

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Jamilton Gonçalves Feitosa Junior

**Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas
para seis municípios da Região Sul do Brasil**

Toledo-PR

2018

Jamilton Gonçalves Feitosa Junior

**Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas
para seis municípios da Região Sul do Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Alessandro Pansera

Toledo-PR

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 128

Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para seis municípios da Região Sul do Brasil

por

Jamilton Gonçalves Feitosa Junior

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 09:10 h do dia **7 de junho de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Benedito Martins Gomes
(UNIOESTE – Cascavel)

Profa. MSc. Patricia Cristina Steffen
(UTFPR – Toledo)

Prof. Dr. Wagner Alessandro Pansera
(UTFPR – Toledo)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natercio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

*Este trabalho é dedicado a todos aqueles
que nunca deixaram de acreditar.*

Agradecimentos

Àquele que tem me dado saúde e sabedoria durante todos esses anos.

À minha família que tem me apoiado desde sempre em todas as minhas aventuras e desventuras em série.

Aos meus amigos de infância e aos novos que fizeram toda a diferença na caminhada até aqui.

Aos professores e técnicos que fazem tudo o que podem com tudo o que têm, e que além de ajudarem em diversas situações também proporcionaram ótimas conversas e experiências. Aos demais que mostraram a necessidade de refletir sobre o que esperar da sociedade e o que almejar para fazer a diferença.

Ao meu supervisor de estágio pela paciência diante de todos os meus questionamentos e acessos de fala.

Ao meu orientar pela paciência e dedicação ao elucidar todas as minhas (quase infinitas) dúvidas.

E a todos os demais que de alguma forma ajudaram a construir o que sou, além de mostrar a necessidade de continuar sempre aberto a compreensão e aprendizado.

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis.”

(Maria Julia Paes de Silva)

Resumo

A hidrologia representa um importante papel ao estudar os eventos hidrológicos empregados no dimensionamento de obras de engenharia. Para locais em que são escassas as informações sobre o comportamento das chuvas utilizadas em projetos, comumente torna-se necessário realizar extrapolações a partir de dados disponíveis em localidades próximas, seguindo as metodologias definidas nas bibliografias e normas específicas. O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de diferentes estimadores de parâmetros da distribuição de probabilidade de valores extremos (GEV) frente a distribuição Gumbel, mais comumente empregada. Além disso, também comparou-se neste trabalho a diferença existente na aplicação dos coeficientes de desagregação de chuvas diárias propostos pela CETESB (1986) e os coeficientes recentemente apresentados por Basso et al. (2016). Para a estimação dos quantis de probabilidade empregando as metodologias estimadoras citadas, utilizou-se as séries históricas de precipitações diárias máximas anuais de 6 municípios localizados na Região Sul do Brasil. Como resultado, não identificou-se diferenças significativas nas estimativas para tempos de recorrência de até 100 anos nas estações com mais de 65 anos de registros pluviométricos. Já como resultado da aplicação de diferentes coeficientes de desagregação, constatou-se que os coeficientes propostos por Basso et al. (2016) geram intensidades de chuva superiores aos da CETESB (1986). Com exceção de Iraí, todos os demais municípios, aplicando ambas as metodologias de desagregação, apresentaram intensidades superiores aos definidos pela NBR 10844 para tempos de retorno iguais ou superiores a 5 anos. Além disso, observou-se que dividir a equação IDF em duas partes resulta em menores erros de estimativa para a fração válida para chuvas com mais de 60 minutos de duração.

Palavras-chave: desagregação de chuva. chuvas de projeto. chuvas máximas. GEV. Gumbel.

Abstract

Hydrology plays an important role in studying the hydrological events used in the design of engineering works. For locations where information on rainfall behavior is not available, it is often necessary to extrapolate from data available in nearby localities, following the methodologies defined in the bibliographies and specific standards. The present work had as objective to study the behavior of different estimators of parameters of the generalized extreme value distribution of probability (GEV) against the Gumbel distribution, more commonly used. In addition, the present difference in the application of daily rainfall breakdown coefficients proposed by CETESB (1986) and the coefficients recently presented by Basso et al. (2016). For the estimation of probability quantiles using the aforementioned estimating methodologies, the annual maximum daily rainfall series of 6 cities located in the Southern Region of Brazil were used. As a result, significant differences in estimates for recurrence times of up to 100 years were not identified in stations with more than 65 years of rainfall records. As a result of the application of different coefficients of disaggregation, it was verified that the coefficients proposed by Basso et al. (2016) generate higher rainfall intensities than CETESB (1986). With the exception of Iraí, all other municipalities, applying both methodologies of disaggregation, presented intensities higher than those defined by NBR 10844 for times of return equal or superior to 5 years. In addition, it has been observed that dividing the IDF equation into two parts results in smaller estimation errors for the fraction valid for rains over 60 minutes in duration.

Keywords: rain disaggregation. project rains. maximum rainfall. GEV. Gumbel.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comportamento das três formas da distribuição GEV.	19
Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.	27
Figura 3 – Disposição das cidades estudadas ao longo da Região Sul do Brasil.	29
Figura 4 – Mapa de isozonas elaborado por Torrico (1974).	30
Figura 5 – Mapa das novas isozonas propostas por Basso et al. (2016).	30
Figura 6 – Histograma de frequência das precipitações máximas diárias amostradas.	35
Figura 7 – Boxplot das precipitações máximas das cidades amostradas.	35
Figura 8 – Representação das distribuições teóricas máximas para as cidades amostradas.	38

Lista de tabelas

Tabela 1 – Coeficientes de desagregação para diferentes durações de chuva apresentados pela CETESB (1986).	23
Tabela 2 – Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas propostas por Torrico (1974).	24
Tabela 3 – Tempo de retorno para sistemas urbanos.	25
Tabela 4 – Estações pluviométricas adotadas.	28
Tabela 5 – Isozonas das estações pluviométricas adotadas conforme os mapas de Torrico (1974) e Basso et al. (2016).	31
Tabela 6 – Coeficientes de desagregação das relações (r_{min24h}) entre as precipitações das novas isozonas para o período de recorrência de dez anos dos municípios escolhidos.	31
Tabela 7 – Análise estatística inicial da série de chuvas diárias máximas anuais utilizando medidas resumo.	34
Tabela 8 – Parâmetros da GEV e teste de Kolmogorov-Smirnov para as estações estudadas.	37
Tabela 9 – Diferença percentual dos valores de precipitações diárias estimadas pela distribuição GEV em relação a distribuição Gumbel.	39
Tabela 10 – Coeficientes das equações IDF obtido a partir da aplicação do método das relações de intensidade de CETESB (1986) e Basso et al. (2016).	41
Tabela 11 – Intensidades de precipitação em mm/h para uma chuva de 5 minutos de duração.	42
Tabela 12 – Coeficientes de desagregação para diferentes durações obtidos por Back, Sonego e Pola (2015) para Chapecó/SC comparados com os propostos por CETESB (1986).	44

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (SP)
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
EPE	Erro padrão de estimativa
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i>
IDF	Relação de intensidade-duração-frequência
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MLH	Método dos momentos-LH
MML	Método dos momentos-L
MOM	Método dos momentos
MVG	Método da máxima verossimilhança generalizada
MVS	Método da máxima verossimilhança
NBR	Norma Brasileira
TR	Tempo de retorno
VR	Valores extremos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	12
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Estudos hidrológicos de precipitações intensas	15
2.1.1	Eventos hidrológicos e dados pluviométricos	15
2.1.2	Chuvas intensas	16
2.2	Modelagem estocástica de precipitações	17
2.2.1	Distribuição Generalizada de Valores Extremos - GEV	18
2.2.2	Distribuição Gumbel	19
2.2.3	Estimativa de parâmetros	20
2.3	Desagregação de chuvas	22
2.3.1	Tempos de retorno	25
2.3.2	Relação 24 horas/1 dia	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Obtenção dos dados pluviométricos	28
3.2	Processamento dos dados amostrais	31
3.3	Estimação de parâmetros e desagregação de chuvas	32
3.4	Equações de chuvas intensas	32
4	RESULTADOS	34
4.1	Estatística descritiva e estimativa de parâmetros	34
4.1.1	Teste de aderência	36
4.1.2	Comparação Gumbel-GEV	38
4.2	Resultados da desagregação	40
4.2.1	Parâmetros das equações IDF	40
4.2.2	Comparação com a NBR 10844	41
5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47

1 Introdução

A hidrologia representa um papel fundamental nos estudos relacionados ao dimensionamento racional de obras como galerias pluviais, sistemas de drenagem urbana e vertedouros de barragem, buscando uma solução que relacione os estragos causados pela falta de capacidade de atender a demanda dos escoamentos e o custo total das obras (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). Assim, torna-se necessário assumir um determinado risco de falha para que a obra se torne economicamente viável (PINTO et al., 1976).

Definida a recorrência do evento de interesse para o projeto de engenharia, torna-se necessário estimar a sua magnitude através de um modelo distributivo adequado. A metodologia mais empregada para a análise de frequência de eventos hidrológicos extremos é a distribuição Gumbel (máximos), que constitui uma das três formas assintóticas da Distribuição de Valores Extremos (GEV) (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Superada a barreira de escolha da distribuição de probabilidade mais adequada, prossegue-se com a determinação das relações entre a intensidade, duração e frequência. Como afirmam Back e Pola (2016), quando não se dispõe de longas séries pluviográficas, torna-se necessário adotar outras medidas para obter as chuvas de projeto com diferentes durações a partir das chuvas intensas diárias. No Brasil, a técnica que tem sido amplamente utilizada adota as relações de durações propostas pela CETESB (1986).

Para aplicar um modelo distributivo adequado, e posteriormente o método das relações de durações, utilizam-se as séries históricas de precipitações obtidas a partir de pluviômetros, que são aparelhos mais facilmente encontrados por possuírem instalação e análise mais simples quando comparados com os pluviógrafos (SOUZA, 2014; DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008). Vale ressaltar que os pluviógrafos são capazes de medir a intensidade das precipitações ao longo do tempo, diferentemente dos pluviômetros que medem a lamina total precipitada no intervalo de um dia.

Em meio a este panorama são encontrados poucos trabalhos voltados para a análise do emprego de diferentes estimadores de parâmetros da GEV aplicados às chuvas intensas, e também trabalhos comparando os coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986) e por Basso et al. (2016).

1.1 Justificativa

O processo de desenvolvimento de uma dada região ou país depende das informações disponíveis sobre os recursos naturais pertencentes aquela região, sendo os recursos hídricos elementos vitais (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). Diante disso, torna-se necessário conhecer o comportamento e magnitude dos eventos hidrológicos recorrentes.

tes em uma determinada bacia de interesse.

O primeiro estudo sobre chuvas intensas publicado no Brasil ocorreu em 1957 pelo então engenheiro e hidrólogo Otto Pfafstetter, do Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS). Na época, o trabalho intitulado “Chuvas Intensas no Brasil” reuniu os dados de 98 postos pluviográficos disponíveis no Brasil, a partir dos quais foram geradas diversas relações de chuvas intensas, que podem ser encontradas em CETESB (1986).

Atualmente as relações de intensidade, duração e frequência são comumente expressas pela Equação 1.1:

$$i_{chuva} = \frac{K \cdot TR^a}{(t + b)^c} \quad (1.1)$$

em que:

i_{chuva} = a intensidade de chuva (mm/h);

TR = o período de retorno (anos);

t = a duração da chuva (min);

K, a, b, c = constantes determinadas a partir de dados históricos de precipitações de cada localidade.

Diante da necessidade realizar projetos de engenharia em locais sem dados pluviográficos, Torrico (1974) determinou coeficientes de desagregação de chuvas diárias para 8 regiões microclimáticas denominadas de isozonas, que permitiram espacializar as relações de intensidade-duração-frequência (IDF) dos mesmos postos estudados por Pfafstetter (1957).

Esse feito expandiu o alcance dos dados inicialmente estudados por Pfafstetter (1957) e reduziu a necessidade de extrapolações em projetos de dimensionamento distantes das estações com séries históricas de pluviógrafos. Logo, os coeficientes de desagregação permitem a obtenção das intensidades de chuvas para intervalos menores que 24 horas através de séries históricas de precipitações obtidas a partir de pluviômetros instalados próximos às localidades de interesse.

Algum tempo depois, através das estações pluviográficas com equações de IDF até então definidas, e prezando pelas equações mais recentes, Basso et al. (2016) obtiveram novos coeficientes de desagregação de chuvas intensas, adotando como critério um período de retorno ou tempo de retorno (TR) de 10 anos, seguindo CETESB (1986) e Tucci (1993), uma vez que é o período de retorno mais empregado no dimensionamento de estruturas de macrodrenagem urbana. Ainda que, conforme Tucci (1993), não exista diferença significativa nos coeficientes de desagregação para diferentes TRs.

