



Ambiente & Água - An Interdisciplinary
Journal of Applied Science
ISSN: 1980-993X
ambi-agua@agro.unitau.br
Universidade de Taubaté
Brasil

Rodrigues Borges, Giovana Mara; Silveira Thebaldi, Michael
Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para o
município de Formiga, MG, Brasil
Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 11, núm. 4,
octubre-diciembre, 2016, pp. 891-902
Universidade de Taubaté
Taubaté, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92847951012>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc



Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para o município de Formiga, MG, Brasil

doi:10.4136/ambi-agua.1823

Received: 12 Dec. 2015; Accepted: 11 Jul. 2016

Giovana Mara Rodrigues Borges; Michael Silveira Thebaldi*

Centro Universitário de Formiga (UNIFOR-MG), Formiga, MG, Brasil

Setor de Engenharia Ambiental e Sanitária

*Autor correspondente: e-mail: msthebaldi@uniformg.edu.br,
giovanaengambiental@gmail.com

RESUMO

O conhecimento do comportamento probabilístico de dados de precipitação é extremamente importante para a elaboração de projetos de obras hidráulicas, tais como sistemas de drenagem, vertedores de barragens, entre outros. Assim, este trabalho teve como objetivo, estudar o comportamento de modelos estatísticos na predição da precipitação máxima diária anual, bem como dos modelos de chuvas intensas para o município de Formiga, MG, Brasil. Para tal, os dados de precipitação máxima diária anual foram ordenados de forma decrescente, com o objetivo de identificar uma distribuição estatística que melhor a descrevesse por meio da frequência de excedência. Quanto ao estudo de chuvas intensas, foi utilizada a metodologia de disagregação de chuvas, sendo ajustados os modelos Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e Exponencial. Pelo teste do Qui-quadrado foi identificado que o modelo Gumbel para Máximos aderiu melhor às frequências dos dados observados. Para previsão de chuvas intensas, o modelo exponencial se adequou melhor aos dados observados.

Palavras-chave: desagregação de chuvas, distribuições estatísticas, gestão de recursos hídricos.

Estimate of annual daily maximum rainfall and intense rain equation for the Formiga municipality, MG, Brazil

ABSTRACT

Knowledge of the probabilistic behavior of rainfall is extremely important to the design of drainage systems, dam spillways, and other hydraulic projects. This study therefore examined statistical models to predict annual daily maximum rainfall as well as models of heavy rain for the city of Formiga - MG. To do this, annual maximum daily rainfall data were ranked in decreasing order that best describes the statistical distribution by exceedance probability. Daily rainfall disaggregation methodology was used for the intense rain model studies and adjusted with Intensity-Duration-Frequency (IDF) and Exponential models. The study found that the Gumbel model better adhered to the data regarding observed frequency as indicated by the Chi-squared test, and that the exponential model best conforms to the observed data to predict intense rains.

Keywords: daily rainfall disaggregation, statistical distributions, water resources management.

1. INTRODUÇÃO

A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica e pode atuar sobre a erosão do solo, inundações em áreas rurais e urbanas, obras hidráulicas, entre outros (Bertoni e Tucci, 2015). Em obras rurais, o seu conhecimento é necessário para o planejamento de sistemas de terraceamento agrícola, drenagem em estradas e a implantação de barragens para atenuação de cheias (Mesquita et al., 2009).

Além disso, o estudo das precipitações máximas faz-se importante quando se deseja obter os valores máximos diários, visando o estudo da frequência de ocorrência de precipitações intensas, inclusive para geração das equações de chuvas intensas (Mello e Silva, 2013). Chuvas intensas, também denominadas chuvas extremas ou máximas, são aquelas que apresentam grande lâmina precipitada, que supera um valor mínimo em um certo intervalo de tempo (Silva et al., 2003). Segundo Araújo et al. (2008), uma das principais características das chuvas intensas é sua distribuição irregular, tanto espacialmente quanto temporalmente.

De acordo com Cruciani et al. (2002), a caracterização das chuvas intensas é imprescindível para que seus efeitos sejam quantificados adequadamente, além de permitir a previsão da ocorrência de eventos hidrológicos extremos e suas consequências da forma mais real e precisa possível.

