

## ANÁLISE E EXTRAPOLAÇÃO DO MÉTODO DE HERSHFIELD PARA DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL

Letícia Carlini Burger<sup>1</sup>; Eloy Kaviski<sup>2</sup>

**Resumo** – Este artigo apresenta dois modelos para a estimativa do fator de frequência  $K$  utilizado no cálculo da precipitação máxima provável através de métodos estatísticos. Ambos os modelos baseiam-se no método proposto por Hershfield. O primeiro deles sugere a extrapolação do método de Hershfield com o objetivo de viabilizar sua utilização para chuvas com durações superiores a 24 horas. Para isso, o gráfico construído por Hershfield teve suas curvas ajustadas a uma equação através do método dos mínimos quadrados. O segundo modelo propõe um método alternativo para obter resultados similares aos de Hershfield. Este modelo utiliza séries sintéticas e o mesmo método utilizado por Hershfield para a determinação do fator de frequência  $K$ . Através de um estudo de caso, utilizando-se quatro estações pluviométricas localizadas no estado do Paraná, para diferentes durações de chuva e extensões de séries de dados, são comparados os resultados obtidos pelos dois modelos. A partir da análise dos resultados concluiu-se que ambos os modelos podem ser considerados adequados na determinação do fator de frequência  $K$ .

**Palavras-Chave** – Método de Hershfield. PMP. Método de Monte Carlo.

## ANALYSIS AND EXTRAPOLATION OF THE HERSHFIELD METHOD TO ESTIMATE PROBABLE MAXIMUM PRECIPITATION

**Abstract** – This paper introduces two models for the estimation of the frequency factor  $K$  used in the calculation of probable maximum precipitation through statistical methods. Both models are based on the method proposed by Hershfield. The first suggests the extrapolation of Hershfield's method in order to allow its use for rainfall with durations exceeding 24 hours. For this purpose, the graph constructed by Hershfield had its curves fitted to an equation using the least squares method. The second model proposes an alternative method to obtain similar results to Hershfield's. This model uses synthetic series and the same method used by Hershfield for determining the frequency factor  $K$ . A case study was conducted using four rainfall stations located in the state of Paraná, for different durations of rainfall and lengths of data series, and the results obtained by the two models were compared. Based on the analysis of the results, it was concluded that both models can be considered appropriate for determining the frequency factor  $K$ .

**Keywords** – Hershfield method. PMP. Monte Carlo method.

## INTRODUÇÃO

A Precipitação Máxima Provável (PMP), segundo a *World Meteorological Organization* (WMO, 2009), é definida como a maior altura de chuva meteorologicamente possível de ocorrer sobre uma determinada bacia hidrográfica, correspondente a uma dada duração e época do ano, sem levar em conta as tendências climáticas de longo prazo. Muitas organizações vinculadas à segurança de barragens recomendam explicitamente esse método para o caso de grandes obras e onde o galgamento envolve grandes riscos (Sugai, 1989).

Os métodos recomendados para o cálculo da PMP podem ser divididos em duas categorias básicas: os métodos hidrometeorológicos e os métodos estatísticos. Os métodos estatísticos são muito utilizados, pois além de demandarem pouco tempo para sua aplicação, usam apenas dados de precipitação, e por isso são aplicados em casos onde a região em estudo apresenta escassez de dados climatológicos, necessários para a determinação hidrometeorológica.

Entre os métodos estatísticos reconhecidos para a estimativa da PMP encontra-se o método de Hershfield, que teve seus parâmetros determinados para regiões em sua maior parte localizadas nos

<sup>1</sup>Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Engenheira civil na Intertechne Consultores Associados. E-mail: leticia.c.burger@gmail.com

<sup>2</sup>Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná. E-mail: eloy.dhs@ufpr.br

EUA. Sua aplicação é recomendada para bacias de até 1.000 km<sup>2</sup> e durações de chuva de até 24 horas.