As novas relações obtidas por Basso et al. (2016) para cada posto foram espacializadas de forma a demonstrar o comportamento regional, o que permitiu comparação com as isozonas de Torrico (1974). Dessa análise, Basso et al. (2016) constataram que para estruturas dimensionadas com os coeficientes obtidos por Torrico (1974) para chuvas com duração de 1 hora, as estruturas obtidas estariam superdimensionadas nas regiões Centro-Oeste e Norte, e subdimensionadas nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste.

Diante das conclusões do estudo de Basso et al. (2016), justificou-se a realização deste trabalho, adotando como enfoque a aplicação dos coeficientes para as chuvas intensas de seis municípios da Região Sul do Brasil.

1.1.1 Objetivo geral

Obter a chuva de projeto para seis municípios da Região Sul do Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

O presente trabalho teve como objetivos:

- comparar os quantis estimados pelos modelos distributivos Gumbel e GEV;
- comparar os coeficientes de desagregação obtidos por CETESB (1986) e Basso et al. (2016).

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Estudos hidrológicos de precipitações intensas

Nos estudos hidrológicos frequentemente são necessárias previsões de eventos superiores aos até então observados. Essas previsões se definem no estudo dos dados hidrológicos até então coletados com a finalidade de se definir as probabilidades de ocorrências futuras dos eventos de interesse. Geralmente, o período de retorno representa a frequência de observação de um determinado evento hidrológico associado a um risco de falha. Logo, é possível calcular a magnitude de um evento para um respectivo tempo de retorno, desde que existam informações disponíveis (PANSERA, 2013).

Os eventos extremos têm ocorrência inferior à dos eventos moderados. O intuito da análise de frequência de dados hidrológicos é relacionar a magnitude de eventos extremos com a sua frequência de ocorrência, utilizando para isso uma distribuição de probabilidade adequada. Os dados hidrológicos estudados são considerados como sendo independentes e identicamente distribuídos e o sistema hidrológico que os gera é considerado estocástico, ou seja, aleatório (QUEIROZ, 2002). As definições para chuvas intensas, suas metodologias de estimação e também algumas das metodologias de desagregação são apresentadas ao longo deste capítulo.

2.1.1 Eventos hidrológicos e dados pluviométricos

Como afirmam Garcez e Alvarez (1988) e Maggi (2006), as características topográficas, geológicas, geomorfológicas, pedológicas e térmicas, bem como o tipo de cobertura da bacia constituem elementos substanciais no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, sendo a precipitação o principal mecanismo de entrada no balanço hidrológico, e a evaporação a forma direta do retorno da água para a atmosfera com conseqüente redução do escoamento superficial. Dessa forma, cada local de estudo possui uma identidade hidrológica, resultando assim uma análise e modelagem diferentes.

Para este estudo, teve-se interesse especial pelas chuvas intensas, das quais são obtidas as relações de intensidade-duração-frequência (IDF). Essas relações são de grande interesse para trabalhos de hidrologia, uma vez que são frequentemente empregadas na estimativa das vazões de projeto para o dimensionamento de obras de engenharia como: vertedouros de barragens, bueiros, bocas de lobo, terraços, canais de drenagem, estruturas de controle de cheias, pontes, entre outros (BACK, 2006; PANSERA, 2013).

Já sobre a obtenção dos dados hidrológicos, Souza (2014) coloca que, no Brasil, a quantidade de dados existentes obtidos a partir de pluviógrafos é bem inferior quando

comparada aos dados fornecidos por pluviômetros, já que a densidade espacial destes últimos é bem maior, devido a apresentarem mais fácil instalação e processamento de dados. Logo, tem-se que os dados pluviométricos estão disponíveis, na maioria dos casos, apenas para as principais cidades do país.

Tal escassez de dados pluviográficos obriga, na maioria das vezes, os profissionais de engenharia a lançarem mão de metodologias de desagregação de chuvas para obterem as chuvas de projeto dos locais de interesse.

2.1.2 Chuvas intensas

Para Garcez e Alvarez (1988), chuvas intensas são o conjunto de chuvas originadas a partir de uma mesma perturbação meteorológica, cuja intensidade ultrapasse um determinado valor de chuva (chuva mínima). A duração desses eventos pode variar de alguns minutos até dezenas de horas, dado que a área atingida pode variar de alguns quilômetros até milhares de quilômetros quadrados.

Cabe ressaltar, que para o dimensionamento e estudo de redes pluviais e erosão do solo, tem-se interesse especial pelas intensidades máximas em intervalos curtos, de 5 minutos a 1 hora. Tucci (1993) define chuva intensa como uma ocorrência extrema, com duração, distribuição crítica no tempo e espaço para uma dada área ou bacia hidrográfica. Esse evento pode desencadear, por exemplo, fenômenos como a erosão do solo e inundações, e ainda agir sobre obras hidráulicas. O mesmo autor ainda ressalta que, além de caracterizar um evento de chuva intensa, é importante conhecer a sua distribuição temporal (hietograma) e espacial para a determinação da vazão na bacia.

Garcez e Alvarez (1988) afirmam que para o dimensionamento racional de obras como galerias pluviais, sistemas de drenagem urbana e vertedouros de barragem, busca-se uma solução que relacione os estragos causados pela falta de capacidade de atender a demanda do escoamento e o custo total da obra. Dessa maneira, torna-se necessário assumir um determinado risco de falha para que a obra se torne economicamente viável (PINTO et al., 1976).

Pinto et al. (1976) ressaltam que ao colocar em um gráfico as intensidades de precipitações contra suas durações, é possível observar que, quanto menor a duração considerada, maior a intensidade média. Vale dizer que a duração não é obrigatoriamente a total do episódio pluvial e nem sempre a medida a partir do seu início. Dessa forma, a máxima intensidade média a ser observada dentro de uma mesma precipitação pluvial irá variar inversamente em relação a amplitude de tempo em que a mesma ocorreu.

2.2 Modelagem estocástica de precipitações

A necessidade de estimar eventos futuros com uma determinada segurança, implica na busca por modelos capazes de representar de forma adequada uma série hidrológica histórica. Tal busca é objeto de estudo e aperfeiçoamento constantes dentro do ramo da hidrologia estocástica (PANSERA, 2013).

Existem diversos modelos matemáticos capazes de descrever os fenômenos hidrológicos através do ajuste dos dados observados a funções que auxiliem na previsão do comportamento dos fenômenos de interesse. Em meio a isso, são encontradas várias funções de distribuição de probabilidade empregadas no estudo de variáveis aleatórias contínuas, como a distribuição uniforme, normal, log-normal, gama, valores extremos, Weibull, exponencial, beta, entre outras (ABUMANSSUR, 2006).

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a maior parte dos fenômenos hidrológicos são considerados estocásticos, ou regidos por leis probabilísticas, uma vez que contêm componentes aleatórios dotados de certa regularidade. Dessa forma, para uma dada região em estudo são considerados como processos hidrológicos estocásticos fenômenos como a precipitação, evapotranspiração (EVP), escoamentos superficial e sub-superficial, capacidade de infiltração, entre outros.

Diversos modelos de distribuição de probabilidade e métodos de estimação de parâmetros foram apresentados pela literatura científica, majoritariamente nas últimas cinco décadas. Porém, ainda não existe uma distribuição de probabilidade consensual que seja capaz, sob qualquer condição, representar de forma precisa o comportamento das variáveis hidrológicas (PANSERA, 2013).

Diante disso, tornasse necessário o estudo comparativo contínuo das metodologias de distribuição de probabilidade com a finalidade de analisar o quanto se aproximam de uma representação adequada da frequência das variáveis hidrológicas. Para este trabalho, deu-se enfoque para distribuição de probabilidade GEV (acrônimo em inglês para *Generalized Extreme Value*) com seus parâmetros obtidos a partir dos métodos dos momentos convencionais (MOM) (NAGHETTINI; PINTO, 2007), momentos-L (MML) (OLIVEIRA et al., 2014), momentos-LH (MLH) (QUEIROZ; CHAUDHRY, 2006), máxima verossimilhança (MVS) (MARTINS; REIS JUNIOR; ALEXANDRE, 2008) e máxima verossimilhança generalizada (MVG) (MARTINS; STEDINGER, 2000). Para maior aprofundamento sobre essas metodologias estimadoras apresentadas pode-se buscar os autores supracitados.

Em seguida são abordadas as distribuições de densidade de probabilidade GEV e Gumbel, alguns dos estimadores de parâmetros da GEV e casos em que foram empregados.

2.2.1 Distribuição Generalizada de Valores Extremos - GEV

O objetivo principal da teoria estatística de valores extremos é a análise dos eventos extremos já registrados para realizar a previsão de valores extremos futuros. A estimação de condições futuras tem papel atuante no planejamento e elaboração de projetos de engenharia, podendo requerer a estimação do maior ou menor valor de uma variável. Diante disso, a extrapolação dos valores extremos observados se torna necessária, e com isso a teoria assintótica da estatística de valores extremos constitui uma ferramenta essencial para a obtenção da informação necessária (QUEIROZ, 2002).

Segundo Queiroz (2002), a notável capacidade da distribuição GEV em representar eventos de máximos naturais tem criado grande interesse pelo seu emprego, para a modelagem de eventos extremos referentes a variáveis hidrológicas. Estudos sobre o tema apontam que a GEV ajusta valores mais próximos a realidade diante da necessidade de extrapolação dos dados amostrais para grandes períodos de retorno (QUADROS; QUEIROZ; BOAS, 2011).

Martins e Stedinger (2000) colocam que, na prática, a mesma tem sido utilizada para modelar uma extensa gama de extremos naturais, dentre elas cheias anuais, chuvas, velocidade do vento, alturas de ondas do mar, entre outros eventos naturais. A origem física desses valores extremos (VE) sugere que a sua distribuição seja representada por um dos formatos da distribuição GEV (tipos VE I, II e III). Os mesmos autores, citando Hosking (1985) e Hosking (1990), afirmam que matematicamente, a distribuição GEV é muito atraente devido a sua função inversa possuir um formato bem definido, e o seus parâmetros serem facilmente estimados através dos momentos convencionais e dos momentos-L.

A distribuição GEV foi introduzida inicialmente por Jenkinson (1955), englobando as três formas assintóticas de valores extremos de distribuição, sendo elas a Gumbel tipo I ($k = 0$), Frechet tipo II ($k < 0$), e Weibull ou tipo III ($k > 0$) (MARTINS; STEDINGER, 2000). A função de probabilidades acumuladas da distribuição GEV é dada pela Equação 2.1

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \kappa \cdot \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad k \neq 0 \quad (2.1)$$

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right] \right\} \quad k = 0, \quad (2.2)$$

em que, k , α e β constituem, respectivamente, os parâmetros de forma, escala e posição. De acordo com o valor e o sinal de k tem-se a forma assintótica dos valores extremos máximos, assim, para $\kappa < 0$, a GEV representa a distribuição do Tipo VE II, definida apenas para $y > (\beta + \alpha)/k$, já para, $k > 0$, a GEV se enquadra

como a distribuição do Tipo VE III, definida apenas para $y < (\beta + \alpha)/k$. Por fim, para $k = 0$, a GEV constitui a distribuição Gumbel (VE I) com parâmetro de escala α e parâmetro de posição β (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Na prática, tem-se que para $-0,04 < k < 0,04$ o ajuste se aproxima consideravelmente da distribuição Gumbel (QUEIROZ; CHAUDHRY, 2006).

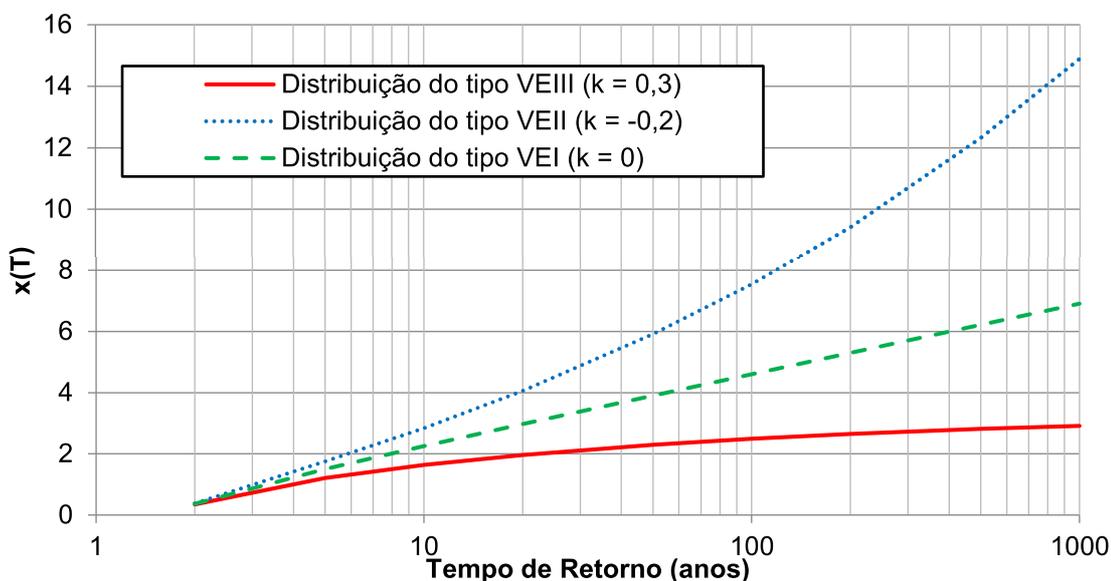
Os quantis da distribuição GEV são dados por

$$x(F) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \cdot \{1 - [-\ln(F)]^\kappa\} \quad k \neq 0 \quad (2.3)$$

$$x(F) = \beta - \alpha \cdot \ln[-\ln(F)] \quad k = 0. \quad (2.4)$$

Na Figura 1 está representado o comportamento das três formas da GEV a partir de diferentes valores para o parâmetro k .

