



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DAYANNE RODRIGUES OLIVEIRA

**MÉTODOS DE DESAGREGAÇÃO NA GERAÇÃO DE EQUAÇÕES IDF: ESTUDO
COMPARATIVO APLICADO A MUNICÍPIOS CEARENSES PROVIDOS DE
PLUVIÓGRAFOS**

CRATEÚS
2021

DAYANNE RODRIGUES OLIVEIRA

MÉTODOS DE DESAGREGAÇÃO NA GERAÇÃO DE EQUAÇÕES IDF: ESTUDO
COMPARATIVO APLICADO A MUNICÍPIOS CEARENSES PROVIDOS DE
PLUVIÓGRAFOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Me. Tatiane Lima Batista.

CRATEÚS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O46m Oliveira, Dayanne Rodrigues.
Métodos de desagregação na geração de equações IDF : estudo comparativo aplicado a municípios cearenses providos de pluviógrafos / Dayanne Rodrigues Oliveira. – 2021.
101 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2021.
Orientação: Prof. Me. Tatiane Lima Batista.
1. Chuvas intensas. 2. Equações IDF. 3. Desagregação. I. Título.

CDD 620

DAYANNE RODRIGUES OLIVEIRA

MÉTODOS DE DESAGREGAÇÃO NA GERAÇÃO DE EQUAÇÕES IDF: ESTUDO
COMPARATIVO APLICADO A MUNICÍPIOS CEARENSES PROVIDOS DE
PLUVIÓGRAFOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, Campus Crateús, como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Me. Tatiane Lima Batista (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Me. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Rosinha e Fábio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua bondade, amor incondicional e lealdade sem fim.

A Universidade Federal do Ceará, essencial na minha formação e crescimento profissional.

A minha orientadora, Prof^a. Me. Tatiane Lima Batista, por sua excelência na orientação e sua gentileza.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre e Prof^a. Me. Janine Brandão de Farias Mesquita, pela disponibilidade.

Aos meus pais Rosinha e Fábio, pelo amparo, cuidado e inspiração.

A minha irmã Jhulia Fabrinny, pelo apoio, amor, amizade e parceria constante.

As minhas avós Darlene e Júlia, por zelarem por mim e serem meu maior exemplo de dedicação.

As minhas amadas tias Rosileide, Francineide e Marta, pelos conselhos e palavras de ânimo.

Ao meu tio Flávio, por ter acreditado no meu sonho e me aconselhado a não desistir.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, obrigada.

“Tudo o que se move quer alcançar um objetivo.”

São Tomás de Aquino

RESUMO

Para um melhor dimensionamento de estruturas hidráulicas urbanas é necessário conhecer a relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas intensas. Estas estão geralmente associadas a curtas durações. Em função da pequena rede de pluviógrafos e a vasta disponibilidade de séries históricas de dados pluviométricos no território brasileiro, é comum o emprego de métodos de desagregação de chuvas diárias, registradas em pluviômetros, em chuvas de durações menores. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de três métodos de desagregação construindo equações IDF para os municípios de Fortaleza – CE e Quixeramobim – CE, ambos providos de equações de pluviógrafos, a partir de séries históricas de precipitações máximas diárias. Cinco distribuições de probabilidade foram testadas para cálculo do tempo de recorrência ou frequência dos eventos. Foram aplicadas as metodologias de desagregação desenvolvidas por Bell (1969) e adaptada por Righetto (1998), pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em 1979 o modelo tradicional e o alternativo proposto por Back (2020), além da metodologia de isozonas proposta por Tborga Torrico (1974). O ajuste dos parâmetros das equações construídas para os dois municípios foi verificado pelo cálculo do coeficiente de NASH, do Erro Padrão de Estimativa e análise da função S que é o somatório dos quadrados dos desvios. Para análise do desempenho das equações desenvolvidas neste trabalho foi realizada uma comparação entre estas e a equação de pluviógrafos de cada município, analisando o Índice de Desempenho e a correlação dos valores. O modelo alternativo proposto por Back (2020) apresentou os melhores ajustes, com coeficiente de NASH igual a 1 e menores valores de S para os dois municípios. A metodologia proposta por Tborga Torrico (1974) foi a que apresentou melhor desempenho quando comparada a equação IDF de pluviógrafos do município de Fortaleza – CE com índice de desempenho de 97%. Para Quixeramobim o método com maior índice de desempenho foi o de Bell, com valor médio de de 91%, seguido pelo método de Tborga Torrico (1974) com 87%. Entretanto, a reta de regressão dos valores obtidos pelo método de Bell apresentou o menor coeficiente angular e, portanto, o método é o que mais subestima os valores das intensidades em comparação com os resultados obtidos pela equação padrão.

Palavras-chave: Chuvas intensas. Equação IDF. Desagregação.

ABSTRACT

For a better design of urban hydraulic structures it is necessary to know the relationship between intensity, duration and frequency of heavy rainfall. These are usually associated with short durations. Due to the small network of rain gauges and the vast availability of historical series of rainfall data in Brazil, it is common to use methods of disaggregating daily rainfall, those recorded in rain gauges, into rainfall of shorter durations. This work aims to evaluate the performance of three disaggregation methods building IDF equations for the municipalities of Fortaleza - CE and Quixeramobim - CE, both provided with rain gauge equations, from historical series of maximum daily precipitation. Five probability distributions were tested to calculate the recurrence time or frequency of events. The disaggregation methodologies developed by Bell (1969) and adapted by Righetto (1998), by the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB) in 1979 the traditional and the alternative model proposed by Back (2020), and the isozone methodology proposed by Taborga Torrico (1974) were applied. The adjustment of the parameters of the equations built for the two municipalities was verified by calculating the NASH coefficient, the Standard Error of Estimation and analysis of the S function, which is the sum of the squares of the deviations. To analyze the performance of the equations developed in this work, a comparison was made between them and the rain gauge equation of each municipality, analyzing the Performance Index and the correlation of the values. The alternative model proposed by Back (2020) presented the best fits, with NASH coefficient equal to 1 and lower S values for the two municipalities. The methodology proposed by Taborga Torrico (1974) was the one that presented the best performance when compared to the IDF equation of rain gauge in the city of Fortaleza - CE with a performance index of 97%. For Quixeramobim the method with the highest performance index was Bell's, with an average value of 91%, followed by the method of Taborga Torrico (1974) with 87%. However, the regression line of the values obtained by Bell's method showed the smallest angular coefficient and, therefore, the method is the one that most underestimates the values of the intensities compared to the results obtained by the standard equation.

Keywords: Intense rains. IDF Equations. Disaggregation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Algoritmo do modelo proposto por Back (2020).....	30
Figura 2 - Mapa de isozonas.....	32
Figura 3 – Fluxograma do método de pesquisa.....	39
Figura 4– Mapa de Localização de Quixeramobim – CE	40
Figura 5 – Mapa de localização de Fortaleza – CE	42
Figura 6 – Registros de precipitações obtidos da ANA.....	53
Figura 7 - Curva intensidade-duração para $Tr=19$ anos de acordo o método de Bell para Fortaleza	62
Figura 8 - Curva intensidade-duração para $Tr=19$ anos de acordo com a metodologia da CETESB para Fortaleza.....	62
Figura 9 – Ajuste dos parâmetros f e e – Fortaleza	64
Figura 10 - Correlação linear – Pluviógrafo x Bell	69
Figura 11 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo tradicional	69
Figura 12 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo alternativo	70
Figura 13 - Correlação linear – Pluviógrafo x Isozonas	70
Figura 14 - Curva intensidade-duração para $Tr = 5$ anos – Fortaleza.....	72
Figura 15 - Curva intensidade-duração para $Tr = 10$ anos – Fortaleza.....	72
Figura 16 - Curva intensidade-duração para $Tr = 15$ anos – Fortaleza.....	73
Figura 17 - Curva intensidade-duração para $Tr = 20$ anos – Fortaleza.....	73
Figura 18 - Curva intensidade-duração para $Tr = 25$ anos – Fortaleza.....	74
Figura 19 - Curva intensidade-duração para $Tr = 30$ anos – Fortaleza.....	74
Figura 20 - Curva intensidade-duração para $Tr = 50$ anos – Fortaleza.....	75
Figura 21 - Curva intensidade-duração para $Tr = 100$ anos – Fortaleza.....	75
Figura 22 - Curva intensidade-duração para $Tr= 9$ anos de acordo com o método de Bell para Quixeramobim.....	82
Figura 23 - Curva intensidade-duração para $Tr= 9$ anos de acordo com a metodologia da CETESB para Quixeramobim	82
Figura 24 - Ajuste dos parâmetros f e e - Quixeramobim	84
Figura 25 – Correlação linear –Pluviógrafo x Bell.....	89
Figura 26 – Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo tradicional.....	89
Figura 27 – Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo alternativo.....	90
Figura 28 - Correlação linear – Pluviógrafo x Bell	91

