

**CURVAS I-D-F PARA PRESIDENTE PRUDENTE – SP (1973 – 2009)**

**ALUNO: GUSTAVO MARÓSTICA BILIASI**

**ORIENTADOR: JOSÉ TADEU GARCIA TOMMASELLI**

Presidente Prudente

Novembro/2012

## TERMO DE APROVAÇÃO

Gustavo Maróstica Biliasi

### "CURVA I-D-F PARA PRESIDENTE PRUDENTE-SP (1973-2009)"

Trabalho de graduação aprovado como um dos requisitos parciais para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências e Tecnologia, *campus* de Presidente Prudente – SP, pela seguinte banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Márcio Rogério Pontes

  
\_\_\_\_\_  
Msc. Rafael Tiezzi

Presidente Prudente, 30 de novembro de 2012.

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental  
Rua Roberto Simonsen, 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente SP  
Tel 18 3229-5680 fax 18 3229-5341 coordengamb@fct.unesp.br

## SUMÁRIO

1. Introdução	6
2. Objetivos	6
3. Revisão Bibliográfica	6
4. Material e Método	8
4.1 Material	8
4.2 Método	9
4.2.1 Elaboração de arquivos digitais de pluviogramas	9
4.2.2 Digitalização dos arquivos dos pluviogramas	10
4.2.3 Pré-tratamento dos arquivos	11
4.2.4 Transformação dos dados digitalizados (coordenadas aleatórias) para valores compatíveis com os pluviogramas (coordenadas reais dos pluviogramas)	12
4.2.5 Modelo de transformação	13
4.2.5.1 Exemplo do modelo de transformação	14
4.2.6 Extração dos valores de intensidade	18
4.2.7 Sistema de obtenção da coordenada $Y_R$ acumulada	18
4.2.8 Planilha de extração	20
4.2.9 Seleção dos Maiores Valores Anuais	21
4.2.10 Criação da curva I-D-F	23
4.2.10.1 Metodologia para definir os valores de a, b e n	24
4.2.10.2 Metodologia para encontrar k e m	28
4.2.10.3 Definição dos valores de b e n	28
4.2.10.4 I-D-F Final	29
5. Resultados e Discussão	29
5.1 Comparações entre as intensidades máximas do Período de Retorno de 20	31

anos, para as equações de Presidente Prudente

6. Conclusão	31
7. Bibliografia	32

## 1. INTRODUÇÃO

---

O conhecimento das relações entre intensidade, duração e frequência de chuvas intensas é de enorme importância para projetos hidráulicos de drenagem urbana e agrícola, como galerias, bueiros, reservatórios de retenção (piscinões), extravasores de barragens, vãos de pontes, vertedores, etc. (GENOVEZ, 2000). Eltz *et al.* (1992) afirmam que a análise de frequência 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 em bases puramente determinísticas.

Na engenharia hidrológica, segundo Righetto (1998), chuvas intensas são aquelas que provocam cheias nos sistemas de drenagem, ou seja, são chuvas que geram escoamentos pluviais em galerias e canais, tais que as vazões de pico atingem valores próximos da capacidade do sistema. O mesmo autor afirma que chuvas intensas podem causar enchentes, desde que gerem vazões superiores à capacidade do sistema de drenagem.

Para esse tipo de estudo utiliza-se o método estatístico de curvas I-D-F (intensidade – duração – frequência), que fornece a intensidade pluviométrica (mm/min) ou a altura precipitada (mm) em função da duração da chuva (t) e do período de retorno (T). Esse tipo de curva I-D-F é criada a partir de dados pluviométricos históricos do local.

## 2. OBJETIVOS

---

Criar uma curva I-D-F para a cidade de Presidente Prudente, utilizando dados pluviográficos de 1973 – 2009.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Dentre os tipos de equações I-D-F podemos citar o trabalho pioneiro do Engenheiro Otto Pfafstetter, que analisou registros pluviográficos de 98 postos espalhados pelo território brasileiro, em épocas variadas. Após a análise desses gráficos, o autor observou que as precipitações seguiam o padrão de (DAEE 1999):

$$h = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}}} [a \cdot t + b \cdot \log(1 + c \cdot t)] \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

- h: precipitação total (mm);
- T: período de retorno (anos);

- t: duração da chuva (horas);
- a: coeficiente que depende da duração da chuva;
- b: coeficiente que depende da duração da chuva e do local em estudo;
- $\alpha, \beta, c$ : valores constantes para cada local em estudo.

Outro tipo de curva de Intensidade–duração–frequência são as equações do tipo “ln ln”. Desenvolvidas entre 1979 e 1982 para o Estado de São Paulo, consideram séries anuais e parciais de intensidades de chuvas [Mero e Magni, 1982] e têm a forma:

$$i = A_j \cdot (t + B_j)^{C_j} + (t + D_j)^{E_k} \cdot \left\{ F_k + G_k \cdot \ln \ln \left[ \frac{T}{(T-1)} \right] \right\} + M_j \cdot (t + P_j)^{Q_j} \cdot \ln(T - 0,5) \quad \dots\dots\dots(2)$$

Sendo:

- j = k = 1 para 10 min ≤ t ≤ 60 min;
- j = k = 2 para 60 min < t ≤ 180 min;
- j = 2 e k = 3 para 180 min < t ≤ 1440 min.

Onde:

- i: intensidade pluviométrica (mm/min);
- T: período de retorno (anos);
- t: duração da chuva (min);
- A, B, C, D, E, F, G, M, P, Q: valores que dependem da duração da chuva e do local em estudo.

Além dessas, podemos citar as equações do tipo “DAEE - FCTH”:

$$i = A \cdot (t + B)^C + D \cdot (t + E)^F \cdot \left\{ G + H \cdot \ln \ln \left[ \frac{T}{(T-1)} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Onde:

- i: intensidade pluviométrica (mm/min);
- T: período de retorno (anos);
- t: duração da chuva (min);
- A, B, C, D, E, F, G, H: valores que dependem da duração da chuva e do local em estudo;

E as do tipo “HC - FCTH”:

$$i = \frac{A}{(t + B)^C} + \frac{D}{(t + E)^F} \cdot \left\{ -0,45004 - 0,7797 \cdot \ln \ln \left[ \frac{T}{(T-1)} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

Onde:

- i: intensidade pluviométrica (mm/min);
- T: período de retorno (anos);
- t: duração da chuva (min);
- A, B, C, D, E, F: valores que dependem do local em estudo.

Sudo *et al.* (1981), utilizaram dados pluviográficos dos anos de 1972 a 1980 e elaboraram uma relação entre intensidade, duração e frequência para a cidade de Presidente Prudente - SP. A partir deste estudo encontrou-se a relação:

$$i = \frac{13,9059T^{0,1680}}{(t+15)^{-0,7247}} \dots\dots\dots(5)$$

Onde:

- i: intensidade pluviométrica (mm/min);
- T: período de retorno (anos);
- t: duração da chuva (min).

Porém, como esta relação foi feita utilizando-se de apenas 8 anos de dados e já tem-se 30 anos de sua criação, chegou-se a conclusão de que ela já não reflete as condições atuais. Portanto, viu-se a necessidade de elaborar uma nova curva I-D-F, que utilizando uma maior série de dados possa refletir as condições atuais.

No presente trabalho teve-se como objetivo a elaboração de uma Curva I-D-F para o município de Presidente Prudente, utilizando a série de dados de 1973 a 2009. Nessa série de 38 anos foram gerados cerca de 2.000 (dois mil) pluviogramas com dados de chuva.

Para criação da curva, foi utilizada a equação do tipo Geral que possui a seguinte forma:

$$i = \frac{kt^m}{(t+b)^{-n}} \dots\dots\dots(6)$$

Onde:

- I: intensidade pluviométrica (mm/min);
- T: período de retorno (anos);
- t: duração da chuva (min);
- K, m, b, n: parâmetros relativos ao ajuste da equação.

Para geração das curvas, utilizou-se os períodos de retorno (T) de 5, 10, 20, 30, 50, 100 e 1.000 anos. E as durações de chuva de 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos.

## 4. MATERIAL E MÉTODO

---

### 4.1. Material

Para a realização deste estudo utilizou-se os pluviogramas oriundos do pluviógrafo da Estação Meteorológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, no campus de Presidente Prudente (SP), localizado na latitude 22° 07’

04" S, longitude 51° 22' 57" W e altitude de 472 metros.

O pluviógrafo é do tipo sifão, modelo R FUESS BERLIN STEGLITZ, apresenta autonomia para registrar chuvas em um intervalo de tempo de 24 horas, sendo movido à corda por meio de um mecanismo de relógio. Os pluviogramas registram na abscissa o tempo e na ordenada a quantidade de chuva em milímetros.

Para a transformação dos pluviogramas em imagens digitais (digitalização), foi utilizado um "scanner" com resolução máxima de 300 dpi.

Em seguida, para a vetorização das imagens dos pluviogramas foi utilizado o aplicativo gráfico Surfer<sup>1</sup>. E por fim, para a organização básica dos dados, para os cálculos preliminares e para os cálculos de transformações foi utilizada a planilha eletrônica Excel<sup>2</sup>.

Foi necessário *scanear* (digitalizar) os pluviogramas de janeiro de 1980 a dezembro de 1991, e também os compreendidos entre janeiro de 2003 a maio de 2009. Os dados de intensidade de 1973 a 1979 foram obtidos de Sudo *et al.* (1981), e os pluviogramas digitalizados de 1998 a 2002 foram obtidos de Carvalho (2004). Não foi possível utilizar os dados de 1992 a 1997, pois os mesmos não puderam ser localizados junto à estação meteorológica.

## 4.2. Método

Antes de se iniciar a operação de digitalização dos pluviogramas, adotou-se o seguinte procedimento, conforme por Tommaselli *et al.* (1999), ou seja, em um pluviograma, havendo curvas de chuvas separadas entre si com intervalo igual ou superior a seis horas foram avaliadas como duas chuvas independentes.

### 4.2.1. Elaboração de arquivos digitais de pluviogramas (imagens escaneadas)

Inicialmente foram digitalizadas as fotocópias dos pluviogramas diários, visto que os pluviogramas originais são enviados, todo final de mês, ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Foram utilizados os pluviogramas do intervalo de janeiro de 1973 a maio de 2009. Todos os pluviogramas foram digitalizados com resolução aproximada de 300 dpi e foram armazenados no formato JPEG.