Figura 1 – Comportamento das três formas da distribuição GEV.



Fonte: Produzido pelo autor.

2.2.2 Distribuição Gumbel

A distribuição de valores extremos do tipo VE I, também denominada distribuição de Gumbel, é a distribuição extremal mais utilizada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações voltadas para a determinação de relações de intensidade-duração-frequência de chuvas intensas e vazões de enchentes (NAGHETTINI; PINTO, 2007; MEDEIROS, 2013).

Os quantis da distribuição Gumbel são dados por

$$Y_{TR} = -\ln[-\ln(1 - TR^{-1})] \quad (2.5)$$

$$K_{TR} = -0,45 + 0,7797 \cdot Y_{TR} \quad (2.6)$$

$$X_{TR} = \bar{x} + K_{TR} \cdot S \quad (2.7)$$

em que:

Y_{TR} = a variável reduzida da distribuição de Gumbel;

TR = o período de retorno (anos);

X_{TR} = a precipitação máxima diária para determinado TR (mm);

K_{TR} = o fator de frequência (adimensional);

\bar{X} = a média da precipitação máxima diária (mm);

S = o desvio padrão dos dados de precipitação máxima diária (mm).

2.2.3 Estimativa de parâmetros

A inferência estatística tem como uma das principais finalidades estimar, com confiança, as características da população representada por uma variável aleatória. As metodologias empregadas são denominadas de métodos ou técnicas de estimação. As propriedades populacionais referentes a uma variável são definidas pelos seus parâmetros, quantis ou outro número similar. Uma vez que, as populações são raramente conhecidas na sua totalidade em ciências como a hidrologia, estas propriedades referentes a variável aleatória podem ser obtidas através da estimação empregando as amostras disponíveis (QUEIROZ, 2002).

Assim, como não é possível conhecer toda a poluição do fenômeno de interesse, tornasse necessário determinar qual o modelo distributivo mais adequado e seus respectivos parâmetros, de maneira que o modelo adotado represente o mais próximo possível o comportamento da população real a partir de uma amostra. Desse modo, através das distribuições, pode-se obter as probabilidades inerentes aos eventos representados por uma dada variável amostrada (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Da mesma necessidade de se estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade, Montgomery e Runger (2009) afirmam que o método da máxima verossimilhança (MVS) é, na maioria das vezes, o método de estimação escolhido pelos estatísticos matemáticos, uma vez que é, geralmente, fácil de usar e produz estimadores com boas propriedades estatísticas. Também é razoavelmente fácil de ser obtido em muitas ocasiões e tem uma distribuição normal assintótica. “Assintótica” quer dizer “quando n é grande”, sendo n o tamanho da amostra. Já Costa Neto (2002), afirma que o método da máxima verossimilhança fornece, geralmente, estimadores consistentes, assintoticamente eficientes e com distribuição assintoticamente normal. Já o método dos momentos (MOM), segundo o mesmo autor, produz estimadores consistentes, mas que, na maioria das vezes, não são os mais eficientes.

Ainda, segundo Naghettini e Pinto (2007), o método dos momentos-L (MML) fornece estimadores de parâmetros com qualidade comparável aos obtidos pelo método

da MVS, com menos esforço computacional. Ainda que para pequenas amostras os estimadores MML, em alguns casos, são mais precisos do que a MVS.

Mello e Silva (2005) ao estudarem os estimadores de parâmetros para a distribuição Gumbel para as chuvas intensas da região do Alto Rio Grande, Minas Gerais, constataram superioridade nos resultados obtidos com o método da máxima verossimilhança, quando comparados com o método dos momentos. As séries históricas de precipitações máximas anuais ajustadas por máxima verossimilhança obtiveram resultados menores de λ^2 , onde λ^2 é o somatório das diferenças quadráticas das séries em estudo. Porém, podem gerar efeitos consideráveis nos hidrogramas de projeto.

Quadros, Queiroz e Boas (2011) ao estudarem as séries históricas de precipitações para diferentes durações a partir de dados de pluviógrafos no município de Cascavel, Paraná, empregando o método estimador de parâmetros momentos-LH (MLH), constataram que a distribuição Gumbel subestima a distribuição GEV para grandes períodos de retorno. Mais especificamente, para durações de mais de 30 minutos. Ainda, existe uma grande diferença entre as distribuições para períodos de retornos grandes. Por fim, os autores afirmam que a distribuição GEV é mais precisa que a Gumbel, uma vez que respeita a tendência dos dados, tornando a análise mais realística.

Pansera (2013) cita Wang (1997), que introduziu os momentos-LH como forma generalizada dos momentos-L, com o intuito de otimizar a estimativa de quantis, na situação em que são empregados níveis mais elevados dos momentos-L. Wang (1997) desenvolveu cinco níveis para os momentos-LH (L0, L1, L2, L3 e L4), em que L0 se refere aos Momentos-L.

Gomes (2011) ao avaliar diferentes modelos de distribuição de probabilidades no ajuste das precipitações intensas para a bacia do Rio Taquarizinho, Minas Gerais, obteve distâncias menores entre as curvas de intensidade do modelo GEV, quando comparadas com os modelos Gumbel e Log Normal, empregando os como estimador de parâmetros os momentos-L. Além disso, observou que para tempos de retorno menores o modelo GEV retorna valores de intensidades máximas maiores que os do modelo Gumbel.

Queiroz e Chaudhry (2006) ao analisarem a distribuição GEV e os momentos-LH no estudo de eventos hidrológicos extremos, observaram que os momentos-LH fornecem ajustes adequados para cheias anuais e vazões mínimas, de acordo com os testes de aderência de Wang e Kolmogorov-Smirnov, adotando 5% de significância.

2.3 Desagregação de chuvas

Frequentemente em projetos de engenharia é necessário determinar as relações entre intensidade, duração e frequência para locais onde não se dispõe de postos com pluviógrafos. Para tal, empregam-se algumas metodologias para estimar as relações de interesse para esses locais, baseando-se em seus dados pluviométricos de precipitações.

Obtidos os dados de precipitação diária por meio de registros pluviométricos, associados os períodos de retorno de que se tem interesse, pode-se aplicar uma metodologia de desagregação adequada. Dessa forma, ao relacionar as alturas de precipitação, em função da duração de desagregação e o período de retorno, são originadas as curvas IDF (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008).

Como reafirma Torrico (1974), para a determinação da relação precipitação/descarga em obras de drenagem, necessita-se conhecer altura de precipitação em intervalos inferiores a 24 horas. Devido a pequena rede de pluviógrafos disponíveis, os hidrólogos e engenheiros são obrigados a recorrer à extrapolação através pluviógrafos distantes da área de projeto, ignorando se os dados utilizados são representativos para a bacia do projeto. Em contrapartida, existe na atualidade um número relativamente grande de estações pluviométricas, com registros de precipitações diárias, que permitem o emprego de metodologias capazes de deduzir as precipitações para períodos inferiores a 24 horas.

Um destes métodos, como descreve Tucci (1993), é o Método das Relações de Durações, que se baseia em duas propriedades observadas em curvas IDF de vários postos espalhados pelo mundo, sendo elas: a) a existência de uma tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações manterem-se paralelas entre si; e b) mesmo para diferentes localidades, existe uma grande similaridade nas relações entre precipitações médias máximas de diferentes durações, com uma leve tendência de mudança para diferentes tempos de retorno. Logo, o método das relações entre durações possui grande aplicabilidade, uma vez que existe um grande número de pluviômetros com longas séries históricas espalhados pelo território nacional.

Ainda Tucci (1993), esclarece que a precipitação de 24 horas é o total máximo relativo a um período contínuo de 24 horas e a de 1 dia é o valor compreendido entre os horários de observação, e como ressalta Medeiros (2013), “diversos autores concluíram que a relação entre as alturas de precipitação máximas de 24h obtidas dos pluviógrafos e a leitura de um dia do pluviômetro independe do período de retorno”.

Como afirmam Damé, Teixeira e Terra (2008), no meio científico, é objeto de buscas um modelo de desagregação das precipitações diárias que retorne curvas de intensidade-duração-frequência dos quais o desvio, ao ser comparado com as

séries históricas existentes, seja aceitável para ser utilizado em projetos de obras hidráulicas, uma vez que é um dos dados de entrada nos modelos de transformação de chuva-vazão.

Ainda segundo Damé, Teixeira e Terra (2008) e também Back, Sonogo e Pola (2015), a técnica de desagregação de uso corrente na prática da engenharia no Brasil toma como base os coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986). Tal técnica emprega coeficientes médios obtidos a partir dos estudos do Departamento Nacional de Obras de Saneamento - DNOS para 98 postos pluviográficos, publicados no trabalho de Pfafstetter (1957). Os coeficientes propostos pela CETESB (1986) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de desagregação para diferentes durações de chuva apresentados pela CETESB (1986).

Relação entre alturas pluviométricas	Coeficientes de desagregação
1 dia / 24 h	1,14
12 h / 24 h	0,85
10 h / 24 h	0,82
8 h / 24 h	0,78
6 h / 24 h	0,72
1 h / 24 h	0,42
30 min / 1 h	0,74
25 min / 30 min	0,91
20 min / 30 min	0,81
15 min / 30 min	0,70
10 min / 30 min	0,54
5 min / 30 min	0,34

Fonte: CETESB (1986).

Como citado no início, devido a necessidade de ampliar o alcance do trabalho inicialmente desenvolvido por Pfafstetter (1957), Torrico (1974) espacializou as IDF dos postos pluviográficos até então existentes gerando isozonas. Seus respectivos coeficientes são relacionados em percentagem na Tabela 2.

Sampaio (2011) constatou ao testar diferentes metodologias de desagregação, a não existência de diferenças significativas quando comparadas às relações obtidas pela forma tradicional, a partir de pluviógrafos, para diferentes regiões do Rio Grande do Sul, sendo que qualquer uma das metodologias de desagregação testadas (função de desagregação de Chen (1983), Robaina e Peiter (1992), CETESB (1986) e Bell (1969)) podem ser utilizadas.

Ainda, Sampaio (2011) concluiu que a determinação das equações de IDF através das metodologias de desagregação abordadas se mostrou coerente, podendo

ser aplicada para outras regiões carentes de estações com pluviógrafos.

Tabela 2 – Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas propostas por Torrico (1974).

Isozona	1h/24h chuva										6min/24h	
	TR (anos)										TR (anos)	
	5	10	15	20	25	30	50	100	1.000	10.000	5-50	100
A	36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35,0	34,7	33,6	32,5	7,0	6,3
B	38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,4	37,2	36,0	8,4	7,5
C	40,1	39,7	39,5	39,3	39,2	39,1	38,8	38,4	37,2	36,0	9,8	8,8
D	42,0	41,6	41,4	41,2	41,1	41,0	40,7	40,3	39,0	37,8	11,2	10,0
E	44,0	43,6	43,3	43,2	43,0	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F	46,0	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,2	47,0	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,1	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,9	48,8	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Torrico (1974).

Sobrinho et al. (2014), ao realizarem a validação do método das isozonas proposto por Torrico (1974) para estações situadas em zonas climatológicas diferentes da Região Metropolitana de Cariri (RMC), Ceará, concluiu que as intensidades máximas obtidas pelo método foram confiáveis quando comparadas pelas obtidas através de equações IDF. Já para as regiões de mesma zona climatológica da RMC os erros obtidos entre as relações pluviométricas de 1 h/24 h e de 6 min/24 h gerados pelas isozonas e as advindas de dados pluviográficos foram inferiores a 2%.

Assad, D., Masutomo e Assad, L. (1992) obtiveram resultados coerentes ao empregarem os coeficientes de Torrico (1974) para estimar a intensidade das chuvas na região dos Cerrados brasileiros. Os autores concluíram que o método é de fácil utilização, mas em contrapartida é fundamentado em coeficientes empíricos. Dessa forma, não substitui informações pluviográficas, mas fornece uma primeira aproximação da intensidade de chuvas para regiões que possuem apenas dados pluviométricos.

