

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS EXPEDITOS DE DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS

PERFORMANCE EVALUATION OF METHODS FOR DETERMINATION OF RAIN EQUATIONS INTENSE

Karinnie Nascimento de

Almeida

Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras, Vitória, ES.

kaka.nascimento05@gmail.com

José Antônio Tosta dos Reis

tosta@ct.ufes.br

Antônio Sérgio Ferreira

Mendonça

RESUMO

O conhecimento do regime de chuvas é de grande importância para tomada de decisão de controle de inundações. Contudo, densidades de pluviógrafos são muito deficientes em muitas regiões e séries de precipitações destes tipos de postos são muito mais curtas e menos confiáveis do que aquelas originadas por pluviômetros. A literatura indica alternativas expeditas para a determinação de intensidades pluviométricas, dentre as quais os métodos de Chow-Gumbel e de Bell. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho das equações de chuvas intensas estabelecidas pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell empregando o teste F de variâncias, assumindo-se nível de significância de 5%. Para a área de estudo os resultados indicaram que, para períodos de retorno superiores a 5 anos e durações superiores a 30 minutos, as equações de chuvas intensas determinadas pelos métodos expeditos praticamente equivalentes às aquelas determinadas com auxílio de equações estabelecidas a partir de registros pluviográficos.

Palavras-chave: drenagem; chuvas intensas; chow-gumbel; bell; curvas intensidade-duração-frequência.

ABSTRACT

Knowledge about rainfall variation is very important for the decision-making process of flood control. However, automatic rain gauges' densities are very poor in many regions and rainfall series obtained by these types of equipments are much shorter and less reliable than those caused by manually operated rain gauges. The literature presents various methods for determination of rainfall intensities, including those denominated Chow-Gumbel and Bell. The study aimed to evaluate the performance of intensity-duration-frequency equations obtained by use of the Chow-Gumbel and Bell methods. For comparison of the results from the application of the different alternatives considered for the fitting of intensity-duration-frequency equations was used the F test of variance, assuming 5% significance level. For Bahia region stations, test results indicated that, for return periods longer than 5 years and durations above 30 minutes' equations determined by empirical methods usually produced rainfall intensities roughly equivalent to those determined with the aid of equations established from automatic rain gauge records.

Keywords: drainage; extreme rainfall; chow-gumbel; bell; intensity-duration-frequency curves.

INTRODUÇÃO

Chuvas intensas são fenômenos naturais geralmente caracterizados por fortes precipitações contínuas com curta duração. Esses fenômenos podem causar aumentos de vazões, produzindo inundações e/ou enchentes, com amplos efeitos negativos como perdas humanas e materiais, interrupção de atividades econômicas e sociais nas áreas inundadas, contaminação das águas, proliferação das doenças de veiculação hídrica e aceleração do processo de erosão dos solos (Cruciani et al., 2002).

O conhecimento das chuvas também é de grande interesse de ordem técnica para projetos de obras hidráulicas, sendo indispensável para dimensionamento de vertedores, galerias de águas pluviais, bueiros, calhas, sistemas de drenagem agrícola, urbana e rodoviária, canalização de córregos, dentre outros.

Monitoramento de precipitações por meio de rede de pluviógrafos confiável, durante período de tempo suficientemente longo e representativo, permite o estabelecimento de equações de chuvas intensas, conformando relação entre intensidade, duração e frequência das precipitações. Constituem exemplos de equações de chuvas intensas desenvolvidas a partir de registros pluviográficos as apresentadas nas publicações de Reich (1963), Chen (1983), Kothyari & Garde (1992), Alila (2000), Silva et al. (2002), Adadin (2005) e Singh & Zhang (2007).

Contudo, densidades de pluviógrafos são muito deficientes em muitas regiões e séries de precipitações obtidas por estes tipos de postos são muito mais curtas, com menores números de anos de medições, e menos confiáveis do que aquelas originadas por pluviômetros. Naquelas situações em que registros pluviográficos não existem ou estão disponíveis em séries de pequena extensão, os métodos expeditos que consideram dados obtidos por pluviômetros para estabelecimento de equações de chuvas intensas apresentam-se como as alternativas mais recorrentemente empregadas. Cabe observar que a falta de registros de longo período confiáveis obtidas por pluviógrafos é muito comum em muitas regiões brasileiras e da maioria dos países,

Dentre os métodos expeditos para determinação de equações de chuvas intensas, os métodos de Chow-Gumbel e de Bell destacam-se pela facilidade de aplicação. Esses métodos, que permitem a definição de equações a partir de séries históricas precipitações máximas anuais de um dia de duração – séries estabelecidas com auxílio de pluviômetros – e de coeficientes de conversão entre chuvas de diferentes durações, tem sido usualmente empregados no Brasil. Constituem exemplos de aplicação dos métodos de Bell e Chow-Gumbel em diferentes estados brasileiros os trabalhos de Oliveira et al. (2005), Santos et al. (2009), Cardoso et al. (2013), Campos et al. (2014) e Fachine et al. (2014).

