

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PARA A CIDADE DE RIBEIRÃO PRETO

Giovanni Chaves PENNER¹ & Marlon Pontonico LIMA²

(1) Professor Adjunto Universidade Federal do Pará, Engenheiro Sanitarista, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rua Augusto Corrêa 01 Cidade Universitária, CEP 66075-110 Guamá - Caixa postal 479, Belém/Pará, Brasil, Endereço eletrônico: gpenner@gmail.com.

(2) Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário UniSEB. Endereço eletrônico: marlonlima11@hotmail.com.

Introdução

Material e métodos

Obtenção dos Dados

Análise dos Pluviogramas

Seleção das Precipitações para o Estabelecimento das Séries Anuais

Análise Estatística das Intensidades de Precipitação

Obtenção dos Parâmetros da Equação de Intensidade-Duração-Frequência

Linearização da Curva de Intensidade-Duração-Frequência

Desagregação da Chuva Diária

Considerando Todas as Durações

Regressão Não Linear (Gauss-Newton)

Equações do Tipo "ln ln"

Resultados e discussão

Análise das Precipitações

Aplicação da Distribuição Probabilística de Gumbel

Equação IDF pelo Método da Desagregação da Chuva Diária

Equação IDF pelo Método da Regressão Linear Usando Todas as Durações

Equação IDF pelo Método da Regressão Não Linear (Gauss-Newton)

Equação IDF pelo Método "ln ln"

Considerações finais

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

RESUMO – No presente trabalho foi realizada uma análise das máximas precipitações pluviométricas observadas em Ribeirão Preto, para o período de 1940 a 2006. Para o estudo das frequências de distribuição das chuvas intensas nos diferentes períodos de retorno utilizou-se o método de Gumbel. Quatro equações de intensidade-duração-frequência foram obtidas por diferentes procedimentos. Os resultados fornecidos pelas equações foram comparados com os valores fornecidos pela distribuição Gumbel, sendo que o método regressão não linear Gauss-Newton o mais apropriado.

Palavras-chave: equações de intensidade-duração-frequência, regressão não-linear para chuvas, regressão linear para chuvas, distribuição de Gumbel.

ABSTRACT – G. C. Penner, M. P. Lima – “Comparison of different methods to determine the high intensity rains equation for the Ribeirão Preto city”-The purpose of this study is to present an analysis of the highest intensity rains observed in the city of Ribeirão Preto in the period from 1940 to 2006. The Gumbel method was applied for the study of the frequency distribution of intense precipitations considering different recurrence times. Additionally, four intensity-duration-frequency equations were developed using different procedures. The results obtained applying the equations were compared to the Gumbel distribution, being the Gauss-Newton nonlinear regression equation the one that showed the best predictions.

Keywords: intensity-duration-frequency equation, nonlinear regression for rain, linear regression for rain, Gumbel distribution.

INTRODUÇÃO

As chuvas intensas são responsáveis pela erosão dos solos e pela concentração de águas pluviais em vales e zonas ribeirinhas. Assim, o conhecimento das relações entre intensidade, duração e frequência dessas chuvas é de grande importância para o projeto de obras de controle de erosão e de estruturas hidráulicas para águas pluviais, como galerias, bueiros, extravasores de barragens, vãos de pontes, etc. (Vieira et al. 1998).

Para utilização dos dados de chuva em projetos de Engenharia de Drenagem, faz-se necessário conhecer as quatro características

fundamentais da chuva: Intensidade, Duração, Frequência e Distribuição. A determinação de uma relação para essas características é feita a partir de dados históricos de postos pluviográficos (Fendrich, 2003).

Eltz et al. (1992) afirmam que a análise de frequências é uma técnica estatística importante no estudo das chuvas, em razão da grande variabilidade temporal e espacial das precipitações pluviais, as quais não podem ser previstas com bases puramente determinísticas.

O Município de Ribeirão Preto vem já há muitos anos defrontando-se com o problema

das inundações. O controle destas enchentes torna-se um desafio cada vez maior, à medida em que o crescimento da área urbana implica, naturalmente, no aumento das áreas impermeabilizadas (PMRP, 2002), o que tem consequências imediatas nos tempos de residência e picos de vazão das microbacias hidrográficas urbanas.

Como agravante, Ribeirão Preto encontra-se quase que totalmente inserida em uma única bacia hidrográfica, a do Ribeirão Preto. O núcleo original da cidade foi estabelecido próximo à foz do curso de água que emprestou

seu nome ao município, processando-se o seu desenvolvimento histórico avançando no sentido das suas cabeceiras.

Neste cenário, impôs-se a elaboração de um estudo para separar e analisar os dados de chuvas referentes a um período de 66 anos (1940 a 2006), coletados e registrados no pluviógrafo localizado na Estação Experimental do Centro de Cana de Ribeirão Preto, a fim de obter equações de intensidade-duração-frequência (IDF) que permita prever eventos intensos com diferentes períodos de retorno.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia apresentada pode ser dividida em duas etapas: 1) obtenção e preparação dos dados e 2) análise e interpretação das previsões, para determinar o método mais adequado para a geração da equação de chuvas intensas. Em todos os casos, os ajustes foram realizados utilizando uma planilha eletrônica, para que a análise possa ser reproduzida pela comunidade técnica.

Obtenção dos Dados

Os dados de intensidade de chuva foram obtidos das leituras dos pluviogramas registrados no pluviógrafo da Seção de Climatologia Agrícola do Instituto Agrônomo de Campinas, instalado na Estação Experimental do Centro de Cana de Ribeirão Preto. Como já mencionado, os pluviogramas em análise referem-se ao período de 1948 a 2006, sendo a única exceção o ano 1993. Também foram usados os registros diários feitos em pluviômetro, obtidos para o período de 1940 a 2006, sendo a única exceção o ano de 1941. A Estação Experimental de Ribeirão Preto situa-se a 621 metros acima do nível do mar, estando localizada nas coordenadas geográficas de 21°11' de latitude sul e 47°18' de longitude oeste. A precipitação média anual é de 1.492,2 mm, e a temperatura média anual é de 22,4 °C. O tipo climático é Aw, de acordo com a classificação de Köppen, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

Análise dos Pluviogramas

Segundo Fendrich (2003), para a determinação das alturas precipitadas considera-se:

a) Todos os pluviogramas que apresentaram altura de precipitação superior a 15 mm, durante 24 horas;

b) No caso de ocorrerem duas ou mais chuvas durante o intervalo de 24 horas, considerar como uma única chuva;

c) Os intervalos de duração iguais a 10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720 e 1440 minutos;

d) Os valores limites para as precipitações mínimas adotadas para cada intervalo conforme Tabela 1;

e) Caso o intervalo de duração não tenha sido atingido para uma precipitação, e o valor mínimo tenha sido superado, considerou-se que a precipitação estaria no intervalo de precipitação correspondente.

Seleção das Precipitações para o Estabelecimento das Séries Anuais

Conforme Fendrich (2003), para cada ano de observação, as alturas de precipitação foram selecionadas respeitando-se os limites indicados na Tabela 1. Selecionados os pluviogramas das máximas precipitações, determinou-se para cada duração a intensidade máxima. O critério adotado foi o das séries máximas anuais, que considera as alturas de precipitação com máxima observação para cada ano, desprezando-se os demais valores, mesmo que estes sejam superiores às máximas dos demais anos.

Tabela 1. Valores limites mínimos das alturas precipitadas para cada duração.

Duração (min)	Altura Precipitada (mm)
10	10
20	15
30	20
60	30
120	35
180	40
360	45
720	50
1440	55

Os anos que apresentaram mais de um intervalo de tempo sem valor de altura pluviométrica acima do mínimo foram eliminados, e os anos sem apenas uma altura pluviométrica acima do mínimo tiveram este valor preenchido com o mínimo para o intervalo. Todavia é importante deixar claro que para a utilização do método de regressão não linear Gauss-Newton não é necessário o preenchimento de falhas. Tal procedimento só é necessário nos métodos de regressão linear.

Análise Estatística das Intensidades de Precipitação

Neste estudo foi usado o modelo probabilístico de Gumbel, por ser o modelo mais citado na literatura para chuvas intensas. Adicionalmente, testes preliminares com os modelos probabilísticos Log-Normal a dois e três parâmetros, Pearson III e Log-Pearson III, mostraram que a distribuição Gumbel é a mais adequada. Para a seleção preliminar da distribuição com melhor aderência foi utilizado o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov.

A distribuição de Gumbel para valores extremos é expressa por:

$$P(X \geq x) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

Sendo $P(X \geq x)$ a probabilidade de um valor extremo qualquer “X” da série ser maior ou igual a “x”, ou seja, $P(X \geq x) = [1 - F(x)]$, e “y” é a variável reduzida ou variável Gumbel, expressa como:

$$y = (X - x_f) \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_x} \quad (2)$$

Sendo:

σ_n – desvio padrão da variável reduzida

y;

σ_x – desvio padrão da variável X;

x_f – moda dos valores extremos X,

expressa por:

$$x_f = \bar{x} - \sigma_x \cdot \frac{\bar{y}_n}{\sigma_n} \quad (3)$$

Onde:

\bar{x} – média aritmética da variável X;

\bar{y}_n – média aritmética da variável

reduzida y.