Zuffo (2004), ao estudar as relações de IDF para a cidade de Campinas, São Paulo, constatou que as equações até então utilizadas estavam desatualizadas, e que conseqüentemente levavam ao subdimensionamento de sistemas de drenagem. O mesmo autor ainda ressalta que as relações de desagregação apresentadas pela CETESB (1986) não representam as mesmas relações para a cidade obtidas a partir da leitura direta dos pluviogramas. O autor alerta que o mesmo pode ocorrer para as demais regiões de crescimento acelerado, e finaliza com a recomendação de que todas as equações de chuvas do país, com mais de 20 anos de idade sejam revisadas, de maneira que o procedimento seja repetido pelo menos uma vez a cada 10 anos.

A reparar pelas datas dos autores dos coeficientes de desagregação já apre-

sentados, nota-se que, atualmente, são encontrados poucos trabalhos voltados para a revisão dos coeficientes de desagregação de chuvas que abranja todo o território nacional, como o realizado por Basso et al. (2016).

2.3.1 Tempos de retorno

De acordo com Wilken (1978), a escolha do tempo de retorno está ligada a análise econômica e de segurança da obra. Por exemplo, para extravasores de barragens se adotam períodos de retorno de 1000 a 10.000 anos, uma vez que acidentes neste tipo de obra ocasionam prejuízos incalculáveis, além de acarretar elevado número de vítimas. Já se tratando de obras de canalização de cursos d'água de penas bacias de drenagem com a finalidade de controlar inundações, os períodos de retorno a serem adotados variam de 5 a 50 anos, de acordo com a importância da obra.

Os períodos de retorno adotados pela Secretaria de Planejamento Estratégico do município de Toledo (TOLEDO, 2017), Paraná, são baseados no Manual de Drenagem Urbana do Paraná (PARANÁ, 2002). Os valores de tempo de retorno para cada sistema de drenagem são apresentados na Tabela 3.

A Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano de São Paulo (SÃO PAULO, 2012) recomenda em seu manual o período de retorno de 100 anos para grandes corredores de tráfego e áreas vitais para a cidade ou em situações que há risco de perdas de vidas humanas, e 500 anos de período de retorno para locais com instalações e edificações de uso estratégico como hospitais, bombeiros, polícia e centro de controle de emergências.

Tabela 3 – Tempo de retorno para sistemas urbanos.

Sistema	Característica	Intervalo (anos)	Valor recomendado (anos)
Microdrenagem	Residencial	2 - 5	2
	Comercial	2 - 5	2
	Áreas de prédios públicos	2 - 5	2
	Áreas comerciais e avenidas	2 - 10	2
	Aeroporto	5 - 10	5
Macrodrenagem		10 - 50	10
Áreas ribeirinhas*		5 - 100	50**

Fonte: TOLEDO (2017).

* Zoneamento; ** limite da área de regulamentação.

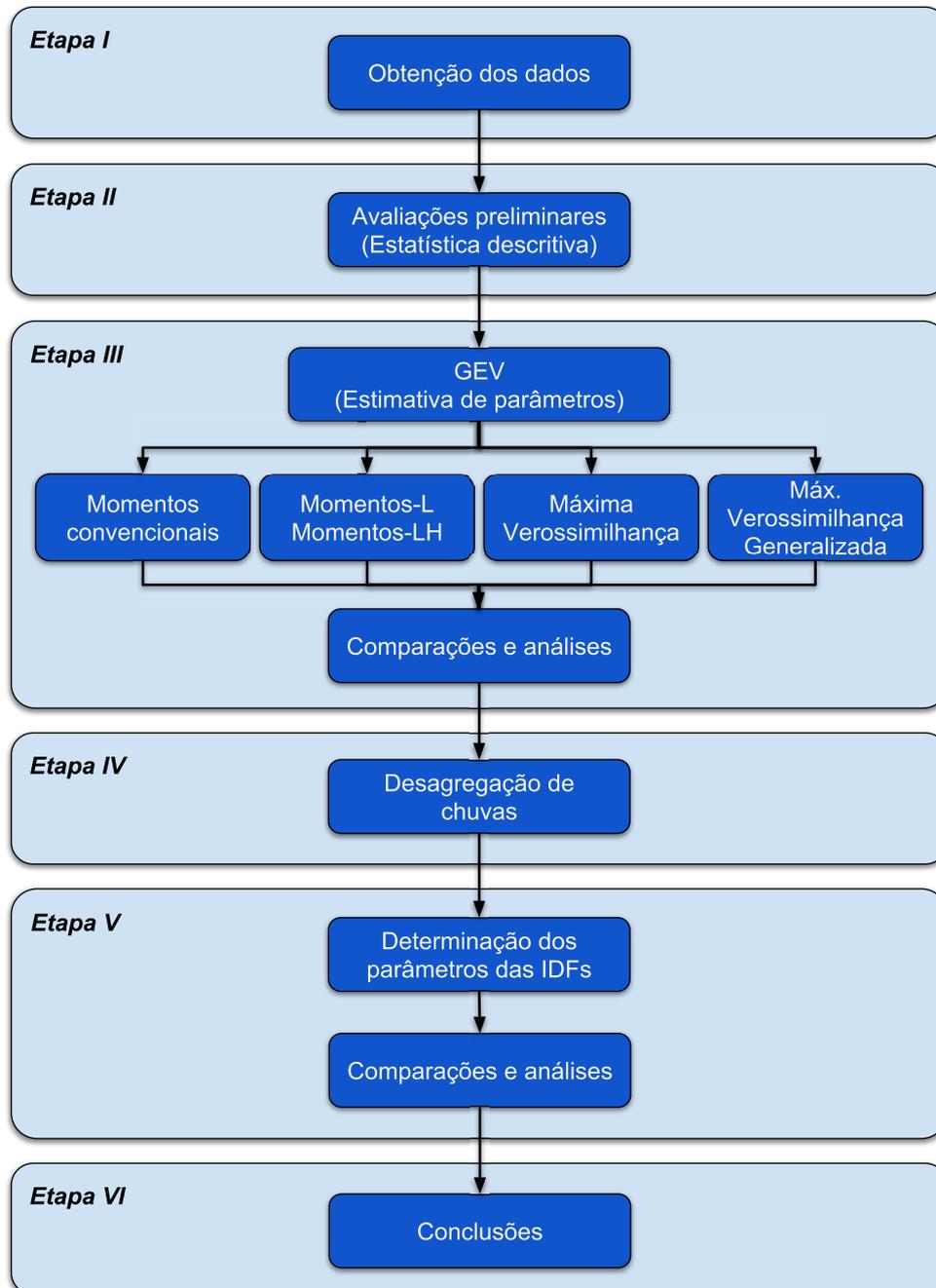
2.3.2 Relação 24 horas/1 dia

Para correlacionar as precipitações nas estações pluviométricas com as isozonas, Torrico (1974) determinou a relação de 24 horas/1 dia, para um tempo de retorno de um ano. O valor encontrado foi de $1,095 \approx 1,10$, com um desvio de $\pm 6,6\%$. Já o coeficiente adotado por Basso et al. (2016) e CETESB (1986) para correlacionar a chuva de 1 dia com a de 24 horas foi de 1,14, como apresentado na Tabela 1.

3 Materiais e Métodos

As etapas seguidas no desenvolvimento do trabalho são apresentadas de forma resumida no fluxograma presente na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Produzido pelo autor.

3.1 Obtenção dos dados pluviométricos

As estações escolhidas para a realização da amostragem de precipitações pertencem à Região Sul do Brasil, e estão localizadas nos municípios de Toledo e Ponta Grossa, no Paraná, Blumenau, em Santa Catarina, Uruguaiana, Encruzilhada do Sul e Iraí no Rio Grande do Sul.

As séries históricas foram obtidas a partir da plataforma Hidro Web, sítio online de dados a Agência Nacional de Águas - ANA (ANA, 2017). Dentre as várias estações disponíveis para cada município, adotou-se como critério de escolha a que apresentasse o maior intervalo de registros meteorológicos. As estações escolhidas estão dispostas na Tabela 4, contendo o município, o nome das estações, o código de identificação ANA, estado federado e tamanho da série histórica, respectivamente.

Tabela 4 – Estações pluviométricas adotadas.

Município	Nome da estação	Código	Estado	Período
Blumenau	GARCIA	02649009	SC	1941-2016
Encruzilhada dos Sul	PASSO DA GUARDA	03052007	RS	1944-2016
Iraí	IRAÍ	02753019	RS	1995-2016
Ponta Grossa	SANTA CRUZ	02550003	PR	1945-2012
Toledo	NOVA CONCÓRDIA	02453017	PR	1964-2015
Uruguaiana	PLANO ALTO	02956007	RS	1943-2016

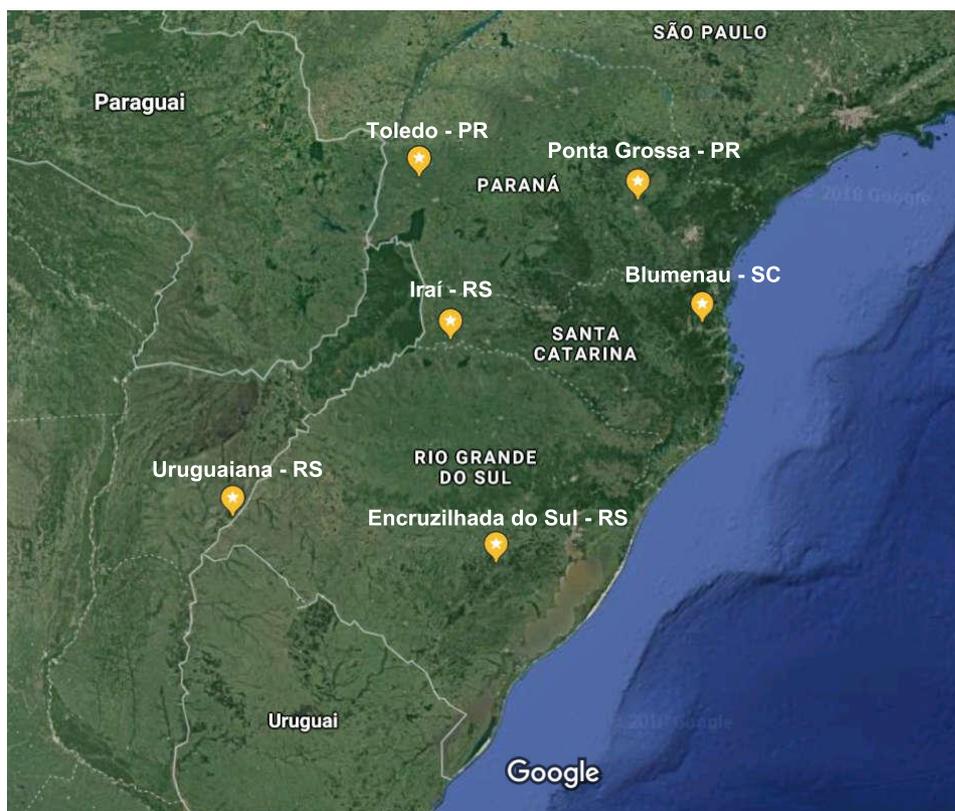
Fonte: Produzido pelo autor.

Como critério para a seleção dos valores máximos nos intervalos anuais, realizou-se o descarte dos anos com muitas falhas ou ausência de mais de 3 meses de dados pluviométricos.

A escolha das cidades estudadas se dá por estarem, exceto Toledo, dentro do grupo estudado inicialmente por Pfafstetter (1957), e posteriormente por Torrico (1974), e mais recentemente na revisão dos coeficientes de desagregação por Basso et al. (2016). Já a escolha de Toledo teve como finalidade analisar o comportamento dos coeficientes para uma localidade que não possui equações de IDF obtidas a partir de estações pluviográficas.

Esta representada na Figura 3 a localização de cada uma das seis estações hidrológicas das quais foram obtidos os dados para este estudo. Em que é possível observar a dispersão dos pontos de interesse ao longo da Região Sul do Brasil.