No entanto, a qualidade das respostas das equações de chuvas intensas estabelecidas pelos métodos expeditos não tem sido verificada. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho dos métodos de Chow-Gumbel e de Bell quando da determinação de equações de chuvas intensas. Para a condução da avaliação proposta foram consideradas as equações de chuvas intensas definidas a partir de registros pluviográficos observados no estado da Bahia, estado com extenso território, que apresenta diferentes tipos climáticos e considerável variação no regime de precipitações.

REGIÃO DE ESTUDO

O Estado da Bahia está localizado na região Nordeste do Brasil. Possui área de 567.295 km², com abertura para o oceano Atlântico. Três tipos climáticos podem ser observados na Bahia: clima quente e úmido sem estação seca (Af, conforme sistema Köppen), clima quente e úmido com estação seca de inverno (Aw) e clima semiárido quente. O clima Af se estabelece ao longo do litoral, com temperaturas médias anuais de cerca de 23°C e totais pluviométricos superiores a 1.500mm. O clima Aw é característico do interior do Estado e apresenta temperaturas médias anuais que variam entre 18°C nas áreas mais elevadas e 22°C nas áreas mais baixas, com totais anuais de precipitação de aproximadamente 1000 mm. O tipo climático (BSh) é típico no norte do Estado e no vale do São Francisco, com temperaturas médias anuais que superam 24°C e totais anuais precipitados usualmente interiores a 700mm (Silva et al., 2000).

MATERIAIS E MÉTODOS

Equações de chuvas intensas estabelecidas a partir de registros pluviográficos

As equações de chuvas intensas disponíveis para o estado da Bahia foram estabelecidas por Silva et al. (2000) a partir dos registros de pluviógrafos que integram a rede hidro meteorológica da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As referidas equações, juntamente com nome e localização das

estações pluviográficas e períodos de monitoramento, estão reunidas no Tabela 1. É relevante observar que Silva et al. (2000) não indicaram as faixas de aplicação referentes às durações ou períodos de recorrência associados as equações reunidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Estações pluviográficas e equações de chuvas intensas para o Estado da Bahia

Estações	Município	Altitude (m)	Latitude S (GMS)	Longitude W (GMS)	Período	Equação
Argoim	Rafael Jambeiro	159	12°35'06"	39°31'06"	1988-1995 1997-1999	$i = \frac{8999,0 \cdot T^{0,245}}{(t + 56,068)^{1,119}}$
Brotas de Macaúbas	Brotas de Macaúbas	837	12°00'13"	42°37'42"	1988-1999	$i = \frac{4210,017 \cdot T^{0,192}}{(t + 32,453)^{1,042}}$
Cândido Sales	Cândido Sales	676	15°30'18"	41°13'45"	1988-1999	$i = \frac{2828,391 \cdot T^{0,204}}{(t + 34,463)^{0,956}}$
Carinhanha	Carinhanha	440	14°18'16"	43°46'05"	1981- 1986 1989-1999	$i = \frac{2718,147 \cdot T^{0,214}}{(t + 21,193)^{0,978}}$
Fazenda Porto Alegre	Cocos	500	14°16'06"	44°31'18"	1981- 1986 1989-1999	$i = \frac{2500,0 \cdot T^{0,184}}{(t + 34,478)^{0,902}}$
Fazenda Refrigério	Ibipeba	489	11°21'22"	42°16'26"	1988-1999	$i = \frac{3950,0 \cdot T^{0,222}}{(t + 33,862)^{1,028}}$
Formosa do Rio Preto	Formosa do Rio Preto	488	11°03'00"	45°12'00"	1987-1999	$i = \frac{1719,054 \cdot T^{0,174}}{(t + 20,021)^{0,865}}$
Ipiaú	Ipiaú	142	14°10'15"	39°41'23"	1991-1994 1996-1999	$i = \frac{2194,929 \cdot T^{0,232}}{(t + 32,891)^{0,882}}$
Itamaraju	Itamaraju	80	17°02'43"	39°32'37"	1975-1986 1988-1999	$i = \frac{4032,860 \cdot T^{0,211}}{(t + 28,605)^{1,060}}$
Itapebi	Itapebi	80	15°57'39"	39°31'34"	1975-1986	$i = \frac{3586,593 \cdot T^{0,204}}{(t + 39,135)^{0,987}}$