Tingsanchali (2012), com o objetivo de verificar a capacidade do vertedouro da barragem Mae Sruai na Tailândia, determinou a PMP para durações de 1, 2 e 3 dias. A estimativa foi feita utilizando-se o mesmo método estatístico utilizado por Hershfield, onde os fatores de frequência  $K$  foram calculados a partir das séries anuais de chuvas máximas observadas de cada duração. A estimativa da PMP para cada duração foi realizada adotando-se o maior  $K$  encontrado entre as estações pluviométricas estudadas.

Deshpande (2008) também estimou a PMP para durações de 1 a 3 dias em 210 estações localizadas na Índia, almejando avaliar o período de retorno associado a estes resultados. Entretanto, o cálculo da PMP foi feito adotando-se o fator de frequência encontrado na curva envoltória construída a partir da plotagem dos valores médios das séries anuais de chuvas máximas e dos valores de  $K$  observados nas 210 estações, assim como fez Hershfield em seu método.

A elaboração da curva envoltória do fator de frequência também foi feita por Rakhecha (1992), com o objetivo de se estimar a PMP de 2 dias de duração para 131 estações localizadas na península da Índia. A partir dos resultados obtidos, Rakhecha preparou um mapa geral mostrando a distribuição espacial da PMP de 2 dias na região estudada.

Neste artigo são propostos dois modelos para a estimativa do fator de frequência  $K$  utilizado no cálculo da precipitação máxima provável, sendo um deles uma extrapolação do método de Hershfield e o outro um método alternativo similar ao método de Hershfield. Ambos os modelos viabilizam a utilização do método estatístico para chuvas com durações superiores a 24 horas.

## MÉTODO DE HERSHFIELD

O método proposto por Hershfield foi o que recebeu maior aceitação dentre os métodos estatísticos existentes (WMO, 2009). Assim como outros métodos estatísticos, o método de Hershfield tem como base a equação geral da frequência apresentada por Ven Te Chow (apud WMO, 2009: 66):

$$X_T = \bar{X} + K \cdot S, \quad (1)$$

onde  $X_T$  corresponde à chuva para um tempo de recorrência  $T$ , e  $\bar{X}$  e  $S$  são respectivamente a média e o desvio padrão da série de máximas anuais.  $K$  é o fator de frequência.

Na construção de seu método, Hershfield calculou valores do fator de frequência  $K$  para séries de precipitações máximas anuais de 24 horas de duração nas aproximadamente 2.700 estações que estudou, sendo a maior parte localizada nos Estados Unidos. O cálculo foi feito substituindo-se na equação geral de frequência o valor de  $X_T$  pela máxima precipitação observada no local  $X_{MÁX}$ , e utilizando a média e o desvio padrão da série excluindo o valor  $X_{MÁX}$ .

O maior valor de  $K$  encontrado a partir dos dados de todas as estações foi 15. Verificou-se que os fatores de frequência variam aleatoriamente com a posição geográfica, pois não foi observada qualquer tendência na plotagem dos resultados. Inicialmente, a partir dos primeiros resultados obtidos, Hershfield também acreditou que os valores de  $K$  eram independentes da magnitude da chuva; porém mais tarde, em 1965, constatou que o fator de frequência varia inversamente com a chuva. Com isso, foram definidas envoltórias superiores para as durações de chuva de 5 minutos, 1, 6 e 24 horas, onde  $K$  pode ser determinado a partir da média das precipitações máximas anuais. A Figura 1 apresenta estas envoltórias e indica um valor máximo para  $K$  de 20 (Sugai, 1989).