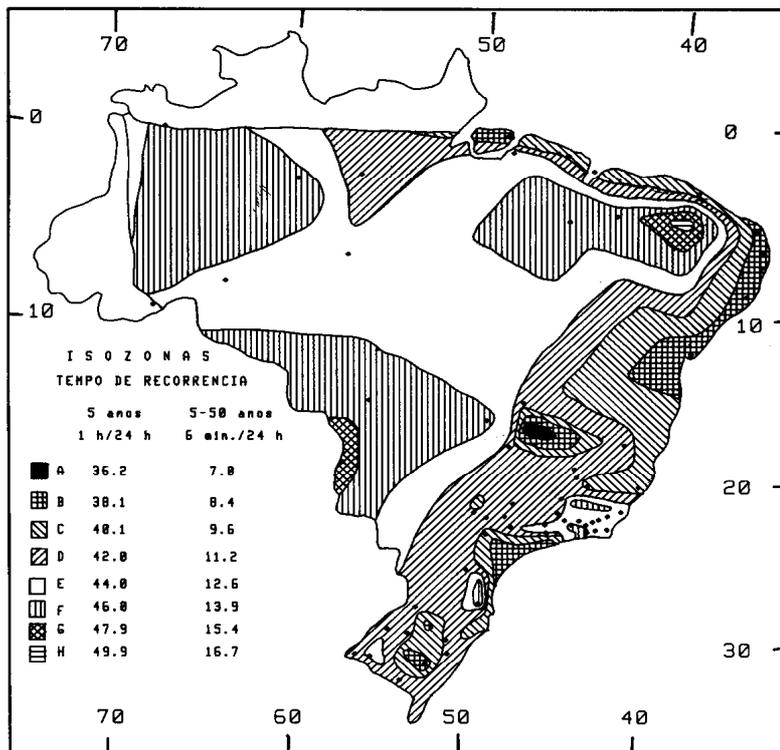
Figura 3 – Disposição das cidades estudadas ao longo da Região Sul do Brasil.



Fonte: Google (2018).

Ao confrontar as Figuras 4 e 5, é possível observar a disposição das isozonas inicialmente propostas por Torrico (1974) e atualizadas posteriormente por Basso et al. (2016). Pode-se visualizar a permanência de algumas regiões homogêneas entre um mapa e outro, atentando para o aumento de novas isozonas de acordo com a maior disponibilidade de dados hidrológicos. Já na Tabela 5 estão reunidas as estações e as isozonas em que se encontram de acordo com as classificações de Torrico (1974) e Basso et al. (2016). Os novos coeficientes de desagregação definidos por Basso et al. (2016) para as isozonas de interesse estão relacionados na Tabela 6.

Figura 4 – Mapa de isozonas elaborado por Torrico (1974).



Fonte: Adaptado de Assad, D., Masutomo e Assad, L. (1992).

Figura 5 – Mapa das novas isozonas propostas por Basso et al. (2016).



Fonte: Adaptado de Basso et al. (2016).

Tabela 5 – Isozonas das estações pluviométricas adotadas conforme os mapas de Torrico (1974) e Basso et al. (2016).

Município	Estado	Isozona segundo Torrico (1974)	Isozona segundo Basso et al (2016)
Blumenau	SC	F	Subquente-H
Encruzilhada do Sul	RS	G	Subquente-D
Iraí	RS	D	Subquente-C
Ponta Grossa	PR	D	Subquente-I
Toledo	PR	E	Subquente-F
Urugaiana	RS	D	Subquente-B

Fonte: Produzido pelo autor.

Ao comparar os coeficientes de desagregação da chuva de 1 h/24 h de Torrico (1974) e Basso et al. (2016) representados nas Tabelas 2 e 6, é possível observar que a diferença entre os coeficientes fica em torno de 5% do valor total diário, com exceção dos municípios de Blumenau e Toledo, os quais tiveram um acréscimo da ordem de 15% e 20% do total diário, respectivamente.

Tabela 6 – Coeficientes de desagregação das relações (r_{min24h}) entre as precipitações das novas isozonas para o período de recorrência de dez anos dos municípios escolhidos.

Abreviação	Duração (min)										
	10	15	20	30	45	60	120	240	360	720	1440
Subquente-H	24,6	32,1	38,0	46,8	55,4	61,2	73,2	82,6	87,0	96,6	100,0
Subquente-D	19,6	24,7	28,7	34,5	40,5	44,8	55,2	66,1	72,8	82,6	100,0
Subquente-C	18,4	23,2	26,9	32,4	38,1	42,3	52,7	63,8	70,9	78,4	100,0
Subquente-I	25,5	32,9	38,5	46,8	54,8	60,2	71,4	80,7	85,3	98,7	100,0
Subquente-F	18,9	24,6	29,1	36,0	43,1	48,2	60,0	71,2	77,5	92,5	100,0
Subquente-B	17,5	21,8	25,2	30,2	35,5	39,4	49,6	60,9	68,4	76,6	100,0

Fonte: Adaptado de Basso et al. (2016).

3.2 Processamento dos dados amostrais

Para a obtenção e análise dos parâmetros da distribuição GEV, foram empregadas rotinas desenvolvidas no software RStudio (RStudio Team, 2015). O RStudio é uma ferramenta amplamente empregada ao longo da graduação para a modelagem e análise de fenômenos, principalmente nas disciplinas relacionadas ao cálculo numérico, probabilidade e estatística. Diante disso, aliado a sua ampla biblioteca de pacotes, tornou a sua escolha a mais adequada para o desenvolvimento deste trabalho.

Para este estudo foram analisadas as intensidades máximas de precipitações para os intervalos de duração entre 5 e 1440 minutos, e tempos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos.

3.3 Estimação de parâmetros e desagregação de chuvas

Seguindo a metodologia proposta, após a obtenção dos dados como descrito em 3.1, foi realizada a avaliação preliminar empregando a elaboração de boxplot, histograma de frequência e demais elementos de estatística descritiva.

Feito isto, partiu-se para a aplicação dos métodos estimadores de parâmetros da GEV através de rotinas computacionais para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos. Os métodos estimadores empregados são o método dos momentos convencionais (MOM) (NAGHETTINI; PINTO, 2007), momentos-L (MML) (OLIVEIRA et al., 2014), momentos-LH (MLH) (QUEIROZ; CHAUDHRY, 2006), máxima verossimilhança (MVS) (MARTINS; REIS JUNIOR; ALEXANDRE, 2008) e máxima verossimilhança generalizada (MVG) (MARTINS; STEDINGER, 2000), como descrito em 2.2.

A análise do comportamento dos quantis estimados empregando as distribuições GEV, frente aos quantis estimados pela distribuição Gumbel, deu-se graficamente, de forma que o resultado das distribuições foi plotado no mesmo gráfico para cada cidade. A aderência das distribuições teóricas às distribuições empíricas foi avaliada empregando o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

Como dito anteriormente, o teste de Kolmogorov-Smirnov constitui uma das formas de testar a aderência do modelo teórico à distribuição populacional, que conforme Silva et al. (2012), "avalia a distância máxima entre os resultados de uma distribuição a ser testada e os valores associados à distribuição hipoteticamente verdadeira", ou seja, mede a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica (NAGHETTINI; PINTO, 2007), em outras palavras, a diferença entre a função de distribuição acumulada do modelo e da amostra (COSTA NETO, 2002), para variáveis aleatórias contínuas .

O teste KS é dado pela Equação 3.1

$$D_N = \sup_{-\infty < x < +\infty} |F_N(x) - F_X(x)| \quad (3.1)$$

Onde $F_N(x)$ e $F_X(x)$ correspondem a distribuição empírica e probabilidade teórica, respectivamente. Neste trabalho foi adotado o nível de 5% de significância ($\alpha = 5\%$) na validação das amostras.

3.4 Equações de chuvas intensas

Como parte final do trabalho, foi realizada a determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas, apresentada em 1.1. Para tal, foram utilizadas as intensidades de precipitação geradas a partir dos valores estimados para diferentes tempos

de retorno através da distribuição de probabilidade Gumbel, seguido da desagregação utilizando os coeficientes propostos pela CETESB (1986) e Basso et al. (2016).

As equações IDF geradas foram divididas em duas partes, sendo a primeira válida para os intervalos de duração de chuvas de 5 a 60 minutos e a segunda parte válida para as durações de 60 a 1440 minutos. Também foi gerada uma equação geral contemplando os intervalos de duração de 5 a 1440 minutos, com intuito de observar o comportamento do erro padrão de estimativa (EPE) perante as equações fracionadas.

Os parâmetros das equações IDF foram ajustados conforme enuncia Back (2006), empregando a minimização da soma dos quadrados dos desvios para todas as durações e períodos de retorno analisados, de acordo com a Equação 3.2:

$$S = \sum_{d=1}^{n_d} \sum_{T=1}^{n_T} (f_{i_{d,T}} - f_{o_{d,T}})^2 \quad (3.2)$$

em que:

S = soma dos quadrados dos desvios;

$f_{i_{d,T}}$ = a intensidade estimada para a duração d , e período de retorno T ;

$f_{o_{d,T}}$ = a intensidade observada para a duração d , e período de retorno T ;

n_d = o número de durações utilizadas;

n_T = o número de períodos de retorno utilizados.

Os valores de erro padrão de estimativa, também denominado como raiz do erro médio quadrático (BRAGA et al., 2018), foram estimados de acordo com a equação Equação 3.3:

$$EPE = \sqrt{\frac{S}{n}} \quad (3.3)$$

em que EPE é o erro padrão de estimativa dado em mm/h, S é a soma dos quadrados dos desvios e n é o número de intervalos empregado.

Por fim, com o intuito de aplicar as equações IDF aqui obtidas, realizou-se a comparação com os valores definidos pela norma de dimensionamento de instalações prediais de águas pluviais NBR 10844/89 (ABNT, 1989). Comparou-se as intensidades para chuva com duração de 5 minutos e tempos de recorrência de 1, 5 e 25 anos.

4 Resultados

4.1 Estatística descritiva e estimativa de parâmetros

Empregou-se para a análise inicial dos dados deste trabalho as seguintes medidas resumo: de posição, de dispersão e de achatamento ou curtose, que estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise estatística inicial da série de chuvas diárias máximas anuais utilizando medidas resumo.

Município	n	\bar{x}	M_d	s	cv	ca	cc	Mín.	Max.
Blumenau	67	87,56	83,3	25,71	29,36	0,87	0,59	46,00	161,20
Encruzilhada do Sul	66	84,27	79,90	23,73	28,16	1,32	2,29	47,40	162,20
Iraí	21	98,01	94,00	29,39	29,99	1,17	1,62	64,80	180,20
Ponta Grossa	70	84,12	78,40	28,92	34,38	1,58	3,86	42,90	204,20
Toledo	48	92,74	94,50	30,52	32,91	0,54	1,37	25,40	185,00
Uruguaiana	70	125,62	121,15	38,58	30,71	0,69	0,25	57,00	230,00

Fonte: Produzido pelo autor.

n - tamanho da série; \bar{x} - média (mm); M_d - mediana (mm); s - desvio padrão (mm); cv - coeficiente de variação; ca - coeficiente de assimetria; cc - coeficiente de curtose; Mín - menor valor amostrado (mm); Máx - maior valor amostrado (mm).

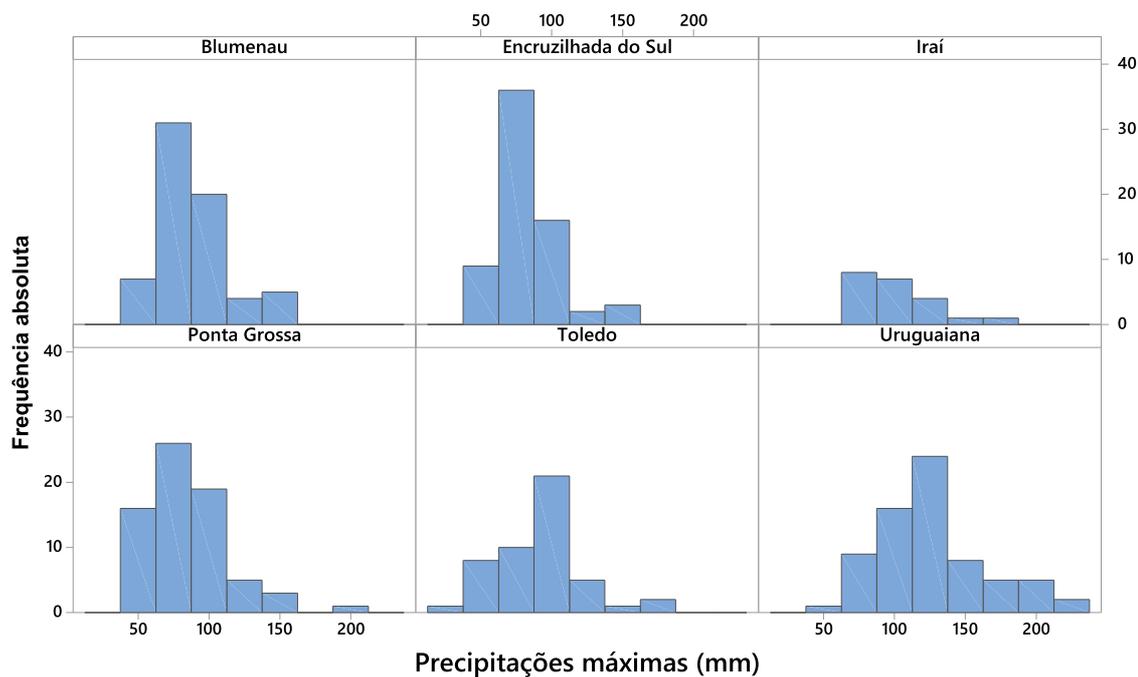
Da Tabela 7, é possível observar que a média dos eventos extremos anuais registrados nas seis cidades estudadas se situam entre cerca de 85 mm e 125 mm, em que o município com maior média é Uruguaiana com 125,62 mm de chuva diária.