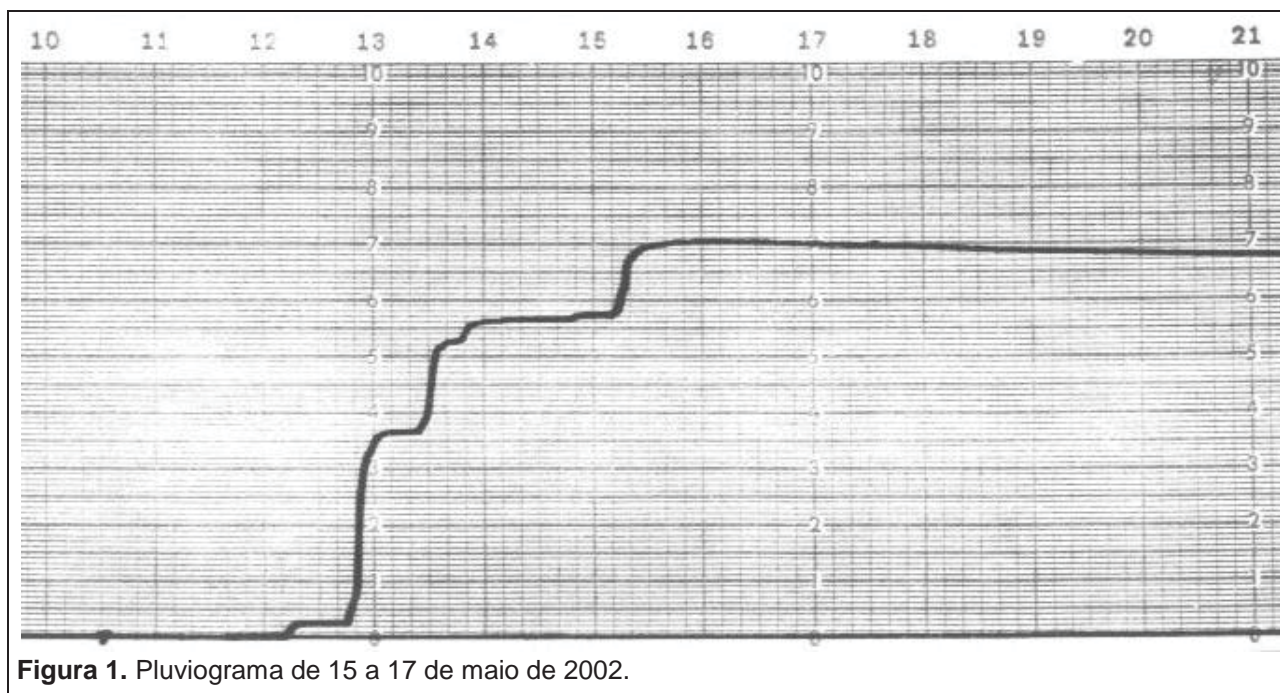
---

<sup>1</sup> Surfer é marca registrada da Golden Software, Inc.

<sup>2</sup> Excel é marca registrada da Microsoft Corporation

Na sequência, utilizando o aplicativo *Paint Shop Pro*<sup>3</sup>, que adquiria as imagens do *scanner*, foram selecionadas apenas as áreas dos pluviogramas que continham informação sobre precipitação.

No total, considerados os anos estudados, foram digitalizadas 2.106 imagens de chuva. A figura 1 mostra um exemplo deste tipo de procedimento. Observe que este pluviograma foi utilizado durante 3 dias, mas em apenas um dia foi registrada a precipitação. Atente para a abscissa que foi demarcada com um traço mais grosso. Este procedimento é padrão nas estações meteorológicas do INMET, para a economia de pluviogramas.



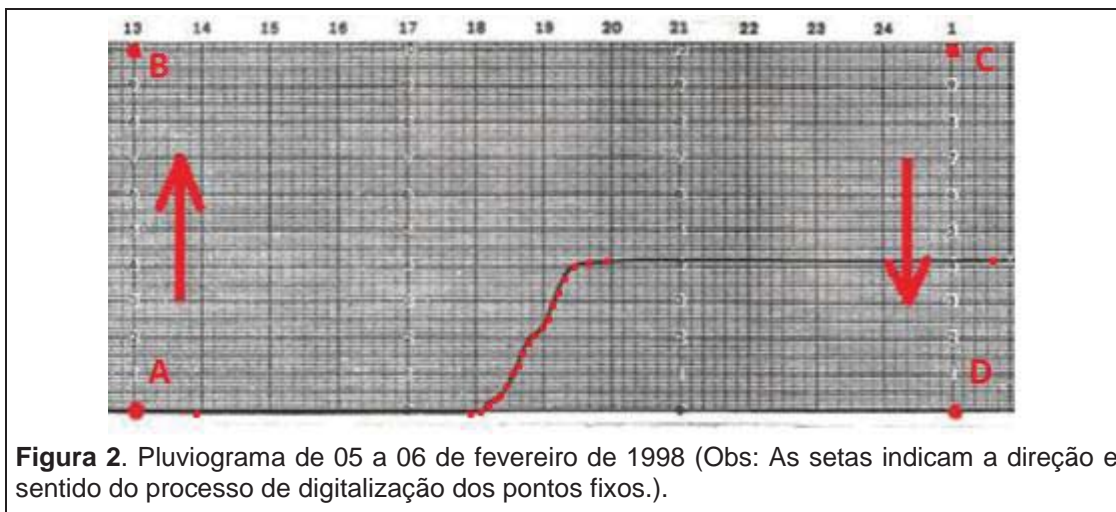
#### 4.2.2. Digitalização dos arquivos dos pluviogramas

Os arquivos de pluviogramas foram digitalizados no programa gráfico Surfer (O comando utilizado da barra de ferramenta foi MAP → BASE MAP, para abrir o arquivo digital, e para digitalizar a chuva selecionou-se a figura e utilizou-se o comando MAP → DIGITALIZE).

Inicialmente digitalizou-se pontos fixos de controle para obter uma melhor precisão, ou seja, para corrigir erros de inclinação da imagem. Os pontos fixos são correspondentes a altura de chuva 0 e 10 milímetros, em dois horários mais distantes dos eventos chuvosos, e sempre são digitalizados na mesma direção e sentido para que se mantenha uma uniformidade de valores. Posteriormente, digitalizou-se a curva de chuva. A figura 2 demonstra o processo de digitalização da imagem do pluviograma. Os pontos maiores (A, B, C e D) são os pontos fixos utilizados para correção da inclinação da imagem, os menores se referem à vetorização da curva.

<sup>3</sup> Paint Shop Pro é marca registrada da Jasc Software.

A digitalização das curvas de chuvas e pontos fixos dos pluviogramas gerou um arquivo de texto com uma seqüência de coordenadas retangulares do sistema da imagem (salvos no formato \*.txt).



**Figura 2.** Pluviograma de 05 a 06 de fevereiro de 1998 (Obs: As setas indicam a direção e sentido do processo de digitalização dos pontos fixos.).

#### 4.2.3. Pré-tratamento dos arquivos

Os valores obtidos da digitalização foram gerados em arquivos de extensão \*.txt, com separadores decimais do sistema americano (pontos para decimais e vírgula para milhares). Para utilizá-los no aplicativo Excel era necessário que as coordenadas x e y estivessem no sistema brasileiro (vírgula para decimais e pontos para separador de milhares).

Para mudar estes sistemas, criou-se um macro-comando no programa Word<sup>4</sup>, atribuída com o comando Alt + M. Ao final do procedimento, os novos arquivos gerados possuem a extensão txt. A estrutura do macro-comando feito para tal processo está listada no anexo I.

Após esse pré-tratamento, os arquivos de extensão .txt foram convertidos em arquivos de extensão xls. A tabela 1 mostra um exemplo de um arquivo digitalizado de um pluviograma, já no formato xls. Nota-se que antes de cada coordenada dos pontos fixos existe um outro valor de coordenada, que se refere à coordenada real do pluviogramas (altura em mm, e tempo em horas).

Na tabela 1, os pontos fixos são representados pela hora mais próxima do evento de chuva e pelos valores de altura de chuva já definidos anteriormente como 0, e 10 milímetros. Estes pontos serão denominados de coordenadas reais ( $X_{Rj}$ ,  $Y_{Rj}$ ), respectivamente, sendo que j varia de **A** a **D**. Logo abaixo de cada coordenada real há uma coordenada lida (x, y).

A digitalização de cada pluviograma foi realizada de maneira sistematizada, separando os valores dos pontos fixos e os da curva da chuva, para que posteriormente os cálculos sejam

<sup>4</sup> Word é marca registrada da Microsoft Corporation.

realizados mais facilmente, principalmente, deixando em um formato padronizado que facilitasse o estabelecimento de fórmulas no aplicativo Excel.

**Tabela 1:** Coordenadas do pluviograma de 01 a 02 de fevereiro de 1998

Coordenadas dos Pontos Fixos	13	0
	188,8545	19,49691
	13	10
	188,8545	320,8265
	19	10
	542,7155	320,8265
	19	0
	544,4838	19,49691
Coordenadas da curva de chuva	210,0744	19,49691
	231,2942	19,49691
	245,4408	19,49691
	266,6607	19,49691
	266,6607	24,22159
	266,6607	28,94627
	270,1973	33,67095
	273,734	38,39563

#### **4.2.4. Transformação dos dados digitalizados (coordenadas aleatórias) para valores compatíveis com os pluviogramas (coordenadas reais do pluviograma)**

Esta transformação dos dados digitalizados tem como objetivo realizar algumas correções necessárias nos pluviogramas, ou seja, é necessário efetuar algumas correções com o intuito de se ter um sistema retangular de coordenadas.

Foram efetuados dois tipos de correções: correção do traslado da origem e correção da inclinação dos eixos do pluviograma em relação aos eixos da imagem (rotação).

A transformação de coordenadas pressupõe que existem alguns pontos fixos (ou pontos de apoio) em que se conheça as coordenadas reais (do pluviograma) e as coordenadas

fictícias (do sistema da imagem vetorizadas). Esses pontos fixos, denominados **A**, **B**, **C**, **D**, com  $(X_{RA}; Y_{RA})$ ,  $(X_{RB}; Y_{RB})$ ,  $(X_{RC}; Y_{RC})$ ,  $(X_{RD}; Y_{RD})$ , respectivamente, estão mostrados na figura 3. É importante lembrar que cada um desses pontos possui, também, coordenadas  $(x_j, y_j)$  conhecidas (extraídas da imagem).

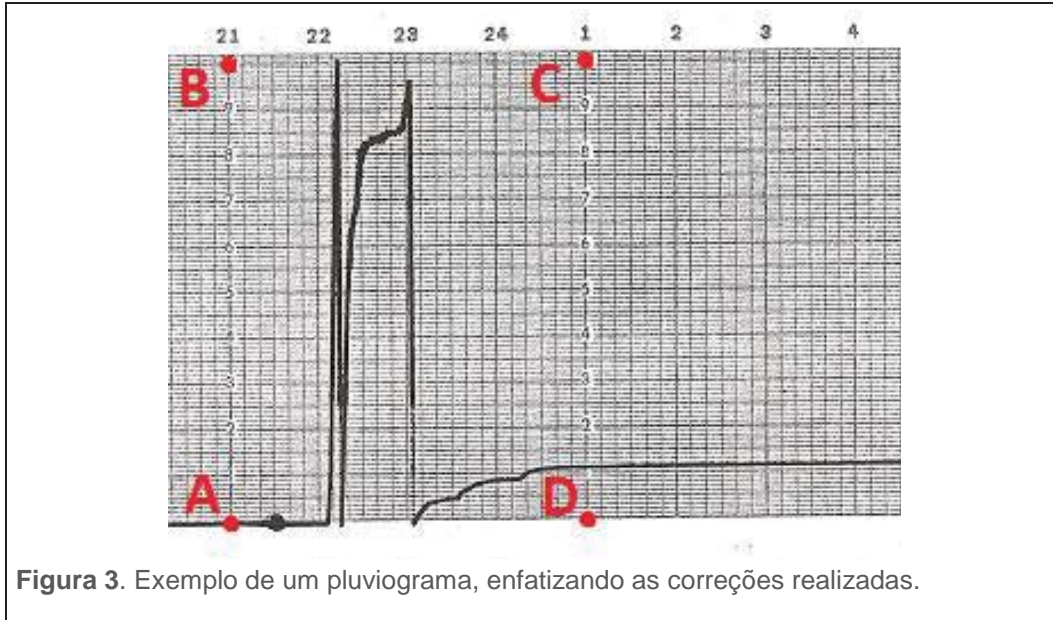


Figura 3. Exemplo de um pluviograma, enfatizando as correções realizadas.