A substituição de (3) em (2) resulta:

$$y = (X - \bar{x} + \sigma_x \cdot \frac{\bar{y}_n}{\sigma_n}) \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_x} \quad (4)$$

Os valores de \bar{y}_n e σ_n encontram-se na Tabela 2, em função do período de observação “n”.

Nota-se que a substituição dos valores $\bar{y}_n = 0,57$ e $\sigma_n = 1,28$, para $n = \infty$, na equação (4) fornece:

$$y = (X - \bar{x} + 0,45 \cdot \sigma_x) \cdot \frac{1}{0,7797 \sigma_x} \quad (5)$$

A equação (5) pode ainda ser escrita de maneira ligeiramente diferente,

como $X = \bar{x} + \left(\frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right) \cdot \sigma_x$, que, substituída na

equação de Chow (1964), mostrou que a maioria das funções de frequência teóricas aplicáveis na análise hidrológica podem ser resolvidas por:

$$x_T = \bar{x} + k_T \cdot s \quad (6)$$

Onde:

x_T – altura precipitada para o período de retorno utilizado (mm);

\bar{x} – altura média da série histórica das precipitações (mm);

k_T – fator de frequência, função do período de retorno e da distribuição probabilística utilizada;

s – desvio padrão da série histórica das precipitações (mm).

Isto produz:

$$k_T = \frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \quad (7)$$

Sendo:

k_T – fator de frequência, função do período de retorno, e do número n de valores extremos que constituem a série;

y – determinado por:

$$y = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right), \text{ onde } T \text{ é o período de retorno;}$$

Os valores de \bar{y}_n e σ_n encontram-se na Tabela 2, em função do número de observações “ n ”. Ressalta-se que os valores de \bar{y}_n e σ_n também podem ser calculados por equações sugeridas por Naghettini e Pinto (2007).

Com o procedimento acima descrito, as alturas precipitadas foram determinadas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 e 100 anos. Os valores obtidos para cada período de retorno e duração servem de referência para determinação dos coeficientes da curva de IDF.

Tabela 2. Média e desvio padrão da variável Gumbel “ y ” em função do número de observações (Gumbel, 1958).

N	\bar{y}_n	σ_n	n	\bar{y}_n	σ_n	n	\bar{y}_n	σ_n
8	0,4843	0,9043	35	0,5403	1,1285	64	0,5533	1,1793
9	0,4902	0,9288	36	0,5410	1,1313	66	0,5538	1,1814
10	0,4952	0,9497	37	0,5418	1,1339	68	0,5543	1,1834
11	0,4996	0,9676	38	0,5424	1,1363	70	0,5548	1,1854
12	0,5035	0,9833	39	0,5430	1,1388	72	0,5552	1,1873
13	0,5070	0,9972	40	0,5436	1,1413	74	0,5557	1,1890
14	0,5100	1,0095	41	0,5442	1,1436	76	0,5561	1,1906
15	0,5128	1,0206	42	0,5448	1,1458	78	0,5565	1,1923
16	0,5157	1,0316	43	0,5453	1,1480	80	0,5569	1,1938
17	0,5181	1,0411	44	0,5458	1,1499	82	0,5572	1,1953
18	0,5202	1,0493	45	0,5463	1,1519	84	0,5576	1,1967
19	0,5220	1,0566	46	0,5468	1,1538	86	0,5580	1,1980
20	0,5236	1,0628	47	0,5473	1,1557	88	0,5583	1,1994
21	0,5252	1,0696	48	0,5477	1,1574	90	0,5586	1,2007
22	0,5268	1,0754	49	0,5481	1,1590	92	0,5589	1,2020
23	0,5283	1,0811	50	0,5485	1,1607	94	0,5592	1,2032
24	0,5296	1,0864	51	0,5489	1,1623	96	0,5595	1,2044
25	0,5309	1,0915	52	0,5493	1,1638	98	0,5598	1,2055
26	0,5320	1,0961	53	0,5497	1,1653	100	0,5600	1,2065
27	0,5332	1,1004	54	0,5501	1,1667	150	0,5646	1,2253
28	0,5343	1,1047	55	0,5504	1,1681	200	0,5672	1,2360
29	0,5353	1,1086	56	0,5508	1,1696	250	0,5688	1,2429
30	0,5362	1,1124	57	0,5511	1,1708	300	0,5699	1,2479
31	0,5371	1,1159	58	0,5515	1,1721	400	0,5714	1,2545
32	0,5380	1,1193	59	0,5518	1,1734	500	0,5724	1,2588
33	0,5388	1,1226	60	0,5521	1,1747	750	0,5738	1,2651
34	0,5396	1,1255	62	0,5527	1,1770	1000	0,5745	1,2685

Obtenção dos Parâmetros da Equação de Intensidade-Duração-Frequência

Para determinação da equação de chuvas intensas foram usados quatro procedimentos diferentes. Os dois primeiros consistem na linearização da equação IDF original para: chuva com duração de um dia e chuva com

diferentes durações. O terceiro consistiu na aplicação da regressão não linear pelo método de Gauss-Newton; e o quarto consistiu na aplicação do método “ln ln”. Como já foi mencionado, neste estudo objetivou-se apresentar os procedimentos de forma acessível, elaborando-os em planilha eletrônica.

Linearização da Curva de Intensidade-Duração-Frequência

A equação geral da relação intensidade-duração-frequência, na maioria dos casos, é dada por:

$$i = \frac{K \cdot Tr^m}{(t+b)^n} \quad (8)$$

Onde:

i – intensidade em mm/h;

Tr – período de retorno em anos;

t – a duração da chuva em min;

b – correção do termo referente à duração;

K , m e n – coeficientes determinados por análise de regressão.

A representação gráfica dos logaritmos naturais das intensidades em relação aos logaritmos naturais das durações " $t + b$ ", produz, por anamorfose (isto é, substituindo valores diferentes para " b ") funções lineares (retas) para as curvas de intensidade-duração. Nesse procedimento, b é uma constante escolhida através de otimização do coeficiente de ajuste R^2 da regressão linear. Quanto mais próximo do valor 1,0, melhor será a aderência da reta teórica aos dados.

As retas assim obtidas têm a forma geral:

$$\ln(i) = \ln(C) - n \cdot \ln(t+b) \quad (9)$$

Sendo:

n – coeficiente angular das retas;

$C = K \cdot Tr^m$ – coeficiente linear das retas.

Os valores do coeficiente angular n mostraram-se muito próximos para todas as retas. Assim, um valor médio foi utilizado como representativo da equação IDF.

Para a determinação dos coeficientes " K " e " m " faltantes foram lançados em gráfico os logaritmos naturais de " C " em função dos logaritmos naturais dos períodos de retorno. Novamente aplicou-se uma regressão linear, na qual o coeficiente angular fornece " m " da curva IDF e o coeficiente linear fornece $\ln(K)$, conforme mostrado abaixo:

$$\ln(C) = \ln(K) + m \cdot \ln(Tr) \quad (10)$$

Sendo:

m – coeficiente angular da reta;

$\ln(K)$ – coeficiente linear da reta.

Desagregação da Chuva Diária

Conforme Porto (1998), a ferramenta básica para os estudos hidrológicos em áreas urbanas é a relação intensidade-duração-frequência das chuvas de curta duração. Infelizmente, nem todas as cidades dispõem da série histórica de dados pluviográficos que possam ser utilizados para o levantamento desta relação. Muitas vezes há a necessidade de se avaliar tais relações em regiões onde as únicas informações disponíveis são as chuvas de 1 dia. Desta forma foi aplicada a metodologia apresentada em CETESB (1986), com a qual se obteve uma relação para a cidade de Ribeirão Preto.

Partiu-se da relação obtida pelo Instituto Astronômico e Geofísico de São Paulo, que estabeleceu uma relação entre as alturas pluviométricas das chuvas máximas de "1 dia" e de "24 horas", obtidas dos dados pluviométricos e pluviográficos observados simultaneamente na cidade de São Paulo. Os resultados obtidos, resumidos na Tabela 3, mostram as relações entre tais alturas pluviométricas para vários períodos de retorno.

Analisando os dados da Tabela 3 observa-se que as alturas de chuva máximas de "1 dia" e "24 horas", guardam uma relação quase constante independente do período de retorno, cujo valor médio é da ordem de 1,14, praticamente coincidente com o valor adotado pelo U.S. Weather Bureau para a mesma relação que é de 1,13.

A relação entre chuvas de diferentes durações, por sua vez, foi obtida da publicação elaborada pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento-DNOS, com título "Chuvas Intensas no Brasil". Esta referência apresenta relações entre alturas pluviométricas de diferentes durações, para períodos de retorno de 2 a 100 anos, cujos valores médios são apresentados na Tabela 4. Acrescenta-se que os valores da Tabela 4 foram comparados com os obtidos no presente estudo e apresentaram pequena variação.