Para o dimensionamento de drenos, vertedores, obras de proteção contra cheias, erosão hídrica, entre outros, é necessário o conhecimento das três grandezas que caracterizam a precipitação máxima: a intensidade, a duração e a frequência. A equação de intensidade, duração e frequência (IDF), também conhecida como equação de chuvas intensas, é a principal forma de caracterizar a relação dessas grandezas (Pruski et al., 2006). O estudo dessas precipitações é um dos caminhos para se conhecer a vazão de enchente de uma bacia.

Segundo Pereira et al. (2007), as dificuldades para obtenção das equações IDF decorrem de limitações de dados disponíveis, tanto em termos de densidade da rede pluviográfica como em relação ao pequeno período de observação disponível, além da necessidade de um exaustivo trabalho de análise, interpretação e codificação de uma grande quantidade de dados.

Os parâmetros da relação intensidade-duração-frequência de chuvas intensas são ajustados por meio de regressão linear com base nas informações extraídas de pluviogramas (Oliveira et al., 2005) ou em dados de Plataformas de Coletas de Dados (PCDs). Obtidos desta maneira, estes parâmetros produzem melhores resultados e precisão e devem ser aplicados quando possível por se tratar de lâminas e durações reais para a localidade em questão. Quando não se dispõe de pluviogramas, a alternativa para se gerar informações para chuvas intensas é a aplicação de relações médias entre lâminas precipitadas em diferentes intervalos de tempo. Com base nesse princípio, denominado desagregação de chuvas, as lâminas de precipitação podem ser estimadas a partir da chuva máxima diária anual registrada pelo pluviômetro em intervalos de tempo tão pequenos quanto cinco minutos (Mello e Silva, 2013).

Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento de modelos estocásticos na predição da precipitação máxima diária anual, bem como modelos de chuvas intensas para o município de Formiga, MG, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O município de Formiga, que possui área de 1502 km², localiza-se no Oeste de Minas Gerais e é constituído pelos biomas Cerrado e Mata Atlântica. De acordo com a Classificação Climática de Köppen se enquadra no clima Cwb, ou seja, clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado (Alvares et al., 2013).

Os dados analisados são referentes à precipitação diária no município de Formiga, MG, Brasil e foram adquiridos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb), gerido pela ANA, na estação código 02045021, localizada na latitude 20° 27' 26" S e longitude 45° 25' 9" W, nos períodos de 1925 a 1937 e 1976 a 2014, exceto os anos 1989 e 2006, pois os mesmos não possuíam a série completa de informações necessárias ao estudo.

2.1. Precipitação Máxima Diária Anual

Os dados foram organizados com o objetivo de obter as precipitações máximas diárias anuais e, posteriormente, ordenados em ordem decrescente para a obtenção da frequência de excedência, constituindo uma série com 50 valores de precipitação máxima diária anual para Formiga, MG, Brasil. As frequências observadas referentes aos eventos hidrológicos foram obtidas por meio da fórmula de Weibull (Equação 1).

$$f_{obs} = \frac{i}{N+1} \quad (1)$$

em que:

f_{obs} - frequência observada de excedência;

i - posição ocupada pelo dado de chuva diária máxima anual dentro da série histórica;

N - tamanho da série histórica.

A partir dos valores calculados da frequência de excedência, foram calculados os tempos de retorno das precipitações relativos a cada frequência de excedência, como indicado na Equação 2.

$$TR = \frac{1}{f_{obs}} \quad (2)$$

em que:

TR - tempo de retorno em anos.

Foram ajustadas as funções cumulativas e densidade de probabilidade nos modelos Gumbel para máximos, Fréchet, Gama, Log-Normal 2 parâmetros e Log-Normal 3 parâmetros.

A distribuição Gumbel para máximos tem sua função densidade de probabilidade (FDP) representada pela Equação 3.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \cdot e^{-\left[\frac{(x-\mu)}{\alpha} - e^{-\frac{(x-\mu)}{\alpha}}\right]} \quad (3)$$

em que:

α e μ - parâmetros da distribuição.