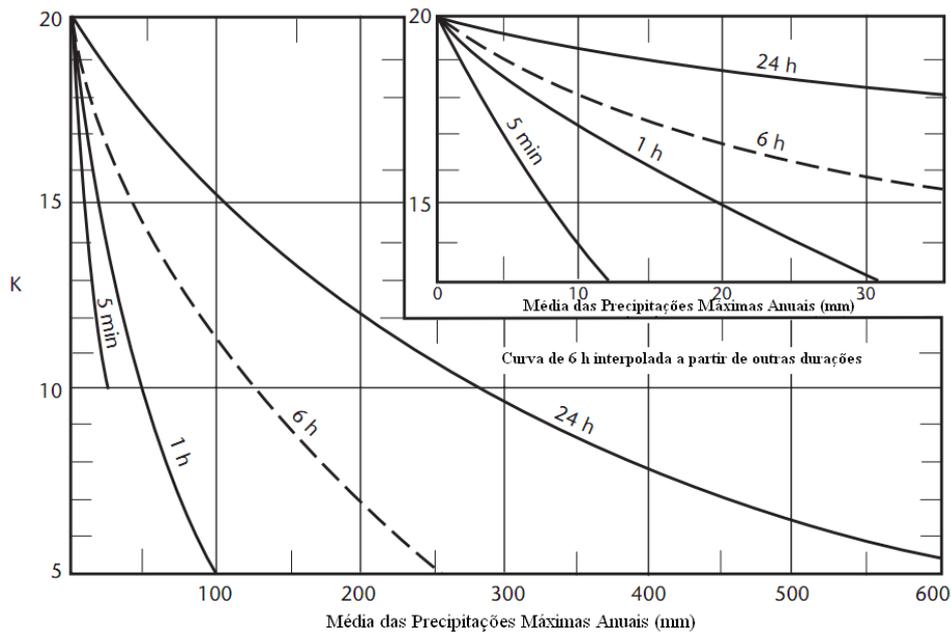


Figura 1 – K em função da duração da chuva e média das precipitações máximas anuais (Fonte: WMO, 2009)

Tendo em vista o interesse em encontrar formas de se aplicar o método estatístico de Hershfield para durações de chuva maiores do que 24 horas, foram realizadas duas análises que estão descritas a seguir.

### MODELO PARA EXTRAPOLAÇÃO DO MÉTODO DE HERSHFIELD

A primeira análise realizada foi uma avaliação do gráfico apresentado na Figura 1, com o objetivo de se verificar a possibilidade de extrapolação das curvas para durações maiores do que aquelas ali apresentadas.

Foram levantados deste gráfico 28 pontos representativos das curvas de durações de 5 minutos, 1 e 24 horas. Tais pontos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontos levantados do gráfico da Figura 1

K	Média das Chuvas Máximas Anuais			K	Média das Chuvas Máximas Anuais		
	5 min	1 h	24 h		5 min	1 h	24 h
5	-	100	-	13	-	30,25	169,19
6	-	-	535,67	14	-	-	137,36
7	-	76,12	455,23	15	9,67	19,23	106,83
8	-	66,13	387,88	16	-	15,13	84,27
9	-	-	330,58	17	5,97	11,38	61,29
10	25,53	49,29	282,65	18	4,24	7,63	40,74
11	-	-	241,67	19	-	-	21,1
12	-	36,53	204,95	20	0	0	0

A partir destes pontos, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, estimou-se a equação apresentada abaixo:

$$K = 20 - \frac{0,732 \cdot \bar{P}_{24}^{0,693}}{(d + 0,372)^{0,420}}, \quad (2)$$

onde:

$\bar{P}_{24}$  = média das chuvas máximas anuais de 24 horas de duração;

$d$  = duração da chuva de projeto (h).

O método dos mínimos quadrados foi aplicado usando-se um algoritmo de recozimento simulado. Os algoritmos de recozimento simulado (Aarts e Korst, 1989) podem garantir a solução ótima global aproximada de qualquer função, incluindo funções descontínuas e funções não convexas. A principal vantagem desta técnica é sua característica de utilizar uma estratégia de busca que permite movimentos probabilísticos, evitando que se fique restrito somente a um local ótimo. O conceito foi introduzido por Metropolis *et al.* (1953) para solucionar problemas de mecânica estatística usando o método de Monte Carlo. Machado *et al.* (2011) aplicaram este método para analisar soluções ótimas no dimensionamento de sistemas de tratamento de efluentes.

Desta forma, obteve-se um modelo para interpolação e extrapolação das curvas apresentadas no gráfico definido por Hershfield. O valor do coeficiente de correlação obtido do ajuste foi 0,995.