Portanto, adotou-se o procedimento sugerido para regiões nas quais as únicas informações mais detalhadas são as chuvas de 1 dia, observadas em postos pluviométricos, avaliando-se a chuva de 24 horas de determinada frequência usando o fator 1,14, e, a partir dessas, as chuvas de menor duração com

a mesma frequência utilizando as relações constantes no Tabela 4.

Tabela 3. Relação entre as alturas de chuva máximas em São Paulo.

	PERÍODO DE RETORNO (ANOS)					
	5	10	25	50	75	100
Relação entre alturas pluviométricas das chuvas de 24 h e de 1 dia	1,13	1,13	1,14	1,15	1,14	1,15

Tabela 4. Relação entre alturas pluviométricas.

Relação entre alturas pluviométricas	Valores médios obtidos no estudo do DNOS	Valores adotados pelo U.S. Weather Bureau
5 min/30 min	0,34	0,34
10 min/30 min	0,54	0,57
15 min/30 min	0,70	0,72
20 min/30 min	0,81	
25 min/30 min	0,91	
30 min/1 h	0,74	0,79
1 h/24 h	0,42	
6 h/24 h	0,72	
8 h/24 h	0,78	
10 h/24 h	0,82	
12 h/24 h	0,85	

Considerando Todas as Durações

Nessa análise aplicou-se o método da regressão linear diretamente para os dados de cada uma das durações (10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720 e 1440 minutos).

Regressão Não Linear (Gauss-Newton)

Muitas vezes modelos matemáticos conduzem a dependências não lineares entre seus parâmetros. Um modelo imediato é, por exemplo, a Equação 8 para chuvas intensas.

Segundo Chapra & Canale (2006), o método de Gauss-Newton é um algoritmo que pode ser usado para minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre os dados e a equação não linear. O conceito chave neste método é expressar a equação não linear original em séries de Taylor, procedimento que é uma aproximação para o formato linear. O método dos mínimos quadrados é então usado

para estimar os coeficientes, através da mencionada minimização dos resíduos.

A relação entre a equação não linear e os dados pode ser generalizada como:

$$i_i = f(t_i, Tr_i; K, m, b, n) + e_i \quad (11)$$

Onde:

i_i – valores medidos da variável dependente;

$f(t_i, Tr_i; K, m, b, n)$ – equação que é função das variáveis independentes t_i e Tr_i , e uma função não linear dos coeficientes K , m , b e n ;

e_i – erro aleatório.

Por conveniência, este modelo pode ser expresso de forma abreviada omitindo os coeficientes, como:

$$i_i = f(t_i, Tr_i) + e_i \quad (12)$$

O modelo não linear pode ser expandido em séries de Taylor em torno do valor dos

coeficientes e reduzido para a primeira derivada, como:

$$f(t_i, Tr_i)_{j+1} = f(t_i, Tr_i)_j + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial K} \cdot \Delta K + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial m} \cdot \Delta m + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial b} \cdot \Delta b + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial n} \cdot \Delta n \quad (13)$$

Onde:

j – aproximação inicial (mediante valores assumidos para os coeficientes, também denominado de semente);

$j+1$ – valor calculado (valor iterado sucessivamente a partir da semente);

$$\Delta K = K_{j+1} - K_j, \quad \Delta m = m_{j+1} - m_j, \\ \Delta b = b_{j+1} - b_j \text{ e } \Delta n = n_{j+1} - n_j - \text{aproximações}$$

$$i_i - f(t_i, Tr_i)_j = \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial K} \cdot \Delta K + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial m} \cdot \Delta m + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial b} \cdot \Delta b + \frac{\partial f(t_i, Tr_i)_j}{\partial n} \cdot \Delta n \quad (14)$$

Ou, na forma matricial:

$$\{D\} = [Z_j] \cdot \{\Delta A\} + \{E\} \quad (15)$$

Sendo $[Z_j]$ a matriz das derivadas parciais da função avaliada como aproximação inicial “ j ”.

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial K & \partial f_1 / \partial m & \partial f_1 / \partial b & \partial f_1 / \partial n \\ \partial f_2 / \partial K & \partial f_2 / \partial m & \partial f_2 / \partial b & \partial f_2 / \partial n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial f_n / \partial K & \partial f_n / \partial m & \partial f_n / \partial b & \partial f_n / \partial n \end{bmatrix}$$

Onde:

n – número de dados;

$\partial f_i / \partial K$, $\partial f_i / \partial m$, $\partial f_i / \partial b$ e $\partial f_i / \partial n$ – derivadas parciais da função (equação IDF) em relação aos coeficientes K , m , b e n , respectivamente.

Conforme apresentado em Righetto (1998) e Soares & Soares (2000), as derivas parciais dos coeficientes da Equação 8 são:

$$\frac{\partial f}{\partial K} = \frac{Tr^m}{(t+b)^n} = \frac{f_i}{K} \quad (16)$$

$$\frac{\partial f}{\partial m} = \frac{K \cdot Tr_i^m \cdot \ln(Tr_i)}{(t+b)^n} = f_i \cdot \ln(Tr_i) \quad (17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = \frac{-K \cdot Tr_i^m \cdot \ln(t+b)}{(t+b)^n} = -f_i \cdot \ln(t+b) \quad (18)$$

$$\frac{\partial f}{\partial n} = \frac{-K \cdot n \cdot Tr_i^m}{(t+b)^{n+1}} = -\frac{f_i \cdot n}{(t+b)} \quad (19)$$

sucessivas dos coeficientes (para cada iteração, uma nova aproximação).

Desta forma o modelo original é linearizado com relação aos coeficientes. A Equação 13 pode ser substituída na Equação 12 para fornecer:

O vetor $\{D\}$ representa a diferença entre as medidas e os valores determinados pela função:

$$\{D\} = \begin{bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \dots \\ y_n - f(x_n) \end{bmatrix}$$

O vetor $\{\Delta A\}$ contém as informações da mudança dos valores dos coeficientes:

$$\{\Delta A\} = \begin{bmatrix} \Delta K \\ \Delta m \\ \Delta b \\ \Delta n \end{bmatrix}$$

Com a aplicação da linearização por mínimos quadrados, a Equação 15 passa a ser representada na forma:

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = \{[Z_j]^T \{D\}\} \quad (20)$$

Assim, esta abordagem consiste em resolver a Equação 15 para $\{\Delta A\}$, para computar os valores dos coeficientes como:

$$K_{j+1} = K_j + \Delta K \quad (21)$$

$$m_{j+1} = m_j + \Delta m \quad (22)$$

$$b_{j+1} = b_j + \Delta b \quad (23)$$

$$n_{j+1} = n_j + \Delta n \quad (24)$$

Este procedimento é repetido até que a solução convirja, isto é, até que o valor $|e_K|$ representado pela equação

$$|e_K| = \left| \frac{K_{j+1} - K_j}{K_{j+1}} \right| \cdot 100\% \quad n_{j+1} = n_j + \Delta n \quad (25)$$

atinja um critério de parada aceitável, por exemplo, $|e_K|$ menor do $1 \cdot 10^{-5}$. Vale ressaltar que o cálculo do erro acima descrito deve ser realizado para todos os coeficientes da mesma forma que para o coeficiente “ K ”.

Equações do Tipo “ln ln”

Seguiu-se a metodologia proposta em Martinez Júnior & Magni (1999). As equações foram determinadas a partir das expressões:

$$i_{t,T} = M_{(i)t} + \sigma_{(i)t} \cdot K_{n,T} \quad (26)$$

Onde:

$i_{t,T}$ – Intensidade da chuva (mm/h) para uma duração t (min) e período de retorno T (anos);

$M_{(i)t}$ – Média das intensidades de chuvas intensas correspondentes à duração t ;

$\sigma_{(i)t}$ – Desvio padrão das intensidades de chuvas intensas correspondentes à duração t ;

$K_{n,T}$ – Fator de frequência para a distribuição Gumbel, função do número de anos da série e do período de retorno T .

Sendo:

$$K_{n,T} = \frac{(y - \bar{y})}{\sigma_y} = - \left(\frac{\bar{y}}{\sigma_y} \right) - \left(\frac{1}{\sigma_y} \right) \cdot \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \quad (27)$$

Onde:

y – Variável reduzida da distribuição Gumbel;

\bar{y} – Média da variável reduzida da distribuição Gumbel;

σ_y – Desvio padrão da variável reduzida da distribuição Gumbel.

Admitiu-se a hipótese de que a média e o desvio padrão das intensidades máximas de chuva variem com a duração através de expressões do tipo:

$$M_{(i)t} = A \cdot (t + B)^C \quad (28)$$

$$\sigma_{(i)t} = D \cdot (t + E)^F \quad (29)$$

Onde:

A, B, C, D, E, F são coeficientes a serem ajustados por mínimos quadrados.