Estações	Município	Altitude (m)	Latitude S (GMS)	Longitude W (GMS)	Período	Equação
Ituberá	Ituberá	114	13°48'38"	39°10'09"	1989-1999	$i = \frac{3228,481 \cdot T^{0,207}}{(t + 45,386)^{0,948}}$
Juazeiro	Juazeiro	370	09°24'20"	40°30'12"	1988-1999	$i = \frac{5592,554 \cdot T^{0,242}}{(t + 40,039)^{1,093}}$
Medeiros Neto	Medeiros Neto	180	17°22'33"	40°13'17"	1975-1986 1988-1999	$i = \frac{6899,271 \cdot T^{0,227}}{(t + 40,913)^{1,107}}$
Ponte Serafim	Barreiras	713	11°53'46"	45°36'43"	1987-1999	$i = \frac{4073,933 \cdot T^{0,181}}{(t + 27,902)^{1,073}}$
Santa Cruz da Vitória	Santa Cruz da Vitória	243	14°57'32"	39°48'27"	1988-1999	$i = \frac{3450,0 \cdot T^{0,239}}{(t + 34,012)^{0,989}}$
Santa Maria da Vitória	Santa Maria da Vitória	437	13°24'02"	44°11'51"	1988-1989 1991-1999	$i = \frac{2873,405 \cdot T^{0,216}}{(t + 29,656)^{0,946}}$
Teodoro Sampaio	Teodoro Sampaio	116	12°18'01"	38°38'38"	1988 1991-1999	$i = \frac{5850,0 \cdot T^{0,212}}{(t + 51,820)^{1,021}}$

FONTE: SILVA ET AL. (2000)

Registros pluviométricos

Para o estabelecimento de equações de chuvas intensas a partir dos métodos de Chow-Gumbel e de Bell foram utilizados registros pluviométricos disponíveis na base de dados gerenciada pela Agência Nacional das Águas (ANA). Foram manipuladas séries históricas consistidas de totais diários de precipitação, registrados em estações pluviométricas instaladas nas mesmas coordenadas geográficas ou municípios das

estações pluviográficas empregados por Silva et al. (2000), quando da definição das equações apresentadas na Tabela 1. Para a manipulação das séries históricas selecionadas, correspondentes aos mesmos períodos indicados na Tabela 1, foi empregado o programa computacional HIDRO, programa de domínio público produzido e disponibilizado pela ANA.

Métodos expeditos para determinação de equações de chuvas intensas

Método de Chow-Gumbel

A aplicação do Método de Chow-Gumbel, detalhadamente apresentado e discutido por CETESB (1986), envolveu a seguinte sequência de atividades:

Seleção das máximas precipitações anuais de 1 dia duração;

Análise de frequências dos totais precipitados com ajuste da distribuição probabilística de Gumbel à série de máximas precipitações anuais de 1 dia. Dessa forma, foram estimadas as precipitações máximas anuais de 1 dia associadas a diferentes períodos de retorno. Foram considerados períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 75 e 100 anos.

Obtenção, a partir dos totais precipitados de 1 dia, das precipitações para durações de 24 horas. Conforme observa CETESB (1986), a relação entre as chuvas

máximas de 24 horas e 1 dia é aproximadamente constante, oscilando em torno do valor de 1,14 (os coeficientes de conversão variam entre 1,13 e 1,15, dependendo do período de retorno). No presente trabalho foi utilizado 1,14 como fator de conversão.

Determinação, a partir da avaliação da chuva com duração de 24 horas, das chuvas com mesma frequência de ocorrência, mas de menor duração. Nesta etapa do trabalho foram empregados os fatores de conversão apresentados na Tabela 2, conforme CETESB (1986).

Estabelecidas as aturas pluviométricas associadas a diferentes períodos de retorno e durações, as intensidades foram produzidas como simples relações entre as referidas alturas e durações;

Definição de equações de chuvas intensas no formato estabelecido pela equação (01).

$$i = \frac{K \cdot T^a}{(t+b)^c} \quad (01)$$

Na equação (01), i representa a intensidade máxima média (mm/minuto), T o período de retorno (anos), t a duração (minutos) e k , a , b e c são os parâmetros que localmente se deseja determinar. O ajuste do modelo estabelecido por meio da equação (01) foi realizado com auxílio da Programação Não Linear (PNL), aplicada, neste trabalho, com auxílio do programa Solver, disponível na Planilha Microsoft Excel®. Para

aplicação da PNL estabeleceu-se uma função objetivo que buscou minimizar o erro total entre os valores de intensidade pluviométrica estimados a partir das etapas de 1 a 5 ($i_{\text{Método}}$) e as intensidades estimadas com auxílio da equação (01) ($i_{\text{Equação}}$), conforme equação (02). Os parâmetros k , a , b e c constituíram as variáveis de decisão do problema de otimização, com valores pertencentes ao conjunto \Re^+ .

$$\min f_o = \sum_T \sum_t (i_{\text{Método}} - i_{\text{Equação}}) \quad (02)$$

Para a garantia de determinação do ótimo global – neste trabalho, o menor valor possível para o somatório dos erros – foram testados diferentes valores iniciais para os parâmetros a , b , c e k . De uma tentativa para outra, os valores iniciais dos referidos

parâmetros foram aleatoriamente modificados em, no mínimo, uma ordem de grandeza. O processo de otimização conduzido com auxílio da PNL foi repetido no mínimo 10 (dez) vezes.

Tabela 2 - Relação entre as alturas pluviométricas para precipitações de mesma frequência e diferentes durações.