O cv dos dados amostrados se encontra aproximadamente entre 30% e 35%, ou seja, os eventos extremos amostrados variam em até 35% em torno na média. Ainda conforme a Tabela 7, é possível observar que todos os municípios possuem valores de ca positivos, variando entre assimetrias moderadas e fortes. Ao analisar o coeficiente de curtose (cc) é possível notar que todos os municípios se enquadram no formato platicúrtica, o que implica em caudas curtas, com exceção de Ponta Grossa, com uma distribuição leptocúrtica, que consiste em caudas longas para a distribuição.

Nas Figuras 6 e 7 estão representados os seis histogramas de frequência e os gráficos do tipo boxplot contendo a distribuição das séries históricas das seis cidades estudadas, respectivamente.

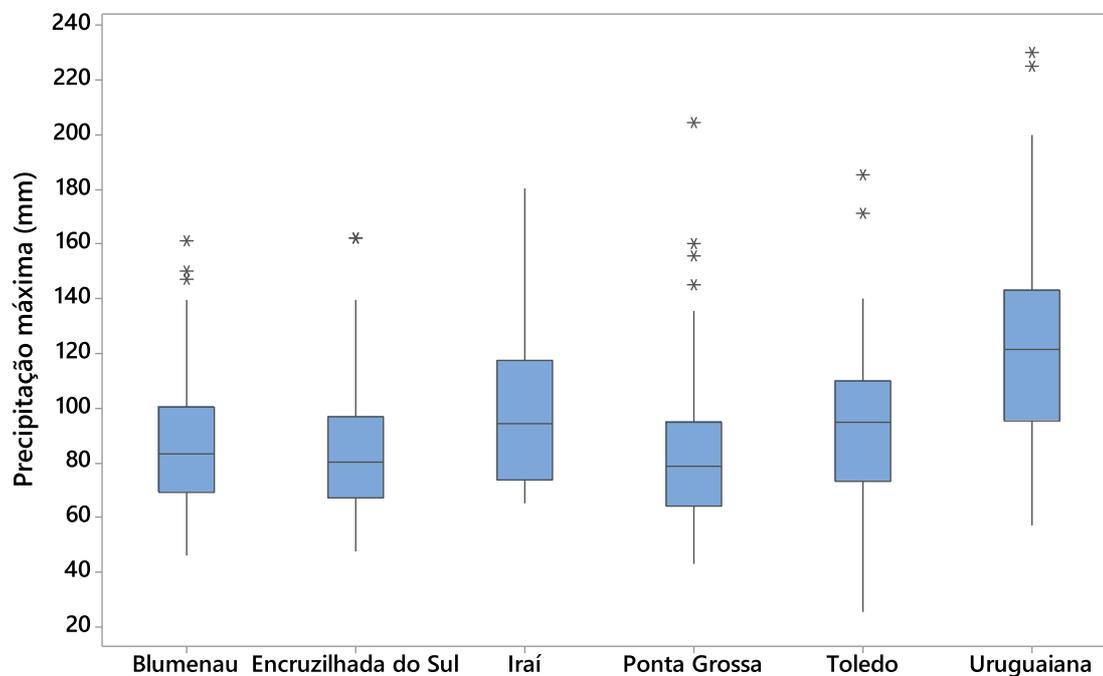
A Figura 6 demonstra que os dados se acumulam à esquerda dos histogramas, com a formação de caldas para a direita, sendo bem visível este comportamento nos histogramas de Iraí e Ponta Grossa.

Figura 6 – Histograma de frequência das precipitações máximas diárias amostradas.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 7 – Boxplot das precipitações máximas das cidades amostradas.



Fonte: Produzido pelo autor.

Por meio dos boxplots apresentados na Figura 7 é possível observar que a linha central das caixas (mediana) situa-se entre 80 e 100 mm, exceto para o município de Uruguaiana em que a mediana supera 120 mm. A posição deslocada para baixo das

caixas dos boxplots demonstra, visualmente, a assimetria positiva das séries históricas em que os dados tendem a se concentrar nos menores valores. Em contrapartida, os gráficos de Toledo e Uruguaiana, que possuem menores coeficientes de assimetria, estão situados mais ao centro do intervalo de dispersão dos dados.

Com a exceção de Iraí, todas as demais séries históricas possuem valores fora do intervalo definido pelos limites superior e inferior dos boxplots. Uma possível justificativa para os valores atípicos observados nos boxplots, não descartando a possibilidade de erros de amostragem, e a incidência do fenômeno meteorológico El Niño. O mesmo tem a característica de ocasionar o aumento da magnitude das precipitações na Região Sul do Brasil, concomitantemente com incidência de seca nas regiões Norte e Nordeste (INPE, 2018).

4.1.1 Teste de aderência

Com o intuito de avaliar a validade das distribuições teóricas estimadas através da GEV em relação as distribuições observadas empiricamente, realizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS), conforme descrito em 3.3.

Estão representados na Tabela 8, para os seis municípios em análise, os valores obtidos empregando os cinco diferentes estimadores de parâmetros da GEV, relacionados na mesma tabela com os resultados do teste KS, que definem a aderência da distribuição teórica à empírica comparando-a com o valor máximo definido como crítico presente na bibliografia.

Pode-se observar na Tabela 8 que, com exceção de Toledo empregando o método MLH, todas as metodologias estimadoras de parâmetros da GEV se ajustaram a distribuição empírica dos seis municípios da Região Sul estudados. Vale ressaltar que o valor crítico para o teste KS está diretamente relacionado ao tamanho da série histórica de dados.

Quanto a forma da distribuição definida pelo parâmetro κ , para o município de Blumenau as distribuições convergem para o tipo VE I (Gumbel), uma vez que na prática quando $-0,04 < \kappa < 0,04$ considera-se que o ajuste se aproxima consideravelmente da distribuição Gumbel (QUEIROZ; CHAUDHRY, 2006). Já para os municípios de Encruzilhada do Sul, Iraí e Ponta Grossa, as distribuições convergem para o tipo VE II (Frechet), dado $\kappa < 0,00$. Em contrapartida, as distribuições ajustadas para Toledo e Uruguaiana convergem para o tipo VE III (Weibull), uma vez que $\kappa > 0,00$.

Tabela 8 – Parâmetros da GEV e teste de Kolmogorov-Smirnov para as estações estudadas.

Município	n	Metodologia	Parâmetros da GEV			Teste Kolmogorov		Decisão sobre H_0
			β	α	κ	Ajuste	Crítico	
Blumenau	67	MOM	76,26	21,27	0,05	0,07	0,17	Não rejeitar
		MML	75,78	20,43	0,00	0,06	0,17	Não rejeitar
		MLH	75,92	19,61	-0,03	0,06	0,17	Não rejeitar
		MVS	76,09	20,42	0,02	0,06	0,17	Não rejeita
		MVG	76,24	20,27	-0,02	0,07	0,17	Não rejeitar
Encruzilhada do Sul	66	MOM	73,48	17,80	-0,03	0,05	0,17	Não rejeitar
		MML	73,20	17,14	-0,07	0,06	0,17	Não rejeita
		MLH	74,32	15,02	-0,13	0,09	0,17	Não rejeitar
		MVS	73,30	16,87	-0,07	0,06	0,17	Não rejeita
		MVG	73,02	16,75	-0,09	0,06	0,17	Não rejeitar
Iraí	21	MOM	84,76	22,78	0,00	0,09	0,29	Não rejeitar
		MML	83,58	21,43	-0,09	0,09	0,29	Não rejeitar
		MLH	86,69	18,12	-0,15	0,17	0,29	Não rejeitar
		MVS	83,21	19,22	-0,18	0,11	0,29	Não rejeitar
		MVG	83,75	19,94	-0,14	0,11	0,29	Não rejeitar
Ponta Grossa	70	MOM	70,86	20,57	-0,06	0,05	0,16	Não rejeitar
		MML	70,68	20,00	-0,09	0,06	0,16	Não rejeitar
		MLH	70,65	19,93	-0,09	0,06	0,16	Não rejeitar
		MVS	70,77	19,73	-0,09	0,06	0,16	Não rejeitar
		MVG	70,83	19,72	-0,09	0,06	0,16	Não rejeitar
Toledo	48	MOM	80,00	27,28	0,12	0,12	0,20	Não rejeitar
		MML	81,46	28,48	0,22	0,10	0,20	Não rejeitar
		MLH	88,58	12,81	-0,22	0,24	0,20	Rejeitar
		MVS	80,52	28,13	0,15	0,11	0,20	Não rejeitar
		MVG	79,42	27,24	0,07	0,13	0,20	Não rejeitar
Uruguaiana	70	MOM	109,08	33,28	0,09	0,11	0,16	Não rejeitar
		MML	108,58	32,55	0,06	0,11	0,16	Não rejeitar
		MLH	108,79	31,10	0,02	0,12	0,16	Não rejeitar
		MVS	108,93	32,31	0,07	0,11	0,16	Não rejeitar
		MVG	106,35	31,01	0,01	0,14	0,16	Não rejeitar

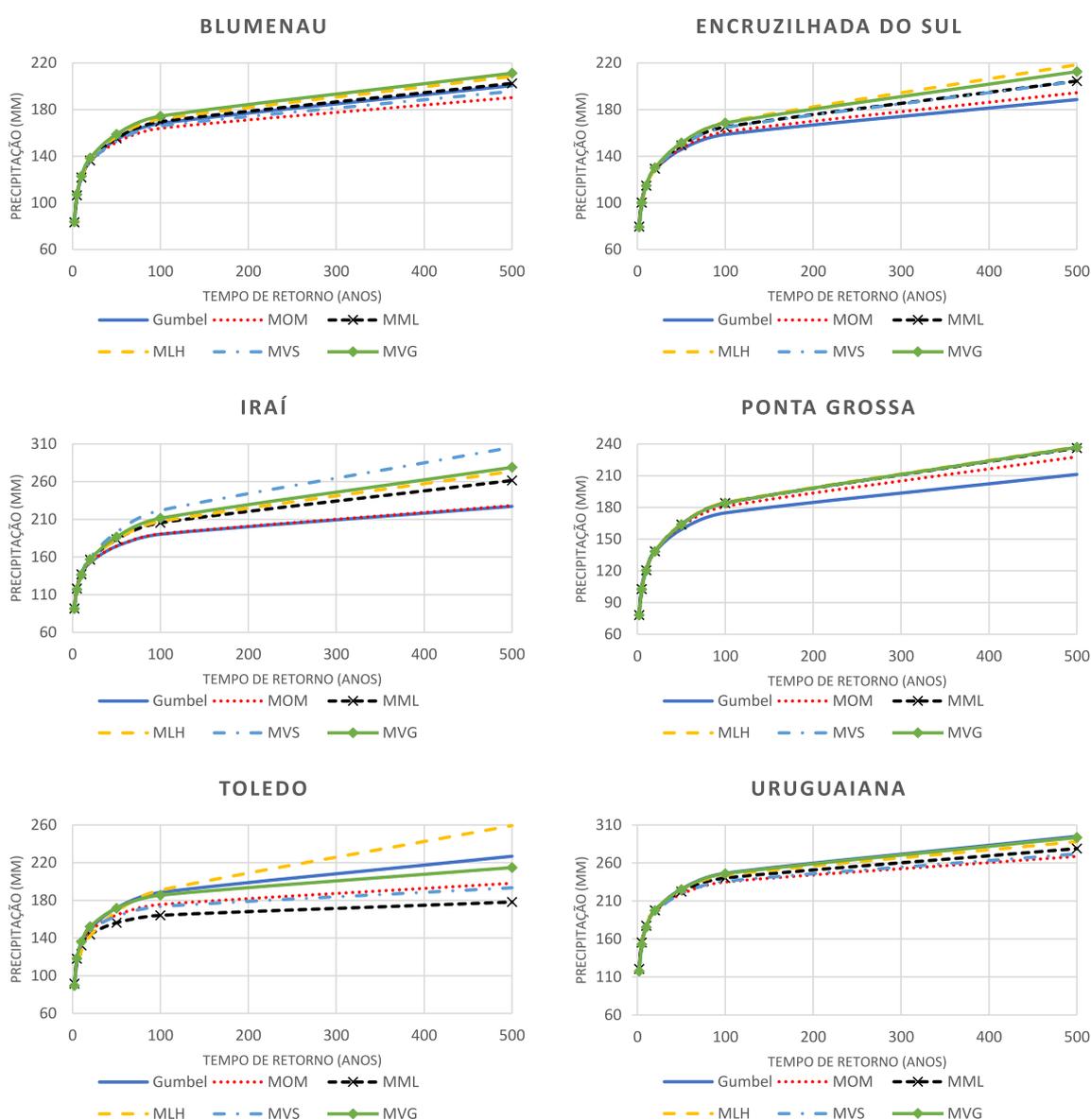
Fonte: Produzido pelo autor.

n - tamanho da série; β , α , κ - parâmetros de posição, escala e forma, respectivamente.