Substituindo as Equações 27, 28 e 29 em um 26, e fazendo pequenas modificações obtém-se:

$$i_{t,T} = A \cdot (t + B)^C + D \cdot (t + E)^F \cdot \left(G + H \cdot \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right) \quad (30)$$

Onde:

G e H são coeficientes a serem determinados por relações entre a média e o desvio padrão da variável reduzida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise das precipitações

Nas Tabelas 5 a 6 são apresentados os dados da análise estatística descritiva das máximas precipitações anuais para um dia e para diferentes durações. Os dados foram divididos em três grupos: o primeiro mostra a análise estatística dos dados de altura e intensidade máximas de chuva com duração de um dia; o segundo mostra a análise estatística dos dados de altura de chuva máxima para diferentes durações; e, finalmente, o terceiro descreve a análise estatística dos dados de intensidade máxima de chuva para diferentes durações. Procedeu-se esta diferenciação porque a série observada com pluviógrafo (registro contínuo) é menor do que a série observada com pluviômetro (dados diários). Para os registros pluviográficos a série é

composta pelo período que vai de 1948 até 2006 (exceto 1993, sem registros completos), enquanto que para os registros pluviométricos a série é mais extensa, indo de 1940 até 2006, (exceto 1941, sem dados completos). As Tabelas 5 e 6 apresentam a análise estatística de dados de altura precipitada, mas convém lembrar que os dados usados para gerar as curvas de IDF são análises estatísticas dos dados de intensidades, constantes das Tabelas 5 e 7.

As Tabelas 5 a 7 mostram que com o aumento da duração da precipitação houve decréscimo das intensidades máximas anuais (as menores intensidades estão presentes nas maiores durações). Adicionalmente, observa-se uma variação superior a 6 mm entre a média e a mediana, medidas da tendência central, para as

máximas alturas precipitadas em um dia. Neste caso, acredita-se que a mediana pode representar melhor a informação da tendência central. Outra constatação importante é que todos os coeficientes de variação (relação entre

o desvio padrão e a média) ficaram no intervalo de 22% a 30% do valor médio, indicando variabilidade entre os dados, porém na mesma ordem de grandeza para todas as durações.

Tabela 5. Estatística descritiva das alturas (mm) e intensidades (mm/h) diárias máximas precipitadas.

Estatística Descritiva	Duração de 1 Dia	
	Altura Precipitada (mm)	Intensidade (mm/h)
Média	86,85	3,62
Desvio Padrão	24,24	1,01
Variância	587,50	1,02
Assimetria	2,15	2,15
Moda	97,00	4,04
Mediana	80,50	3,35
CV %	27,91	27,91

Tabela 6. Estatística descritiva das alturas máximas precipitadas, em milímetros, para cada ano e em diferentes durações.

Duração	10	20	30	60	120	180	360	720	1440
Estatística Descritiva	Altura Precipitada (mm)								
Média	18,22	29,14	37,47	49,05	54,97	59,50	65,25	68,37	87,32
Desvio Padrão	5,42	7,61	10,09	13,79	14,02	13,54	14,80	15,19	24,94
Variância	29,38	57,85	101,76	190,14	196,43	183,38	219,18	230,83	622,06
Assimetria	0,34	0,44	0,75	0,78	0,94	0,62	0,50	0,69	2,19
Moda	20,00	30,00	40,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	97,00
Mediana	18,70	28,20	35,75	46,80	52,85	56,40	63,35	66,35	80,50
CV %	29,8	26,1	26,9	28,1	25,5	22,8	22,7	22,2	28,6

Tabela 7. Intensidades máximas precipitadas, em milímetros por hora, para cada ano e em diferentes durações.

Duração	10	20	30	60	120	180	360	720	1440
Ano	Intensidades de Chuva (mm/h)								
Média	109,29	87,41	74,94	49,05	27,48	19,83	10,88	5,70	3,64
Desvio Padrão	32,52	22,82	20,17	13,79	7,01	4,51	2,47	1,27	1,04
Variância	1057,82	520,65	407,02	190,14	49,11	20,38	6,09	1,60	1,08
Assimetria	0,34	0,44	0,75	0,78	0,94	0,62	0,50	0,69	2,19
Moda	120,00	90,00	80,00	30,00	17,50	13,33	7,50	4,17	4,04
Mediana	112,20	84,60	71,50	46,80	26,43	18,80	10,56	5,53	3,35

Aplicação da distribuição probabilística de Gumbel

Conforme mencionado na metodologia, neste estudo foi usada a distribuição Gumbel como modelo probabilístico de extremos. Como foram usados dois grupos de dados: 1) duração de um dia para 66 anos, e 2) durações menores (10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720) para 58 anos, procederam-se duas aplicações distintas da distribuição Gumbel.

Como a série de dados diários possui um conjunto de 66 registros, utilizou-se $n = 66$ na Tabela 2 obtendo o valor médio $\bar{y}_{66} = 0,5538$ e o desvio padrão $\sigma_{66} = 1,1814$ da variável Gumbel “y”. Os valores da variável reduzida “y” foram determinados para cada um dos diferentes períodos de retorno. Os valores para o fator de frequência foram então obtidos pela Equação 7. Lançando mão da Equação 6, determinaram-se as alturas precipitadas para cada um dos períodos de retorno, usando os

valores da média e desvio padrão apresentados na Tabela 5. Os valores assim obtidos para as

alturas precipitadas pelo método de Gumbel foram organizados na Tabela 8.

Tabela 8. Alturas de chuva precipitada em um dia obtidas pelo método de Gumbel.

Período de Retorno (anos)	Variável Reduzida y	Fator de Freqüência K	Alturas Precipitadas (mm)
2	0,367	-0,159	83,00
5	1,500	0,801	106,26
10	2,250	1,436	121,65
15	2,674	1,794	130,34
20	2,970	2,045	136,42
25	3,199	2,239	141,11
50	3,902	2,834	155,54
75	4,311	3,180	163,93
100	4,600	3,425	169,86

Procedimento similar foi aplicado aos dados de intensidade de chuva obtidos dos registros de diferentes durações. Utilizando $n = 58$ obtiveram-se os valores da média $\bar{y}_{58} = 0,5515$ e do desvio padrão $\sigma_{58} = 1,1721$ da variável Gumbel “y”. Em seguida foram determinados os valores para o fator de

freqüência e as intensidades precipitadas para cada um dos períodos de retorno, usando os valores da média e desvio padrão apresentados na Tabela 7. Os valores assim obtidos para as intensidades precipitadas pelo método de Gumbel foram organizados na Tabela 9.

Tabela 9. Máxima intensidade de chuva precipitada (mm/h) para várias durações obtidas pelo método de Gumbel.

Período de Retorno (anos)	Variável Reduzida y	Fator de Freqüência K	Duração (min)									
			10	20	30	60	120	180	360	720	1440	
			Intensidades de Chuva (mm/h)									
2	0,367	-0,158	104,2	83,8	71,8	46,9	26,4	19,1	10,5	5,5	3,5	
5	1,500	0,809	135,6	105,9	91,3	60,2	33,2	23,5	12,9	6,7	4,5	
10	2,250	1,449	156,4	120,5	104,2	69,0	37,6	26,4	14,5	7,5	5,1	
15	2,674	1,811	168,2	128,7	111,5	74,0	40,2	28,0	15,3	8,0	5,5	
20	2,970	2,064	176,4	134,5	116,6	77,5	41,9	29,1	16,0	8,3	5,8	
25	3,199	2,258	182,7	138,9	120,5	80,2	43,3	30,0	16,4	8,6	6,0	
50	3,902	2,858	202,3	152,6	132,6	88,5	47,5	32,7	17,9	9,3	6,6	
75	4,311	3,207	213,6	160,6	139,6	93,3	50,0	34,3	18,8	9,8	7,0	
100	4,600	3,454	221,6	166,2	144,6	96,7	51,7	35,4	19,4	10,1	7,2	

Equação IDF pelo método da desagregação da chuva diária

Partindo dos valores de altura precipitada para cada uma dos diferentes períodos de retorno mostrados na Tabela 8, as alturas precipitadas em um dia foram corrigidas para o valor de 24 horas utilizando o coeficiente 1,14. De posse dos valores das alturas de chuva de 24

horas, foram realizadas correções conforme os coeficientes apresentados na Tabela 4, para obter as alturas precipitadas em diferentes durações. A Tabela 10 mostra os resultados de alturas de chuva obtidos para diferentes durações e período de retorno. As alturas precipitadas constantes da Tabela 10 foram

transformadas em intensidades de chuva (mm/h), para os cálculos subsequentes.

Tabela 10. Alturas de chuva precipitada em um dia desagregada para diferentes durações.