A função cumulativa de probabilidade é dada pela Equação 4, em que x é o valor da variável hidrológica avaliada - no caso deste estudo precipitação máxima diária anual, e x_i é um valor qualquer da mesma variável.

$$P(x \geq x_i) = 1 - e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} \quad (4)$$

Os parâmetros α e μ dados pelo método dos momentos são apresentados nas Equações 5 e 6, e são calculados a partir da média (\bar{X}) e desvio padrão (S) amostrais.

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \quad (5)$$

$$\mu = \bar{X} - 0,451 \cdot S \quad (6)$$

A função de Fréchet consiste na aplicação da Distribuição Gumbel aos valores logaritmizados da variável hidrológica. Esta distribuição foi aplicada para estudar as frequências de precipitações máximas. As funções densidade de probabilidade e cumulativa de probabilidade são representadas pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$FDP = f(x) = \frac{\theta}{\lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{x}\right)^{\theta+1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{x}\right)^{\theta}\right] \quad (7)$$

em que:

θ - parâmetro da distribuição associado à média;

λ - parâmetro da distribuição associado à variância.

$$P(X \geq xi) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{x}\right)^{\theta}\right] \text{ para } x > 0; \theta, \lambda > 0 \quad (8)$$

A obtenção dos parâmetros da distribuição Fréchet, θ e λ se inicia com a Equação 9, a partir do coeficiente de variação (CV). Em seguida foi calculado o parâmetro λ por meio das Equações 10 e 11, a partir do ajuste da média.

$$CV = \sqrt{\frac{\Gamma(1-\frac{2}{\theta})}{\Gamma^2(1-\frac{1}{\theta})}} - 1 \text{ para } \theta > 2 \quad (9)$$

$$E(x) = \bar{X} = \lambda \cdot \Gamma\left(1 - \frac{1}{\theta}\right) \text{ para } \theta > 0 \quad (10)$$

$$Var(x) = s^2 = \lambda^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{\theta}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{\theta}\right)\right] \text{ para } \theta > 2 \quad (11)$$

em que:

Γ - função Gama.

A estimativa de um valor x, vinculado a um TR, para a distribuição Fréchet, é obtida pela Equação 12.

$$x_{TR} = \lambda \cdot \left[\ln\left(\frac{TR}{TR-1}\right)\right]^{-\frac{1}{\theta}} \quad (12)$$

Já a função cumulativa de probabilidade da distribuição Gama é dada pela Equação 13.

$$FCP = \frac{1}{\beta^v \cdot \Gamma(v)} \int_0^x u^{(v-1)} e^{-\frac{u}{\beta}} du \quad (13)$$

Os parâmetros da distribuição Gama, β e v , são dados pelas Equações 14 e 15.

$$\beta = \frac{s^2}{\bar{x}} \quad (14)$$

$$v = \frac{(\bar{x})^2}{s^2} \quad (15)$$

em que:

s^2 - desvio padrão amostral da série histórica;

\bar{x} - média amostral da série histórica.

A distribuição log-Normal 2 parâmetros é descrita pela função densidade de probabilidade como apresentado na Equação 16.

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma n \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\ln(x) - \mu n}{\sigma n} \right)^2} \quad (16)$$

em que:

μn e σn - parâmetros da distribuição, correspondendo à média e ao desvio padrão dos logaritmos dos dados.

A equação base para estudos hidrológicos, utilizando a distribuição log-Normal 2 parâmetros, é adaptada da equação geral de Ven Te Chow (Haan, 1979), conforme a Equação 17.

$$X_{TR} = e^{\mu n + \sigma n \cdot K_{TR}} \quad (17)$$

em que:

X_{TR} - valor da variável hidrológica associada a um tempo de retorno;

K_{TR} - variável reduzida da distribuição Normal.