Considerando: **X** = tempo (h); **Y** = altura da chuva (mm), cada ponto de apoio possui uma coordenada real  $(X_{Rj}; Y_{Rj})$  e uma coordenada fictícia ou lida equivalente  $(x_j, y_j)$ . Ou seja:

- Pontos fixos:
- A  $(X_{RA}; Y_{RA}) \leftrightarrow (x_A, y_A)$ ;
  - B  $(X_{RB}; Y_{RB}) \leftrightarrow (x_B, y_B)$ ;
  - C  $(X_{RH}; Y_{RH}) \leftrightarrow (x_H, y_H)$ ;
  - D  $(X_{RH}; Y_{RH}) \leftrightarrow (x_H, y_H)$ .

A partir desta equivalência matemática é possível utilizar o modelo de transformação.

#### 4.2.5. Modelo de Transformação

O principal objetivo desse modelo de transformação é utilizar as coordenadas dos pontos fixos para obter os valores dos coeficientes  $a_n$  e  $b_n$ , que permitirão, a partir das leituras das coordenadas fictícias, ou lidas,  $x_j$  e  $y_j$ , da curva de chuva, que se obtenha valores de coordenadas corrigidas e retificadas  $X_R$  e  $Y_R$ , da mesma.

O modelo de transformação parte do pressuposto que as coordenadas reais estão relacionadas com as coordenadas lidas  $(x_j, y_j)$  de acordo com as equações:

$$X_{Rj} = a_1 x_j + b_1 y_j + c_1 \dots \dots \dots (7)$$

$$Y_{Rj} = a_2 x_j + b_2 y_j + c_2 \dots \dots \dots (8)$$

Os quatro pontos fixos do pluviograma, são suficientes para resolver este sistema de seis incógnitas, porque haverá mais equações do que incógnitas.

Para resolver o sistema deve ser montado um sistema de vetores (matrizes) que represente, em apenas um conjunto, os quatro pares de coordenadas reais dos pontos de apoio, relacionados com os seus valores lidos dos pluviogramas. Assim sendo, montou-se um sistema de matrizes conforme segue:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \dots\dots\dots(9a)$$

Onde:  $\mathbf{V}$  é o vetor das coordenadas dos pontos fixos (ou reais);  
 $\mathbf{A}$  é o vetor das coordenadas fictícias (valores lidos);  
 $\mathbf{X}$  é o vetor dos coeficientes (a ser determinado).

O sistema representado na equação (9a) será mostrado a seguir na sua forma matricial:

$$\begin{pmatrix} X_{RA} \\ Y_{RA} \\ X_{RB} \\ Y_{RB} \\ : \\ : \\ X_{RH} \\ Y_{RH} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A & y_A & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_B & y_B & 1 \\ : & : & : & : & : & : \\ : & : & : & : & : & : \\ x_H & y_H & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_H & y_H & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(9b)$$

Como se deseja obter os valores dos coeficientes representados pela matriz  $\mathbf{X}$ , use-se o seguinte equacionamento:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} * (\mathbf{A}^T \mathbf{V}) \dots\dots\dots(9c)$$

**4.2.5.1. Exemplo do Modelo de Transformação**

Como exemplo, para melhor entendimento do processo, será utilizada a base de dados do pluviograma do dia 01 a 02 de março de 1998.

Utilizando a matriz 4b obtém-se a seguinte disposição dos valores das coordenadas:

$$V = A * X$$

14	245,98	18,62	1	0	0	0	$a_1$
0	0	0	0	245,98	18,562	1	$b_1$
14	245,98	321,27	1	0	0	0	$c_1$
10	0	0	0	188,85	320,83	1	$a_2$
18	484,86	321,27	1	0	0	0	$b_2$
10	0	0	0	484,86	321,27	1	$c_2$
18	484,12	20,45	1	0	0	0	
0	0	0	0	484,12	20,45	1	

Como se deseja determinar os coeficientes, utilizou-se o sistema 4c. Para isso, calculou-se, inicialmente, a matriz transposta e a inversa da multiplicação da matriz pela sua transposta:

$$X = (A^T A)^{-1} * A^T V$$

$a_1$	1,76E-05	-6,4E-08	-0,00641	0	0	0	24329,0
$b_1$	-6,4E-09	1,1E-05	-0,00185	0	0	0	10909,4
$c_1$	-0,00641	-0,00185	2,906029	0	0	0	64,0
$a_2$	0	0	0	1,8E-05	-6,4E-08	-0,0064	7308,4
$b_2$	0	0	0	-6,4E-08	1,1E-05	-0,0018	6425,4
$c_2$	0	0	0	-0,00641	-0,00185	2,906034	20,0

Com os resultados dos coeficientes é possível determinar as coordenadas reais dos pontos da curva da chuva, através das equações finais de transformação das coordenadas. Para o exemplo usado a equação obtida está na tabela 2 abaixo:

**Tabela 2:** Equações finais de transformação das coordenadas do pluviograma 01 a 02 de março de 1998.

$$X_R = 0,016770999 x + 2E-05 y + 9,87814$$

$$Y_R = 0,000127241 x + 0,033142y + -0,60091$$

A partir das coordenadas reais ( $X_R$ ,  $Y_R$ ) é elaborado um gráfico representando a curva da chuva corrigida do pluviograma.

Todo este equacionamento foi implementado em uma planilha eletrônica do Excel. A primeira folha da planilha é usada para introdução dos dados gerados a partir da digitalização das curvas dos pluviogramas, conforme mostra a figura 4.

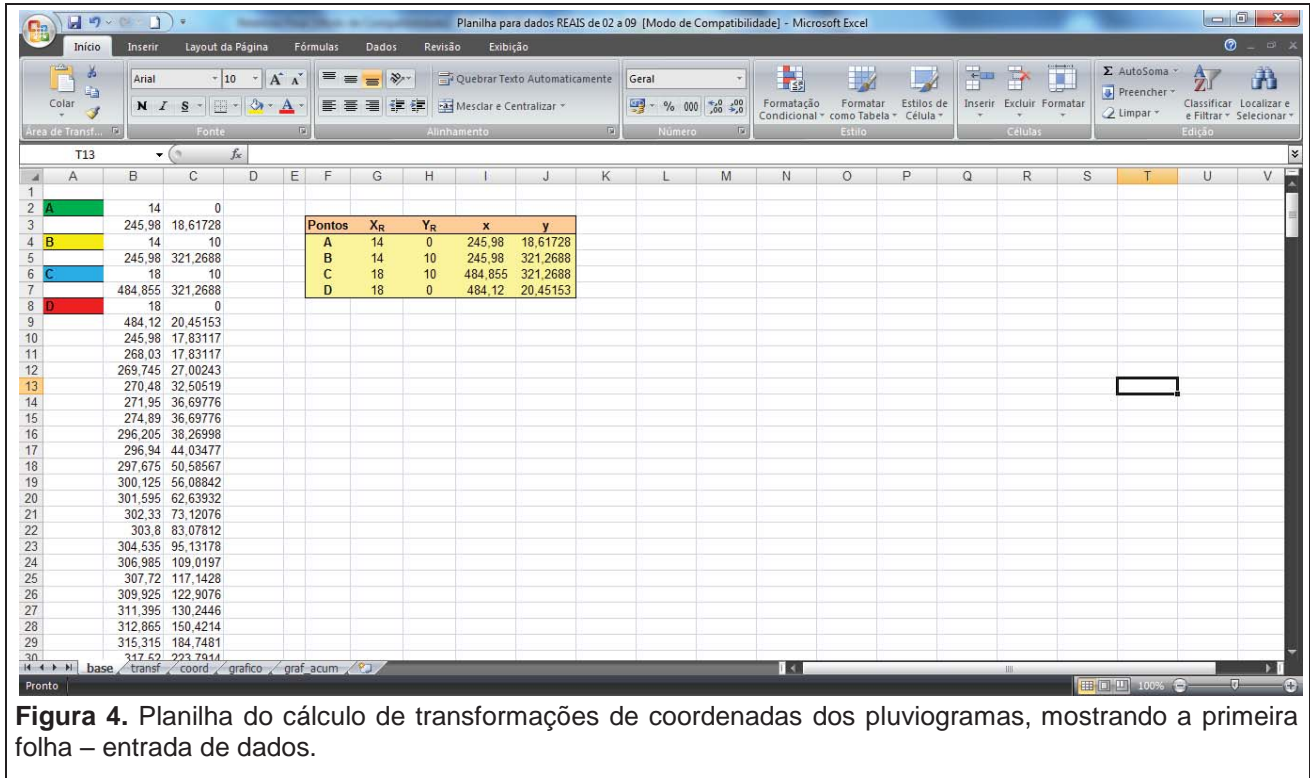


Figura 4. Planilha do cálculo de transformações de coordenadas dos pluviogramas, mostrando a primeira folha – entrada de dados.

Nesta mesma planilha foi montada uma tabela com os pontos fixos e suas coordenadas reais ( $X_R$ ,  $Y_R$ ) e suas coordenadas lidas ( $x$ ,  $y$ ), esta forma dispõe os valores mais facilmente para usar nos cálculos seguintes.

A segunda folha da planilha é utilizada para a implementação dos cálculos intermediários, ou seja, é utilizada para a implementação dos cálculos matriciais acima mencionados, que levam à determinação da matriz dos coeficientes das equações. Logo, gera como resultado as equações finais de transformação das coordenadas. A figura 5 mostra uma parte desta planilha.

As coordenadas da curva de chuvas corrigidas ( $X_R$ ,  $Y_R$ ) pelas equações finais de transformação das coordenadas são dispostas em uma terceira folha da planilha, mostrada na figura 6.

Na quarta folha da planilha (figura 7) expressa o resultado final da transformação das coordenadas da curva da chuva, ou seja, o gráfico corrigido dos erros de inclinação da imagem e, também serve como elemento de comparação entre os pluviogramas gerados digitalmente com aqueles de onde se originaram. Este tipo de procedimento permite uma rápida análise de eventuais erros grosseiros de digitalização ou erros do sistema estabelecido.

Curva I-D-F para Presidente Prudente – SP (1973 – 2009).