Duração	Tr (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	75	100
	Alturas Precipitadas (mm)								
5 mim	10,00	12,80	14,66	15,70	16,43	17,00	18,74	19,75	20,46
10 mim	15,88	20,33	23,28	24,94	26,10	27,00	29,76	31,36	32,50
15 mim	20,59	26,35	30,17	32,33	33,84	35,00	38,58	40,66	42,13
20 mim	23,82	30,50	34,91	37,41	39,15	40,50	44,64	47,05	48,75
25 mim	26,76	34,26	39,22	42,02	43,99	45,50	50,15	52,85	54,77
30 mim	29,41	37,65	43,10	46,18	48,34	50,00	55,11	58,08	60,18
1h	39,74	50,88	58,25	62,41	65,32	67,56	74,47	78,49	81,33
6h	68,13	87,22	99,85	106,98	111,98	115,82	127,67	134,55	139,42
8h	73,81	94,48	108,17	115,90	121,31	125,47	138,30	145,76	151,04
10h	77,59	99,33	113,72	121,84	127,53	131,91	145,40	153,24	158,79
12h	80,43	102,96	117,88	126,30	132,19	136,73	150,72	158,84	164,60
24h	94,62	121,13	138,69	148,59	155,52	160,86	177,31	186,88	193,64
1 dia	83,00	106,26	121,65	130,34	136,42	141,11	155,54	163,93	169,86

Conforme a metodologia, os logaritmos das máximas intensidades obtidas da Tabela 10 foram lançados em gráfico em função dos logaritmos das durações, acrescidas da constante “b”, obtida otimizando R² na

regressão linear de “ln(i)” versus “ln(t+b)”. “b” foi variado entre 1 a 60, obtendo-se o maior valor R² = 0,9998939 para b = 12. A Figura 1 mostra os resultados da regressão para a melhor aderência dos “ln(i)” em função de “ln(t+b)”.

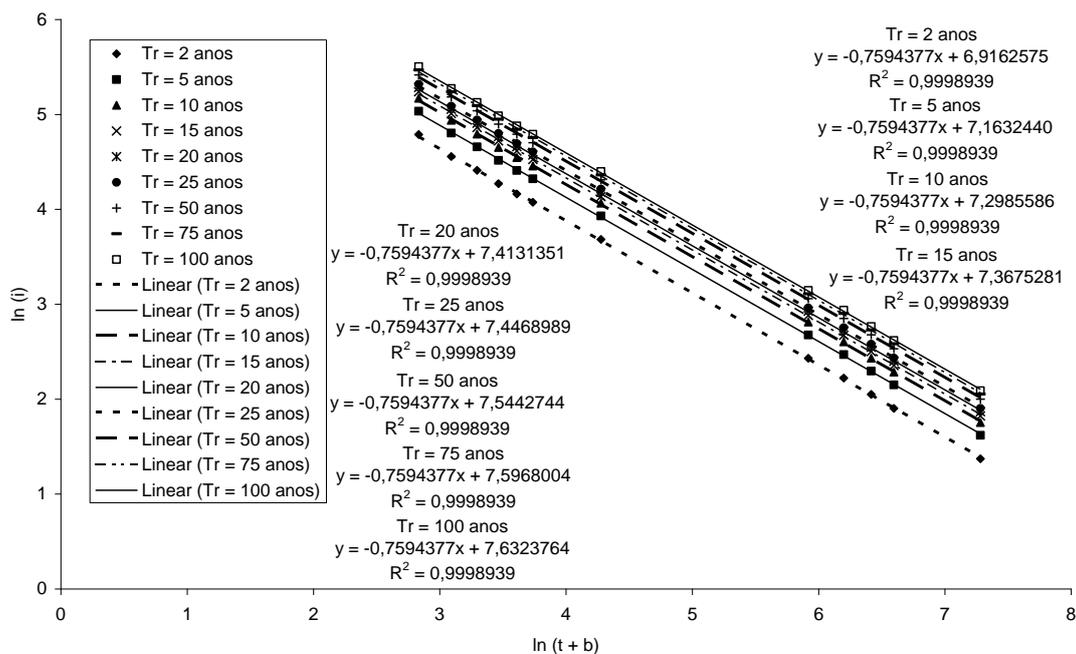


Figura 1. Melhor aderência à regressão linear dos logaritmos naturais das intensidades versus logaritmos naturais da duração mais o coeficiente “b” (partindo da duração de um dia).

O coeficiente angular das retas da Figura 1 é o coeficiente “n” da curva IDF. Como todas as retas apresentaram o mesmo valor, adotou-se para curva final $n = 0,7594$.

Na sequência, os valores dos coeficientes lineares das regressões da Figura 1, representados por “ln(C)”, foram lançados em gráfico como função dos logaritmos dos

períodos de retorno de cada curva, procedendo-se a regressão linear de “ln(C)” versus “ln(Tr)” e encontrando-se os valores dos coeficientes “m” e “K” (Figura 2). O coeficiente angular “m” apresentou o valor 0,176032, sendo adotado $m = 0,176$ para a curva IDF final. O coeficiente linear “K” assumiu o valor 953,199290, sendo considerado $K = 953,1993$ para a equação IDF final.

De posse de todos os coeficientes necessários para a equação IDF, a equação pelo

método da desagregação da chuva diária assume a forma

$$i = \frac{953,1993 \cdot Tr^{0,176}}{(t+12)^{0,7594}} \quad (31)$$

que pode ser utilizada para verificar a aderência aos valores da distribuição de Gumbel. A Equação 31 é válida para períodos de retorno menores que 100 anos. O valor do período de retorno deve ser inserido em anos e a duração em minutos para serem obtidos valores de intensidade em milímetros por hora.

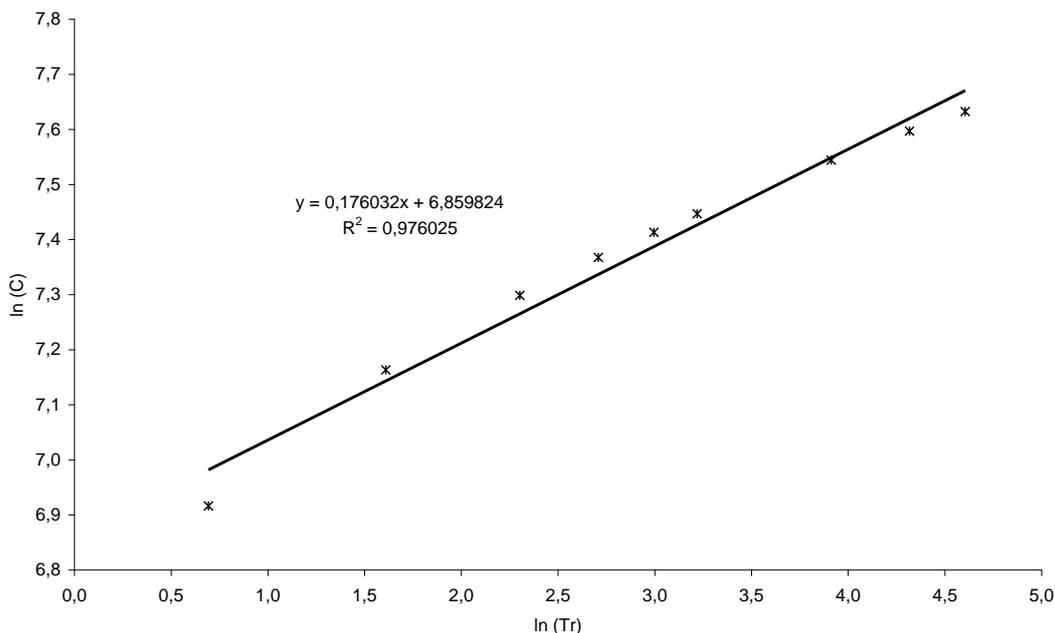


Figura 2. Regressão linear dos logaritmos naturais de C (coeficientes lineares mostrados na Figura 1) em função dos logaritmos naturais de Tr.

Para verificar a aderência da Equação 31 aos dados fornecidos pelo modelo probabilístico de Gumbel foi elaborada a Figura 3 e determinado o valor do coeficiente de ajuste R^2 , cujo valor foi 0,993653, indicando, em princípio, boa aderência. Todavia, analisando a Figura 3 percebe-se que não se verifica essa boa aderência, sendo que ora os dados são subestimados (durações menores) e ora os dados são superestimados (durações maiores).

Outra forma de comparar o equacionamento obtido é pelo valor da soma dos mínimos quadrados entre os valores obtidos com a distribuição Gumbel e os valores

calculados com a equação IDF. Para este caso o valor obtido foi de $10.532,03 \text{ (mm/h)}^2$. Nas comparações subsequentes, feitas com os resultados obtidos com os outros métodos, verifica-se que este valor é elevado. A intensidade média também é um parâmetro de comparação. Para a equação IDF obtida com este método a média foi 59,76 mm/h, enquanto que a distribuição Gumbel forneceu 66,28 mm/h.

A diferença constatada está provavelmente vinculada à própria metodologia adotada.

