a intensidade de precipitação, sua duração e frequência (IDF), conforme apresentado nas figuras 3 a 6.

Pode-se perceber nas curvas PDF

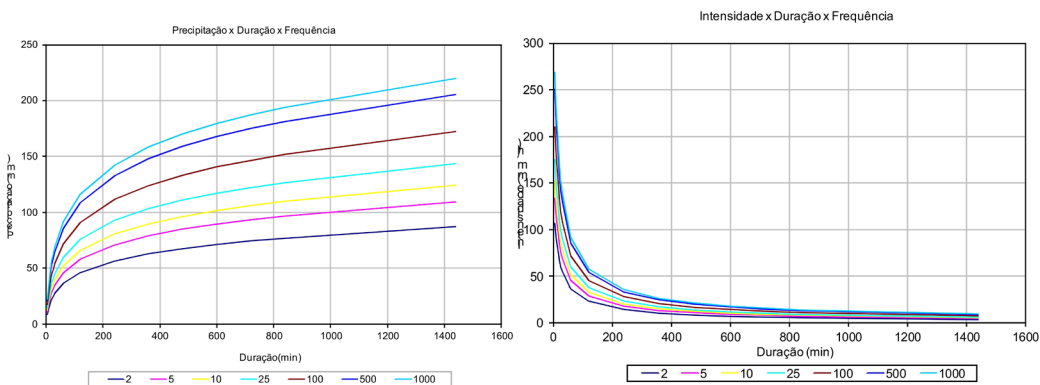
que quanto maior o quantil de precipitação, menor é sua probabilidade de ocorrência. O mesmo é verificado para as curvas IDF, onde se nota que menores intensidades de precipitação apresentam maior probabilidade de ocorrência, enquanto eventos de grande intensidade possuem maior tempo de retorno (ou menor probabilidade de ocorrência).

Figura 3 – Curvas PDF e IDF para os quantis obtidos pela aplicação da distribuição de Gumbel com parâmetros estimados pelo método MOM



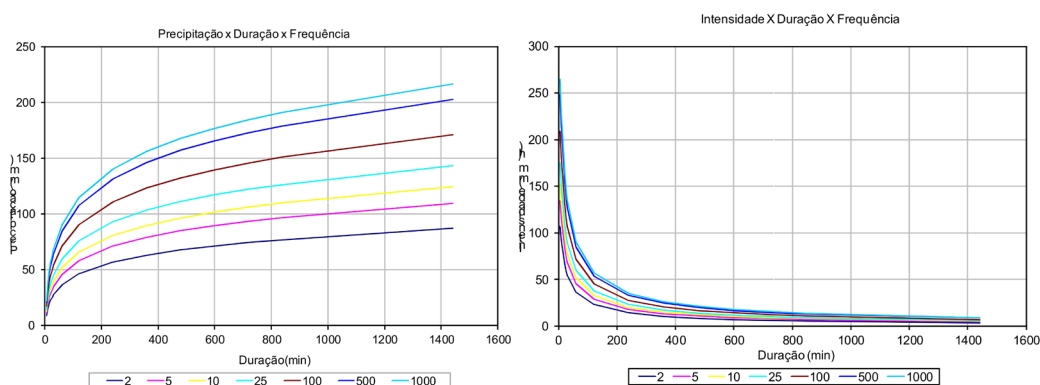
Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Figura 4 – Curvas PDF e IDF para os quantis obtidos pela aplicação da distribuição de Gumbel com parâmetros estimados pelo método MML



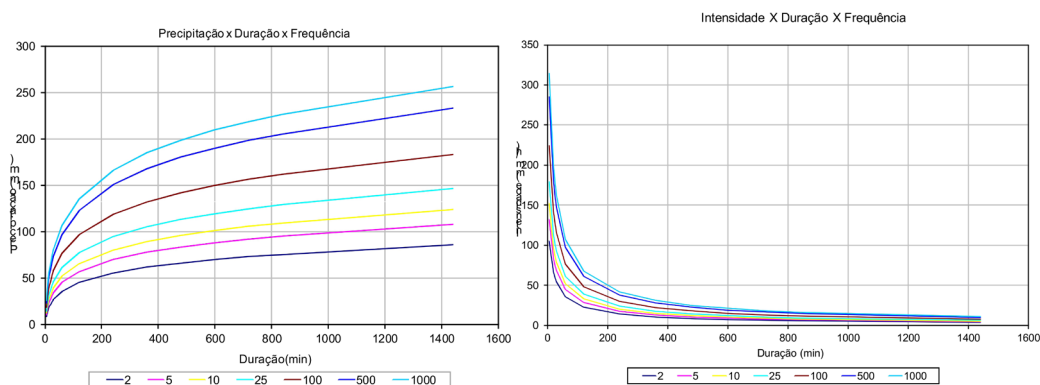
Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Figura 5 – Curvas PDF e IDF para os quantis obtidos pela aplicação da distribuição GEV com parâmetros estimados pelo método MOM



Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Figura 6 – Curvas PDF e IDF para os quantis obtidos pela aplicação da distribuição GEV com parâmetros estimados pelo método MML



Fonte: Coelho Filho et al. (2016).

Conforme apresentado anteriormente, a utilização da distribuição de Gumbel ou GEV não provoca alterações significativas na estimativa dos quantis de precipitação até 25 anos de tempo de retorno. Para tempos de retorno superiores a 25 anos, os quantis de precipitação obtidos pela distribuição GEV (método MML) são superiores em relação aqueles fornecidos pela distribuição GEV (método MOM) e de Gumbel (método MOM e MML).

Pode-se notar que os quantis de precipitação máxima desagregados, de mesma duração e frequência, não apresentam desvios significativos em função da utilização das distribuições de Gumbel (MOM e MML) ou GEV (MOM e MML), para a geração das curvas PDF e IDF. Entretanto, a partir do tempo de retorno de 25 anos, os valores obtidos pela distribuição GEV (MML) são superiores em relação aos demais.

Isso se deve, principalmente, em função

da estimativa dos parâmetros da distribuição GEV, utilizando o método MML. De acordo com Naghettini e Pinto (2007), o método MML produz estimadores mais confiáveis em relação àqueles produzidos pelo método MOM. Os mesmos autores também afirmam que, para amostras curtas, 50 anos ou menos, sejam investigadas distribuições de probabilidades de 2 parâmetros, tal como o modelo de Gumbel, uma vez que a qualidade da estimativa é proporcional ao tamanho da amostra.

A série histórica de dados de precipitação máxima anual considerada no presente estudo abrange o período de 1949 a 2015, totalizando uma amostra de 65 dados, conforme ano hidrológico. Nesse sentido, distribuições de 3 parâmetros, como é o caso da GEV, apresentam maior flexibilidade de forma aos dados amostrais e são aplicáveis para a estimativa de quantis de precipitação máxima.

Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo apresentar o estudo de chuvas intensas para a cidade de Goiânia, por meio da aplicação da metodologia de análise de frequência para a estimativa dos quantis de precipitação máxima para diferentes tempos de retorno, utilizando as distribuições de probabilidades de Gumbel e GEV. Na sequência, esses quantis de precipitação foram desagregados, possibilitando a elaboração das curvas PDF e IDF.

Para o ajuste dos modelos distributivos mencionados foram utilizados os dados de precipitação máxima anual registrados pela estação pluviométrica Goiânia (01649013), compreendendo uma série histórica de registros de dados de precipitação entre os anos de 1949 a 2015, totalizando 65 dados de

precipitações máximas anuais, considerando seu ordenamento conforme ano hidrológico. Os testes estatísticos aplicados indicaram as condições de homogeneidade, independência e estacionariedade da série histórica.

Neste estudo, verificou-se que os quantis de precipitação estimados, utilizando-se as distribuições de probabilidades de Gumbel e GEV, com seus respectivos parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML, não apresentaram variações significativas considerando-se o tempo de retorno de 25 anos.

Para tempos de retorno superiores a 25 anos, verifica-se um aumento do quantil de precipitação estimado utilizando-se a distribuição GEV com parâmetros obtidos pelo método MML.

Observou-se, pela ordem, um desvio de 18,6%, 17% e 18,5%, do quantil de precipitação máxima calculado para o tempo de retorno de 1000 anos pela distribuição GEV, com parâmetros estimados pelo método MML, em relação àqueles obtidos pela utilização do método MOM e da distribuição de Gumbel com parâmetros estimados pelos métodos MOM e MML.