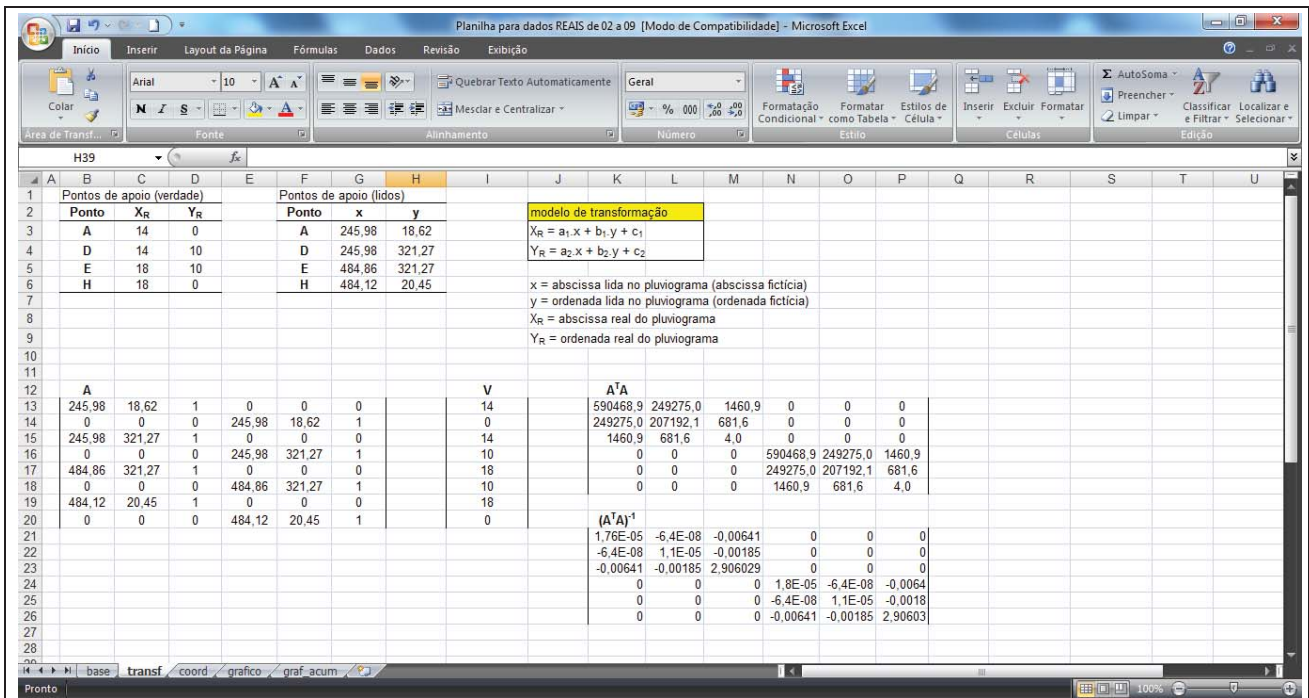


Figura 5. Planilha do cálculo de transformações de coordenadas, mostrando a segunda folha – cálculo dos coeficientes do modelo de transformação.

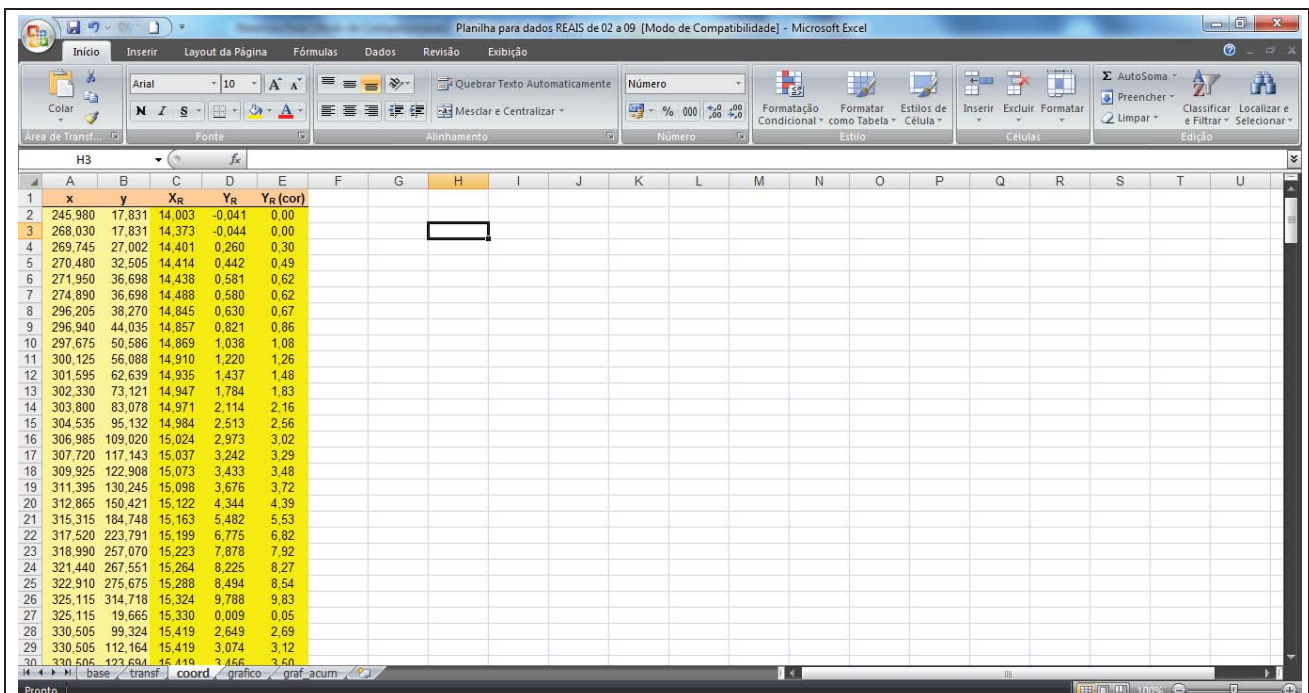


Figura 6. Planilha da tabela dos valores corrigidos das coordenadas da curva de chuva, mostrando a terceira folha.

Apenas, para fins de confirmação, todos os pluviogramas digitalizados foram corretamente representados pelos seus equivalentes originais.

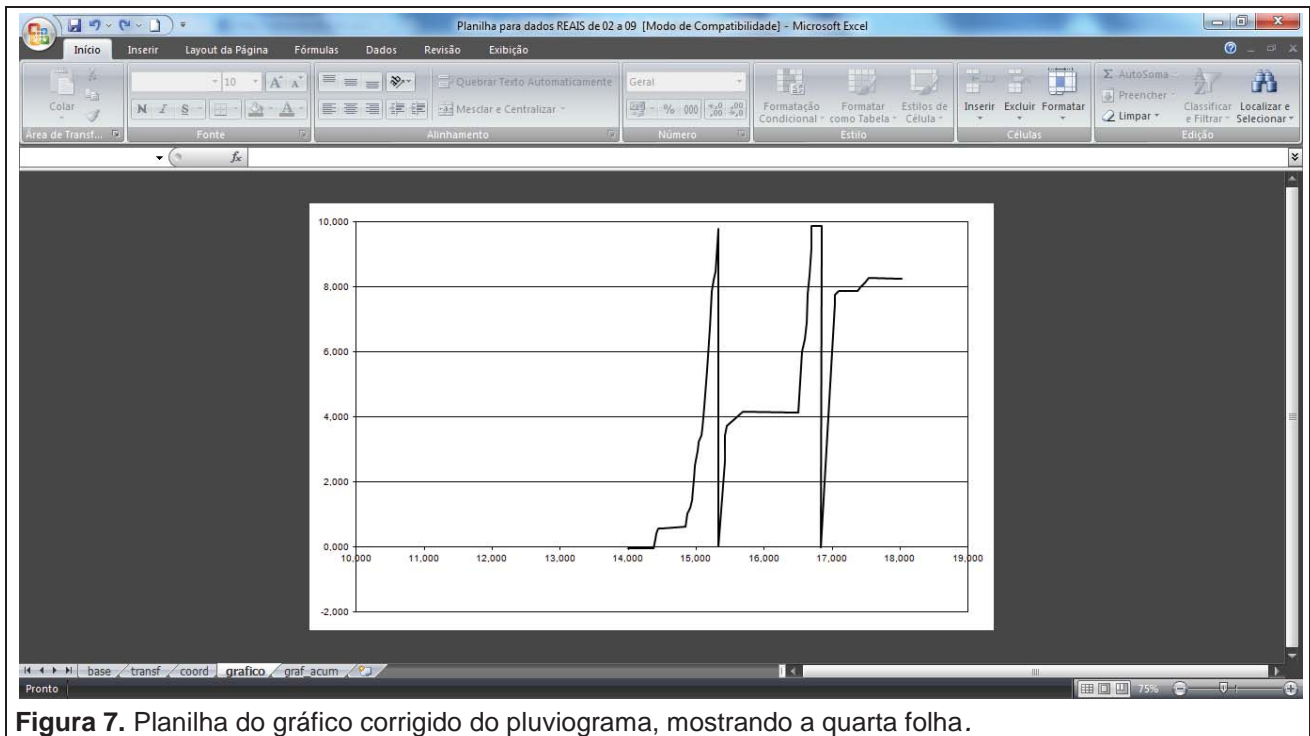


Figura 7. Planilha do gráfico corrigido do pluviograma, mostrando a quarta folha.

Desta maneira, as coordenadas de todas as precipitações e seus respectivos gráficos gerados foram salvos de maneira sistematizada, separados por mês e ano.

#### 4.2.6 Extração dos valores de intensidade

Uma vez que todas as curvas de precipitação foram digitalizadas e tiveram seus dados transformados em coordenadas reais, iniciou-se o processo de extração dos valores de intensidade de chuva.

Conforme proposto no projeto inicial foram extraídas todas as intensidades das chuvas de duração de 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60 e 120 minutos; e para realizar essa extração utilizou-se outra planilha eletrônica do Excel<sup>5</sup>.

#### 4.2.7 Sistema de obtenção da coordenada $Y_R$ acumulada

Para extrair os valores de intensidade da chuva, inicialmente é necessário modificar o gráfico dos pluviogramas, pois quando a chuva ultrapassa 10 mm o gráfico decresce abruptamente porque o aparelho tem como limite tal quantidade de água (sifonamento do pluviógrafo). Logo, para se obter a intensidade da chuva em 30 minutos é mais conveniente uma curva de chuva acumulada.