Figura 29 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo tradicional	91
Figura 30 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo alternativo	92
Figura 31 - Correlação linear – Pluviógrafo x Isozonas	92
Figura 32 - Curva intensidade-duração para $Tr = 5$ anos – Quixeramobim	94
Figura 33 - Curva intensidade-duração para $Tr = 10$ anos – Quixeramobim	95
Figura 34 - Curva intensidade-duração para $Tr = 15$ anos – Quixeramobim	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Relações entre durações.....	27
Tabela 3 - Coeficientes desagregação de acordo com as isozonas	32
Tabela 4 – Critérios para interpretação do valor de ID.....	52
Tabela 5 – Informações gerais da estação pluviométrica de Fortaleza.....	54
Tabela 6 – Precipitações máximas diárias anuais para a estação do município de Fortaleza...	55
Tabela 7 – Resultado do teste de aderência Qui-Quadrado – Fortaleza	56
Tabela 8 – Resultados dos índices estatísticos – Fortaleza.....	56
Tabela 9 – Precipitação diária máxima para cada período de retorno – Fortaleza	57
Tabela 10 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método de Bell para Fortaleza.....	59
Tabela 11 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método das relações entre durações para Fortaleza	60
Tabela 12 – Parâmetros estimados para os métodos de Bell e das relações entre durações – Fortaleza	63
Tabela 13 – Parâmetros estimados para o modelo alternativo – Fortaleza.....	65
Tabela 14 – Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do Erro Padrão de Estimativa – Fortaleza	65
Tabela 15 – Quadrado dos desvios – Bell – Fortaleza – (mm/h) ²	66
Tabela 16 – Quadrado dos desvios – Relações entre durações (Tradicional)-Fortaleza-(mm/h) ²	66
Tabela 17 – Quadrado dos desvios – Relações entre durações (Alternativo) – Fortaleza (mm/h) ²	67
Tabela 18 – Classificações de acordo com o índice de desempenho, ID – Fortaleza	71
Tabela 19 – Informações gerais da estação pluviométrica de Quixeramobim	76
Tabela 20 – Precipitações máximas diárias da estação de Quixeramobim.....	77
Tabela 21 – Resultados dos teste de aderência Qui-Quadrado – Quixeramobim.....	78
Tabela 22 – Resultados dos índices estatísticos – Quixeramobim	78
Tabela 23 – Precipitações diárias máximas estimadas para diferentes períodos de retorno – Quixeramobim.....	79
Tabela 24 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método de Bell para Quixeramobim	80
Tabela 25 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações	

(mm/h) – Método das relações entre durações para Quixeramobim.....	81
Tabela 26 – Parâmetros estimados para os métodos de Bell e das relações entre durações – Quixeramobim.....	83
Tabela 27 – Parâmetros estimados para o modelo alternativo – Quixeramobim	84
Tabela 28 – Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do Erro Padrão de Estimativa – Quixeramobim.....	85
Tabela 29 – Quadrado dos desvios – Bell – Quixeramobim (mm/h) ²	86
Tabela 30 – Quadrado dos desvios – Modelo Tradicional - Quixeramobim (mm/h) ²	86
Tabela 31 – Quadrado dos desvios – Modelo Alternativo - Quixeramobim (mm/h) ²	87
Tabela 32 – Classificações de acordo com o índice de desempenho – Quixeramobim	90

LISTA DE VARIÁVEIS

T_r	Período de retorno
i	Intensidade de uma precipitação
t	Duração de uma precipitação
a	Parâmetro da equação IDF
b	Parâmetro da equação IDF
c	Parâmetro da equação IDF
d	Parâmetro da equação IDF
e	Parâmetro da equação IDF
f	Parâmetro da equação IDF
P	Altura pluviométrica
k	Relação regional de Bell
$r_{\frac{t_1}{t_2}}$	Relação entre duas precipitações de diferentes durações
DQM	Desvio Quadrático Médio
DQR	Desvio Quadrático Residual
DMA	Desvio Médio Absoluto
D_1	Estatística de teste Qui-Quadrado
α	Nível de significância
GL	Graus de liberdade
R^2	Coefficiente de determinação
R	Coefficiente de NASH
EPE	Erro Padrão da Estimativa
S	Soma do quadrado dos desvios
IC	Índice de concordância
ID	Índice de desempenho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização	17
1.2 Problema e questões de pesquisa	18
1.3 Objetivos	19
<i>1.3.1 Objetivo geral</i>	19
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i>	19
1.4 Justificativa	19
1.5 Delimitação do estudo	20
1.6 Roteiro temático	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Equações Intensidade – Duração – Frequência (IDF) de chuvas intensas	22
2.2 Métodos de desagregação de chuvas diárias	24
<i>2.2.1 Método de Bell</i>	24
<i>2.2.2 Método das relações entre durações</i>	26
<i>2.2.2.1 Modelo tradicional</i>	26
<i>2.2.2.2 Modelo alternativo</i>	28
<i>2.2.3 Método das Isozonas</i>	30
2.3 Distribuições de probabilidade	32
<i>2.3.1 Distribuição Gama com dois parâmetros</i>	34
<i>2.3.2 Distribuição Gumbel</i>	34
<i>2.3.3 Distribuição Log-normal com dois parâmetros</i>	35
<i>2.3.4 Distribuição Gama com três parâmetros</i>	35
<i>2.3.5 Distribuição Log-normal com três parâmetros</i>	36
2.4 Estudo das chuvas intensas no Ceará	37
3 METODOLOGIA	39
3.1 Caracterização da área de estudo	40

3.1.1 <i>Quixeramobim</i>	40
3.1.2 <i>Fortaleza</i>	41
3.2 Seleção de dados.	42
3.3 Distribuição de melhor ajuste.....	43
3.3.1 <i>Teste do Qui-Quadrado</i>	44
3.3.2 <i>Análise do coeficiente de determinação</i>	45
3.4 Aplicação dos métodos de desagregação.....	46
3.4.1 <i>Aplicação do método de Bell</i>	46
3.4.2 <i>Aplicação do método das relações entre durações</i>	47
3.5 Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas.....	47
3.5.1 <i>Parâmetros a, b e d</i>	48
3.5.2 <i>Parâmetro c</i>	48
3.5.3 <i>Parâmetros f, e do modelo alternativo.</i>	49
3.6 Verificação da qualidade do ajuste dos parâmetros	49
3.6.1 <i>Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe</i>	49
3.6.2 <i>Erro padrão da estimativa</i>	50
3.6.3 <i>Análise da soma dos quadrados dos desvios</i>	50
3.7 Comparação dos métodos de obtenção das equações IDF.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Seleção de dados	53
4.2 Fortaleza	54
4.2.1 <i>Precipitações máximas diárias anuais</i>	54
4.2.2 <i>Distribuição de melhor ajuste</i>	56
4.2.2.1 <i>Determinação da precipitação máxima diária para vários períodos de retorno</i>	57
4.2.3 <i>Aplicação dos métodos de desagregação</i>	58
4.2.3.1 <i>Aplicação do método de Bell (1969)</i>	58
4.2.3.2 <i>Aplicação do método das relações entre durações</i>	59