A distribuição log-Normal 3 parâmetros é descrita pela função densidade de probabilidade, como apresentado na Equação 18.

$$f(x) = \frac{1}{(x - \beta) \cdot \sigma n \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\ln(x - \beta) - \mu n}{\sigma n} \right)^2}, \text{ com } X \geq \beta \quad (18)$$

Para estimar os parâmetros da distribuição log-Normal 3P (β , μn e σn) são utilizadas as Equações 19, 20, 21, 22 e 23.

$$\varphi = \frac{[-\gamma + (\gamma^2 + 4)^{0.5}]}{2} \quad (19)$$

$$\eta_y = \frac{(1 - \varphi^3)}{\varphi^{\frac{1}{3}}} \quad (20)$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{s}{\eta_y} \quad (21)$$

$$\mu n = \text{LN} \left(\frac{s}{\eta_y} \right) - 0,5 \cdot \text{LN}(\eta_y^2 + 1) \quad (22)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\ln(\eta\gamma^2 + 1)} \quad (23)$$

em que:

η_y - coeficiente de variação da variável $y = x - \beta$;

γ - coeficiente de assimetria da série histórica.

A equação base para estudos hidrológicos, utilizando-se a distribuição log-Normal 3 parâmetros, também é adaptada da equação geral de Ven Te Chow (Haan, 1979), como mostra a Equação 24.

$$X_{TR} = e^{\mu n + \sigma_n K_{TR}} + \beta \quad (24)$$

Com a finalidade de testar a aderência dos dados observados aos modelos acima citados, foram realizados os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, considerando um nível de significância de 5% de probabilidade estatística em ambos.

A seleção da distribuição estatística que melhor representa a série histórica de precipitação máxima diária anual foi realizada com base nos testes de aderência, sendo a distribuição selecionada a de representação significativa a 5% de probabilidade tanto para os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, e de menor valor de Qui-Quadrado calculado.

Nos casos em que o teste de Qui-Quadrado não foi significativo para nenhuma distribuição aplicada à série histórica de precipitação máxima diária anual, tomou-se como critério de escolha de distribuição aquela que foi significativa pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e apresentou valor de Qui-Quadrado calculado mais próximo do Qui-Quadrado tabelado à significância de 5% de probabilidade.

Já quando o teste de Kolmogorov-Smirnov não foi significativo para nenhuma distribuição aplicada à série histórica de precipitação máxima diária anual, adotou-se como distribuição estatística que melhor representaria a série, aquela significativa ao teste de Qui-Quadrado, possuindo menor valor de Qui-Quadrado calculado. Para séries históricas em que nenhuma distribuição possuísse aderência significativa à 5% de probabilidade em ambos os testes, foi feita seleção com base na distribuição com menor Qui-Quadrado calculado, mesmo que não houvesse confiança na representação da série pela distribuição.

2.2. Desagregação de chuvas

Para obtenção dos valores das precipitações associados à certas durações, considerando o período de retorno de 5 a 500 anos e o tempo de duração de 5 a 1440 min, empregou-se o método de desagregação de chuvas (Froehlich, 1993; Cardoso et al., 1998). Para tal, relacionou-se a precipitação de 1 dia (associada a um dado tempo de retorno, calculado a partir da distribuição estatística que melhor aderiu à série de precipitação máxima diária anual) com a precipitação de 24 h, e assim sucessivamente, utilizando as constantes da Tabela 1.

Por definição, a precipitação de 1 dia se refere àquela obtida por pluviômetro com intervalo de 24 h sempre fixo, enquanto a precipitação de 24 h é referente àquela obtida por pluviógrafo sem fixação do início da contagem do tempo.

Assim, dividindo a precipitação obtida pela sua respectiva duração, encontraram-se as intensidades de precipitação associadas aos períodos de retorno e às durações. Determinaram-se também as intensidades de precipitação consideradas como chuvas intensas, com base nos valores apresentados por Mello e Silva (2013).

Tabela 1. Constantes do modelo de desagregação de chuvas diárias.

Relação (ht1/ht2)*	Constante (K)
1dia/24h	1,14
12/24h	0,85
10h/24h	0,82
8/24h	0,78
6/24h	0,72
1/24h	0,42
0,5/1h	0,74
25min/0,5h	0,91
20min/0,5h	0,81
15min/0,5h	0,70
10min/0,5h	0,54
5min/0,5h	0,34

*ht1 e ht2 referem-se à chuvas máximas associadas a uma duração que estão sendo relacionadas.