Relação entre as alturas pluviométricas	Coefficientes de conversão
5 min / 30 min	0,34
10 min / 30 min	0,54
15 min / 30 min	0,70
20 min / 30 min	0,81
25 min / 30 min	0,91
30 min / 1 h	0,74
1h / 24 h	0,42
6h / 24 h	0,72

FONTE: CETESB (1986)

Método de Bell

O Método de Bell estima a altura pluviométrica produzida por uma precipitação com duração t e período de retorno T a partir de uma chuva intensa padrão de 60 minutos de duração e 2 anos de período de retorno ($h_{60,2}$), conforme equação (03).

$$h_{t,T} = (a_0 \cdot \ln T + a_1) \cdot (a_2 \cdot t^b - a_3) \cdot h_{60,2} \quad (03)$$

Na equação (03) a_0 , a_1 , a_2 , a_3 e b constituem parâmetros regionais. Conforme Righetto (1998), os referidos parâmetros foram estimados a partir da manipulação de informações pluviográficas de postos instalados em diferentes regiões do País, permitindo a conformação da equação (04).

$$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,70) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot h_{60,2} \quad (04)$$

Righetto (1998) sugere, adicionalmente, que o valor de $h_{60,2}$ pode ser obtido a partir da precipitação máxima diária associada ao período de retorno de 2 anos, conforme expressão (05).

$$h_{60,2} \cong 0,51 \cdot h_{\text{dia},2} \quad (05)$$

Neste trabalho, a precipitação máxima diária associada ao período de retorno de 2 anos foi apropriada a partir do emprego da distribuição probabilística de Gumbel.

Análise estatística

Para a comparação das respostas oferecidas pelas equações de chuvas intensas determinadas pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell com as equações de chuvas intensas determinadas por Silva et al (2002) foi empregado o teste F de variância, detalhadamente apresentado e discutido por Levine et al. (2005). A equação (06) define a estatística do teste F para a equivalência entre duas variâncias.

$$F_{\text{est}} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (06)$$

Na equação (06), S_1^2 e S_2^2 representam as variâncias da primeira e segunda amostras, respectivamente. A primeira amostra é definida como a amostra que possui a maior variância dentre as amostras objeto de comparação (Levine et al., 2005). Neste estudo, as amostras foram formadas por intensidades de precipitações estimadas pelas diferentes equações de chuvas intensas, para um mesmo valor de duração (t) e período de retorno (T), no grupo de estações pluviométricas consideradas.

Para um determinado nível de significância, a hipótese nula de igualdade entre variâncias de duas amostras é conformada pela equação (07). A hipótese alternativa de que as variâncias para as duas populações não são iguais, por sua vez, é definida pela equação (08). A hipótese nula será rejeitada se a estatística do teste (F_{est}) for maior do que o valor crítico da distribuição F ($F_{\text{crítico}}$). Portanto, a regra de decisão é estabelecida pela equação (09). Os valores críticos da distribuição F são tabelados e dependentes dos graus de liberdade nas duas amostras objeto de comparação e do nível de significância adotado.

$$H_0: S_1^2 = S_2^2 \quad (07)$$

$$H_1: S_1^2 \neq S_2^2 \quad (08)$$

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ se } F_{\text{est}} > F_{\text{crítico}} \quad (09)$$

Como no presente trabalho foram conduzidas análises pareadas a aplicação do teste F exigiu, adicionalmente, que a probabilidade de F_{est} ser menor que o $F_{\text{crítico}}$ fosse maior que o nível de significância adotado. Neste trabalho, assumiu-se para o nível de significância de 5%.

A comparação das respostas de pares de equações de chuvas intensas foi realizada para grupos de intensidades pluviométricas associadas aos períodos de retorno de 2, 10, 20, 50 e 100 anos e durações de 5, 30, 240, 720 e 1440 minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 reúne as equações de chuvas intensas estabelecidas com auxílio dos métodos de Chow-Gumbel e de Bell. A Figura 1, por sua vez, apresenta as intensidades pluviométricas estimadas para diferentes períodos de retorno e durações na estação de Cândido Sales, consideradas as equações de chuvas intensas estabelecidas por Silva et al. (2000) (Tabela 1) e com auxílio dos métodos de Chow-Gumbel e de Bell (Tabela 3). Gráficos semelhantes foram produzidos para as demais estações pluviométricas objeto de análise.