4.2.4 Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas	61
4.2.4.1 Parâmetro <i>c</i>	61
4.2.4.2 Parâmetros <i>a</i> , <i>b</i> e <i>d</i>	63
4.2.4.3 Parâmetros <i>f</i> e <i>e</i>	63
4.2.5 Verificação da qualidade do ajuste dos parâmetros	65
4.2.6 Comparação dos métodos de obtenção de equação IDF	68
4.3 Quixeramobim	76
4.3.1 Precipitações máximas diárias anuais	76
4.3.2 Distribuição de melhor ajuste	77
4.3.2.1 Determinação da precipitação máxima diária para vários períodos de retorno.....	79
4.3.3 Aplicação dos métodos de desagregação	79
4.3.3.1 Aplicação do método de Bell (1969)	79
4.3.3.2 Aplicação do método das relações entre durações.....	80
4.3.4 Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas	81
4.3.4.1 Parâmetro <i>c</i>	81
4.3.4.2 Parâmetros <i>a</i> , <i>b</i> e <i>d</i>	83
4.3.4.3 Parâmetros <i>f</i> e <i>e</i>	83
4.3.5 Verificação da qualidade do ajuste dos parâmetros	85
4.3.6 Comparação dos métodos de obtenção de equação IDF	88
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção serão apresentadas a contextualização do assunto abordado e as questões pelas quais esta pesquisa foi desenvolvida. Além disso, estão expostos os objetivos, justificativa e delimitação deste trabalho.

1.1 Contextualização

As águas das chuvas produzem grande impacto no espaço urbano, seja pela velocidade com que ocorre o escoamento dessas águas ou ainda pelo seu volume. No Brasil, a drenagem urbana durante muitos anos foi abordada de maneira acessória. As grandes metrópoles, em sua maioria, desenvolveram-se antes mesmo que a drenagem urbana fosse considerada como fator decisivo no planejamento de sua expansão (CANHOLI, 2005).

Em projetos de drenagem, frequentemente é necessário obter a intensidade de chuvas de curta duração, geralmente com durações inferiores a um dia. Habitualmente, a intensidade de uma chuva é estimada com base nas relações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de eventos de chuvas anteriores. Sendo assim, em locais que possuem dados dos eventos de precipitação, tenta-se ajustar equações de chuvas intensas, também chamadas de equações IDF (BACK *et al.*, 2011).

As chuvas intensas são agentes da erosão dos solos e da concentração de águas pluviais em vales e zonas ribeirinhas. Desse modo, compreender as relações entre intensidade, duração e frequência, torna-se importante para o dimensionamento de obras de controle de erosão e estruturas hidráulicas cuja finalidade é o escoamento de águas pluviais, tais como: bueiros, galerias, vãos de pontes, extravasores de barragens, etc. (VIEIRA *et al.*, 1998).

Segundo Genovez e Zuffo (2000), o estudo das equações de chuvas intensas possui, também, como um de seus principais objetivos estimar vazões máximas para rios com pouca ou nenhuma medição de vazões, geralmente cursos d'água de pequenas bacias, sejam urbanas ou rurais, e que constituem a macro-drenagem natural destas.

No entanto, existem fatores que dificultam o processo de obtenção dessas equações. Entre estes fatores, destacam-se as limitações referentes à base de dados disponíveis, tanto em termos de densidade da rede pluviográfica como em relação a escassez ou insuficiência de dados digitalizados. Em decorrência desses fatores, muitos estudos não

seguem a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) de utilizar séries de observação com 30 anos ou mais (SILVA *et al.*, 2002).

Diante disso, em função das limitações de dados pluviográficos, é cada vez mais comum a implementação de métodos que utilizam dados pluviométricos para geração das equações de chuvas intensas.

1.2 Problema e questões de pesquisa

No Brasil, sequências extensas de dados de chuvas com alta resolução temporal são raras, e a chuva diária, medida uma vez ao dia em um pluviômetro, é o dado mais acessível em termos do tamanho das séries de dados e da densidade das redes (HERNANDEZ, 2008).

Para Hernandez (2008), na ausência de posto pluviográfico na área de interesse, a chuva pode ser estimada com dados de um outro posto pluviográfico, diretamente ou através de interpolação espacial. No entanto, essa prática pode acarretar problemas de subdimensionamento o que comprometeria a segurança, ou ainda um superdimensionamento, responsável por custos elevados desnecessários.

Os métodos baseados na coleta de dados de chuvas diárias possuem um obstáculo na geração de curvas IDF, isso ocorre devido a indisponibilidade de dados de chuvas de durações mais curtas. (SOUZA *et al.*, 2016). Dessa forma, metodologias de desagregação da chuva diária possibilitam a determinação das equações IDF (COUTINHO *et al.*, 2019). Na literatura, são frequentemente utilizadas as metodologias de Bell, das relações entre durações e das isozonas (BATISTA (2018); BACK (2020); SOUZA, AMORÍM E TORRES (2016)).

No Ceará, onde se realizou este estudo, apenas os municípios de Fortaleza e Quixeramobim possuem equações IDF que foram desenvolvidas com base em dados de pluviógrafos por Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) (a mais recente) e Dernadin e Freitas (1982), respectivamente. Existem também estudos que foram realizados com base em dados de pluviômetros utilizando o método das isozonas, são exemplos: o estudo desenvolvido por Fachine Sobrinho *et al.* (2014) e, posteriormente automatizado por Alves (2015), para a Região do Cariri e o estudo desenvolvido por Batista (2018) para todos os municípios cearenses.

À vista disso, surgem os seguintes questionamentos:

- Qual a influência dos métodos de desagregação no comportamento das equações IDF para o estado do Ceará?
- Esse comportamento é semelhante ao encontrado em estudos realizados em outros locais do país?
- Qual dos métodos de desagregação, utilizados frequentemente na literatura, produzem equações que se ajustam melhor à região estudada?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor equações IDF utilizando métodos de desagregação de chuvas diárias para Fortaleza-CE e Quixeramobim-CE e avaliar seu desempenho.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar um levantamento das equações IDF mais recentes e construídas com base em dados de pluviógrafos para os municípios;
- Propor a equação IDF com base em dados de postos pluviométricos para cada município utilizando o Método de Bell e o Método da Relação entre Durações (modelo tradicional e modelo alternativo).
- Comparar as equações IDF obtidas através da desagregação com a equação obtida com dados pluviográficos (encontradas na literatura) para cada município;
- Analisar a influência do método da desagregação no comportamento da equação IDF.

1.4 Justificativa

O conhecimento de eventos hidrológicos extremos é um requisito para projetos de

drenagem, impermeabilização e outras obras de engenharia, tanto em zonas urbanas ou rurais, pois permite aos projetistas considerar os riscos envolvidos e escolher a melhor solução do ponto de vista técnico e econômico (SOUZA *et al.*, 2016).

Como citado anteriormente, alguns estudos foram realizados no estado do Ceará utilizando, preponderantemente, a metodologia das isozonas para geração de equações IDF. Os municípios de Fortaleza e Quixeramobim possuem equações IDF geradas através de dados de pluviógrafos (SILVA, PALÁCIO JÚNIOR E CAMPOS (2013); DERNADIM E FREITAS (1982)), o que permite a realização de uma comparação e análise de desempenho de equações construídas com base em dados pluviométricos.

Portanto, a carência de estudos que trabalhem com outros métodos de desagregação da chuva diária na região e a importância, anteriormente destacada, das equações IDF no estudo das chuvas intensas de um determinado local fortalecem a relevância deste trabalho.

Isto posto, este trabalho contribui com o estudo das chuvas intensas no Ceará à medida que produz informações sobre a influência dos métodos de desagregação da chuva diária no comportamento das equações IDF.

1.5 Delimitação do estudo

O presente estudo se restringe ao ajuste de equações IDF para os municípios de Fortaleza e Quixeramobim utilizando métodos de desagregação de dados pluviométricos, analisando a precisão destas equações quando comparadas às que são obtidas a partir de dados pluviográficos.