Fonte: Adaptado de Occhipinti e Santos (1966) e Mello e Silva (2013).

2.3. Equações de chuvas intensas

Os valores de intensidade de precipitação foram ajustados aos seguintes modelos:

- Modelo usual, básico ou Equação IDF, como mostrado na Equação 25.

$$I = \frac{K \cdot TR^a}{(b+td)^c} \quad (25)$$

em que:

I - intensidade de chuva (mm/h);

K, a, b e c - parâmetros de ajuste;

TR - tempo de retorno (anos);

td - tempo de duração (minutos).

- Modelo exponencial, apresentado conforme Equação 26.

$$I = e^{B+D \cdot TR^x + E \cdot (\ln td)^2} \quad (26)$$

em que:

B, D, x e E - parâmetros de ajuste.

O principal critério para escolha do modelo exponencial foi a sua simplicidade, já que apresenta o mesmo número de parâmetros do modelo IDF. Landsberg (1977), ressalta que os modelos estudados são empregados para modelagem de fenômenos em ciências naturais.

O ajuste dos modelos foi realizado utilizando o pacote Solver do Microsoft Excel, utilizando o método da Gradação Reduzida Generalizada (GRG) Não-Linear. Para a avaliação dos modelos, foram considerados o coeficiente de determinação ajustado (R^2) e o erro absoluto médio (EAM) produzido pelos modelos em relação aos dados originais, conforme

Equação 27.

$$EAM = N^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} |P_i - O_i| \quad (27)$$

em que:

N - número de pares de dados;

P_i - valor de intensidade de precipitação estimada pela equação de chuvas intensas (mm);

O_i - valor de intensidade de precipitação calculada por meio da desagregação de chuvas (mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Precipitação máxima diária anual

O maior valor encontrado para a precipitação máxima diária anual (PMDA) foi de 154 mm, ocorrido no ano de 2008, enquanto o menor valor foi de 35,2 mm, no ano de 2014. A média dos valores de PMDA é de 81,096 mm enquanto que o desvio padrão, 28,307 mm. Na Tabela 2, são apresentados os valores obtidos dos parâmetros de ajuste das funções avaliadas com os dados da série histórica de precipitação máxima diária anual.

Tabela 2. Valores obtidos dos parâmetros de ajuste das funções avaliadas com os dados da série histórica de PMDA do município de Formiga, MG, Brasil.

Gumbel para máximos	Fréchet	Gama	Log-Normal 2P	Log-Normal 3P
μ : 68,357744	λ : 68,510874	β : 9,880877	μ : 4,341505	β : 0,789826
α : 0,045310	θ : 4,6116717	v : 8,207369	σ : 0,327424	μ_n : 4,327288 σ_n : 0,342223

Os valores de máxima diferença entre as frequências máximas (ΔF) calculadas e qui-quadrado calculado (λ^2) obtidos na avaliação da aderência dos modelos ajustados à distribuição de probabilidades da série histórica de precipitação máxima diária anual do município de Formiga, MG, Brasil estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores obtidos das estatísticas dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (ΔF) e Qui-Quadrado (λ^2) na avaliação do ajuste das funções à série histórica de precipitação máxima diária anual do município de Formiga, MG, Brasil.

Modelo	PMDA	
	ΔF Calculado Máximo	λ^2 Calculado
Gumbel para máximos	0,095740984*	8,279935837*
Fréchet	0,09170173*	11,92013654 ^{NS}
Gama	0,118838118*	9,649387782 ^{NS}
Log-Normal 2P	0,100840414*	9,13408457*
Log-Normal 3P	0,097886891*	8,436986711*

* Significativo a 5% de probabilidade.

As funções cumulativas de probabilidade Gumbel para Máximos, Log-Normal 2P e Log Normal 3P tiveram aderência significativa em ambos os testes realizados. Assim, o melhor ajuste se deu para o modelo Gumbel para Máximos, que apresentou o menor valor de λ^2 .

calculado.