Com o objetivo de verificar este modelo, foram comparados os resultados de  $K$  obtidos a partir da equação (2) para uma duração de chuva de 6 horas, com valores de  $K$  levantados da curva apresentada no gráfico da Figura 1 correspondente também a uma duração de 6 horas. Esta curva é apresentada em linha tracejada, pois é resultado de uma interpolação. Para isto, foram obtidos 11 pontos desta curva, dos quais os valores de  $K$  foram comparados partindo-se de iguais médias de precipitações máximas anuais. Os resultados, considerados satisfatórios, estão apresentados na Figura 2.

Como forma de representação do modelo de extrapolação, foram calculados a partir da equação (2), valores de  $K$  para durações de chuva de 2 a 10 dias. A Figura 2 apresenta também estes resultados.

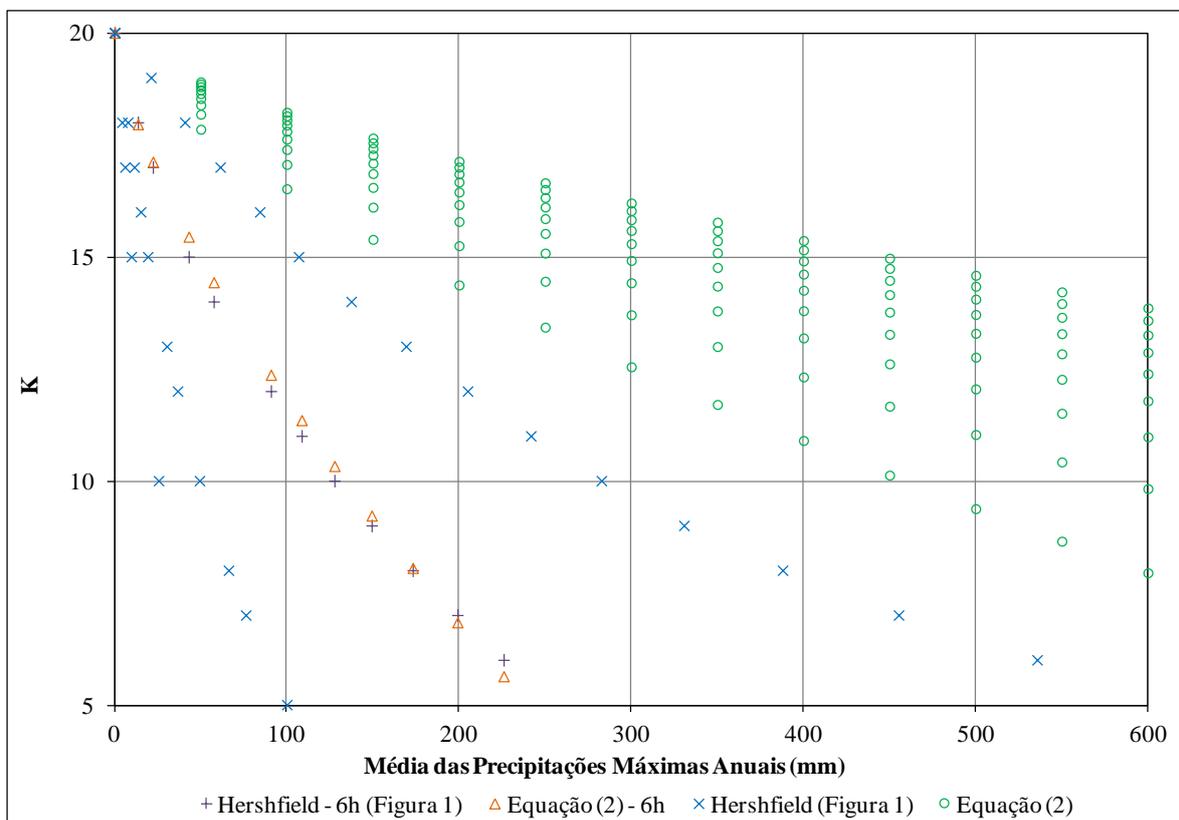


Figura 2 – Comparação dos resultados das interpolações para  $d = 6h$ ; Resultados da extrapolação para  $d = 2$  a 10 dias.