1.6 Roteiro temático

O presente trabalho é composto por cinco seções. Na primeira seção estão apresentados a contextualização do estudo, a questão pela qual a pesquisa foi motivada, os objetivos deste trabalho, sua justificativa e delimitação. Em seguida, tem-se a segunda seção, esta corresponde ao referencial teórico, constituído por quatro partes onde estão apresentados o conceito de chuvas intensas e equações IDF, os métodos mais utilizados na literatura para

desagregação de chuvas diárias, as distribuições de probabilidade comumente utilizadas para variáveis hidrológicas e o estudo de chuvas intensas no estado do Ceará. Na seção três está caracterizada a área de estudo e a descrição da metodologia empregada para construção das equações IDF desta área. Na seção quatro os resultados e discussão relevantes são expostos. As conclusões e sugestões para estudos posteriores estão na quinta e última seção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será apresentada uma revisão de literatura direcionada a assuntos pertinentes à construção de equações IDF a partir de registros pluviométricos, estes são: equações Intensidade – Duração – Frequência (IDF) de chuvas intensas, métodos de desagregação de chuvas diárias, distribuições de probabilidade e estudo das chuvas intensas no Ceará.

2.1 Equações Intensidade - Duração - Frequência (IDF) de chuvas intensas

Chuvas de curta duração e elevada intensidade são ditas chuvas intensas (SILVA, 2009). Tucci (1997) afirma que, ao correlacionar intensidades e durações de precipitações é possível observar que quanto mais intensa for uma chuva, menor será sua duração, mantendo a altura precipitada constante.

Conhecer a intensidade da precipitação é um fator importante no controle de possíveis inundações e erosão do solo. A chuva, por ter potencial para gerar escoamento, é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia (TUCCI, 1997).

Existem, segundo Tucci (1997), basicamente, duas maneiras para fazer a medição de uma chuva. As chuvas podem ser medidas:

- pontualmente, através de pluviógrafos e pluviômetros, o primeiro registra automaticamente os dados continuamente no tempo e o segundo necessita de leituras manuais a intervalos de tempo fixos;
- espacialmente, com uso de radares.

Para Hernandez (2008), caracterizar o regime de eventos de chuvas intensas de pequena duração em determinada região ao longo do tempo é assunto de interesse não somente conceitual, mas também prático, tendo em vista a necessidade de se entender esse regime a fim de dimensionar corretamente obras hidráulicas em pequenas bacias hidrográficas. A relação entre as grandezas intensidade, duração e frequência deve ser obtida a partir da observação de séries de dados suficientemente longas e representativas (TUCCI, 1997).

Pinto (1976), define os conceitos de intensidade instantânea e intensidade média da seguinte forma:

- intensidade instantânea: a relação entre um acréscimo infinitesimal de altura pluviométrica e um intervalo infinitesimal de tempo;
- intensidade média: a relação entre uma precipitação e um intervalo de tempo finito.

A duração pode ser compreendida como o intervalo entre o tempo inicial e o tempo final da precipitação. Além disso, a duração pode compreender completamente ou não o episódio de chuva analisado.

As chuvas são tanto mais raras quanto mais intensas. A fim de considerar a variação da intensidade com a frequência, é necessário fixar a duração. A frequência de um evento de chuva intensa é dada por T_r que é o tempo de retorno ou recorrência (PINTO, 1976). O valor de T_r é dado pela Equação 1:

$$T_r = \frac{1}{p} \quad (1)$$

Em que:

T_r : período de retorno em anos;

p : probabilidade de um determinado evento hidrológico ser igualado ou superado em um ano qualquer.

De acordo com Tucci (1997), a Equação 2 expressa genericamente uma curva IDF.

$$i = \frac{a \times T_r^b}{(t+c)^d} \quad (2)$$

Em que:

i : intensidade da chuva em mm/h;

T_r : período de retorno em anos;

t : duração da chuva em min;

a, b, c e d são parâmetros regionais.

2.2 Métodos de desagregação de chuvas diárias

Nestes tópicos serão abordados alguns dos métodos utilizados para desagregação de chuvas diárias em chuvas de menores durações.

2.2.1 Método de Bell

O Método de Bell consiste em estimar a altura pluviométrica de uma chuva intensa a partir da altura pluviométrica de um evento padrão cuja duração e período de retorno são, respectivamente, 60 minutos e 2 anos. A altura é estimada a partir Equação 3:

$$P(t; T_r) = (\alpha \times \ln(T_r) + \beta_1) \times (\beta_2 \times t^\gamma - \beta_3) \times P(60; 2) \quad (3)$$

Em que:

$P(t; T_r)$: altura pluviométrica (mm) de chuva de duração t e período de retorno T_r ;

$P(60; 2)$: altura pluviométrica (mm) de chuva padrão cuja duração e tempo de retorno são, respectivamente, 60 min e 2 anos;

α , β_1 , β_2 , β_3 e γ : parâmetros regionais ajustados pelo método dos mínimos quadrados;

t : duração da precipitação;

T_r : período de retorno da precipitação.

Bell utilizou dados de vários continentes e ajustou a Equação 4 (TUCCI, 1997):

$$P(t; T_r) = (0,35 \times \ln(T_r) + 0,76) \times (0,54 \times t^{0,25} - 0,50) \times P(60; 2) \quad (4)$$

Em que:

$P(t; T_r)$: altura pluviométrica (mm) de chuva de duração t e período de retorno T_r ;

$P(60; 2)$: altura pluviométrica (mm) de chuva padrão cuja duração e tempo de retorno são, respectivamente, 60 min e 2 anos;

t : duração da precipitação;

T_r : período de retorno da precipitação.

Tucci (1997) afirma que a Equação 4 é recomendada para chuvas com duração entre 5 e 120 minutos, e período de retorno entre 2 e 20 anos.

Com base em estudos de Hersfield, Bell estabeleceu uma relação para a precipitação $P(60;2)$ (TUCCI, 1997). A relação é expressa pela Equação 5:

$$P(60; 2) = 6,69 \times 10^{-3} \times M \times n^{0,33} \quad (5)$$

Em que:

M: Média das precipitações máximas anuais com duração diária, em mm, variando entre 0 e 50,8 mm;

n: Número médio de dias de tormentas, variando entre 1 e 80 dias.

Com M variando de 50,8 a 114,3 mm e n variando de 1 a 80 dias, a Equação 5 é reescrita (Equação 6) como:

$$P(60; 2) = 8,27 \times 10^{-3} \times M^{0,67} \times n^{0,33} \quad (6)$$

O modelo de Bell propõe outra relação (Equação 7) para a estimativa do valor de $P(60;2)$ (SOUZA, AMORIM E TORRES, 2016).

$$P(60; 2) = k \times P(dia; 2) \quad (7)$$

Em que:

k: relação regional entre a precipitação pluvial de 60 minutos e um dia de duração para o período de retorno de 2 anos;

$P(dia; 2)$: altura pluviométrica máxima diária anual correspondente ao período de retorno de 2 anos, em mm.

Righetto (1998) sugere que a Equação 3, com base nos dados da rede pluviométrica brasileira, pode ser reescrita (Equação 8) como:

$$P(t; T_r) = (0,31 \times \ln(T_r) + 0,70) \times (0,38 \times t^{0,31} - 0,39) \times P(60; 2) \quad (8)$$

Righetto (1998) acrescenta que, o valor de $P(60;2)$ pode ser estimado pela Equação 9:

$$P(60; 2) = 0,51 \times P(\text{dia}; 2) \quad (9)$$

O valor de 0,51 corresponde à relação regional entre a precipitação pluvial de 60 minutos e a de um dia de duração para o período de retorno de 2 anos, obtida através da avaliação de precipitações registradas no estado de São Paulo.

2.2.2 Método das relações entre durações

2.2.2.1 Modelo tradicional

Desenvolvido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) em 1979, consiste na análise da tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações.

Segundo Tucci (1997), este método baseia-se em duas características que são observadas nas curvas intensidade-duração-frequência correspondentes a postos localizados em diversas regiões do mundo. Estas características são:

- existe a tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações manterem-se paralelas entre si;
- para diferentes regiões, há uma grande similaridade nas relações entre precipitações médias máximas de diferentes durações.