Thebaldi (2012), ao avaliar a precipitação máxima diária anual do município de Uberaba, MG, observou que o modelo de Gumbel para Máximo representou melhor os dados para esta localidade, assim, como ocorrido neste estudo.

Franco et al. (2014) analisaram a precisão dos ajustes de três distribuições de probabilidade (Gumbel, Gama e GEV) utilizando, para estimativa dos parâmetros, os métodos dos momentos Máxima Verossimilhança e Momentos L, em oito séries históricas de precipitação máxima diária anual na Bacia Hidrográfica do Rio Verde e observaram que, para a distribuição de Gumbel, o método dos momentos foi o mais adequado. Porém, esta distribuição foi a que obteve o menor número de adequações nas séries históricas estudadas. Ferreira et al. (2005) também obtiveram um bom ajuste da distribuição Gumbel para dados de precipitação máxima em 165 municípios do Estado de São Paulo.

3.2. Equações de chuvas intensas

Por representar melhor a série observada de PMDA, a distribuição Gumbel para Máximos foi utilizada para estimar as precipitações de um dia, relativas a tempos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos. Estas foram submetidas à técnica de desagregação de chuvas para indicação das lâminas precipitadas para tempos de duração iguais e inferiores a 24 horas, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Precipitação obtida pelo método da desagregação de chuvas, para o município de Formiga, MG, Brasil.

TR	P/dia	Tempo de duração (minutos)											
		Precipitação (mm)											
		1440	720	600	480	360	60	30	25	20	15	10	5
5	101,5	115,7	98,3	94,8	90,2	83,3	48,6	35,9	32,7	29,1	25,2	19,4	12,2
10	118,0	134,5	114,4	110,3	104,9	96,9	56,5	41,8	38,1	33,9	29,3	22,6	14,2
20	133,9	152,7	129,8	125,2	119,1	109,9	64,1	47,4	43,2	38,4	33,2	25,6	16,1
50	154,5	176,1	149,7	144,4	137,4	126,8	74,0	54,7	49,8	44,3	38,3	29,6	18,6
100	169,9	193,7	164,6	158,8	151,1	139,4	81,3	60,2	54,8	48,8	42,1	32,5	20,5
500	205,5	234,3	199,1	192,1	182,7	168,7	98,4	72,8	66,3	59,0	51,0	39,3	24,8

TR: tempo de retorno, em anos. P/dia: precipitação de um dia, em mm.

A maior precipitação calculada é relativa a um tempo de retorno de 500 anos e duração de 1440 minutos (234,3 mm), enquanto a menor, 12,2 mm, para duração de 5 minutos associada a um TR de 5 anos. A partir dos dados contidos na Tabela 4, a série de intensidades de precipitação foi gerada e, ao ser ajustada aos modelos IDF e exponencial de chuvas intensas, gerou os parâmetros de ajuste apresentados na Tabela 5. Há de se salientar que todas as intensidades de precipitação geradas a partir dos dados da Tabela 4 foram consideradas intensas a partir dos critérios apresentados por Mello e Silva (2013).

Os dados observados mostram-se próximos aos obtidos por meio da equação IDF, o que é evidenciado a partir do coeficiente de determinação (R^2) obtido, 0,9982. Já o erro absoluto médio do modelo IDF, ao representar os dados observados, foi $2,2128 \text{ mm h}^{-1}$.

O valor do coeficiente de determinação (R^2) na avaliação do modelo exponencial foi de 0,9994, enquanto que o erro absoluto médio foi de $1,86964 \text{ mm h}^{-1}$. Com isso, o modelo exponencial mostrou-se o mais eficiente em relação ao modelo IDF para a predição de chuvas intensas em Formiga, MG, Brasil.

Tabela 5. Parâmetros, coeficiente de determinação (R^2) e erro absoluto médio (EAM) obtidos pelos ajustes dos modelos IDF e Exponencial aos dados de intensidade de precipitação obtidos pelo método da desagregação de chuvas.