## MODELO DE SIMULAÇÃO PARA A ESTIMATIVA DO FATOR DE FREQUÊNCIA USANDO DADOS AMOSTRAIS

A segunda análise realizada tratou da obtenção de uma forma de estimar valores do fator de frequência  $K$  para diversas durações de chuva utilizando-se dados observados de precipitação.

No método de Hershfield, os valores do fator de frequência  $K$  foram calculados tendo como base as séries históricas de precipitação para as estações que estudou. O cálculo foi feito substituindo-se na equação geral de frequência o valor de  $X_T$  pela máxima precipitação observada no local  $X_{MAX}$ , e utilizando a média e o desvio padrão da série excluindo o valor  $X_{MAX}$ .

Entretanto, ao utilizar esta forma de cálculo baseada nos dados históricos das estações, há uma incerteza nos resultados obtidos para  $K$  devido à extensão do período de dados amostrais disponíveis, que em muitos casos é curta.

Com o objetivo de obter estimativas confiáveis, foi elaborado um programa de geração de séries sintéticas de precipitações máximas anuais de  $d$  dias de duração, utilizando-se o modelo AR-1 log normal para o cálculo do parâmetro  $K$ . A partir destes resultados foram determinadas faixas de confiança para  $K$  usando o método de Monte Carlo.

A sequência de passos para o cálculo do parâmetro  $K$  está descrita a seguir:

- Em função da série histórica de precipitações são determinados os valores referentes às precipitações máximas anuais com duração  $d$ :  $p(i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ;
- A partir da série de dados  $p$ , é estimado o fator  $K$  amostral;
- Com os dados da série  $p$  são estimados parâmetros do modelo auto-regressivo de ordem 1 log normal (AR1);
- Usando o modelo AR1 são geradas  $m$  séries sintéticas com tamanho  $n$ , e o fator  $K$  é estimado para cada série sintética, obtendo  $K_s(i)$ ,  $i=1, \dots, m$ ;
- A série de parâmetros  $K_s$  é classificada em ordem crescente. Em função do índice referente à ordem de classificação ( $j$ ) é associada uma frequência relativa  $f(j) = \frac{100j}{m}$ . Desta forma determina-se a distribuição de probabilidades amostral do fator  $K$  associada com a série histórica analisada;
- Usando-se a distribuição amostral de  $K$ , é definido o limite superior da faixa de confiança do parâmetro  $K$ . Adota-se como o fator de frequência  $K$  de projeto o limite superior da faixa de confiança de 99,9%.

### ESTUDO DE CASO

Para a realização do estudo de caso foram selecionadas quatro estações pluviométricas localizadas no estado do Paraná com extensão de dados de pelo menos 50 anos. As estações estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estações pluviométricas utilizadas

Código	Nome do Posto	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
2350001	Porto Santa Terezinha	Santa Mariana	23° 06' 00"	50° 27' 00"	340
2449000	Capela da Ribeira	Adrianópolis	24° 40' 48"	49° 00' 00"	180
2550000	Rio dos Patos	Prudentópolis	25° 12' 00"	50° 55' 59"	690
2550005	Rio Claro do Sul	Mallet	25° 57' 08"	50° 40' 45"	750

O estudo foi feito utilizando-se as séries de dados das quatro estações com extensão de 50 anos, bem como séries parciais de 10, 20, 30 e 40 anos para comparação dos resultados. As durações de chuva consideradas foram de 1 a 10 dias. Sendo assim, para a aplicação dos modelos propostos foram construídas, para cada estação, séries anuais de valores máximos de precipitação acumulada para durações de 1 a 10 dias, considerando as cinco diferentes extensões de dados.

De posse destas 200 séries de dados, ambos os modelos foram aplicados, obtendo-se assim resultados para o fator de frequência  $K$  correspondentes às mesmas estações, durações de chuva e extensões de dados. Ao se utilizar o modelo de simulação foram realizadas simulações com 5.000 séries sintéticas, e foi adotado como resultado o valor de  $K$  para a faixa de confiança de 99,9%.