Tabela 3 - Equações de chuvas intensas estabelecidas para o estado da Bahia a partir dos métodos expeditos de Chow-Gumbel e de Bell

Estação	Método expedito de determinação das equações de chuvas intensas	
	Chow-Gumbel	Bell
Argoim	$i = \frac{594,163 \cdot T^{0,263}}{(t + 2,693)^{1,714}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 27,43$
Brotas de Macaúbas	$i = \frac{533,252 \cdot T^{0,182}}{(t + 2,482)^{1,706}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 30,88$
Cândido Sales	$i = \frac{619,594 \cdot T^{0,158}}{(t + 2,456)^{1,704}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 37,50$
Carinhanha	$i = \frac{594,036 \cdot T^{0,199}}{(t + 2,321)^{1,7}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 35,01$
Fazenda Porto Alegre	$i = \frac{714,138 \cdot T^{0,193}}{(t + 2,436)^{1,704}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 41,17$
Fazenda Refrigério	$i = \frac{496,594 \cdot T^{0,179}}{(t + 2,456)^{1,704}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 29,35$
Formosa do Rio Preto	$i = \frac{700,575 \cdot T^{0,175}}{(t + 2,469)^{1,705}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 41,63$
Ipiaú	$i = \frac{637,106 \cdot T^{0,210}}{(t + 2,428)^{1,706}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 35,63$
Itamaraju	$i = \frac{570,618 \cdot T^{0,161}}{(t + 2,445)^{1,703}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 34,58$
Itapepi	$i = \frac{629,644 \cdot T^{0,198}}{(t + 2,527)^{1,710}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 34,40$
Ituberá	$i = \frac{848,135 \cdot T^{0,201}}{(t + 2,545)^{1,710}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 46,35$
Juazeiro	$i = \frac{494,721 \cdot T^{0,206}}{(t + 2,535)^{1,709}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 26,82$
Medeiros Neto	$i = \frac{619,63 \cdot T^{0,173}}{(t + 2,461)^{1,704}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 37,09$
Ponte Serafim	$i = \frac{601,039 \cdot T^{0,168}}{(t + 2,465)^{1,704}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 36,10$
Santa Cruz da Vitória	$i = \frac{719,832 \cdot T^{0,222}}{(t + 2,507)^{1,709}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 38,29$
Santa Maria da Vitória	$i = \frac{667,649 \cdot T^{0,201}}{(t + 2,40)^{1,703}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 38,17$
Teodoro Sanpaio	$i = \frac{720,734 \cdot T^{0,212}}{(t + 2,457)^{1,706}}$	$h_{t,T} = (0,31 \cdot \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot t^{0,31} - 0,39) \cdot 39,49$