As relações entre durações são obtidas pela Equação 10:

$$r_{\frac{t_1}{t_2}} = \frac{P(t_1; T_r)}{P(t_2; T_r)} \quad (10)$$

Em que:

r: relação entre duas precipitações de durações diferentes e mesmo período de retorno, mm/mm;

$P(t_1; T_r)$: altura pluviométrica associada à duração t_1 , mm;

$P(t_2; T_r)$: altura pluviométrica associada à duração t_2 , mm.

O método das relações entre durações é de grande aplicabilidade devido à vasta rede de pluviômetros espalhada pelo país.

Os valores médios destas relações para o Brasil e os Estados Unidos são apresentados na Tabela 1.

É necessário distinguir os termos ‘chuva de 1 dia ou chuva diária’ e ‘chuva de 24h’. Portanto, tem-se que:

- chuva diária corresponde a precipitação que ocorre entre dois instantes de observação pluviométrica;
- precipitação de 24 horas é o valor observado em um intervalo de 24 horas consecutivas.

Tabela 1 - Relações entre durações

Relação	BRASIL	ESTADOS UNIDOS	ESTADOS UNIDOS
		U. S. W. Bureau	Denver
5min/30min	0,34	0,37	0,42
10min/30min	0,54	0,57	0,63
15min/30min	0,70	0,72	0,75
20min/30min	0,81		0,84
25min/30min	0,91		0,92
30min/1h	0,74	0,79	
1h/24h	0,42		
6h/24h	0,72		
8h/24h	0,78		
10h/24h	0,82		
12h/24h	0,85		
24h/1dia	1,14*	1,13	
24h/1dia	1,10**		

*Valor da cidade de São Paulo.

**TaborgaTorrice (1974).

Fonte: Tucci (1997).

2.2.2.2 Modelo Alternativo

Proposto por Back (2020), consiste em uma metodologia alternativa para obtenção de equações IDF com base nos coeficientes de desagregação de chuvas diárias do método de relações entre durações, descrito no item anterior.

O modelo tem como principais vantagens a melhor precisão da estimativa e a facilidade de atualizar a equação alterando apenas o valor da chuva máxima diária, associada ao período de retorno correspondente, que varia de acordo com a localidade.

O modelo tradicional gera valores do quadrado dos desvios altos para valores extremos de períodos de retorno e para curtas durações. Em casos como projetos de drenagem é comum utilizar o período de retorno como 2 anos e duração de 5 a 10 minutos. Para estes valores, o modelo tradicional pode propor alturas pluviométricas subestimadas. Sendo assim, uma forma de obter um valor mais preciso seria ajustar mais de uma equação para diferentes intervalos de duração. No entanto, essa alternativa pode dificultar ainda mais o processo de obtenção da equação e tornar a implementação computacional inviável (BACK, 2020).

O modelo alternativo é dado pelas equações 11 e 12:

$$P = \frac{t}{27,9327 + 3,8346t^{0,7924}} P_{1 \text{ dia}} \quad (11)$$

$$i = \frac{60}{27,9327 + 3,8346t^{0,7924}} P_{1 \text{ dia}} \quad (12)$$

Em que:

P: altura pluviométrica, em mm;

t: duração da chuva em minutos (de 0 a 1440 minutos);

$P_{1 \text{ dia}}$: precipitação máxima diária, em mm, associada a um período de retorno;

i - intensidade máxima de precipitação, em mm/h.

Back (2020) sugere uma equação ainda mais generalista. Esta consiste na substituição de $P_{1 \text{ dia}}$ por uma expressão que inclua o período de retorno, T_r . O autor observou que para a maioria das distribuições de probabilidade testadas em seu trabalho, o ajuste pelo modelo logarítmico foi considerado muito bom, com coeficiente de determinação, R^2 , superior a 0,99. Sendo assim, a Equação 11 pode ser reescrita (Equação 13) como:

$$P = \frac{t}{27,9327+3,8346t^{0,7924}} [f \ln(T_r) + e] \quad (13)$$

Em que:

P: altura pluviométrica, em mm;

t: duração da chuva em minutos (de 0 a 1440 minutos);

f, e: coeficientes que devem ser ajustados por regressão logarítmica dos valores de máxima precipitação diária e período de retorno;

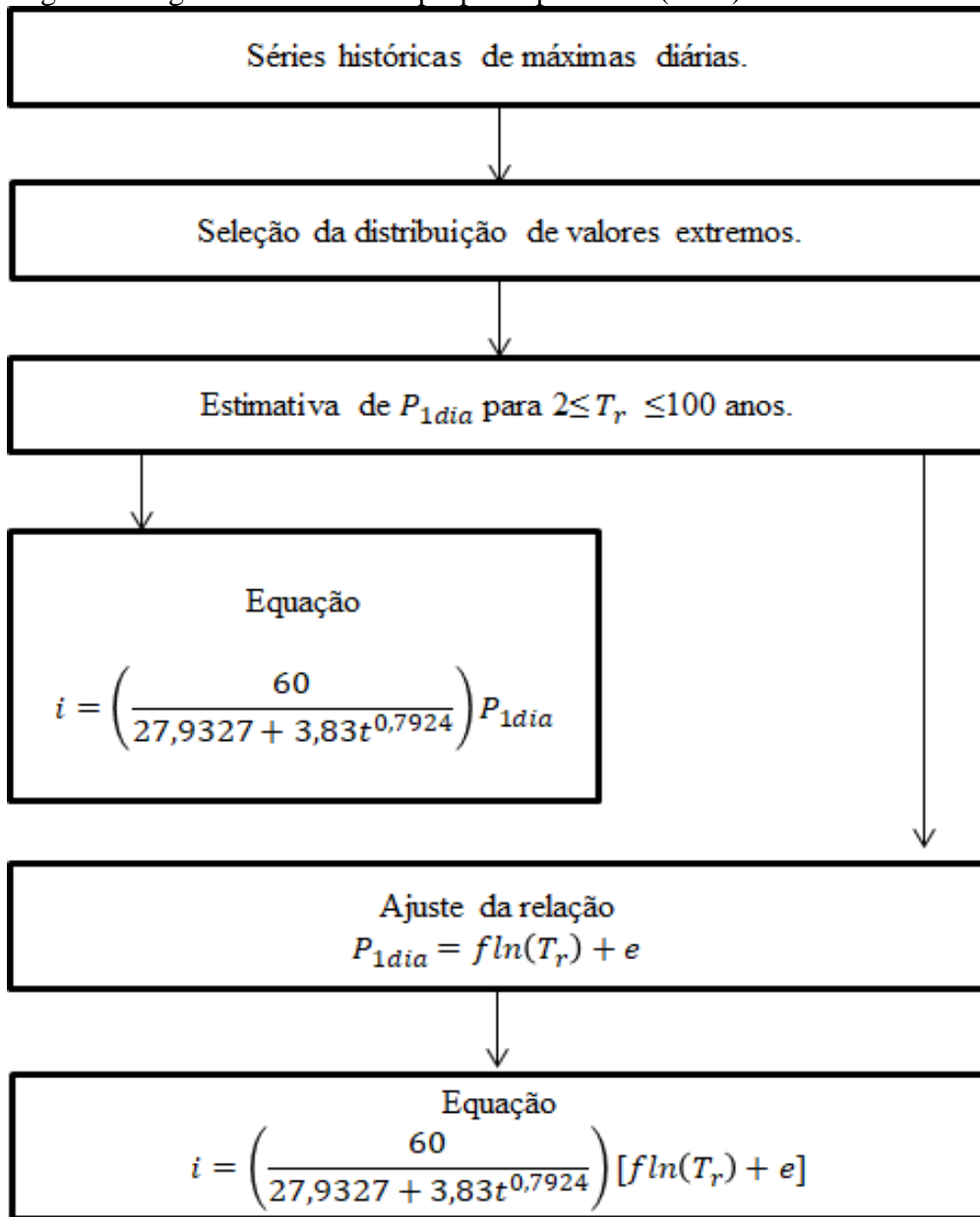
T_r : período de retorno, em anos.