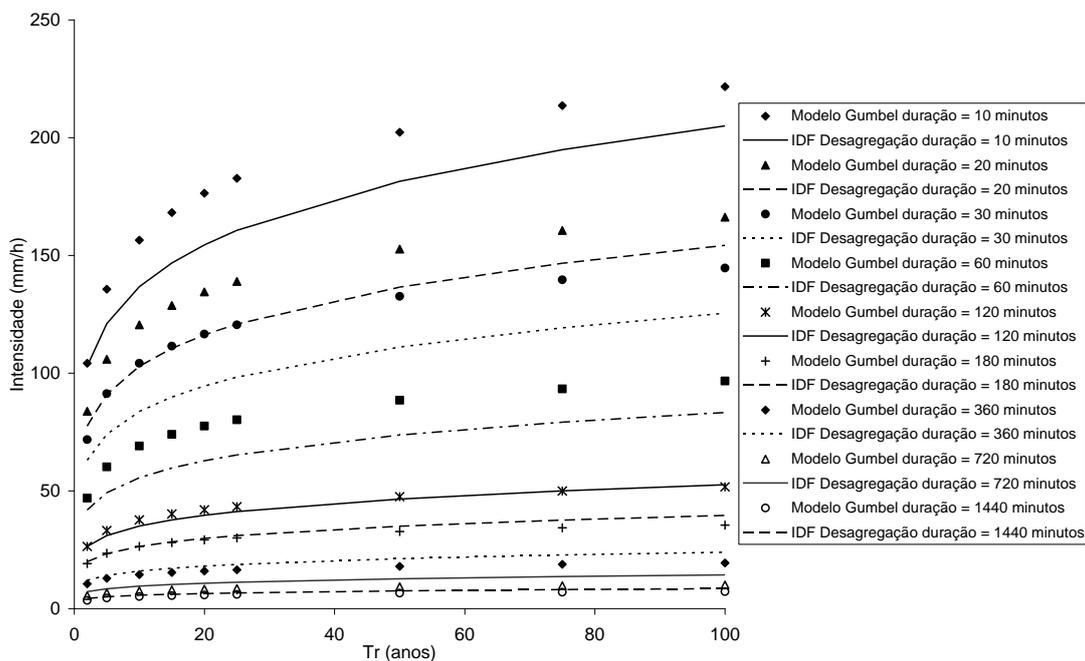


Figura 3. Comparação entre os valores obtidos com a distribuição probabilística Gumbel (pontos) e valores fornecidos pela curva IDF obtida pelo método da desagregação da chuva diária (linhas).

Equação IDF pelo Método da Regressão Linear Usando Todas as Durações

O logaritmo das máximas intensidades da Tabela 9 foi lançado em gráfico em função dos logaritmos das durações acrescidas de uma constante “b”. Para obter o melhor valor de “b”,

seguiu-se o mesmo procedimento do subitem anterior. O melhor valor de “b” foi 16, para o qual obteve-se $R^2 = 0,99616170$. A Figura 4 mostra os resultados da regressão de “ln(i)” em função de “ln(t+b)”.

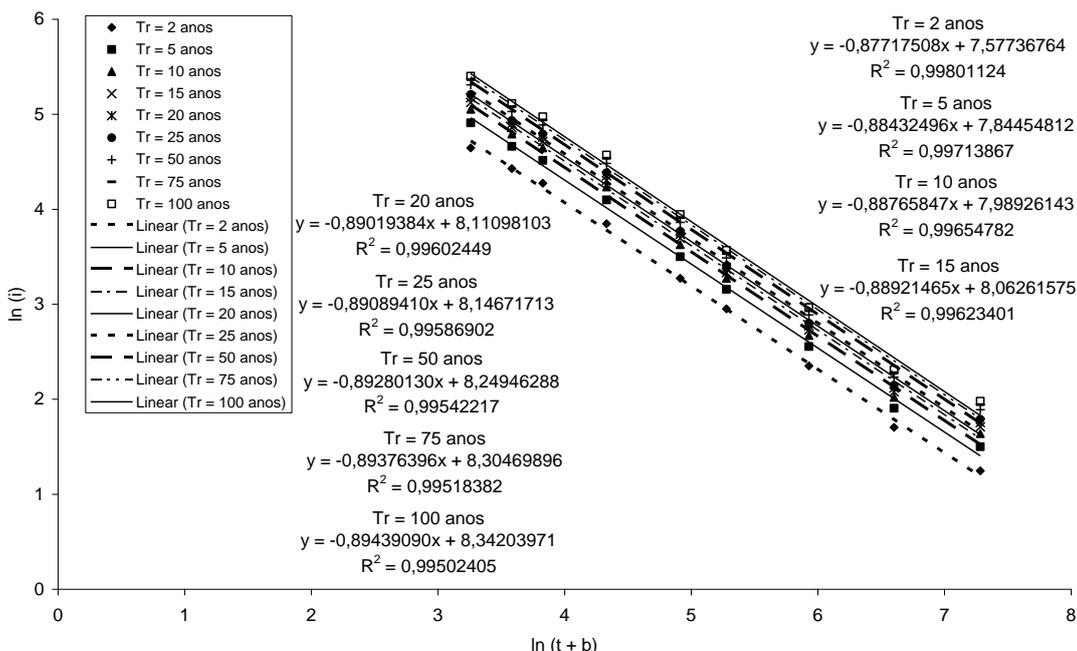


Figura 4. Melhor aderência à regressão linear dos logaritmos naturais das intensidades versus logaritmos naturais da duração mais o coeficiente “b”(considerando todas as durações).

O coeficiente “n” da curva IDF é a média dos valores dos coeficientes angulares das retas

de regressão da Figura 4. Nesse caso tem-se $n = 0,8893$.

Os coeficientes lineares das regressões da Figura 4 foram lançados em gráfico como função dos logaritmos dos períodos de retorno de cada uma das curvas. Procedeu-se a

regressão linear dos valores de “ln(C)” versus “ln(Tr)”, Figura 5, sendo encontrados os valores dos coeficientes “m” e “K”. Neste caso $m = 0,1876$ e $K = 1844,77$.

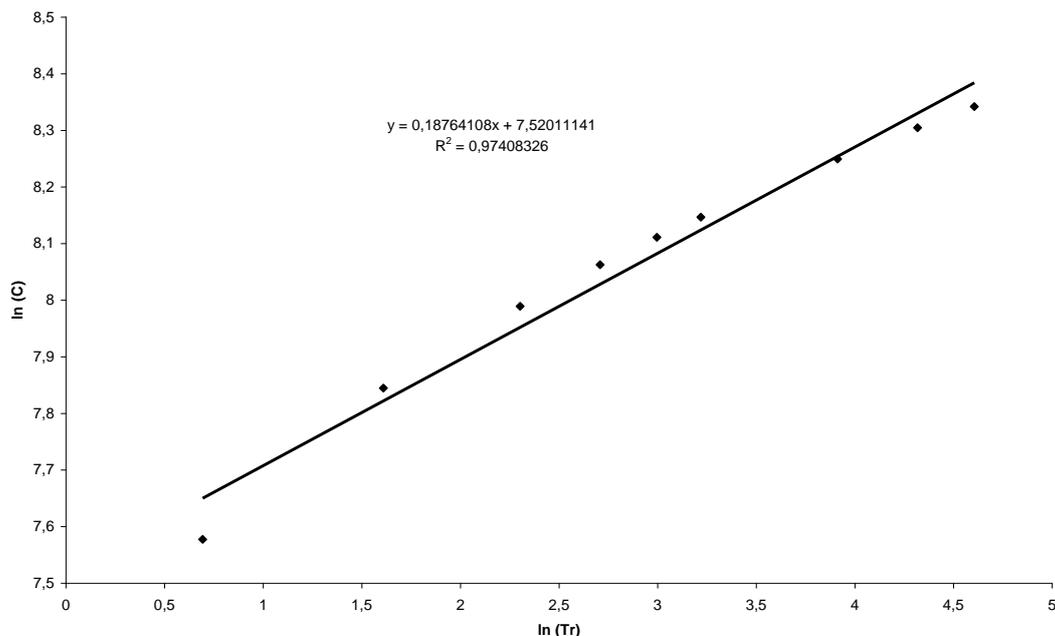


Figura 5. Regressão linear dos logaritmos naturais de C (coeficientes lineares mostrados na Figura 4) em função dos logaritmos naturais de Tr.

Novamente, de posse de todos os coeficientes necessários à equação IDF, a mesma assume a forma

$$i = \frac{1844,77 \cdot Tr^{0,1876}}{(t + 16)^{0,8893}} \quad (32)$$

podendo ser comparada com a distribuição de Gumbel.

A Equação 32 também é válida para períodos de retorno menores que 100 anos. O valor do período de retorno deve ser inserido em anos e a duração em minutos para serem obtidos valores de intensidade em milímetros por hora.