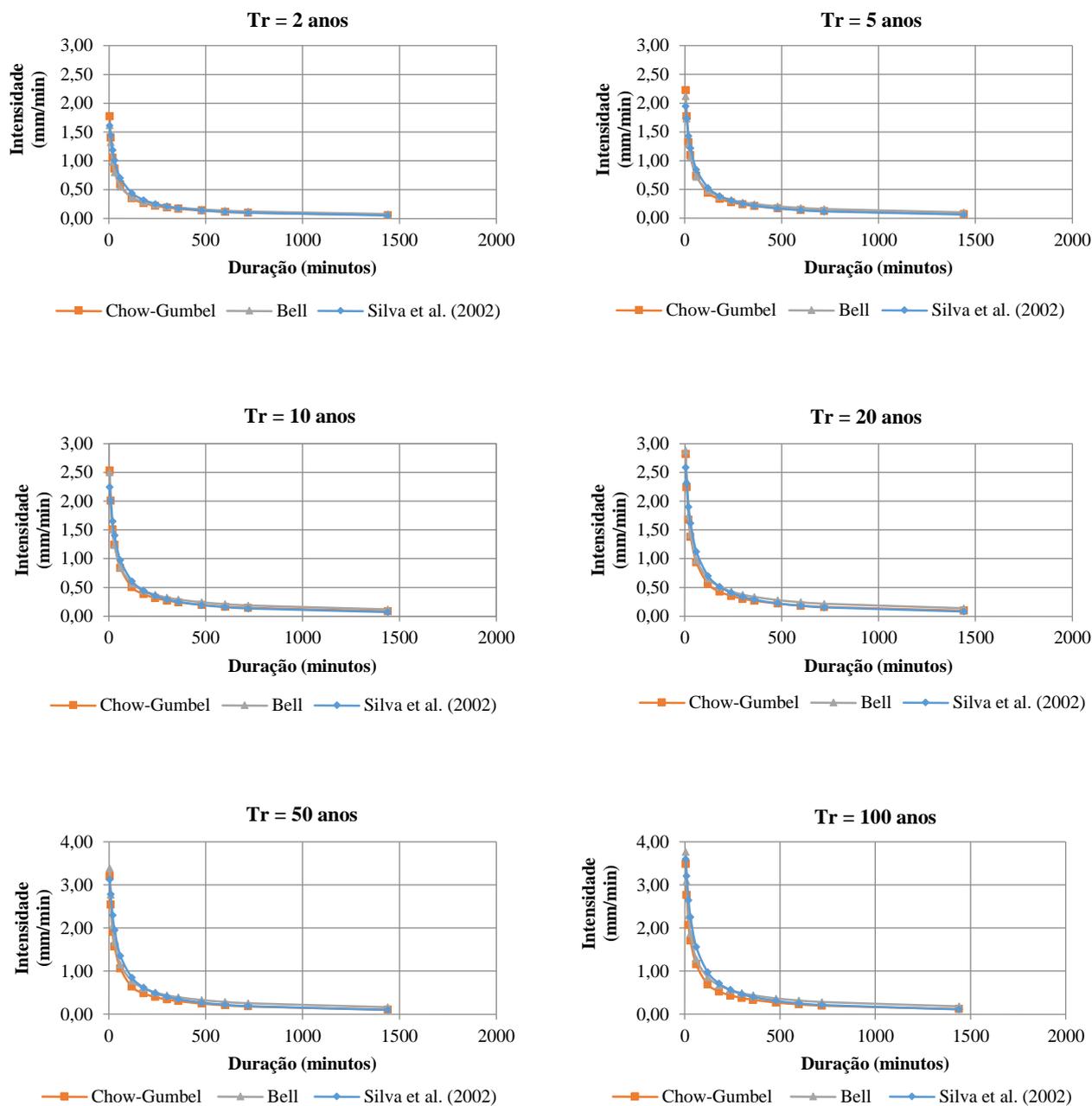


Figura 1 - Intensidades pluviométricas associadas à estação de Cândido Sales

As equações de chuvas intensas associadas ao método de Chow-Gumbel foram obtidas a partir da minimização da função objetivo estabelecida pela expressão (02). Com auxílio da PNL, a função objetivo (equação (02)) foi minimizada a partir da variação dos parâmetros a , b , c e k . Ainda que o procedimento metodológico tenha estabelecido um mínimo de 10 (dez) repetições para o procedimento de minimização,

os ótimos globais foram usualmente identificados nas 4 (quatro) primeiras tentativas.

A simples inspeção da Figura 1 – e das suas similares para as demais estações pluviométricas – permitiu observar que as maiores diferenças entre as intensidades pluviométricas foram observadas para precipitações de pequenas durações e associadas aos

menores períodos de retorno. Nestas condições de duração e frequência, os métodos expeditos produziram os maiores valores de intensidades pluviométricas nas estações de Argoim, Cândido Sales, Fazenda Porto Alegre, Formosa do Rio Preto, Ipiaú, Itapepi, Ituberá, Medeiros Neto, Ponte Serafim, Santa Cruz da Vitória, Santa Maria da Vitória e Teodoro Sampaio, subestimando intensidades apenas nas estações de Brotas de Macaúbas, Carinhanha, Fazenda Refrigário, Itamaraju e Juazeiro. É relevante observar que intensidades pluviométricas mais elevadas produzem estimativas de vazão mais conservadoras para a conformação de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações.

A análise estatística empregada para comparação das respostas de pares de equações de chuvas intensas, conduzida com auxílio do teste F de Variância, foi

realizada para períodos de retorno de 2, 10, 20, 50 e 100 anos e durações de 5, 30, 240, 720 e 1440 minutos. Nas Tabelas de 4 a 7 são sumarizados os resultados decorrentes da aplicação do Teste F de Variância para comparação pareada das respostas produzidas pelas equações propostas por Silva et al. (2000) e equações estabelecidas a partir dos métodos de Chow-Gumbel e Bell. Nas referidas tabelas, F_{est} representa o parâmetro apropriado quando do emprego do teste F de Variância, cujo valor deve ser menor que o $F_{crítico}$. É relevante observar que, na análise pareada, além da necessidade de que F_{est} seja menor que o $F_{crítico}$, a probabilidade de F_{est} ser menor que o $F_{crítico}$ ($P(F_{est} \leq F_{crítico})$) deve ser maior que o nível de significância adotado (5%) para que se possa indicar equivalência. As células em destaque nas tabelas indicam as combinações de alternativas de determinação de chuvas intensas que se apresentaram equivalentes.

Tabela 4 - Resultado da aplicação do teste F de variância para intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 10 anos

Duração (minutos)	Métodos pareados	F_{est}^*	$F_{crítico}^{**}$	$P(F_{est} \leq F_{crítico})$
5	Gumbel – Bell	1,65	2,33	0,16
	Bell – Silva et al. (2000)	2,11	2,33	0,07
	Gumbel – Silva et al. (2000)	3,49	2,33	0,008
30	Gumbel – Bell	1,66	2,33	0,16
	Bell – Silva et al. (2000)	1,28	2,33	0,31
	Gumbel – Silva et al. (2000)	2,13	2,33	0,07
240	Gumbel – Bell	1,18	2,33	0,37
	Bell – Silva et al. (2000)	1,58	2,33	0,18
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,34	2,33	0,28
720	Gumbel – Bell	1,01	2,33	0,49
	Bell – Silva et al. (2000)	1,27	2,33	0,32
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,26	2,33	0,33
1440	Gumbel – Bell	1,22	2,33	0,35
	Bell – Silva et al. (2000)	1,21	2,33	0,35
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,48	2,33	0,22

Notas: * F_{est} : estatística do teste F para a equivalência entre duas variâncias, apropriado pela equação (6). ** $F_{crítico}$: valor crítico da distribuição F utilizado como limite para rejeição da hipótese nula.