De acordo com Back (2020), a equação proposta reduz consideravelmente os desvios entre a intensidade de chuva calculada pela desagregação e a intensidade de chuva estimada pela equação. Em relação à Equação 11, o primeiro termo corresponde à relação entre a precipitação de duração t minutos e a máxima precipitação diária ($P_t/P_{1 \text{ dia}}$). Essa relação foi obtida através do ajuste de uma função aos coeficientes de desagregação apresentados na Tabela 1, tendo como máxima diferença 1,4%. Além disso, o autor enfatiza três vantagens da equação ajustada, que são:

- Relações para durações ausentes na Tabela 1 podem ser obtidas;
- O modelo pode ser atualizado ou aplicado a outras localidades brasileiras apenas com a alteração do valor da precipitação máxima diária;
- Os valores de $P_{1 \text{ dia}}$ podem ser facilmente espacializados.

A Figura 1 mostra uma esquematização do modelo proposto por Back (2020).

Figura 1- Algoritmo do modelo proposto por Back (2020)



Fonte: Adaptado de Back (2020).

2.2.3 Método das Isozonas

Taborga Torrico (1974) percebeu que ao desenhar, em um papel de probabilidade, as precipitações de 24 horas e de 1 hora de diferentes estações pluviográficas do Brasil, as respectivas retas de altura de precipitação/duração, quando prolongadas, tendiam a cortar o eixo das abscissas em um mesmo ponto em determinadas áreas geográficas. Essa tendência, observada por Taborga Torrico, significa que a relação entre as chuvas de 1 e 24 horas, para

um mesmo período de retorno e em cada área homóloga, é constante e não depende das alturas de precipitação.

Construiu-se, então, o mapa de isozonas relacionando as alturas de precipitação máxima anual de uma hora com a máxima anual de 24 horas para cada posto pluviográfico. Foram usados os dados das mesmas estações utilizadas por Otto Pfafstetter em seu livro “Chuvas Intensas no Brasil” (TORRICO,1974).

As oito isozonas e suas características estão apresentadas no Quadro 1.

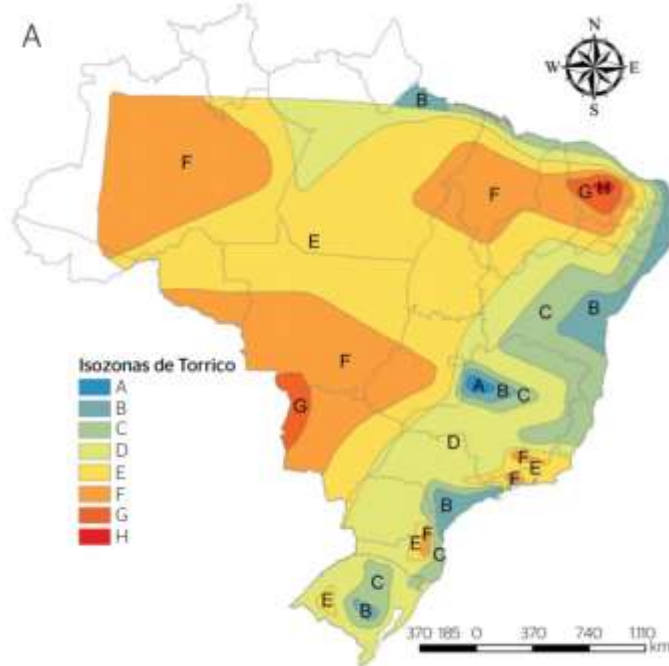
Quadro 1 - Isozonas e suas respectivas características

Isozonas	Características
A	Coincide com a zona de maior precipitação anual do Brasil, com coeficientes de intensidade baixos.
B e C	Tipificam a zona de influência marítima, com coeficientes de intensidade suaves.
D	Tipifica as zonas de transição (entre continental e marítima). Esta isozona se prolonga, caracterizando a zona de influência do Rio Amazonas.
E e F	Tipificam as zonas continental e do noroeste, com coeficientes de intensidade altos.
G e H	Tipificam a zona de caatinga nordestina, com coeficientes de intensidade muito altos.

Fonte: Taborga Torrico (1974).

A Figura 2 apresenta o mapa de isozonas e na Tabela 2 estão os coeficientes de desagregação de acordo com as isozonas.

Figura 2 - Mapa de isozonas



Fonte: Basso *et al.*, 2016.

Tabela 2 - Coeficientes desagregação de acordo com as isozonas

T_r anos	1h/24h (%)										6min/24h (%)	
	5	10	15	20	25	30	50	100	1000	10000	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	36,6	35,4	34,3	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
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	48,6	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Tucci (1997).

2.3 Distribuições de probabilidade

Tucci (1997) afirma que, por não ser possível saber a evolução dos valores dos fatores que influenciam em um evento hidrológico, tais como, temperatura, vento, insolação, precipitação, evaporação e outros, um evento deste tipo é dito aleatório.

Sendo assim, para que haja uma análise desses eventos, partindo do princípio de que eles não podem ser reproduzidos, é necessário recorrer à teoria das probabilidades e

utilizar de eventos já ocorridos, os quais formam uma amostra, para prever eventos futuros (TUCCI, 1997).

Segundo Naghettini e Pinto (2007), é possível atribuir probabilidades e tempos de retorno a eventos hidrológicos extremos de duas maneiras: métodos empíricos e métodos analíticos. O emprego dos métodos empíricos quando a amostra é relativamente pequena fornece uma estimativa com maior incerteza. Portanto, é comum supor que os dados hidrológicos são aleatórios e seguem uma distribuição de probabilidade analítica (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). De acordo com Villela e Mattos (1975), a estatística dos valores extremos é a maneira mais adequada para caracterizar a distribuição de eventos intensos de chuvas.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a distribuição Gama mostra-se interessante na representação de variáveis hidrológicas e hidrometeorológicas por três características: a versatilidade das formas, o coeficiente de assimetria que assume valores positivos e variáveis, e o fato da variável aleatória não ser definida para valores negativos.

Naghettini e Pinto (2007), afirmam ainda que a distribuição de valores extremos do Tipo I, também conhecida como distribuição de Gumbel, é comumente utilizada na análise de variáveis hidrológicas. Altamente empregada na determinação das relações intensidade-duração-frequência de eventos de chuvas intensas e vazões de enchentes.

Vários estudos mostram que as séries anuais de chuvas máximas se adequam bem a distribuição de Gumbel, e muitas vezes essa distribuição é usada sem realizar teste de aderência ou sem procurar uma distribuição que represente melhor (BACK, 2020).

Como a variável log-normal é sempre positiva e o coeficiente de assimetria sempre maior que zero e não fixo, a distribuição log-normal é uma forma paramétrica que pode se adequar muito bem à modelação de dados de alturas de precipitações máximas mensais, trimestrais e anuais (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Nos tópicos seguintes serão apresentadas as funções e parâmetros das distribuições de probabilidade empregadas neste estudo, segundo Alves (2015).

2.3.1 Distribuição Gama com dois parâmetros

A função densidade de probabilidade da distribuição Gama com dois parâmetros é dada pela Equação 14:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\nu \cdot \Gamma(\nu)} \cdot x^{\nu-1} \cdot e^{-x/\beta} \quad (14)$$

Em que: β , ν são, respectivamente, os parâmetros de escala e de forma, e $\Gamma(\nu)$ é uma função (Equação 15).

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty x^{\nu-1} \cdot e^{-x} dx \quad (15)$$

Os parâmetros β e ν são obtidos através das estimativas amostrais, média e desvio padrão, pelas equações 16 e 17.

$$\beta = \frac{\sigma^2}{\mu} \quad (16)$$

$$\nu = \frac{\mu^2}{s^2} \quad (17)$$

2.3.2 Distribuição Gumbel

Na distribuição Gumbel, a função de densidade de probabilidade é dada pela Equação 18:

$$f(x) = \alpha e^{\{-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}\}}, x \in (-\infty, \infty) \quad (18)$$

Em que: α é o parâmetro de escala e β é o parâmetro de posição.