Modelo IDF		Modelo Exponencial	
K	863,3250508	B	6,489348784
a	0,144458656	D	-1,713556708
b	9,78902144	x	-0,16541735
c	0,724312897	E	-0,076506753
R^2	0,9982	R^2	0,9994
EAM (mm h ⁻¹)	2,2128	EAM (mm h ⁻¹)	1,86964

Mello et al. (2001) analisaram os modelos matemáticos IDF, exponencial e linear para o estudo de chuvas intensas em Lavras - MG e seus resultados corroboraram com os deste estudo, sendo que os modelos IDF e exponencial geraram menores erros em comparação ao modelo linear, proporcionando melhores estimativas da intensidade máxima de chuva. Já dentre os modelos que geraram os melhores resultados, o modelo exponencial apresentou melhores estimativas.

4. CONCLUSÃO

A série de precipitação máxima diária anual do município de Formiga, MG, Brasil apresentou valores variando entre 35,2 mm e 154 mm nos períodos de 1925 a 1937 e 1976 a 2014, exceto os anos 1989 e 2006.

Por meio dos testes de aderência das distribuições de frequência analisadas, pode-se constatar que o modelo que apresenta maior adesão à série de precipitação máxima diária anual estudada é o Gumbel para Máximos.

Quanto à Equação de Chuvas Intensas, o modelo que melhor se ajustou à série de intensidades de precipitação calculadas pelo método de desagregação de chuvas foi o exponencial.

5. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARAÚJO, L. E.; SOUSA, F. A. S.; RIBEIRO, M. A. F. M.; SANTOS, A. S.; MEDEIROS, P. C. Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862008000200005>
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: ABRH ; UFRS, 2015. p.177-241.

- CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N.; BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 131-140, 1998. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000100018>
- CRUCIANI, D. E.; MACHADO, R. E.; SENTELHAS, P. C. Modelos da distribuição temporal de chuvas intensas em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 76-82, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000100014>
- FERREIRA, J. C.; DANIEL, L. A.; TOMAZELA, M. Parâmetros para equações mensais de estimativas de precipitação de intensidade máxima para o Estado de São Paulo - Fase I. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 6, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542005000600011>
- FRANCO, C. S.; MARQUES, R. F. P. V.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, L. F. C. Distribuição de probabilidades para precipitação máxima diária na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 735-741, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000700010>
- FROEHLICH, D. C. Short-duration-rainfall intensity equations for drainage design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 5, p. 814-828, 1993. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:5\(814\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:5(814))
- HAAN, C.T. **Statistical methods in hidrology**. 2. ed. Ames: The Iowa State University Press, 1979. 377 p.
- LANDSBERG, J. J. Some useful equations for biological studies. **Experimental Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 273-286, 1977. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479700008000>
- MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M. Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 693-698, 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000300018>
- MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Ed. UFLA, 2013.
- MESQUITA W. O.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Precipitações máximas diárias esperadas para as regiões central e sudeste de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 2, p. 73-81, 2009.
- OCCHIPINTI, A. G.; SANTOS, P. M. **Relações entre as precipitações máximas de “um dia” e de “24 horas” na cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, 1966. 26p.
- OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; WEHR, T. R.; BORGES, L. B.; SARMENTO, P. H. L.; GRIEBELER, N. P. Intensidade-duração-freqüência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 1, p. 13-18, 2005.
- PEREIRA, S. B.; FIETZ, C. R.; PEIXOTO, P. P. P.; ALVES SOBRINHO, T.; SANTOS, F. M. **Equação de intensidade, duração e freqüência da precipitação para a região de Dourados, MS**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2007. 18p.

- PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J. M. A.; GRIEBELER, N. P. **Hidros**:dimensionamento de sistemas hidroagrícolas. Viçosa:Editora UFV, 2006. 259 p.
- SILVA, D. D.; PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; GOMES FILHO, R. R.; LANA, A. M. Q.; BAENA, L. G. N. Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial para o Estado de Tocantins. **Engenharia na Agricultura**, v. 11, n. 1-4, 2003.
- THEBALDI, M. S. Análise estatística da precipitação máxima diária anual da cidade de Uberaba e vazão mínima diária anual do Rio Uberaba. **Revista Agrogeoambiental**, v. 4, n. 3, 2012. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v4n32012470>