Tabela 5 - Resultado da aplicação do teste F de variância para intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 20 anos

Duração (minutos)	Métodos pareados	F_{est}^*	$F_{crítico}^{**}$	$P (F_{est} \leq F_{crítico})$
5	Gumbel – Bell	1,56	2,33	0,19
	Bell – Silva et al. (2000)	2,03	2,33	0,08
	Gumbel – Silva et al. (2000)	3,17	2,33	0,01
30	Gumbel – Bell	1,83	2,33	0,12
	Bell – Silva et al. (2000)	1,05	2,33	0,46
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,74	2,33	0,14
240	Gumbel – Bell	1,33	2,33	0,29
	Bell – Silva et al. (2000)	1,82	2,33	0,12
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,37	2,33	0,27
720	Gumbel – Bell	1,05	2,33	0,46
	Bell – Silva et al. (2000)	1,41	2,33	0,25
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,49	2,33	0,22
1440	Gumbel – Bell	1,08	2,33	0,44
	Bell – Silva et al. (2000)	1,39	2,33	0,26
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,51	2,33	0,21

Notas: * F_{est} : estatística do teste F para a equivalência entre duas variâncias, apropriado pela equação (6). ** $F_{crítico}$: valor crítico da distribuição F utilizado como limite para rejeição da hipótese nula.

Tabela 6 - Resultado da aplicação do teste F de variância para intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 50 anos

Duração (min)	Métodos pareados	F_{est}^*	$F_{crítico}^{**}$	$P (F_{est} \leq F_{crítico})$
5	Gumbel – Bell	2,15	2,33	0,07
	Bell – Silva et al. (2000)	1,15	2,33	0,39
	Gumbel – Silva et al. (2000)	2,47	2,33	0,04
30	Gumbel – Bell	2,10	2,33	0,07
	Bell – Silva et al. (2000)	1,64	2,33	0,17
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,29	2,33	0,31
240	Gumbel – Bell	1,49	2,33	0,22
	Bell – Silva et al. (2000)	2,41	2,33	0,04
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,61	2,33	0,17
720	Gumbel – Bell	1,21	2,33	0,36
	Bell – Silva et al. (2000)	1,88	2,33	0,11
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,56	2,33	0,19
1440	Gumbel – Bell	1,03	2,33	0,48
	Bell – Silva et al. (2000)	1,59	2,33	0,18
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,54	2,33	0,20

Notas: * F_{est} : estatística do teste F para a equivalência entre duas variâncias, apropriado pela equação (6). ** $F_{crítico}$: valor crítico da distribuição F utilizado como limite para rejeição da hipótese nula.

Tabela 7 - Resultado da aplicação do teste F de variância para intensidades pluviométricas associadas ao período de retorno de 100 anos

Duração (min)	Métodos pareados	F _{est} [*]	F _{crítico} ^{**}	P (F _{est} ≤ F _{crítico})
5	Gumbel – Bell	2,32	2,33	0,05
	Bell – Silva et al. (2000)	1,20	2,33	0,36
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,93	2,33	0,10
30	Gumbel – Bell	2,27	2,33	0,06
	Bell – Silva et al. (2000)	2,31	2,33	0,05
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,02	2,33	0,49
240	Gumbel – Bell	1,61	2,33	0,17
	Bell – Silva et al. (2000)	3,07	2,33	0,02
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,90	2,33	0,10
720	Gumbel – Bell	1,30	2,33	0,30
	Bell – Silva et al. (2000)	2,32	2,33	0,05
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,78	2,33	0,13
1440	Gumbel – Bell	1,11	2,33	0,42
	Bell – Silva et al. (2000)	1,93	2,33	0,10
	Gumbel – Silva et al. (2000)	1,74	2,33	0,14

Notas: *F_{est}: estatística do teste F para a equivalência entre duas variâncias, apropriado pela equação (6). **F_{crítico}: valor crítico da distribuição F utilizado como limite para rejeição da hipótese nula.

A inspeção das tabelas indicou que as intensidades pluviométricas estimadas pelos métodos expeditos de determinação de chuvas intensas apresentaram-se equivalentes, considerando o nível de significância adotado neste estudo (5%), independentemente da duração ou período de retorno considerados.

A equivalência entre as intensidades pluviométricas estimadas a partir das equações definidas pelo método de Chow-Gumbel e aquelas apropriadas com auxílio das equações de chuvas intensas estabelecidas por Silva et al. (2000) foi observada para durações superiores a 30 minutos e períodos de retorno maiores que 10 anos. É relevante observar que o método de Chow-Gumbel é conduzido com auxílio de coeficientes de conversão entre chuvas de diferentes durações (Tabela 01), coeficientes que, a princípio, devem ser localmente determinados. No entanto, diferentes estudos têm demonstrado que os referidos coeficientes de conversão se apresentam similares em diferentes partes de mundo (Reich, 1963; Bell, 1969; Genovez & Zuffo, 2000). Bell (1969) observa, adicionalmente, que os coeficientes de conversão entre chuvas de diferentes intensidades independem do período de retorno, variável à qual estão associados erros médios que variam de 5 a 8%, da mesma ordem de grandeza daqueles decorrentes do processo de amostragem das chuvas.