<sup>5</sup> Excel é marca registrada da Microsoft Corporation

Para gerar esta curva de chuva acumulada, foi inserida na nova planilha do Excel a base de cálculo para essa transformação em coordenadas  $Y_R$  acumulada. O procedimento da rotina de cálculo consistiu em: **a)** selecionar-se o menor valor da coordenada  $Y_R$ , para que se obtenha uma nova coordenada  $Y_R$  que será usada para minimizar os erros; **b)** na coluna F analisar se a coordenada  $Y_R$  corrigida subtraída da coordenada anterior era menor que  $-9$ , caso afirmativo repete a coordenada anterior, caso negativo zera a célula; EX: se E3-E2 tiver como resultado um número negativo significa que E3 é menor que E2, ou seja, ocorreu uma sifonada; **c)** na coluna G foi feita uma acumulação, na célula C2 tem um valor inicial nulo, na célula seguinte somou a célula anterior G2 com a F3, desta forma sempre somando a anterior é possível fazer a acumulação de valores crescentes e **d)** na coluna H ou seja à coluna da coordenada  $Y_R$  acumulada somou-se a coluna de acumulação com a de correção. A células selecionadas na figura 8 mostram a estrutura do cálculo:

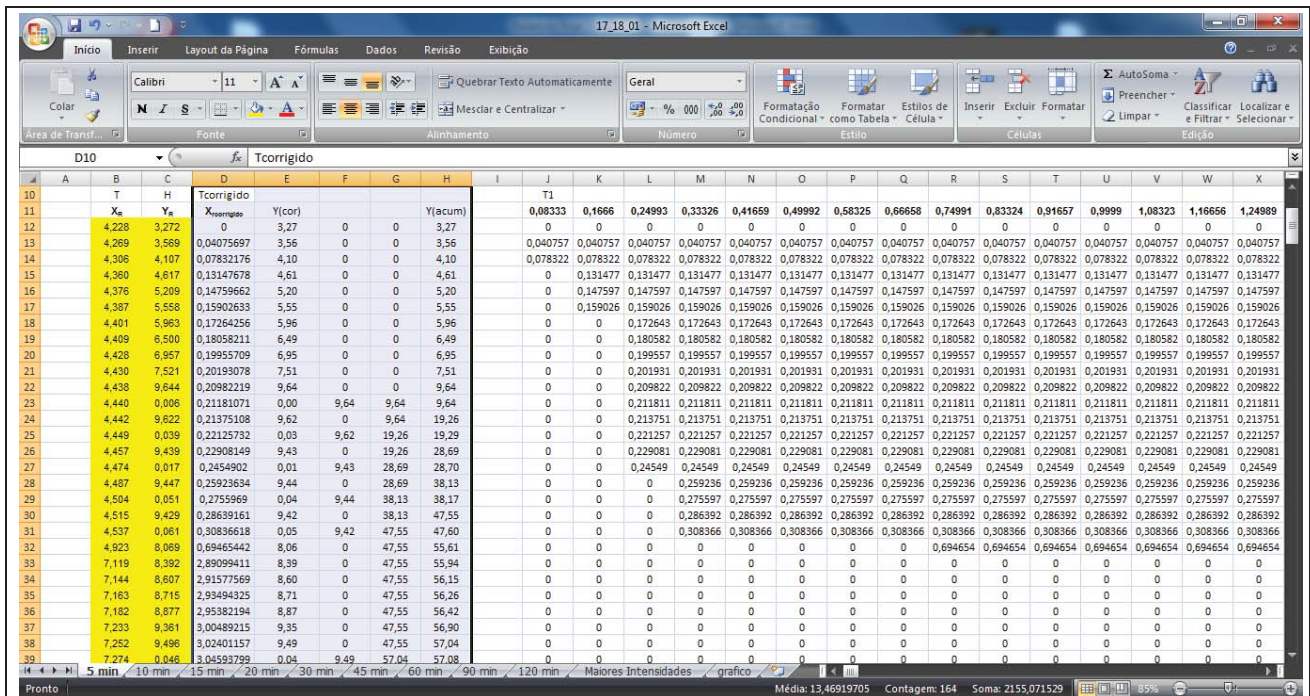


Figura 8. Planilha para obtenção da coordenada  $Y_R$  acumulada.

A partir das coordenadas reais acumuladas, podemos gerar o gráfico real dessa chuva (presente na última aba da planilha), conforme a figura 9.

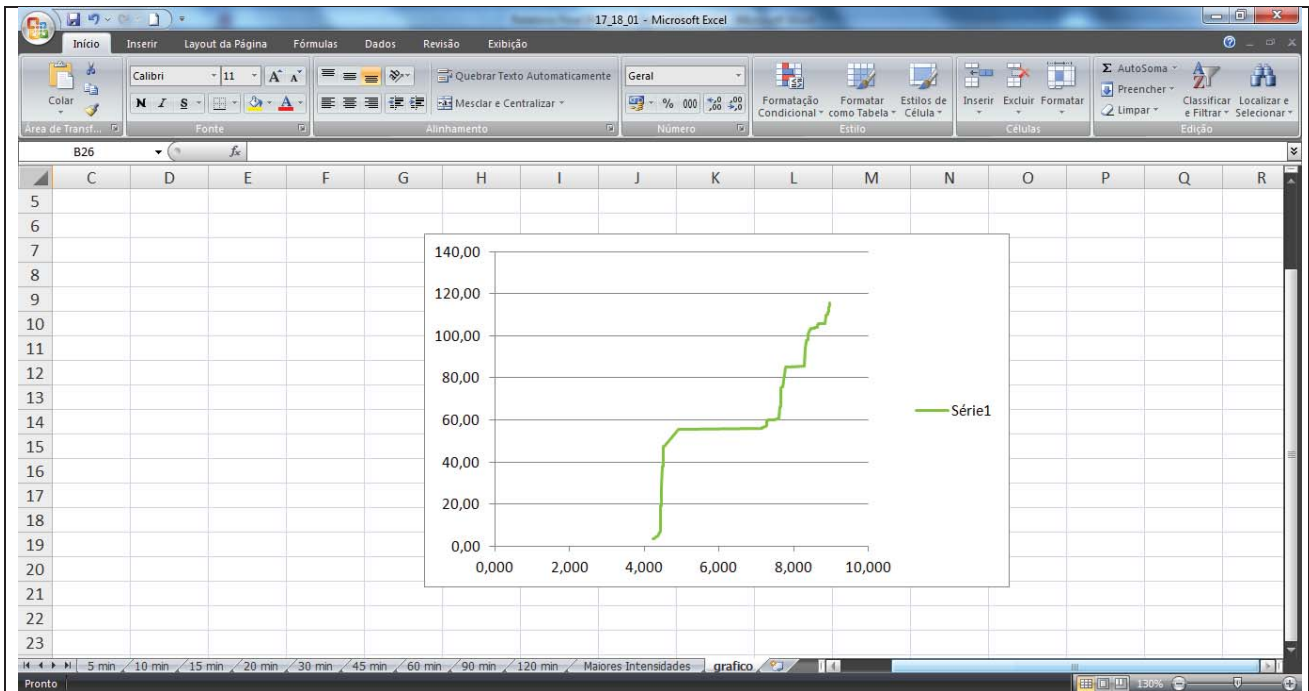


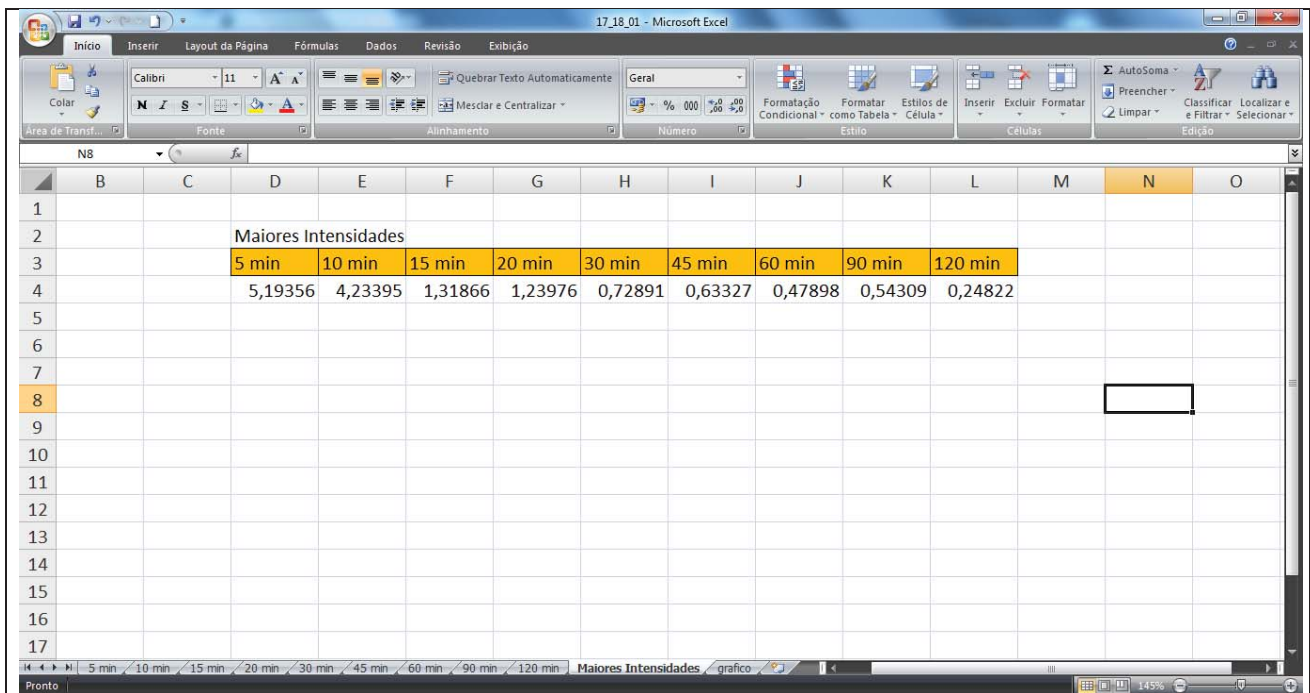
Figura 9. Gráfico da chuva acumulada.

#### 4.2.8 Planilha de extração

A planilha de extração dos valores de intensidade possui uma aba para cada uma das durações escolhidas, que são 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60 e 120 minutos. O princípio para realização do cálculo, é a divisão da curva da precipitação em intervalos correspondentes a cada uma das abas (5, 10, 15, 20, 30, 45, 60 ou 120 minutos). Em seguida, é calculada a intensidade correspondente a cada um desses intervalos, levando em conta a altura da chuva correspondente.

E por fim, aplica-se o comando “Máximo” no conjunto das intensidades encontradas para dessa maneira encontrar a maior intensidade de precipitação para cada uma das durações.

Na ultima aba dessa planilha, são apresentadas todas as maiores intensidades (mm/min), como mostrado na Figura 10.



**Figura 10.** Majores intensidades registradas na Chuva.

Desta maneira, realizou-se o processo de extração das intensidades em todas as precipitações vetorizadas. Foram salvas todas as planilhas que possuíam uma alta intensidade em pelo menos um dos valores de duração.

Assim foram salvas em média 15 chuvas por ano, que, por sua vez, são as mais intensas.

#### 4.2.9 Seleção dos Majores Valores Anuais

Em seguida criou-se uma nova planilha para cada ano da série de dados, contendo os valores de intensidade das chuvas mais intensas registradas. Assim, por meio do comando “Máximo” pode-se calcular as maiores intensidades referentes a cada duração. A figura 11 corresponde a planilha do ano de 2009.

Curva I-D-F para Presidente Prudente – SP (1973 – 2009).