Os resultados do fator de frequência  $K$  obtidos pelos dois modelos, bem como pelos dados históricos, estão apresentados na Tabela 3.

Para a duração de chuva de 1 dia, os resultados apresentados na Tabela 3, a partir do modelo de extrapolação, representam o resultado proveniente diretamente do método de Hershfield, não se tratando de uma extrapolação neste caso.

Tabela 3 – Resultados obtidos para o fator de frequência  $K$

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA:		PORTO SANTA TEREZINHA									
Extensão	Duração da Chuva (dias):	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 anos	Histórico	2,47	2,03	2,54	2,94	3,02	2,29	1,93	1,59	1,68	1,79
	Equação Extrapolação	15,64	16,73	17,24	17,55	17,77	17,94	18,07	18,17	18,26	18,33
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,53	8,83	9,34	10,76	11,09	10,70	10,16	10,19	9,78	9,06
20 anos	Histórico	1,95	2,09	2,22	3,20	3,27	2,73	2,38	1,91	1,82	1,99
	Equação Extrapolação	15,57	16,68	17,20	17,52	17,74	17,90	18,03	18,14	18,23	18,31
	Faixa de Confiança: 99,9%	6,97	7,20	7,42	8,01	8,26	8,05	7,84	7,98	8,01	7,83
30 anos	Histórico	1,92	1,94	2,06	3,09	3,33	2,87	2,46	2,08	1,99	2,13
	Equação Extrapolação	15,96	16,97	17,44	17,73	17,94	18,09	18,21	18,30	18,39	18,46
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,99	7,90	7,78	8,22	8,30	8,13	8,10	8,12	8,25	8,15
40 anos	Histórico	2,15	2,18	2,14	3,02	3,42	2,81	2,61	2,28	2,11	2,25
	Equação Extrapolação	16,03	17,02	17,49	17,77	17,97	18,12	18,24	18,33	18,41	18,48
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,29	7,32	7,33	7,53	7,54	7,67	7,72	7,77	7,74	7,64
50 anos	Histórico	2,32	2,18	2,27	3,15	3,61	3,02	2,82	2,42	2,17	2,34
	Equação Extrapolação	15,45	16,59	17,12	17,45	17,67	17,84	17,98	18,09	18,18	18,26
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,23	7,53	7,26	7,69	7,62	7,68	7,75	7,71	7,71	7,70
ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA:		RIO DOS PATOS									
Extensão	Duração da Chuva (dias):	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 anos	Histórico	3,46	6,19	4,93	4,77	5,12	4,61	4,36	4,47	3,60	3,63
	Equação Extrapolação	15,11	16,33	16,90	17,25	17,50	17,68	17,83	17,95	18,05	18,13
	Faixa de Confiança: 99,9%	11,69	14,89	14,79	12,80	12,32	10,88	10,67	10,43	10,82	9,91
20 anos	Histórico	4,19	7,36	6,05	5,88	6,44	5,99	5,74	5,60	4,62	4,54
	Equação Extrapolação	15,40	16,55	17,09	17,42	17,65	17,82	17,96	18,07	18,16	18,24
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,63	9,85	10,42	9,58	9,45	8,93	8,93	8,63	9,05	8,74
30 anos	Histórico	4,53	8,12	6,75	6,66	6,95	6,35	6,22	5,94	5,20	4,94
	Equação Extrapolação	15,69	16,77	17,28	17,58	17,80	17,96	18,09	18,19	18,28	18,35
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,07	8,84	9,15	8,90	8,84	8,59	8,25	8,06	8,07	7,87
40 anos	Histórico	5,01	8,42	7,20	6,86	6,73	6,31	6,14	6,01	5,43	5,23
	Equação Extrapolação	15,76	16,82	17,32	17,62	17,83	17,99	18,12	18,22	18,31	18,38
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,49	8,63	8,95	8,76	8,86	8,55	8,35	8,16	8,12	7,73
50 anos	Histórico	5,09	7,79	7,27	6,82	6,84	6,33	6,10	5,90	5,42	5,22
	Equação Extrapolação	15,84	16,88	17,37	17,67	17,88	18,03	18,16	18,26	18,34	18,41
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,76	8,79	8,96	8,89	8,82	8,63	8,36	8,04	8,04	7,77