A aderência da Equação 32 aos dados fornecidos pelo modelo probabilístico de Gumbel pode ser observada na Figura 6, que possui um coeficiente de ajuste $R^2 = 0,9931476$, também indicando boa aderência, porém menor que aquela do método anterior. Entretanto, analisando a Figura 6 percebe-se que já há boa aderência da curva IDF aos dados obtidos com a distribuição Gumbel. A soma dos mínimos quadrados entre os valores de Gumbel e os valores da equação IDF baseada no método da regressão linear foi de $2.269,9 \text{ (mm/h)}^2$. Este valor é bem menor do que aquele

obtido pelo modelo anterior. Também o valor da média das intensidades da equação IDF ($66,33 \text{ mm/h}$) ficou muito próximo ao da distribuição de Gumbel ($66,28 \text{ mm/h}$).

Os resultados mostram um melhor ajuste utilizando a regressão linear, que considera os dados de todas as durações e não somente da chuva de um dia, mesmo apresentando um valor de R^2 ligeiramente menor que aquele da equação da chuva de diária.

Equação IDF pelo método da regressão não (GAUSS-NEWTON)

Para a aplicação deste método partiu-se de uma sugestão inicial (semente) para os valores dos coeficientes “K, m, b e n”. Neste estudo foram usados como sementes os valores sugeridos em Righetto (1998), $K = 1500$, $m = 0,2$, $b = 20$ e $n = 1$.

Como a resolução foi feita em planilha eletrônica, construiu-se uma coluna com todas as durações e seus respectivos períodos de retornos. Como se tem 9 durações diferentes (10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720, 1440) e 9 períodos de retorno (2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100) foram usadas 81 linhas. Ao lado das colunas contendo as durações e períodos de

retorno inseriu-se uma nova coluna contendo os valores das intensidades máximas obtidas com a distribuição Gumbel e outra coluna com os

valores das intensidades calculadas pelo uso dos coeficientes inicialmente sugeridos.

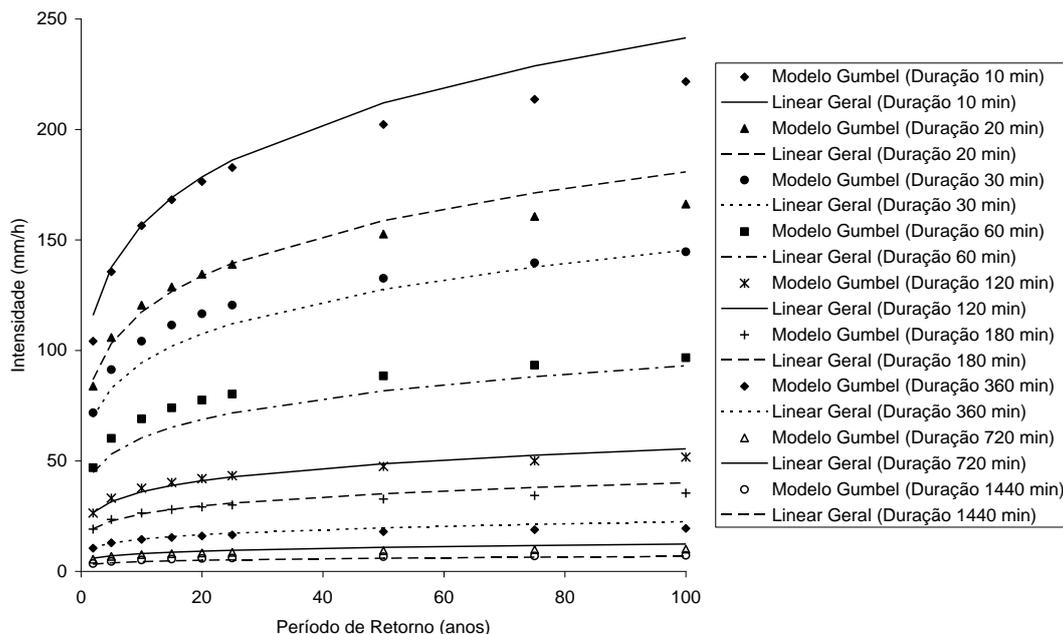


Figura 6. Comparação entre os valores obtidos com a distribuição probabilística Gumbel (pontos) e valores fornecidos pela curva IDF obtida pelo método regressão linear de todas as durações (linhas).

Para a construção da matriz inicial $|Z_0|$ calculou-se o valor de cada derivada parcial, correspondente a cada par “duração e período de retorno”, fazendo uso dos valores dos coeficientes sugeridos. Neste caso, $|Z_0|$ foi uma matriz com 4 colunas (uma para cada derivada) e 81 linhas (uma para cada par duração e período de retorno). A matriz transposta $|Z_0|^T$ foi calculada usando as funções copiar e colar especial da planilha eletrônica (marcando as opções valores e transpor). Procedeu-se a multiplicação entre $|Z_0|$ e $|Z_0|^T$, usando a função “matriz.mult” existente na planilha e, em seguida, determinou-se a matriz inversa desta com a função “matriz.inverso” existente na planilha.

Para o cálculo do vetor $\{D\}$ gerou-se uma coluna possuindo a diferença entre os valores de intensidade máximas obtidos com a distribuição Gumbel e os valores calculados com os coeficientes inicialmente sugeridos. A multiplicação do vetor $\{D\}$ pela matriz transposta $|Z_0|^T$ gerou um vetor de uma coluna e quatro linhas.

O vetor $\{\Delta A\}$, que representa o incremento (positivo ou negativo) dos valores iniciais dos coeficientes (K, m, b, n) foi

calculado pela multiplicação de $[|Z_0| |Z_0|^T]^{-1}$ por $|Z_0|^T \{D\}$.

Os valores dos coeficientes K, m, b, n foram corrigidos e o processo tornou a ser repetido. Para o presente estudo, os valores convergiram já na sexta iteração, com um erro percentual menor do que 10^{-4} para cada um dos coeficientes. A parada ocorreu na sétima iteração com um erro percentual menor do que 10^{-7} . Os coeficientes obtidos estão apresentados já na equação IDF, que assume a forma:

$$i = \frac{5144,90 \cdot Tr^{0,1657}}{(t + 30,2258)^{1,0557}} \quad (33)$$

A Equação 33 também é válida para períodos de retorno menores que 100 anos. O valor do período de retorno deve ser inserido em anos e a duração em minutos para serem obtidos valores de intensidade em milímetros por hora.

O coeficiente de ajuste (Gumbel versus IDF) assumiu o valor $R^2 = 0,9969989$, também indicando boa aderência. Analisando a Figura 7 percebe-se que há muito boa aderência da curva IDF aos dados obtidos com a distribuição Gumbel. Comparando-se as Figuras 3, 6 e 7 a afirmação anterior fica mais evidente.

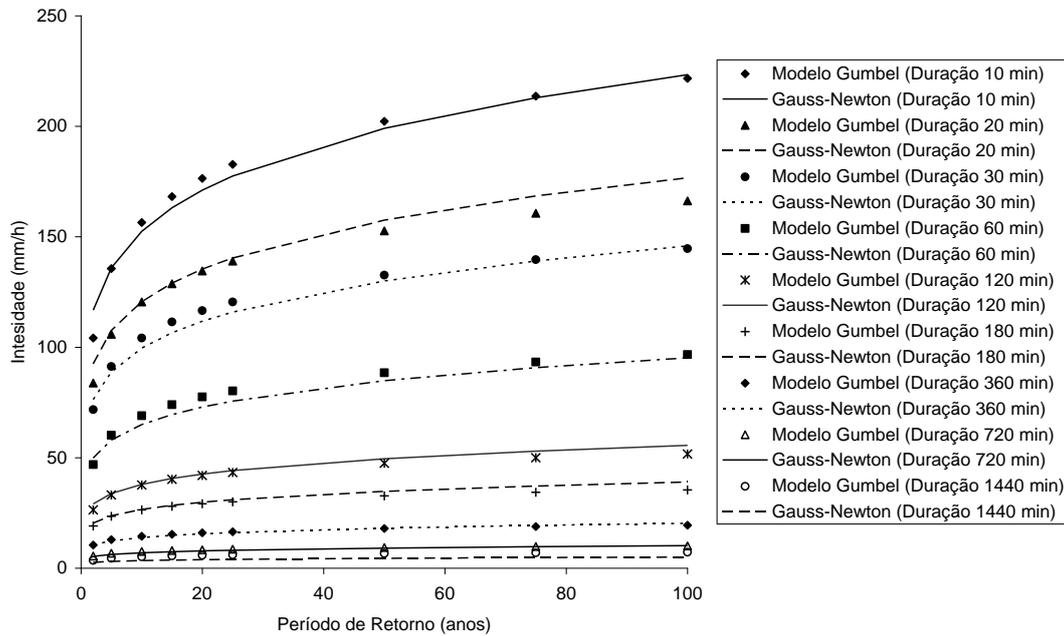


Figura 7. Comparação entre os valores obtidos com a distribuição probabilística Gumbel (pontos) e valores fornecidos pela curva IDF obtida pelo método Gauss-Newton de todas as durações (linhas).