A equivalência entre as intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell e aquelas apropriadas com auxílio das equações de chuvas intensas estabelecidas por Silva et al. (2000) também foi observada para durações superiores a 30 minutos e períodos de retorno maiores que 10 anos. As únicas exceções a este padrão de resposta foram observadas para duração de 240 minutos e períodos de retorno de 50 e 100 anos.

Deve-se observar que, para a condução dos métodos expeditos de conformação de equações de chuvas intensas, foram considerados períodos de retorno entre 2 e 100 anos e coeficientes de desagregação de chuvas para durações específicas, cujos valores variaram de 5 a 1440 minutos. Entende-se que estas faixas de variação de frequência e duração estabelecem os limites para aplicação das equações definidas com auxílio dos métodos expeditos.

CONCLUSÕES

A inexistência de séries de precipitações pluviométricas de longo prazo confiáveis obtidas a partir de pluviógrafos para grande parte das regiões brasileiras e de muitos países demonstra a importância de estudos relacionados com ajuste de equações de chuvas intensas a séries obtidas a partir de pluviômetros.

Os métodos expeditos permitem a conformação de equações de chuvas intensas a partir de séries históricas de precipitações máximas diárias, séries estas que são estabelecidas a partir de monitoramentos sistemáticos de precipitações conduzidos com auxílio de pluviômetros. Na área de estudo considerada neste trabalho e a partir da adoção de um nível de significância de 5%, as intensidades pluviométricas apropriadas com auxílio dos métodos de Bell e Chow-Gumbel apresentaram-se equivalentes, independentemente da duração e do período de retorno considerados.

Ao nível de significância de 5%, as intensidades pluviométricas apropriadas com auxílio do método de Chow-Gumbel e com as equações produzidas por Silva et al. (2000) apresentaram-se equivalentes para durações superiores a 30 minutos e períodos de retorno maiores que 10 anos.

A equivalência entre as intensidades estimadas pelo método de Bell e a partir das equações produzidas por Silva et al. (2000) também foi observada para durações superiores a 30 minutos e períodos de retorno acima de 10 anos, excetuando-se a duração de 240 minutos e períodos de retorno de 50 e 100 anos.

As equivalências observadas neste estudo entre estimativas de intensidades de precipitações com equações intensidade-duração-frequência ajustadas a séries obtidas a partir de registros pluviográficos e pluviométricos de postos localizados na região Sul da Bahia e o fato das densidades de pluviômetros ser muito superiores às de pluviógrafos na quase totalidade das regiões do planeta, devido aos menores custos de operação e manutenção, conclui-se pela grande importância de realização de comparações similares às realizadas no presente estudo para outras regiões brasileiras e mundiais visando estimativas baseadas em séries de alturas pluviométricas diárias, que são, geralmente mais longas do que as séries pluviográficas.

REFERÊNCIAS

- ADADIN, N. A. Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationship in the Mujib Basin in Jordan. **Journal of Applied Sciences**, v. 5, p. 1777-1784, 2005.
- ALILA, Y. Regional rainfall depth duration frequency equations for Canada. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1767-1778, 2000.
- BELL, Frederick C. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 95, n. HY1, p. 311-327, 1969.
- CAMPOS, A. R.; SANTOS, G. G.; SILVA, J. B. L. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 3, p.488-498, 2014.
- CARDOSO, C. O.; BERTOL, I.; SOCCOL, O. J.; SAMPAIO, C. A. D. P. Generation of intensity duration frequency curves and intensity temporal variability pattern of intense rainfall for Lages/SC. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 2, p. 274-283, 2014.
- CETESB. **Drenagem Urbana – Manual de Projeto**. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.
- CHEN, C. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 109, n. 12, p. 1603-1621, 1983.
- 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**, Campina Grande, v.6, n.1, p.76-82, 2002.
- FECHINE SOBRINHO, V.; RODRIGUES, J. O.; MENDONÇA, L. A. R.. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p.727-734, 2014.
- GENOVEZ, A. M. & ZUFFO, A. C. Chuvas intensas no Estado de São Paulo: Estudos existentes e análise comparativa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 45-58, 2000.
- KOTHYARI, U. C. & GARDE, R. J. Rainfall intensity-duration-frequency formula for India. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 118, n. 2, p. 323-336, 1992.
- LEVINE, D.M.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T.C.; BERENSON, M.L. **Estatística – Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2005.
- OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; WEHR, T. R. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 1, p.13-18, 2005.
- REICH, B. M. Short-duration rainfall-intensity estimates and other design aids for regions of sparse data. **Journal of Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 3-28, 1963.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998.
- SANTOS, G. G.; FIGUEIREDO, C. C.; OLIVEIRA, L. F. C. Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p.899-905, 2009.
- SILVA, D.D.; FILHO, R.R.G.; 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.
- SINGH, V. P., & ZHANG, L. IDF curves using the Frank Archimedean copula. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 6, p. 651-662, 2007.