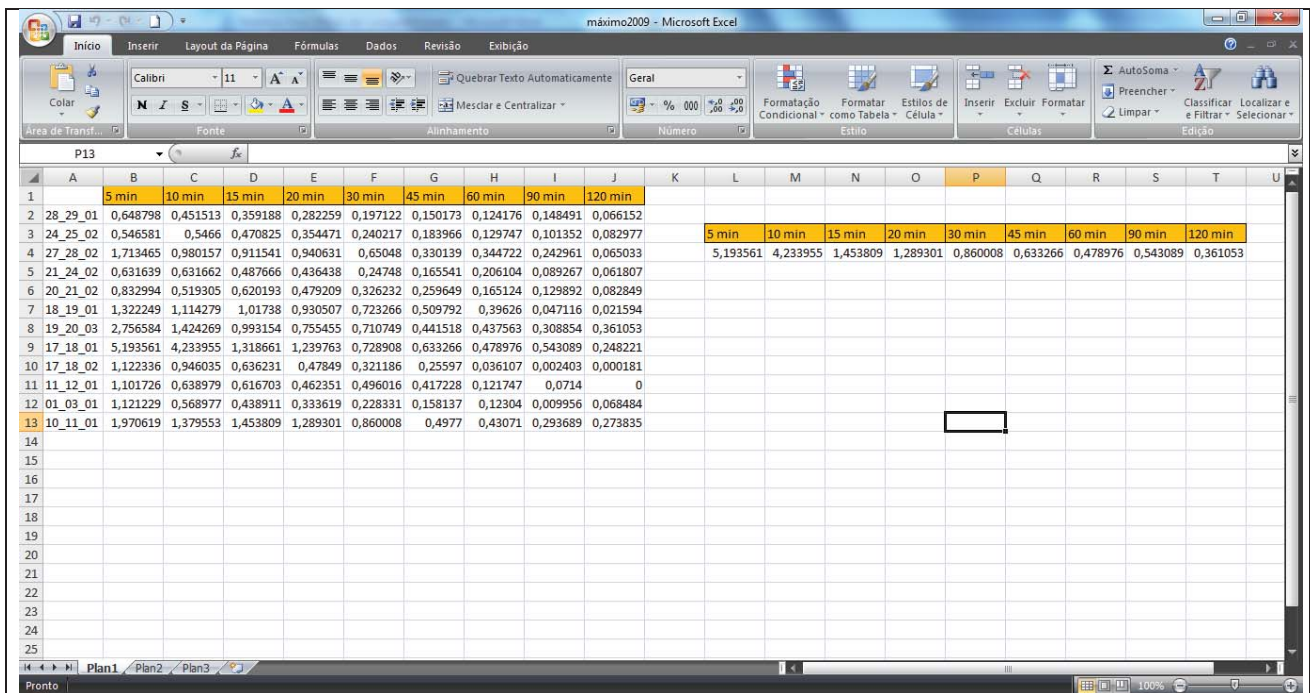


Figura 11. Maiores intensidades registradas em 2009.

Desta maneira, foi possível encontrar as maiores intensidades de cada duração para cada ano da série de dados. Esses dados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Maiores intensidades registradas para cada duração, por ano (mm/min).

	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
<b>1972</b>	1,10	1,16	1,17	1,10	0,90	0,67	0,60	0,42	0,34
<b>1973</b>	1,70	1,20	1,18	1,11	0,91	0,68	0,62	0,44	0,36
<b>1974</b>	1,32	1,27	1,21	1,12	0,97	0,72	0,74	0,46	0,39
<b>1975</b>	1,54	1,38	1,24	1,16	0,98	0,84	0,77	0,53	0,40
<b>1976</b>	1,64	1,47	1,26	1,25	1,01	0,85	0,80	0,55	0,42
<b>1977</b>	2,00	1,51	1,32	1,42	1,19	0,88	0,81	0,60	0,47
<b>1978</b>	2,12	1,65	1,37	1,50	1,21	0,89	0,83	0,62	0,52
<b>1979</b>	2,70	2,02	1,41	1,72	1,29	0,95	0,85	0,63	0,55
<b>1980</b>	1,72	1,50	1,53	1,17	0,78	0,50	0,39	0,26	0,25
<b>1981</b>	2,00	1,92	1,40	1,03	0,96	0,89	0,73	0,49	0,37
<b>1982</b>	1,81	1,48	1,29	1,34	0,94	0,71	0,47	0,51	0,29
<b>1983</b>	1,90	1,21	0,98	0,96	0,65	0,51	0,43	0,36	0,36
<b>1984</b>	2,50	1,87	1,59	1,14	0,89	0,73	0,54	0,47	0,38
<b>1985</b>	1,27	1,27	0,93	1,02	0,93	0,69	0,54	0,39	0,31
<b>1986</b>	2,19	2,14	1,36	1,36	1,36	0,81	0,95	0,71	0,54
<b>1987</b>	2,14	1,74	1,74	1,74	1,33	0,88	0,66	0,51	0,45
<b>1988</b>	3,66	1,90	1,40	1,40	1,40	1,40	1,23	1,29	1,08
<b>1989</b>	2,07	1,99	1,67	1,50	1,01	0,77	0,62	0,51	0,39
<b>1990</b>	1,60	1,60	1,60	1,60	1,17	0,80	0,61	0,42	0,29
<b>1991</b>	1,60	1,17	1,08	1,03	1,05	0,71	0,73	0,37	0,38
<b>1998</b>	3,20	2,52	2,44	2,17	1,47	1,35	0,74	0,59	0,33
<b>1999</b>	3,66	2,12	1,31	1,32	1,17	0,69	0,66	0,35	0,41
<b>2000</b>	2,95	2,14	2,20	1,07	0,80	0,56	0,44	0,36	0,38
<b>2001</b>	1,85	1,40	1,30	1,25	0,98	0,48	0,38	0,32	0,11
<b>2002</b>	1,97	1,42	1,19	0,95	0,77	0,75	0,68	0,47	0,36
<b>2003</b>	2,95	1,93	1,57	1,28	1,35	1,01	0,74	0,54	0,38
<b>2004</b>	4,98	2,49	1,66	1,39	0,83	0,73	0,58	0,39	0,32
<b>2005</b>	3,61	2,00	1,43	1,05	0,80	0,55	0,38	0,28	0,32
<b>2006</b>	4,07	2,54	1,82	1,54	0,96	0,73	0,66	0,24	0,26
<b>2007</b>	3,76	2,24	1,64	1,76	0,85	0,71	0,55	0,43	0,32
<b>2008</b>	4,13	2,27	2,20	1,16	1,10	0,75	0,58	0,51	0,24
<b>2009</b>	5,19	4,23	1,45	1,29	0,86	0,63	0,48	0,54	0,36

#### 4.2.10 Criação da curva I-D-F

Tendo os valores máximos de intensidades anuais, foi possível iniciar o processo de elaboração da curva I-D-F.

Os valores apresentados na Tabela 2 foram inseridos em uma nova planilha que calculou os valores de Média e Desvio Padrão para o conjunto de intensidade de cada duração de chuva.

Assim, foi possível aplicar a distribuição de Gumbel, que calcula os valores máximos de intensidade esperado para determinado período de retorno, conforme a equação:

$$P = P' + K\sigma \dots\dots\dots(10)$$

Onde:

P: Valor máximo de intensidade esperado no período de retorno T;

P': Média aritmética dos valores da série em estudo;

K: Fator de frequência, função do período de retorno desejado;

$\sigma$ : Desvio Padrão da amostra.

Desta maneira, encontrou-se os valores de intensidade máxima presentes na Tabela 2.

**Tabela 3.** Distribuição de Gumbel.

Duração		5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
<b>Média</b>		<b>2,53</b>	<b>1,84</b>	<b>1,47</b>	<b>1,31</b>	<b>1,03</b>	<b>0,78</b>	<b>0,65</b>	<b>0,49</b>	<b>0,38</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>1,09</b>	<b>0,60</b>	<b>0,34</b>	<b>0,28</b>	<b>0,21</b>	<b>0,20</b>	<b>0,18</b>	<b>0,18</b>	<b>0,16</b>
T	k	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
<b>5</b>	0,719	3,31	2,27	1,71	1,51	1,18	0,92	0,78	0,62	0,50
<b>10</b>	1,305	3,95	2,63	1,91	1,67	1,30	1,04	0,89	0,73	0,59
<b>20</b>	1,866	4,56	2,97	2,10	1,83	1,42	1,15	0,99	0,83	0,67
<b>30</b>	2,189	4,92	3,16	2,21	1,92	1,48	1,22	1,05	0,89	0,72
<b>50</b>	2,592	5,36	3,40	2,35	2,03	1,57	1,30	1,12	0,96	0,79
<b>100</b>	3,137	5,95	3,73	2,54	2,18	1,68	1,41	1,22	1,06	0,87
<b>1000</b>	4,936	7,91	4,82	3,15	2,68	2,06	1,77	1,54	1,39	1,15

Com esses valores de intensidade máxima prevista (I), e duração das chuvas (t) é possível montar a equação I-D-F referente a cada um dos períodos de retorno. Essa equação tem a forma:

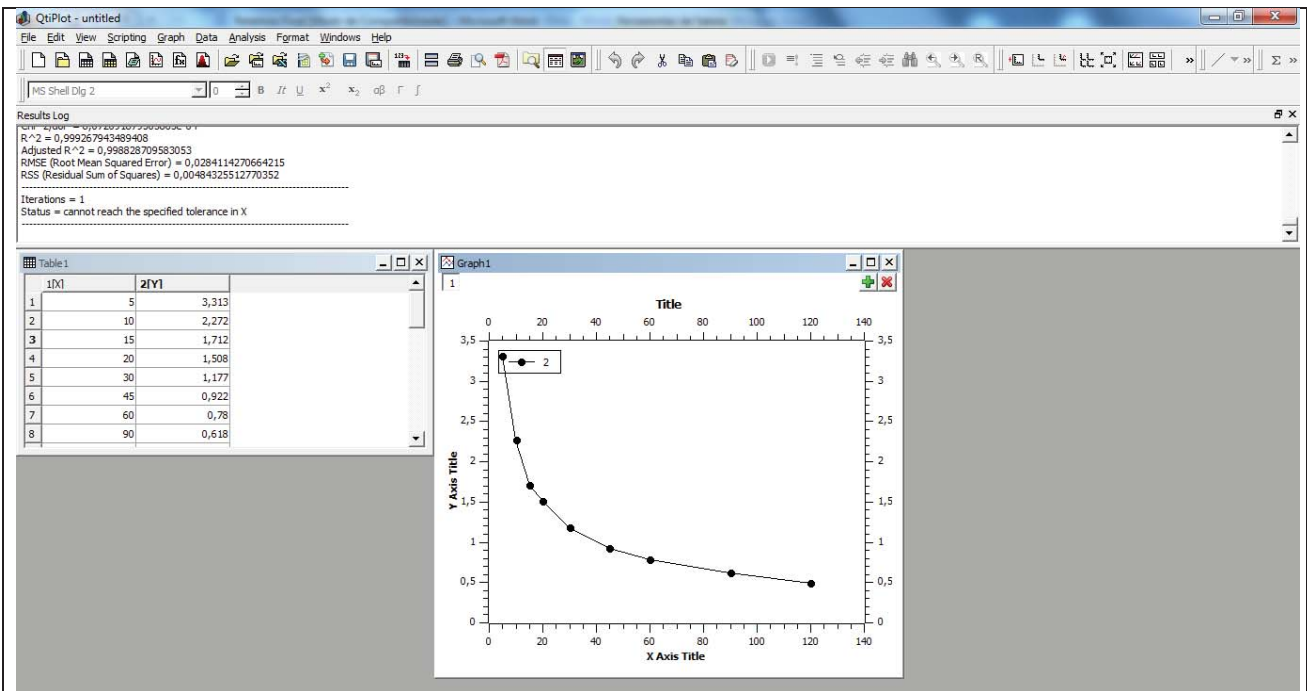
$$I = \frac{a}{(t+b)^n} \dots\dots\dots(11)$$

Porém, para completar essa equação foi necessário encontrar os valores de **a**, **b** e **n**.