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA:		CAPELA DA RIBEIRA									
Extensão	Duração da Chuva (dias):	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 anos	Histórico	2,87	3,87	4,13	5,54	6,94	8,04	7,12	7,60	6,82	5,41
	Equação Extrapolação	16,11	17,08	17,54	17,82	18,01	18,16	18,27	18,37	18,45	18,51
	Faixa de Confiança: 99,9%	9,75	9,20	10,45	10,69	12,24	14,05	14,05	13,77	14,23	14,64
20 anos	Histórico	3,78	4,23	4,99	6,53	8,27	8,27	8,02	7,88	6,72	5,80
	Equação Extrapolação	16,35	17,27	17,69	17,95	18,14	18,27	18,38	18,47	18,54	18,61
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,08	7,65	7,69	8,81	10,32	10,65	10,08	9,77	9,96	9,69
30 anos	Histórico	2,79	2,78	3,07	4,75	6,19	6,04	5,87	5,68	5,22	4,76
	Equação Extrapolação	16,64	17,48	17,87	18,11	18,28	18,41	18,51	18,59	18,66	18,72
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,95	8,30	8,41	10,32	11,22	11,34	11,13	10,27	9,35	9,31
40 anos	Histórico	2,85	2,92	3,18	4,81	6,14	5,73	5,47	5,30	4,98	4,60
	Equação Extrapolação	16,83	17,62	17,99	18,22	18,38	18,50	18,59	18,67	18,73	18,79
	Faixa de Confiança: 99,9%	9,27	8,61	8,63	9,38	10,62	10,63	10,35	9,69	9,11	9,00
50 anos	Histórico	3,02	2,74	2,99	4,73	6,11	5,76	5,36	5,26	4,91	4,60
	Equação Extrapolação	16,87	17,65	18,02	18,24	18,40	18,52	18,61	18,69	18,75	18,80
	Faixa de Confiança: 99,9%	9,91	9,25	9,05	9,76	10,37	10,53	10,41	9,81	9,42	8,99
ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA:		RIO CLARO DO SUL									
Extensão	Duração da Chuva (dias):	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 anos	Histórico	4,48	6,20	9,54	6,24	6,23	5,58	4,75	5,07	4,95	4,30
	Equação Extrapolação	15,94	16,95	17,43	17,72	17,92	18,08	18,20	18,29	18,38	18,45
	Faixa de Confiança: 99,9%	11,38	13,03	13,47	12,95	12,57	12,30	11,12	9,62	10,23	10,10
20 anos	Histórico	2,89	4,21	4,56	4,60	5,17	4,38	3,67	3,60	4,03	3,83
	Equação Extrapolação	16,00	17,00	17,47	17,75	17,95	18,11	18,22	18,32	18,40	18,47
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,48	9,34	9,60	9,66	9,77	9,77	9,38	8,95	8,87	8,72
30 anos	Histórico	3,31	4,77	5,05	5,15	5,74	5,07	4,30	4,15	4,48	4,20
	Equação Extrapolação	16,12	17,09	17,55	17,82	18,02	18,16	18,28	18,37	18,45	18,52
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,94	8,92	9,17	8,79	9,07	9,31	9,29	9,04	9,30	8,74
40 anos	Histórico	3,37	5,18	5,63	5,53	6,21	5,59	4,79	4,62	4,91	4,63
	Equação Extrapolação	16,14	17,11	17,56	17,84	18,03	18,17	18,29	18,38	18,46	18,53
	Faixa de Confiança: 99,9%	8,03	8,93	9,00	8,70	8,78	8,71	8,71	8,48	8,61	8,18
50 anos	Histórico	3,68	5,51	5,88	5,80	6,43	5,76	5,00	4,89	5,21	4,93
	Equação Extrapolação	16,20	17,15	17,60	17,87	18,06	18,20	18,31	18,41	18,48	18,55
	Faixa de Confiança: 99,9%	7,80	8,65	8,80	8,59	8,65	8,51	8,48	8,14	8,27	8,09

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 3 é possível constatar que em todos os casos, o valor obtido para o fator de frequência  $K$  é maior utilizando-se a extrapolação do método de Hershfield do que a partir do modelo de simulação.