Na elaboração das curvas PDF, observa-se o comportamento esperado, onde se verifica que, quanto maior o quantil de precipitação, menor é sua probabilidade de ocorrência. Análise semelhante é feita para as curvas IDF, onde eventos de precipitação de grande intensidade possuem menor probabilidade de ocorrência.

Nesse contexto, o presente estudo de chuvas intensas apresentou os resultados referentes à modelagem estatística de dados hidrológicos para a estimativa de quantis de precipitação máxima para diversas probabilidades de ocorrência, e posterior desagregação da chuva e cálculo

das intensidades de precipitação.

A aplicação da distribuição GEV, com parâmetros estimados pelo método MML, forneceu os maiores quantis de precipitação e, conseqüentemente, as maiores intensidades de precipitação associadas a diferentes tempos de retorno.

O dimensionamento de estruturas hidráulicas para condução de vazões máximas (tais como canais, bueiros, entre outras) é realizado para a situação mais conservadora em termos de produção de vazão, a qual está relacionada à precipitação ou intensidade de precipitação máxima associada a uma probabilidade de ocorrência.

Ainda, para a estimativa de vazões máximas, podem ser utilizados modelos transformadores de chuva em vazão, os quais incorporam, em termos metodológicos, os dados de precipitação ou intensidade de precipitação máxima para um determinado tempo de retorno.

Nesse contexto, os dados de

precipitação e intensidade de precipitação aqui apresentados podem servir para estudos e cálculos preliminares para a obtenção de vazões máximas a serem consideradas no dimensionamento de obras hidráulicas.

De maneira específica, recomenda-se a utilização dos quantis de precipitação e das intensidades de precipitação obtidas pelo ajuste da distribuição GEV com parâmetros estimados pelo método MML, uma vez que os resultados apresentaram valores superiores em relação aos demais, sendo assim mais conservadores para o cálculo de obras hidráulicas que sejam dimensionadas para o critério de vazões máximas, tais como bueiros, canais, vertedores de bacias de retenção, entre outras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CPRM – Serviço Geológico do Brasil pelo apoio e oportunidade da elaboração desse estudo.

Referências

ANA. Agência Nacional de Águas. **Hidroweb**: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 8 nov. 2015.

CÂNDIDO, M. O. **SEAF**. Um protótipo de sistema especialista para análise de frequência local de eventos hidrológicos máximos anuais. 2003. 174 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

CLARKE, R. T. **Statistical modeling in hydrology**. England: John Wiley e Sons, 1994.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1977. 264 p.

CUNHA, M. A. C. Evolução das Vazões do Rio Meia Ponte Jusante de Goiânia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2007. v. 1. p. 17.

DAEE/CETESB. Departamento de Águas e Energia Elétrica e Companhia de Tecnologia de Saneamento. **Drenagem Urbana, Manual de Projeto**. São Paulo: DAEE, 1980.

DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. **Estudo de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM, 2001.

GUMBEL E. J. **Statistics of extremes**. New York: Columbia University Press, 1958.

HAAN, C. T. **Statistical methods in hydrology**. 2. ed. Ames: The Iowa State University Press/Ames, 1979, 378p.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Some statistics useful in regional frequency analysis. **Water Resources Research**, American Geophysical Union, v.29, n.1, p.271-281, 1993.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Correction to Some statistics useful in regional frequency analysis. **Water Resources Research**, American Geophysical Union, v.31, n.1, p.251, 1995.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 1997. 224 p.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, 18, pp. 50-60, 1947.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. 1. ed. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007.

NERC. **Flood studies report**. London: National Environmental Research Council, 1975.

RAO A. R.; HAMED, K. H. **Flood frequency analysis**. Flórida: CRC Press, Boca Raton, 2000.

SILVEIRA, A. L. L. Equação para os coeficientes de desagregação de chuva. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.4, p.143-147, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: UFRGS/ABRH/EDUSP, 1993. p. 200.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. L-moment diagrams should replace product-moment diagrams. **Water Resources Research**, v.29, n. 6, p. 1745-1752, 1993.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, 14, p. 378-388, 1943.

YEVJEVICH, V. Flood and Society. In: ROSSI, G.; HARMANCIOGLU, N.; YEVJEVICH, V. (Ed.). **Coping with floods**. Pre-proceedings of the NATO A. S. I., Majorana Centre, Erice, 1992. p. 3 - 9.