**4.2.10.1 Metodologia para definir os valores de a, b e n**

Para completar a equação 11 foi necessário encontrar os valores dos parâmetros **a**, **b** e **n**. Para isso, utilizou-se o programa *Qtiplot*, que faz o ajuste de expressões matemáticas.

A metodologia aplicada consistiu primeiramente em colar as colunas de duração (t) e I (intensidade máxima esperada) de cada período de retorno na tabela inicial do programa, gerando assim o seu respectivo gráfico (Figura 12).



**Figura 12.** Gráfico gerado pelos valores de d (duração) pela I (intensidade máxima esperada) referente ao Período de retorno de 5 anos.

Em seguida, é utilizado o comando Analysis -> Fit Wizard para que seja informada a equação que se deseja ajustar (no caso, a expressão foi “ $a/(x+b)^n$ ”) (Figura 13).

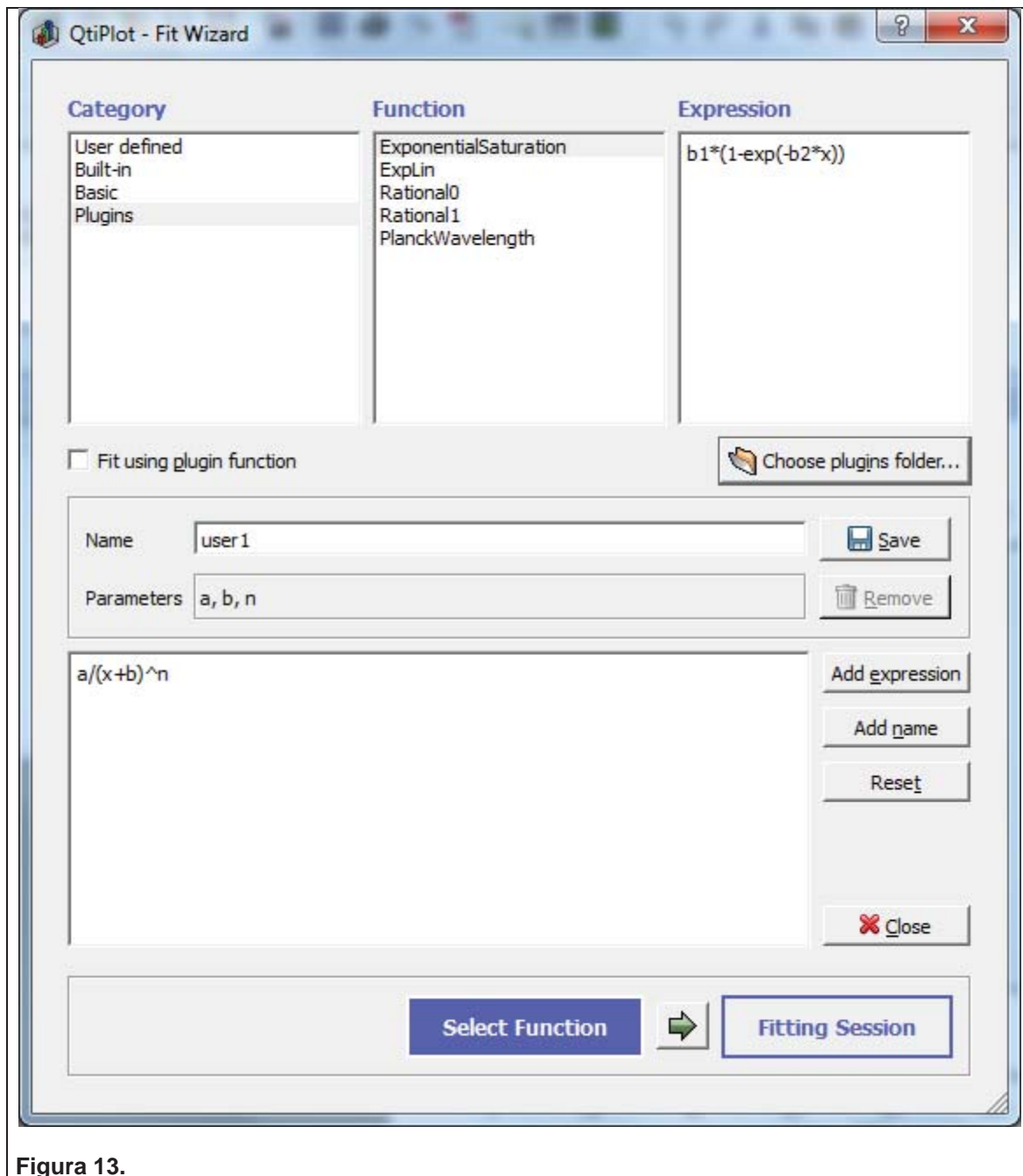


Figura 13.

Posteriormente, na aba seguinte do processo foram “chutados” os valores iniciais de **a**, **b** e **n** (9; 0,5 e 0,5 respectivamente) para que fosse ajustado apertando o botão “Fit” até que os valores finais fossem encontrados.

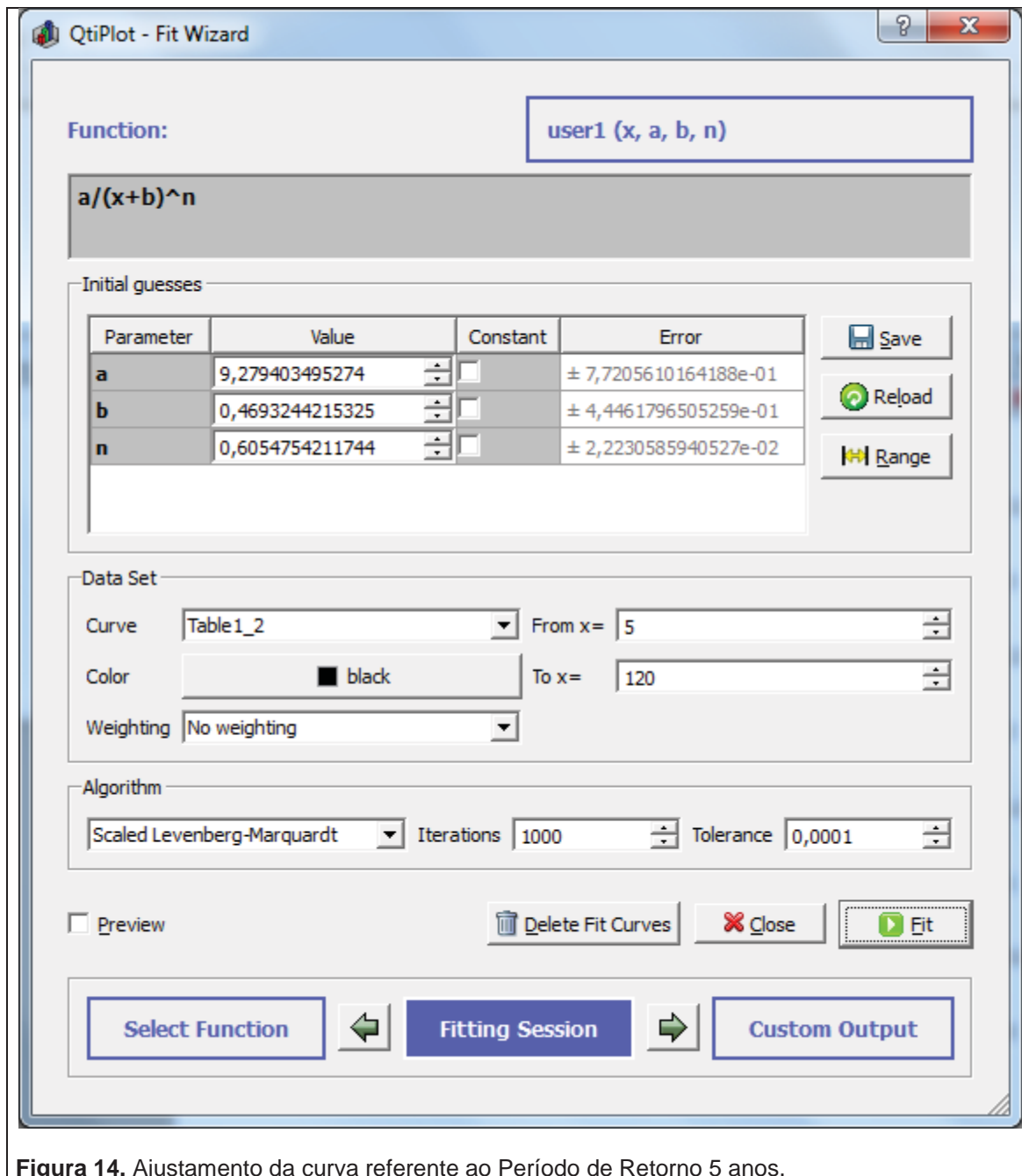


Figura 14. Ajustamento da curva referente ao Período de Retorno 5 anos.

Dessa maneira, encontrou-se os valores dos parâmetros **a**, **b** e **n** referentes a cada um dos períodos de retorno. Esses valores estão presentes na tabela 3.

**Tabela 4.** Valores encontrados de a, b, n

<b>T</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>1000</b>
<b>a</b>	9,2794	9,2595	9,6423	9,9365	10,3695	11,0108	13,32933
<b>b</b>	0,4693	-0,6434	-1,2409	-1,4825	-1,7103	-1,9404	-2,386606
<b>n</b>	0,6055	0,5770	0,5624	0,5566	0,5515	0,5467	0,538189

**4.2.10.2 Metodologia para encontrar k e m**

Sabemos que a equação geral de curvas IDF tem a forma:

$$I = \frac{a}{(t+b)^{-n}} \dots\dots\dots(12)$$

E que:

$$a = kT^m \dots\dots\dots(13)$$

Desta maneira, tendo os valores de **a** e **T** podemos realizar o ajustamento dos parâmetros **k** e **m** da equação 13.

Para isso, também foi utilizado o programa Qtiplot seguindo metodologia semelhante à acima escrita. Foi encontrado os seguintes valores:

<b>k =</b>	7,827635
<b>m =</b>	0,075305

**4.2.10.3 Definição dos valores de b e n**

Após os cálculos, foi possível obter todos parâmetros necessários para elaboração da equação IDF. Esses parâmetros estão apresentados na tabela 5:

**Tabela 5.**

<b>T</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>1000</b>
<b>a</b>	9,2794	9,2595	9,6423	9,9365	10,3695	11,0108	13,329333
<b>b</b>	0,4693	-0,6434	-1,2409	-1,4825	-1,7103	-1,9404	-2,3866055
<b>n</b>	0,6055	0,5770	0,5624	0,5566	0,5515	0,5467	0,53818933
<b>k</b>	7,8276	7,8276	7,8276	7,8276	7,8276	7,8276	7,8276
<b>m</b>	0,0753	0,0753	0,0753	0,0753	0,0753	0,0753	0,0753

Faltando só definir os valores finais de **b** e **n** (que são variáveis para cada T), foi calculado os erros entre os valores de intensidade máxima encontrados pela metodologia de Gumbel (tabela 3), e os valores encontrados pelas equações IDF. Foram utilizado quatro equações IDF diferentes para calculo desse erro, sendo cada uma calculadas com:

1. Valor de B (0,4693) e n (0,6054) correspondente ao período de retorno 5;
2. Valor de B correspondente ao período de retorno 5 (0,4693) e o valor médio de todos n (0,5625);
3. Valor médio de todos B (-1,2763), e n correspondente ao período de retorno 5 (0,6054);
4. Valor médio de B (-1,2763) e n (0,5625).