Pode-se observar também que os valores de  $K$  estimados pelo modelo de simulação não são crescentes com o crescimento da duração da chuva. São dois fatores que podem explicar estes resultados: (i) geralmente os valores observados em cada ano, das chuvas acumuladas com durações menores, não estão englobados nas chuvas acumuladas com durações maiores, resultando em séries incoerentes em termos da distribuição da intensidade da chuva no tempo; (ii) no modelo de simulação foram usadas distribuições de probabilidades independentes, uma para cada duração de chuva, não considerando a estrutura de correlação entre as séries com diferentes durações.

Ao passo que, utilizando-se o modelo de extrapolação, verifica-se que os valores resultantes para o fator  $K$  crescem com a duração da chuva, como era de se esperar, uma vez que o modelo é

derivado do gráfico de Hershfield que foi construído a partir de envoltórias, o que comprova que o modelo de extrapolação está coerente.

## CONCLUSÃO

Com base na análise dos resultados apresentada no item anterior, pode-se concluir que o método proposto por Hershfield é um método conservador para os locais analisados, representando uma envoltória superior para os valores do fator  $K$  conforme a duração da chuva. Isto foi concluído comparando-se os resultados de  $K$  para os locais estudados, a partir da aplicação dos modelos propostos, considerando séries de dados com 50 anos de extensão. Os valores de  $K$  provenientes do modelo de extrapolação resultaram em média 2,1 vezes maior do que os resultados do modelo de simulação, considerados limites superiores de  $K$  para a faixa de confiança de 99,9%.

Os resultados do modelo de simulação apresentam valores menos conservadores para a região, representando o limite superior para a faixa de confiança adotada. Este modelo pode ser considerado válido tendo em vista a diminuição dos resultados de  $K$  conforme se aumenta a quantidade de dados amostrais, confirmando a redução do intervalo da faixa de confiança, e também pelo fato do valor de  $K$  resultante para o histórico estar sempre englobado dentro da faixa de confiança de 99,9%.

Os dois modelos apresentados neste artigo mostraram-se adequados para a determinação do fator de frequência  $K$ , podendo ser utilizados para a estimativa da precipitação máxima provável pelo método estatístico com durações superiores a 24 horas.

## REFERÊNCIAS

- AARTS, E.; KORST, J. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*. John Wiley and Sons, New York - NY, 272 p.
- DESHPANDE, N.R.; KULKARNI, B.D.; VERMA, A.K.; MANDAL, B.N. (2008). Extreme rainfall analysis and estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP) by statistical methods over the Indus river basin in India. *Journal of Spatial Hydrology*, 8(1), pp. 22-36.
- MACHADO, E.S.; KAVISKI, E.; PORTO, M.F.A.; SCUISSATO, C. (2011). Otimização de sistemas regionais de tratamento de efluentes através do algoritmo do Recozimento Simulado. In *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, Nov. 2011.
- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.W.; ROSENBLUTH, M.N.; TELLER, A.H. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21(6), pp. 1087-1092.
- RAKHECHA, P.R.; DESHPANDE, N.R.; SOMAN, M.K. (1992). Probable maximum precipitation for a 2-day duration over the Indian peninsula. *Theoretical and Applied Climatology*, 45, pp. 277-283.
- SUGAI, M.R.V.B. (1989) *Tempo de recorrência associado à Precipitação Máxima Provável na região sul do Brasil*. Dissertação – Centro de Hidráulica e Hidrologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 155 p.
- TINGSANCHALI, T.; TANMANEE, S. (2012). Assessment of hydrological safety of Mae Sruai Dam, Thailand. *Procedia Engineering*, 32, pp. 1198-1204.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2009). *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation - PMP*. Geneva, 291 p.