A soma dos mínimos quadrados entre os valores de Gumbel e os valores da equação IDF foi de $884,3 \text{ (mm/h)}^2$, valor bem menor do que aqueles obtidos com os modelos anteriores. Também o valor médio das intensidades obtido com a equação IDF ($66,16 \text{ mm/h}$) ficou muito próximo daquele obtido com a distribuição de Gumbel ($66,28 \text{ mm/h}$).

O método da regressão não linear mostrou-se superior aos métodos anteriores.

Equação IDF pelo método “LN LN”

Para a determinação dos coeficientes A , B , C , que estão vinculados à parcela da curva IDF que representa a média das intensidades para diferentes durações, realizou-se a linearização, lançando “ $\ln(M)$ ” em função de “ $\ln(t+B)$ ”, com o valor de B variando entre 1 e 60 (números inteiros) e sendo adotado o valor $B = 16$. Os

$$i = 3274,2740 \cdot (t+16)^{-0,8899} + 557,1853 \cdot (t+11)^{-0,8720} \cdot \left[-0,4705 - 0,8532 \cdot \ln \left(\ln \left(\frac{T}{(T-1)} \right) \right) \right] \quad (34)$$

A Equação 34 também é válida para períodos de retorno menores que 100 anos. O valor do período de retorno deve ser inserido em anos e a duração em minutos para serem obtidos valores de intensidade em milímetros por hora.

coeficientes A e C foram obtidos por mínimos quadrados, sendo $A = 3274,2740$ e $C = -0,8899$.

Os coeficientes D , E , F estão vinculados ao desvio padrão das intensidades para diferentes durações. Seguindo o mesmo procedimento anterior, obteve-se $E = 11$. Os coeficientes D e F também foram obtidos por mínimos quadrados, sendo $D = 557,1853$ e $F = -0,8720$.

Finalmente os coeficientes G e H foram obtidos usando o valor da média e desvio padrão da variável reduzida. Sendo a média $\bar{y}_{58} = 0,5515$ e desvio padrão $\sigma_{58} = 1,1721$; G e H foram obtidos através das relações $G = -(\bar{y}_{58}/\sigma_{58}) = -0,4705$ e $H = -(1/\sigma_{58}) = -0,8532$.

Unindo-se os coeficientes, a equação IDF assumiu a forma:

O coeficiente de ajuste (Gumbel versus IDF) assumiu o valor $R^2 = 0,9911665$, indicando boa aderência, todavia menor do que todos os outros métodos. Contudo, analisando a Figura 8 percebe-se que a aderência da curva IDF aos dados obtidos com a distribuição Gumbel é muito ruim, com os valores sempre

superestimados. Comparando-se as Figuras 3, 6, 7 e 8 a afirmação anterior ainda mais fica evidente.

A soma dos mínimos quadrados entre os valores de Gumbel e os valores da equação IDF foi, utilizando o presente método, de

$114.484,52 \text{ (mm/h)}^2$, valor este muito superior ao obtido pelos métodos anteriores. O valor da média das intensidades obtidos com a equação IDF (92,92 mm/h) também ficou muito distante do valor obtido com a distribuição de Gumbel (66,28 mm/h).

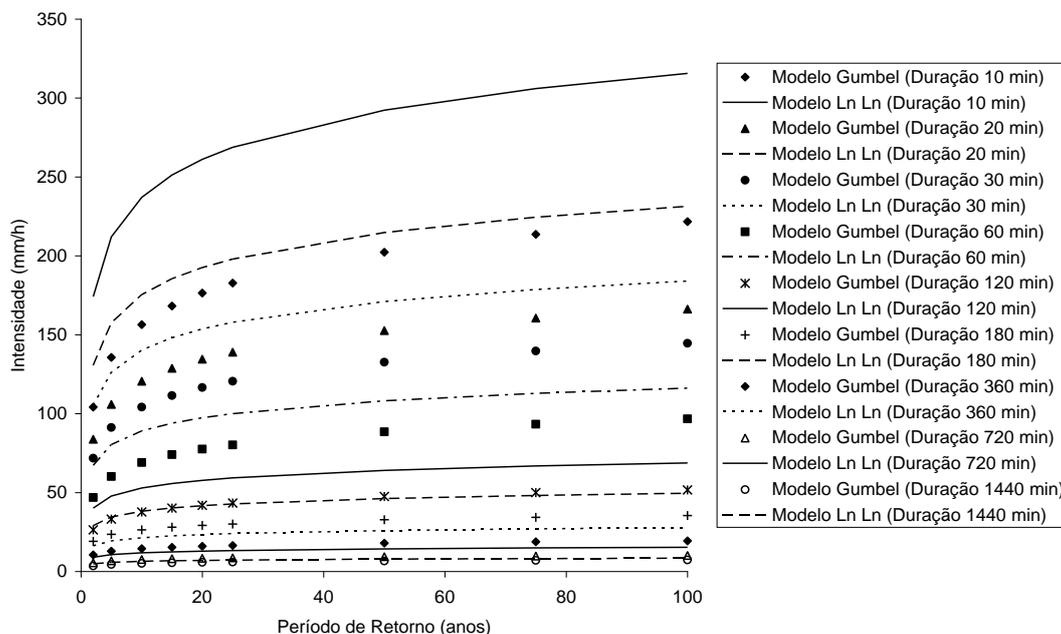


Figura 8. Comparação entre os valores obtidos com a distribuição probabilística Gumbel (pontos) e valores fornecidos pela curva IDF obtida pelo método “ln ln” de todas as durações (linhas).

Comparando-se todas as curvas obtidas, o método “ln ln”, da maneira que foi aplicado, deve ser considerado inadequado, resultado provavelmente vinculado ao procedimento de obtenção dos coeficientes. Eventualmente a

aplicação de regressão não linear para a determinação dos coeficientes levaria a resultados melhores. Entretanto prezou-se seguir o procedimento sugerido pelos autores (Martinez Júnior & Magni, 1999).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método que forneceu os melhores resultados no presente estudo foi a regressão não linear de Gauss-Newton. Trata-se de um procedimento de fácil aplicação e que pode ser reproduzido com muita facilidade. Menciona-se, como exemplo, que Silva et al. (2002), dentre outros autores, também obtiveram sucesso usando o método de Gauss-Newton para estudos de chuvas intensas.

O método da desagregação da chuva de um dia só deve ser descartado no caso da existência de registros feitos para durações

menores pela presença de pluviógrafo. Entretanto, tal método fornece resultados aceitáveis e continua sendo recomendado para aqueles casos nos quais só se dispõe de registros feitos em pluviômetros.

Com a equação que apresentou a melhor sobreposição com os resultados da distribuição de Gumbel, acredita-se que seja possível o cálculo da intensidade máxima de chuvas com diferentes durações e períodos de retorno, com precisão adequada a projetos de engenharia.

AGRADECIMENTOS

Os autores desta pesquisa agradecem ao Instituto Agrônomo de Campinas pela

disponibilidade dos dados, bem como ao Professor Titular SHS/EESC/USP Harry Edmar Schulz pelas correções e sugestões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Numerical Methods for Engineers. New York, Mc Graw-Hill, 926p., 2006.
2. CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Drenagem Urbana – Manual de Projeto. CETESB/ASCETESB, 452p., 1986.
3. CHOW, V.T. Handbook of Applied Hydrology. New York, Mc Graw-Hill, Section 8:8-23 à 8-26, 1964.
4. ELTZ, F.L.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A. Período de retorno de chuvas em Santa Maria, RS. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.16, p.265-269, 1992.
5. FENDRICH, R. Chuvas Intensas para Obras de Drenagem no Estado do Paraná. Curitiba-PR, 101p., 2003.
6. GUMBEL, E. J. Statistics of Extremes. New York: ColumbiaUniversity Press, 375p., 1958.
7. MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. Equações de Chuvas Intensas do Estado de São Paulo. Convênio Departamento de Águas e Energia Elétrica e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 125p., 1999.
8. NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. DE A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 561p., 2007.
9. PMRP – PREFEITURA MUNICIPAL DE RIBEIRÃO PRETO. Plano Diretor de Macrodrenagem de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto, 56p., 2002.
10. PORTO, R. Determinação da relação Intensidade-Frequência-Duração de chuvas para a cidade de Pirassununga, 1998. 7p.
11. RIGHETTO, A. M. Hidrologia e Recursos Hídricos. São Carlos, EDUSP, 1998. 840 p.
12. SILVA, D. D.; GOMES FILHO, R. R.; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F. Chuvas intensas no Estado da Bahia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p. 362-367, 2002.
13. SOARES, P. F.; SOARES, D. A. F. Chuvas intensas em Maringá: metodologia e aplicação. In: ENTECA-2000: I Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá - PR, 2000, Maringá.
14. VIEIRA, D.B.; LOMBARDI NETO, F.; SANTOS, R.P. Relação entre Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas em Mococa, SP. Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira, Campinas, v.33, n. 8, 1998.

Manuscrito recebido em: 12 de Agosto de 2014

Revisado e Aceito em: 29 de Agosto de 2016