Os parâmetros são obtidos em função das estimativas amostrais da média e do desvio padrão pelas equações 19 e 20.

$$\beta = \mu - 0,451\sigma \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{1,2826}{\sigma} \quad (20)$$

Em que: μ é a média da amostra e σ é o desvio padrão da amostra.

2.3.3 Distribuição Log-normal com dois parâmetros

A função densidade de probabilidade da distribuição Log-normal com dois parâmetros é dada pela Equação 21:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \cdot \frac{(\ln(x) - \mu)^2}{\sigma^2}}; x \geq 0 \quad (21)$$

Em que $f(x) = \ln(x)$, σ é o desvio padrão da amostra e μ é a média da amostra.

2.3.4 Distribuição Gama com três parâmetros

A versão da distribuição Gama com três parâmetros é dada pela Equação 22:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\nu \cdot \Gamma(\nu)} \cdot (x - \delta)^{\nu-1} \cdot e^{-(x-\delta)/\beta}, x \geq \delta \quad (22)$$

Em que: β, ν, δ são, respectivamente, os parâmetros de escala, de forma e de posição, e $\Gamma(\nu)$ é uma função.

Os parâmetros β, ν, δ são obtidos através das estimativas amostrais, média e desvio padrão, pelas equações 23, 24 e 25.

$$\nu = \frac{4}{A_s^2} \quad (23)$$

$$\beta = \frac{\sigma A_s}{2} \quad (24)$$

$$\delta = \mu - \frac{2\sigma}{A_s} \quad (25)$$

Em que: A_s é o coeficiente de assimetria da amostra.

2.3.5 Distribuição Log-normal com três parâmetros

Na distribuição Log-normal com três parâmetros é inserido um parâmetro de posição A_0 e isso faz com que todo o conjunto amostral sofra um deslocamento do tipo $y = \ln(x-A_0)$. Portanto, a função densidade é dada pela Equação 26:

$$f(x) = \frac{1}{(x-A_0) \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \cdot \frac{(\ln(x-A_0) - \mu_0)^2}{\sigma_0^2}}, x \geq 0 \quad (26)$$

Em que $f(x) = \ln(x)$; σ_0 é o desvio padrão da amostra deslocada; μ_0 é a média da amostra deslocada e A_0 é o fator de posição para deslocamento.

O terceiro parâmetro é determinado pelo menor valor obtido para a função (Equação 27):

$$f(x) = N \times \ln(\sigma_0) + \frac{N \times \ln(2\pi)}{2} + \sum_1^N [\ln(y_t - A_0)] + \frac{\sum_1^N [\ln(y_t - A_0) - \mu_0]^2}{2\sigma_0} \quad (27)$$

$A_0 <$ Menor valor da amostra

Em que: $f(x) = \ln(x)$, σ_0 é o desvio padrão da amostra deslocada, μ_0 é a média da amostra deslocada, A_0 é o fator de posição para deslocamento, N é o número de dados da amostra e y_t é o valor dos dados da amostra.

2.4 Estudo das chuvas intensas no Ceará

Algumas regiões do estado do Ceará já foram contempladas com estudos locais a respeito de equações de chuvas intensas. Entre estes estudos, destacam-se:

- Rodrigues *et al.* (2008): O estudo abrange os municípios de Fortaleza e Pentecostes. Foram selecionadas duas estações meteorológicas, uma em cada município. Dos pluviogramas disponíveis foram selecionados aqueles que apresentavam as maiores alturas pluviométricas. Calculou-se, através do método de Chow-Gumbel, a máxima intensidade pluviométrica provável, e relacionando a equação IDF na sua forma geral com as propriedades logarítmicas foi possível obter os parâmetros regionais. O estudo apresenta as equações IDF para $T_r = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100$.
- Fachine Sobrinho *et al.* (2014) e Fachine Sobrinho (2011): O estudo abrange os municípios da Região Metropolitana do Cariri, estes são: Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha. O trabalho consiste no emprego da metodologia de desagregação de chuvas diárias pelo método das isozonas proposto por Taborga Torrico (1974) para se obter as equações IDF de cada um dos municípios. As equações obtidas são válidas para durações inferiores a 240 min e período de retorno de até 100 anos.
- Silva, Palácio Júnior e Campos (2013): O estudo apresenta uma equação de chuvas intensas para o município de Fortaleza. A equação foi obtida a partir da série histórica de dados do pluviógrafo instalado em um dos campus da Universidade Federal do Ceará. A equação obtida é válida para períodos de retorno de 2 a 100 anos, e duração de até 120 minutos.
- Alves (2015): Desenvolvimento de um programa computacional na linguagem Java. O programa tinha como objetivo sistematizar a metodologia desenvolvida por Fachine Sobrinho (2011) para geração de equações IDF a partir de dados pluviográficos através do método das isozonas. O programa foi aplicado na geração das equações IDF dos 30 municípios da mesorregião do Cariri cearense.
- Batista (2018): Desenvolvimento de um programa computacional na linguagem Java a fim de sistematizar a geração de equações IDF para os 184

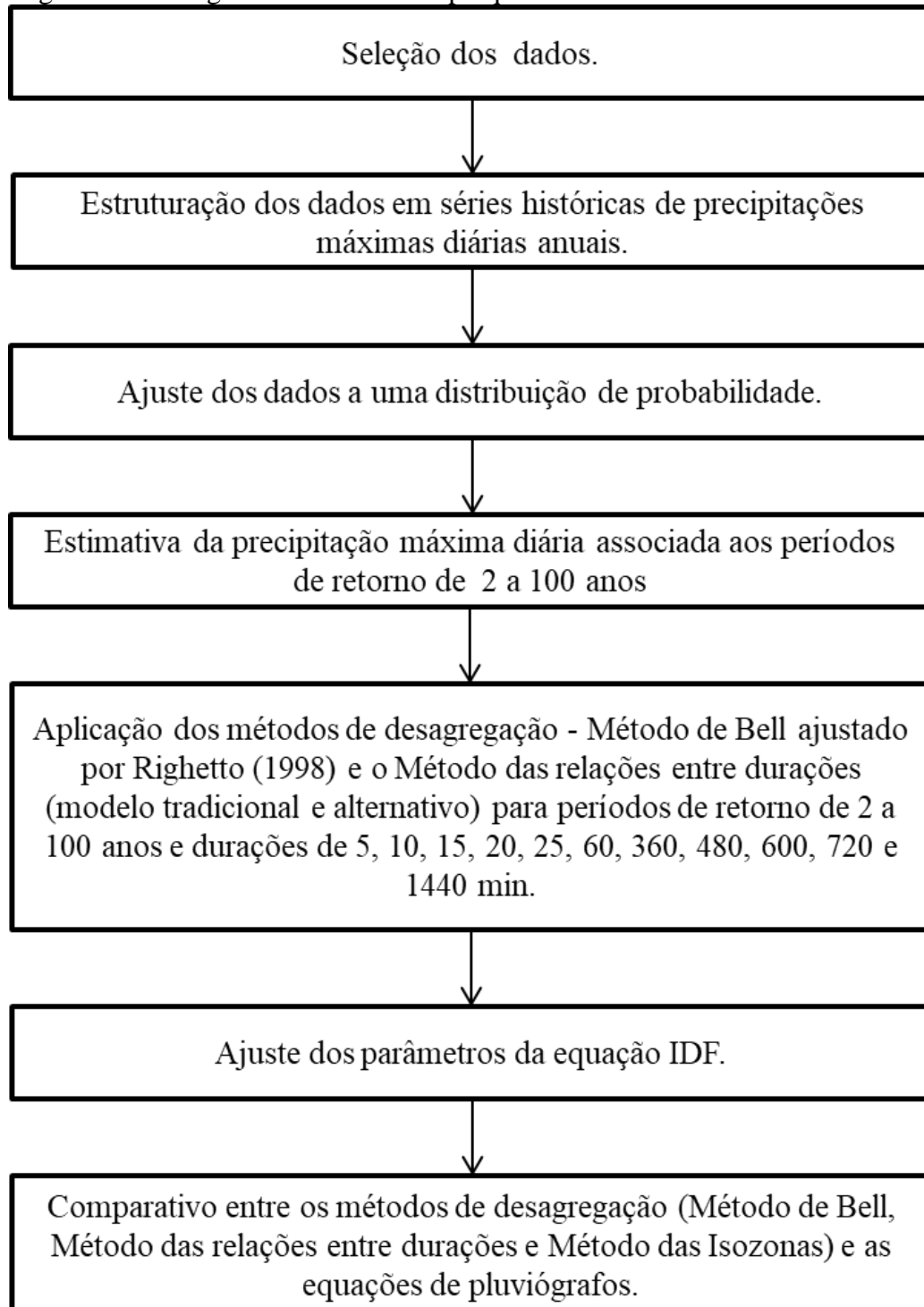
municípios do estado do Ceará. Foram utilizados dados pluviométricos e a desagregação de chuvas diárias foi realizada com base no método das isozonas desenvolvido por Taborga Torrico (1974).