4.1.2 Comparação Gumbel-GEV

Para atingir de fato o primeiro dos objetivos específicos deste trabalho tornou-se necessário analisar o comportamento das distribuições GEV, frente a distribuição Gumbel. Para tanto, optou-se pela representação gráfica das estimativas de eventos diários máximas obtidas, como apresentado na Figura 8. Nela estão representadas as distribuições teóricas referentes as metodologias estimadoras da GEV e também a distribuição Gumbel para os diferentes períodos de retorno propostos anteriormente neste trabalho.

Figura 8 – Representação das distribuições teóricas máximas para as cidades amostradas.



Fonte: Produzido pelo autor.

A partir da Figura 8 se conclui que a representação gráfica corrobora os resultados observados no teste de Kolmogorov-Smirnov, uma vez que as distribuições que

apresentaram aderência à distribuição empírica se comportam de forma similar em vários dos municípios, e até mesmo se sobrepondo em alguns casos. Outro ponto que fica evidente ao analisar a representação gráfica é que os dois municípios com menores séries históricas, Toledo (48) e Iraí (21), foram os que apresentaram maior divergência nas precipitações estimadas para maiores períodos de retorno. Em contrapartida, os demais municípios, Blumenau, Encruzilhada do Sul, Ponta Grossa e Uruguaiana, com séries históricas variando entre 66 e 70 dados amostrais, apresentaram, de forma aproximada, a sobreposição das distribuições.

Ainda através da Figura 8 se conclui que para períodos de retorno de até 100 anos em séries históricas maiores que 65 anos de registro, a distribuição Gumbel pouco difere da GEV. Nesses casos a maior diferença encontrada não foi superior a 7% do valor da Gumbel, de maneira que, em termos de lâmina a ser precipitada, a diferença fica em torno de 10 mm. Tal fato, na prática da engenharia torna pouco atraente a aplicação distribuição GEV para pequenos períodos de retorno, diante do esforço matemático exigido pela mesma frente a simplicidade de cálculo apresentada pela na distribuição Gumbel.

A Tabela 9 resume as maiores e menores diferenças percentuais dos valores de precipitações diárias estimadas através das distribuições GEV em relação a distribuição Gumbel.

Tabela 9 – Diferença percentual dos valores de precipitações diárias estimadas pela distribuição GEV em relação a distribuição Gumbel.

Cidade	n	Menor Diferença			Maior Diferença		
		TR	%	GEV	TR	%	GEV
Blumenau	67	10	0,03	MVS	500	5,28	MVG
Encruzilhada do Sul	66	20	0,03	MOM	500	15,82	MLH
Iraí	21	10	0,01	MVG	500	34,47	MVS
Ponta Grossa	70	20	0,05	MOM	500	12,36	MLH
Toledo	48	50	0,11	MVG	500	21,42	MML
Uruguaiana	70	20	0,04	MML	500	8,97	MOM

Fonte: Produzido pelo autor.

n - tamanho da série; TR - tempo de retorno (anos).

É possível observar que, tomando a distribuição Gumbel como referência, as menores diferenças se concentram entre 10 a 20 anos de tempo de retorno, com exceção de Toledo em que o tempo de retorno é de 50 anos. As maiores diferenças encontradas se concentram no tempo de retorno de 500 anos.

4.2 Resultados da desagregação

Para análise do comportamento e comparação dos resultados obtidos através da aplicação dos coeficientes de desagregação citados anteriormente, utilizou-se precipitações diárias estimadas pela distribuição Gumbel para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

4.2.1 Parâmetros das equações IDF

Os coeficientes das equações de chuvas intensas aqui estimados são apresentados na Tabela 10 juntamente com o erro padrão de estimativa (*EPE*).

Para os parâmetros obtidos a partir das intensidades empregando o método das relações da CETESB (1986) é possível notar que: o parâmetro K teve pouca variação em torno da média (menos de 20% do valor da média), independente da IDF ajustada ser geral ou dividida; os parâmetros a , b e c se mantiveram praticamente constantes, o que gerou um coeficiente de variação menor do que 5% no pior dos casos; o erro padrão de estimativa obteve a média da ordem de 1 mm/h para a IDF válida para o intervalo de 60 a 1440 min, o que representa uma redução no erro das estimativas quando comparado com a equação geral que tem média do *EPE* de 4,40 mm.

Já os parâmetros obtidos a partir das intensidades geradas empregando os coeficientes propostos por Basso et al. (2016) obtiveram os seguintes comportamentos: o parâmetro K apresentou grande variação em torno da média; a variação do parâmetro a não superou 6% da média; o parâmetro b teve variação próxima a 40% para a primeira parte da IDF fracionada e também para a IDF geral, ficando em cerca de 15% para a equação válida 60 min ou mais; a variação do parâmetro c foi inferior a 10% do valor da média; o *EPE* foi menor para a segunda parte da equação dividida ao obter o valor médio de 1,77 mm/h, ao passo que a primeira parte da equação dividida e a equação geral obtiveram valores médios de *EPE* de 4,51 mm/h e 3,39 mm/h, respectivamente.

A pouca diferença apresentada nos coeficientes das equações geradas empregando as intensidades obtidas a partir dos coeficientes da CETESB (1986), pode ser explicada pelo fato dos coeficientes da mesma representarem uma média nacional do comportamento da intensidade das chuvas. Dessa forma, a única diferença existente está na magnitude dos eventos diários estimados. Já nas equações geradas após a aplicação dos coeficientes de desagregação de Basso et al. (2016), são observadas variações significativas nos coeficientes das IDFs. Tal comportamento poderia ser esperado, uma vez que os coeficientes propostos pelos autores têm o intuito de representar o comportamento regional das precipitações, o que conseqüentemente implica em equações IDF muito distintas.

Tabela 10 – Coeficientes das equações IDF obtido a partir da aplicação do método das relações de intensidade de CETESB (1986) e Basso et al. (2016).

Município	CETESB (1986)					Basso et al. (2016)				
	IDF - 5 a 60 min					IDF - 5 a 60 min				
	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>
Blumenau	586,35	0,165	7,317	0,646	3,76	2904,99	0,165	20,202	0,900	4,70
Encruzilhada	565,27	0,161	7,326	0,646	3,43	1044,80	0,161	10,113	0,770	3,28
Iraí	656,00	0,168	7,324	0,646	4,31	1021,28	0,168	9,083	0,746	3,89
Ponta Grossa	563,59	0,183	7,330	0,646	4,51	2481,84	0,183	16,925	0,886	5,77
Toledo	620,31	0,178	7,320	0,646	4,68	1429,86	0,178	15,739	0,791	4,52
Uruguaiana	838,75	0,170	7,303	0,645	5,74	1059,42	0,170	7,205	0,717	4,88
\bar{x}	638,38	0,171	7,320	0,646	4,40	1657,03	0,171	13,211	0,802	4,51
<i>cv</i> (%)	16,34	4,91	0,13	0,05	18,33	49,95	4,91	38,86	9,35	18,98
	IDF - 60 a 1440 min					IDF - 60 a 1440 min				
	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>
	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>
Blumenau	1127,45	0,165	15,774	0,781	0,83	3085,21	0,164	20,907	0,913	1,55
Encruzilhada	1098,28	0,161	16,160	0,782	0,75	1132,69	0,153	13,449	0,777	2,18
Iraí	1260,88	0,168	15,784	0,781	0,95	1318,20	0,163	16,295	0,787	1,82
Ponta Grossa	1093,24	0,183	16,135	0,782	1,00	2366,57	0,182	15,552	0,879	1,84
Toledo	1176,07	0,178	15,310	0,779	1,03	1697,71	0,176	19,294	0,822	1,73
Uruguaiana	1614,80	0,170	15,745	0,781	1,27	1508,15	0,170	16,229	0,780	1,47
\bar{x}	1228,45	0,171	15,818	0,781	0,97	1851,42	0,168	16,954	0,826	1,77
<i>cv</i> (%)	16,22	4,91	1,97	0,18	18,43	39,91	5,95	15,90	6,94	14,18
	IDF - 5 a 1440 min					IDF - 5 a 1440 min				
	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>
	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>	<i>K</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>EPE</i>
Blumenau	811,93	0,165	9,786	0,724	2,98	3291,52	0,165	21,448	0,926	3,53
Encruzilhada	781,78	0,161	9,784	0,724	3,56	1130,98	0,161	10,821	0,788	2,46
Iraí	907,97	0,168	9,789	0,724	4,47	1118,87	0,168	9,908	0,766	2,93
Ponta Grossa	779,14	0,183	9,786	0,724	4,64	2706,68	0,183	17,710	0,904	4,33
Toledo	857,99	0,178	9,780	0,724	4,82	1651,24	0,178	17,209	0,821	3,40
Uruguaiana	1162,93	0,170	9,780	0,724	5,94	1151,04	0,170	7,936	0,736	3,68
\bar{x}	883,62	0,171	9,784	0,724	4,40	1841,72	0,171	14,172	0,824	3,39
<i>cv</i> (%)	16,45	4,91	0,04	0,01	23,46	50,88	4,91	37,73	9,29	18,90

Fonte: Produzido pelo autor.

\bar{x} - média; *cv* - coeficiente de variação em percentagem.

4.2.2 Comparação com a NBR 10844

Os projetos de instalações prediais de drenagem de águas pluviais têm como base a norma brasileira NBR 10844. Tal normativa define que para o dimensionamento das estruturas de captação e condução das águas pluviais como calhas, condutores verticais e horizontais adote-se uma chuva com duração de 5 minutos, baseada nos da-

dos de precipitação máxima locais. A mesma norma ainda define que para construções com até 100 m² pode ser utilizada a intensidade $I = 150$ mm/h (ABNT, 1989).

As intensidades para a chuva de projeto com duração de 5 minutos para os tempos de retorno definidos pela NBR 10844, e obtidos pelas IDFs validas para durações de até 60 minutos geradas utilizando os coeficientes de desagregação de CETESB (1986) e Basso et al. (2016) estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Intensidades de precipitação em mm/h para uma chuva de 5 minutos de duração.

Município	NBR 10844/89			CETESB (1986)			Basso et al. (2016)		
	Tempo de retorno								
	1	5	25	1	5	25	1	5	25
Blumenau	120,00	125,00	152,00	115,85	151,15	197,22	159,03	207,50	270,73
Encruzilhada	106,00	126,00	158,00	111,56	144,49	187,14	128,99	167,06	216,37
Iraí	120,00	198,00	228,00	129,51	169,67	222,30	141,94	185,97	243,65
Ponta Grossa	120,00	126,00	148,00	111,17	149,31	200,53	161,04	216,29	290,50
Toledo	150,00	150,00	150,00	122,51	163,22	217,44	130,10	173,32	230,90
Uruguaiana	120,00	142,00	161,00	166,04	218,43	287,35	176,08	231,64	304,73

Fonte: Produzido pelo autor.

Por meio da Tabela 11 se conclui que para os tempos de retorno de 5 e 25 anos os valores desagregados por ambas metodologias são superiores aos definidos por norma, com exceção do município de Iraí.

Back e Bonetti (2014), ao estudarem 147 estações pluviométricas no estado de Santa Catarina aplicando a distribuição Gumbel e os coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986), observou que 82,8% das estações apresentaram intensidades superiores aos 150 mm/h definidos por norma.

Tal disparidade nos valores pode ser justificada por a NBR 10844 ser baseada em um estudo feito a muito tempo por Pfafstetter (1957), que segundo Genovez e Zuffo (2000) a maioria dos locais estudados por Otto possuíam séries pluviográficas da ordem de 10 anos de dados. Mesmo diante de séries históricas tão curtas muitos trabalhos continuam sendo baseados direta ou indiretamente na publicação de Otto Pfafsteter.

Genovez e Zuffo (2000) ainda colocam que os coeficientes baseados no estudo do DNOS, além de utilizarem séries muito curtas, constituem uma média nacional. O que vai de encontro ao fato de um país com dimensão continental como o Brasil ser caracterizado por diferentes climas. Ao realizar a média nacional, mascara-se as médias regionais ao incorporar características inerentes aos microclimas locais.

O mesmo autor ainda afirma que esses valores médios nacionais, deveriam ser revisados para médias regionais, de maneira a contemplar as precipitações predomi-

nantes em cada região, o que de certa forma pode ser observado nos trabalhos de Torrico (1974) e Basso et al. (2016).

Arboit, Mancuso e Fioreze (2017) também realizaram a geração da equação IDF para o município de Iraí, a partir de dados pluviométricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) contendo 21 anos de dados pluviométricos (de 1991 a 2012), empregando a distribuição Gumbel e os coeficientes de desagregação da CETESB (1986).