O menor erro encontrado foi o da situação 4. Portando para a equação final utilizou-se os valores médios de B (-1,2763) e n (0,5625).

#### 4.2.10.4 IDF Final

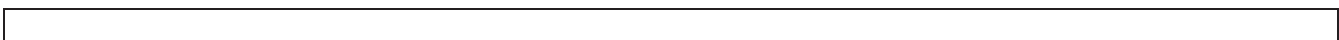
Dessa maneira, possuindo os valores de todos os parâmetros foi possível definir a equação IDF para Presidente Prudente, que é:

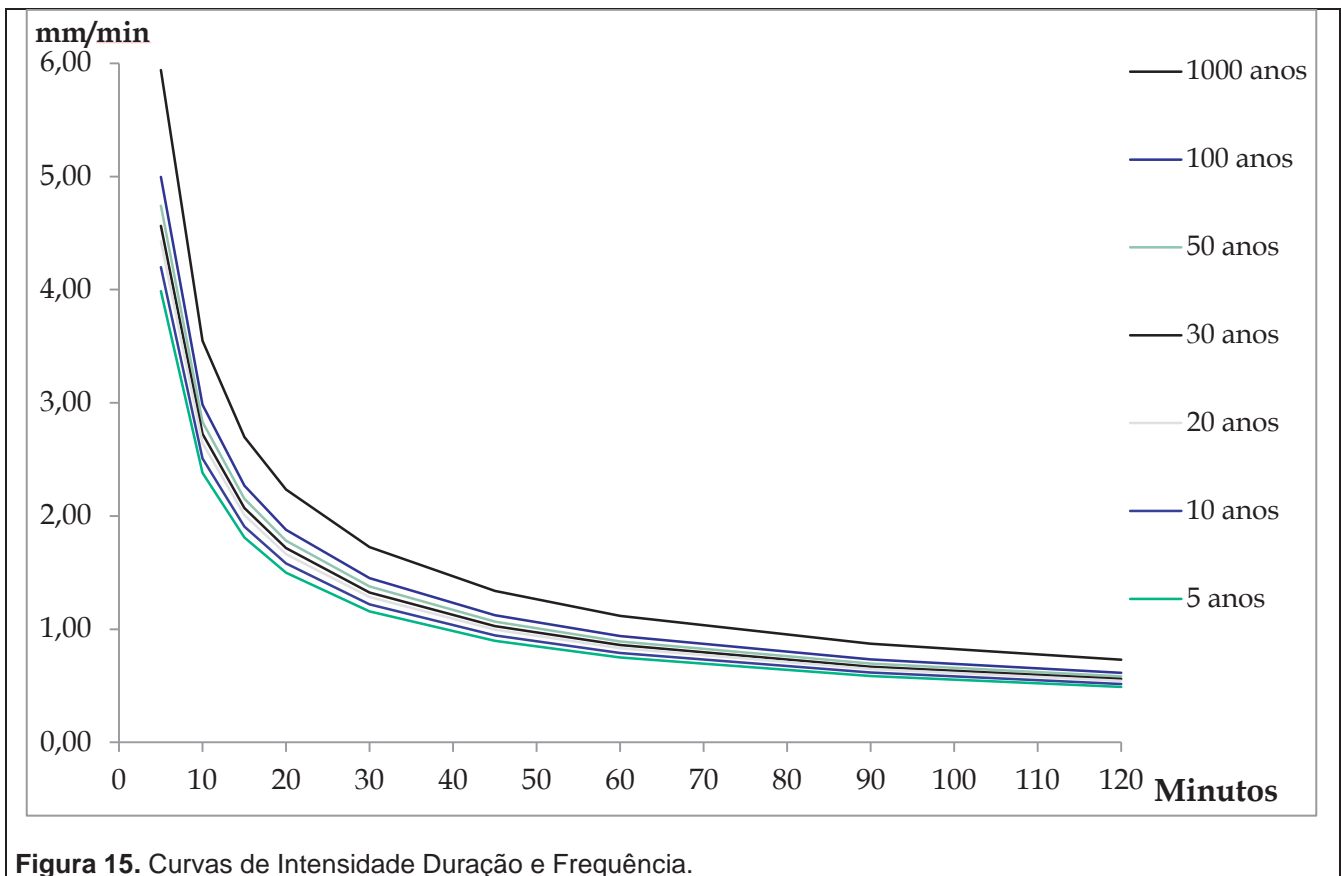
$$I = \frac{7,8276T^{0,0753}}{(t-1,2764)^{0,5625}} \dots\dots\dots(14)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

A partir da equação final, foi possível gerar seu respectivo gráfico que são as Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (Figura 15).





Esse estudo complementa a equação feita por Sudo ET. AL, (equação 15) que utilizou a série de dados de 1972 a 1979.

$$I = \frac{13,9059T^{0,1680}}{(t+15)^{0,7247}} \dots\dots\dots(15)$$

Comparando os dois resultados pode-se notar que pelo aumento da série de dados utilizada houve alteração significativa nos parâmetros da equação, principalmente no valor de **b** que passou de 15 para - 1,2764.

Para comparação, segue algumas equações I-D-F feitas para alguns municípios brasileiros:

Curitiba (Souza, 1959):

$$i = \frac{5950T^{0,217}}{(t+26)^{1,15}} \dots\dots\dots(16)$$

Londrina (Fendrich, 1987):

$$i = \frac{3132,56T^{0,0093}}{(t+30)^{0,939}} \dots\dots\dots(17)$$

Palmas (Fendrich, 1998):

$$i = \frac{1303,47T^{0,126}}{(t+12)^{0,815}} \dots\dots\dots(18)$$

Campinas (In Zuffo, 2004):

$$i = \frac{2524,86T^{0,1359}}{(t+20)^{0,948T^{-0,007}}} \dots\dots\dots(19)$$

### 5.1 Comparações entre as intensidades máximas calculadas, para as equações de Presidente Prudente

Por fim, utilizou-se as duas equações de Presidente Prudente para calcular os valores máximos de intensidades para todas as durações de chuva utilizando o Período de retorno de 20 anos. Os resultados são apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Valores de intensidades encontrados nas diferentes equações de Presidente Prudente (1981 e 2012) utilizando o Período de Retorno 20

t	1981	2012
5	2,623709	4,681979
10	2,231953	2,90038
15	1,955701	2,247866
20	1,748985	1,887457
30	1,45777	1,483668
45	1,183439	1,171368
60	1,006735	0,992291
90	0,78889	0,786727
120	0,657536	0,667835

Comparando os valores, podemos ver que as alterações mais significativas ocorreram nas chuvas de menor duração. Em todas as outras durações houve aumento muito pequeno nos valores de intensidade, devidos ao aumento da série de dados utilizados para o estudo.

## 6. CONCLUSÃO

A equação e as curvas obtidas permitem calcular o valor da intensidade máxima (mm/min) de uma chuva em função da sua duração e período de retorno.

Assim, os valores de intensidade encontrados na equação podem auxiliar em dimensionamentos de sistemas de drenagem permitindo a segurança em uma rodovia, ferrovia, aeroporto; dimensionamentos de sistemas de drenagem urbana que auxilia no controle de inundações; dimensionamento de extravasores de barragens, garantindo assim a segurança da população local e de outras estruturas civis; obras civis de grande porte; prevenção de desastres naturais causados por chuvas intensas; dentre outras aplicações.

## 7. BIBLIOGRAFIA

---

CARVALHO, P. C. Estimativa da Erosividade da chuva em Presidente Prudente – SP (2004).

CHOW, V.T. Frequency of hydrologic data with special application to rainfall intensities. University of Illinois Bulletin, p. 50-81, 1953.

DAEE (1999) EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, São Paulo. p.5-9

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.

FENDRICH, R. Chuvas Intensas para Obras de Drenagem no Estado do Paraná. 2ª Edição. Gráfica Vicentina Editora Ltda. Curitiba/PR, 2003, 101 p.

GENOVEZ, A. M.; R. C. F. PEGORARO (1998)- Análise e avaliação de equações e chuvas Intensas generalizadas. XVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Oaxaca, México, V. 1, p. 369-79, nov..

PFAFSTETTER, Otto. Chuvas Intensas no Brasil: Relação entre Precipitação, Duração e Freqüência de Chuvas Registradas com Pluviógrafos em 98 Postos Meteorológicos. 2. ed. Rio de Janeiro:Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1982. 426p.

RIGHETTO A.M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. EESC/USP São Carlos, 840p.

SUDO, Hideo; RAO, Nandamudi Jagan Mohana; MARTINEZ JÚNIOR, Francisco ET al. Análise intensidade-duração-freqüência para Presidente Prudente, SP. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO de HIDROLOGIA e RECURSOS HÍDRICOS*, ABRH, 4º, Fortaleza, CE., 1981. **Anais**. Fortaleza, ABRH, 1981. v.1, p.387-402.

VIEIRA, D. B; NETO, F. L.; SANTOS, R. P.; Relação entre intensidade, duração e freqüência de chuvas em Mococa, SP (1998).

VIEIRA, D.B.; LOMBARDI NETO, F.; SANTOS, R.P. Análise das máximas intensidades de chuva em Pindorama, SP. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 18, p. 255-260, 1994.

VIEIRA, D. B. Análise das Máximas Intensidades de Chuvas na Cidade de Campinas.

In IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH, Fortaleza/CE, Brasil.



## ANEXO I

---

Macro-comando para trocar vírgula por ponto e vírgula e trocar ponto por vírgula

```
Sub Macro8()  
'  
' Macro8 Macro  
' Macro gravada 17/2/2004 por Tempestade  
'  
Dialogs(wdDialogFileOpen).Show  
  
Selection.HomeKey Unit:=wdStory  
Selection.Find.ClearFormatting  
Selection.Find.Replacement.ClearFormatting  
With Selection.Find  
    .Text = ","  
    .Replacement.Text = ";"  
    .Forward = True  
    .Wrap = wdFindContinue  
    .Format = False  
    .MatchCase = False  
    .MatchWholeWord = False  
    .MatchWildcards = False  
    .MatchSoundsLike = False  
    .MatchAllWordForms = False  
End With  
  
Selection.Find.Execute Replace:=wdReplaceAll  
With Selection.Find  
    .Text = "."  
    .Replacement.Text = ","  
    .Forward = True  
    .Wrap = wdFindContinue  
    .Format = False  
    .MatchCase = False  
    .MatchWholeWord = False  
    .MatchWildcards = False  
    .MatchSoundsLike = False  
    .MatchAllWordForms = False  
End With  
  
Selection.Find.Execute Replace:=wdReplaceAll  
  
Dialogs(wdDialogFileSaveAs).Show  
ActiveWindow.Close  
  
End Sub
```