Apesar de Arboit, Mancuso e Fioreze (2017) terem utilizando uma série história com dimensões semelhantes a empregada neste trabalho, ao se aplicar a IDF desenvolvida pelos mesmos, são obtidos os valores de intensidades das chuvas de projeto com duração de 5 minutos de 152,16 mm/h, 204,60 mm/h e 275,11 mm/h para os tempos de retorno de 1, 5 e 25 anos, respectivamente. Ao comparar com os valores obtidos neste trabalho, também aplicando a distribuição Gumbel, os coeficientes da CETESB (1986) e dispostos na Tabela 11, é possível notar que os valores aqui obtidos são inferiores, chegando a uma diferença de mais de 50 mm/h para o tempo de retorno de 25 anos. Tal disparidade por ser justificada pela diferença nas máximas anuais obtidas a partir de diferentes estações pluviométricas, mesmo que situadas no mesmo município.

Back, Sonogo e Pola (2015) realizam a determinação dos coeficientes de desagregação de chuvas diárias empregando as séries pluviográficas de 1978 a 2014 para o município de Chapecó, SC, localizado a cerca de 350 km de Blumenau, SC, e Ponta Grossa, PR, e menos de 50 km de Iraí, RS, e menos de 300 km de Toledo, PR. O referido trabalho obteve relações de intensidade muito próximas aos propostos pela CETESB (1986), como pode ser observado na Tabela 12. Dada a proximidade do município de Iraí com o município de Chapecó, tal resultado pode reafirmar a pouca diferença nos valores obtidos para o mesmo ao aplicar os coeficientes de CETESB (1986) e Basso et al. (2016) (cerca de 20 mm/h para 25 anos de tempo de retorno).

Já outro estudo de Back, Oliveira e Henn (2012) ao analisar 13 estações pluviográficas no estado de Santa Catarina observaram que as relações entre precipitações de diferentes durações encontradas para as estações situadas no interior do estado apresentam diferenças inferiores a 5% em relação aos valores propostos pela CETESB (1986), enquanto que para as relações médias das estações situadas no litoral apresentaram valores até 50% inferiores.

Vargas et al. (2015) comparam diferentes coeficientes de desagregação para 15 municípios do estado do Rio Grande do Sul. Dentre os coeficientes empregados estão os propostos pela CETESB (1986) e Back, Oliveira e Henn (2012), que tiveram seus desempenhos comparados com diferentes equações IDF obtidas a partir de pluviógrafos situados em municípios do estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 12 – Coeficientes de desagregação para diferentes durações obtidos por Back, Sonogo e Pola (2015) para Chapecó/SC comparados com os propostos por CETESB (1986).

Relações entre durações	Coeficientes de desagregação	
	Back, Sonogo e Pola (2015)	CETESB (1986)
24 h / 1 dia	1,24	1,14
12 h / 24 h	0,82	0,85
10 h / 24 h	0,77	0,82
6h / 24 h	0,65	0,72
1 h / 24 h	0,35	0,42
30 min / 1 h	0,77	0,74
25 min / 30 min	0,90	0,91
20 min / 30 min	0,80	0,81
15 min / 30 min	0,68	0,70
10 min / 30 min	0,54	0,54
5 min / 30 min	0,37	0,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os autores Vargas et al. (2015) concluíram a partir do seu estudo que os coeficientes da CETESB (1986) resultaram em intensidades de chuva, para diferentes cenários, mais próximas das obtidas a partir das equações IDF ajustadas por dados pluviográficos. O que pode ter sido influenciado pelo fato de 14 das 98 estações pluviográficas empregadas no estudo de Pfafstetter (1957) estarem localizadas no estado do Rio Grande do Sul.

As conclusões dos estudos de Back, Oliveira e Henn (2012), Back e Bonetti (2014) e Vargas et al. (2015), somadas aos resultados deste trabalho, indicam que, para as localidades estudadas na Região Sul do Brasil, existe pouca variação nas relações de intensidade e duração das chuvas ao longo dos anos. Dessa forma, a magnitude dos valores de intensidade das chuvas de projeto são influenciadas em maior parte pela magnitude do evento diário máximo obtido a partir das séries históricas utilizando alguma distribuição de probabilidade, como a Gumbel ou a GEV e seus diferentes estimadores de parâmetros.

Como coloca Vargas et al. (2015), embora não seja comum na literatura da área a discussão sobre o tema, deve-se ressaltar que a função de densidade de probabilidade empregada pode impactar no ajuste das relações IDF. No que tange as chuvas intensas, existe uma tendência de que distribuições de extremos possuam melhor aplicabilidade, em especial as com multi-parâmetros.

Cabe ressaltar que, como afirmam Genovez e Zuffo (2000), a precisão da estimativa de intensidade está diretamente relacionada a proximidade do local estudado

com locais que possuem boas séries pluviográficas ou pluviométricas. Dado que as equações IDF demonstram melhores resultados quando obtidas através de séries mais longas de observações.

Logo, o estudo de Basso et al. (2016) representa um importante avanço diante da necessidade de se regionalizar os coeficientes comumente empregados na desagregação de chuvas diárias. Porém, deve ser empregado com cautela e ressalvas, uma vez que o mesmo foi realizado empregando uma gama de diferentes relações de intensidade para diferentes séries históricas, estudadas por autores aos quais o projetista não pode ter acesso.

5 Conclusões

Com o desenvolvimento do presente trabalho foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Existência de pouca diferença entre os resultados obtidos pelos estimadores de parâmetros da GEV e a Gumbel para até 100 anos de tempo de retorno em locais com mais de 65 anos de dados pluviométricos (diferença de menos de 7% do valor estimado pela distribuição Gumbel);
- Dividir as equações IDF em duas partes resulta em erros de estimativa menores para a fração válida para chuvas com duração superior a 60 minutos;
- Os coeficientes propostos por Basso et al. (2016) resultaram, em todos os casos aqui estudados, em intensidades superiores as obtidas empregando os coeficientes da CETESB (1986);
- Com exceção de Iraí, todos os demais municípios aqui estudados apresentaram valores de intensidade superiores aos definidos pela NBR 10844;
- Devem ser consideradas várias estações pluviométricas no estudo das chuvas de projeto para um mesmo município, uma vez que podem existir disparidades nos valores aferidos por estações diferentes para o mesmo período histórico.

Referências

- ABUMANSUR, C. *Estimativa da evapotranspiração mensal no Estado do Paraná*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Hidro Web*: Sistema de informações hidrológicas. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 set. 2017.
- ARBOIT, N. K. S.; MANCUSO, M. A.; FIOREZE, M. Ajuste de equação IDF por desagregação de chuvas diárias para o município de Iraí, RS. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 40, p. 248–253, Mar. 2017.
- ASSAD, D.; MASUTOMO, R.; ASSAD, L. Estimativa das precipitações máximas prováveis com duração de 24 horas e de 30 minutos. *Pes. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 27, n. 5, p. 677–686, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10844*: Instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro, 1989. 13 p.
- BACK, A. J. Relações Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas de Chapecó, Estado de Santa Catarina. *Acta. Sci. Agron.*, v. 28, n. 4, p. 575–581, Out./Dez. 2006.
- BACK, A. J.; BONETTI, A. V. Chuva de projeto para instalações prediais de águas pluviais de Santa Catarina. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 206–267, Out./Dez. 2014.
- BACK, A. J.; OLIVEIRA, J. L. R.; HENN, A. Relações entre precipitações intensas de diferentes durações para desagregação da chuva diária em Santa Catarina. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 16, n. 4, p. 391–398, 2012.
- BACK, A. J.; POLA, A. C. Relações entre precipitações intensas de diferentes durações de Videira, Santa Catarina. *Revista Tecnologia e Ambiente*, v. 22, 2016.
- BACK, A. J.; SONEGO, M.; POLA, A. C. Relações IDF de Chapecó-SC atualizadas com dados de 1976 a 2014. In: *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília/DF: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.
- BASSO, R. E. et al. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 21, n. 4, p. 635–641, 2016.
- BELL, F. C. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 95, p. 311–328, 1969.
- BRAGA, R. N. de S. et al. Determinação e interpolação dos coeficientes das equações de chuvas intensas para cidade do Rio de Janeiro. *Rev. Ambient. Água*, Taubaté, v. 13, n. 1, 2018.
- CHEN, C. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 12, p. 1603–1621, 1983.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. *Drenagem urbana*: Manual de projeto. 3. ed. São Paulo, 1986.

- COSTA NETO, P. L. de O. *Estatística*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2002.
- DAMÉ, R. de C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S. Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas de intensidade-duração-frequência para Pelotas - RS. *Eng. Agríc.*, v. 28, n. 2, p. 245–255, Abr./Jun. 2008.
- GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. *Hidrologia*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.
- GENOVEZ, A. M.; ZUFFO, A. C. Chuvas intensas no estado de são paulo: Estudos existentes e análise comparativa. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p. p.45–58, Jul./Set. 2000.
- GOMES, A. O. *Modelagem estatística da precipitação: estudo de caso bacia do Rio Taquarizinho/MS*. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2011.
- GOOGLE. *Google Maps*. Califórnia, 2018. Disponível em: <<https://goo.gl/maps/NPKgJiHZhHG2>>. Acesso em: 26 Mar. 2018.
- HOSKING, J. R. M. Algorithm as 215: Maximum-likelihood estimation of the parameters of the generalized extreme-value distribution. *J. R. Stat. Soc.*, v. 34, n. 3, p. 301–310, 1985.
- HOSKING, J. R. M. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *J. R. Stat. Soc.*, v. 52, n. 1, p. 105–124, 1990.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Ocorrência de El Niño. 2018. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 22 mar. 2018.
- JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 81, p. 159–171, 1955.
- MAGGI, C. F. *Determinação do índice de disponibilidade de umidade para a Região Oeste do Paraná*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.
- MARTINS, E. S.; STEDINGER, J. R. Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research*, v. 36, n. 3, p. 737–744, 2000. ISSN 1944-7973.
- MARTINS, E. S. P. R.; REIS JUNIOR, D. S.; ALEXANDRE, A. M. B. Uso de informação regional na estimativa de quantis de cheia GEV. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 2, p. 127–139, 2008.
- MEDEIROS, V. S. *Análise estatística de eventos críticos de precipitação relacionados a desastres naturais em diferentes regiões do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

- MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. *Irriga Botucatu*, v. 10, n. 4, p. 318–334, 2005.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM: Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- OLIVEIRA, A. S. de et al. Aplicabilidade da distribuição GEV ao estudo da precipitação máxima diária anual na Região Sul de Minas Gerais. *Revista Agrogeoambiental*, v. 6, n. 1, p. 30–44, Abril 2014.
- PANSERA, W. A. *Distribuição generalizada de chuvas máximas no Estado do Paraná*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.
- PARANÁ. Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA. *Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba*. Curitiba, 2002. 150 p.
- PFRAFSTETTER, O. *Chuvas intensas no Brasil: Relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 1957.
- PINTO, N. L. D. S. et al. *Hidrologia básica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- QUADROS, L. E. de; QUEIROZ, M. M. F. de; BOAS, M. A. V. Distribuição de frequência e temporal de chuvas intensas. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 33, n. 2, p. 401–410, 2011.
- QUEIROZ, M. M. F. de. *Análise das cheias anuais segundo a distribuição generalizada*. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia (Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- QUEIROZ, M. M. F. de; CHAUDHRY, F. H. Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos-LH. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 381–389, 2006.
- ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X. Modelo de desagregação e de geração de chuvas intensas no RS. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21º SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONE SUL*. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. v. 1, p. 746–753.
- RStudio Team. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston, MA, 2015. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>.
- SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: Aspectos tecnológicos: Fundamentos*. São Paulo, SP, 2012. 220 p.

- SAMPAIO, M. V. *Determinação e espacialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- SILVA, B. M. et al. Chuvas intensas em localidades do estado do Pernambuco. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 135–147, Jul./Set. 2012.
- SOBRINHO, V. F. et al. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 18, n. 7, p. 727–734, 2014.
- SOUZA, J. C. B. de. *A influência do método de escolha do parâmetro “C” na determinação de equações de chuvas intensas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2014.
- TOLEDO. Secretaria de Planejamento Estratégico. *Manual de Drenagem Urbana: Volume I*. Toledo, PR, 2017. 37 p.
- TORRICO, J. J. T. *Práticas hidrológicas*. Rio de Janeiro: TRANSCON, 1974.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: ABRH: EDUSP, 1993.
- VARGAS, M. M. et al. Análise de constantes de desagregação de chuva diária no estado do Rio Grande do Sul. In: *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília/DF: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.
- WANG, Q. J. LH moments for statistical analysis of extreme events. *Water Resources Research*, v. 33, n. 12, p. 2841–2848, 1997. ISSN 1944-7973.
- WILKEN, P. S. *Engenharia de drenagem superficial*. São Paulo: CETESB, 1978. 478 p.
- ZUFFO, A. C. Equações de chuvas são eternas? In: *XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SÃO PEDRO*. São Paulo/SP: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2004.