- Lima Neto *et al.* (2018): Este trabalho teve como objetivo determinar a equação IDF do município de Fortaleza através de dados pluviométricos diários e ferramentas computacionais. A equação foi obtida pelo emprego da metodologia de desagregação de chuvas diárias proposta por Taborga Torrico (1974). Além disso, apresentaram um estudo comparativo entre a equação IDF obtida pelo software e a equação IDF gerada por dados pluviográficos para o município em questão.
- Santos *et al.* (2019): Por meio de dados pluviométricos, Santo *et al.* (2019), calibraram os parâmetros das equações IDF para os municípios da região sudeste do estado do Ceará. Estes são: Acopiara, Cariús, Cedro, Icó, Iguatu, Jaguaribe, Orós, Solonópole e Várzea Alegre. Através do método de desagregação de chuvas diárias, empregando-se os coeficientes propostos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) em 1979 e utilizando o modelo probabilístico de Gumbel, foram geradas chuvas máximas para as durações de 120, 180, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos para T_r de 2 a 500 anos.

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentadas a caracterização da área de estudo e a metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho. A Figura 3 mostra um fluxograma das etapas executadas.

Figura 3 – Fluxograma do método de pesquisa



Fonte: Autoria própria (2021).

Este trabalho tem como método de pesquisa um estudo de caso, de natureza quantitativa e com objetivos exploratórios, a partir da análise estatística de dados coletados dos arquivos digitais da Agência Nacional de Águas – ANA.

O presente estudo foi direcionado a dois municípios cearenses, sendo estes: Quixeramobim e Fortaleza. Suas características territoriais e climáticas serão descritas a seguir.

3.1 Caracterização da área de estudo

3.1.1 Quixeramobim

Localizado a 204,6 km de Fortaleza na macrorregião de planejamento Sertão Central e na microrregião geográfica Sertão de Quixeramobim, o município de Quixeramobim (Figura 4) tem 3.276 km² de área. Como municípios limítrofes estão: Banabuiú, Boa Viagem, Choró, Madalena, Milhã, Pedra Branca, Senador Pompeu, Solonópole e Quixadá (IPECE, 2012).

Figura 4– Mapa de Localização de Quixeramobim – CE



Fonte: A autoria própria (2021).

Quixeramobim tem altitude de 191,7 m, relevo formado serras secas e sertões, e vegetação caracterizada por caatinga arbustiva densa e caatinga arbustiva aberta (IPECE, 2012).

De acordo com o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010, Quixeramobim possuía 71.887 habitantes e densidade demográfica de 21,95 hab/km².

Em 2005, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, elaborou um mapeamento da região semiárida do estado do Ceará. Neste mapeamento, 91,98% do território cearense estava incluso.

Ainda em 2005, pela Portaria Federal Nº 89 de 16/03/2005 do Ministério da Integração foi publicada uma nova delimitação do semiárido brasileiro. O mapeamento também elaborado pela FUNCEME inclui 150 dos 184 municípios cearenses na Região Semiárida, o que corresponde a 86,8% do território cearense.

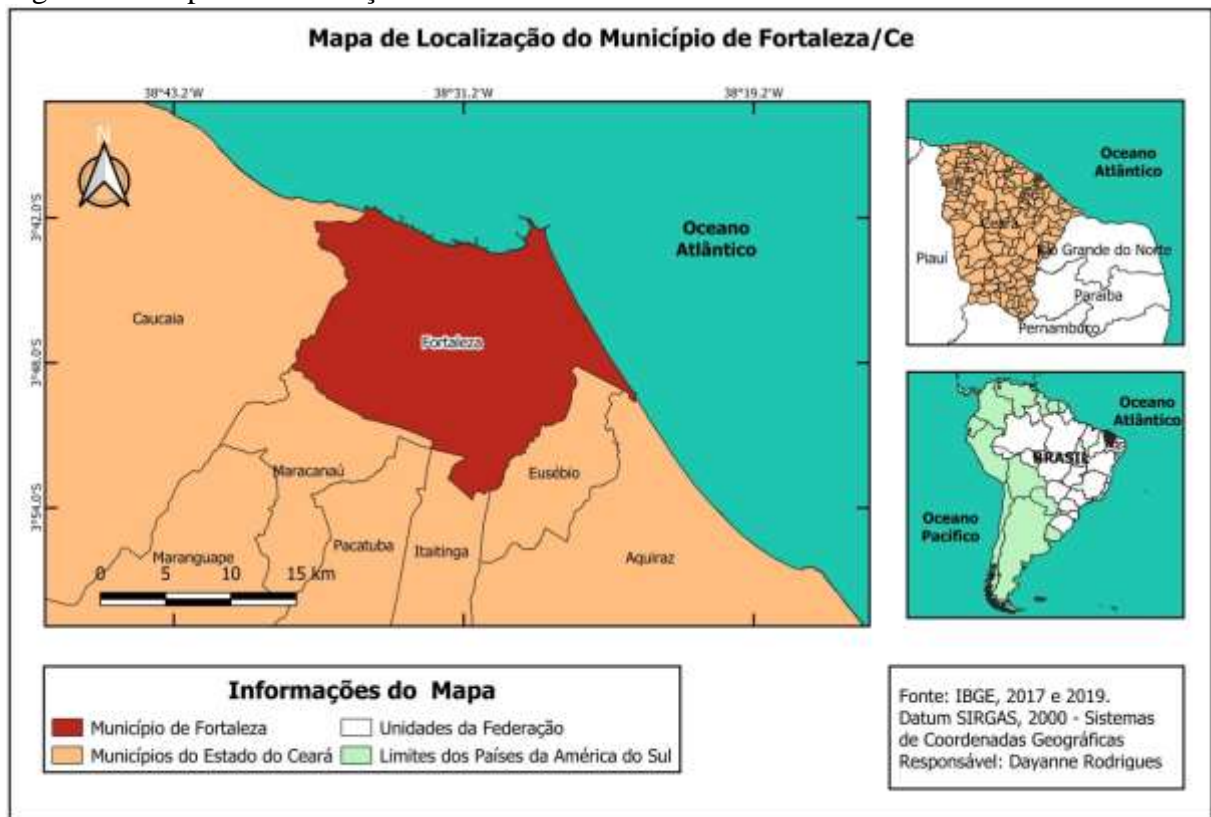
Em 2017, o Ministério da Integração Nacional modificou a Região do Semiárido Brasileiro, incluindo mais 15 municípios cearenses. Dos 184 municípios cearenses, apenas 9 não foram inseridos na Região Semiárida. Segundo a FUNCEME (2017), 98,7% do território cearense está inserido na Região do Semiárido Brasileiro.

Em todos os mapeamentos citados anteriormente, o município de Quixeramobim está inserido na região Semiárida, tendo clima tropical quente semiárido, com chuvas de fevereiro a abril. Segundo a FUNCEME (2020), em 2019 o município teve precipitação anual entre 600 e 800 mm.

3.1.2 Fortaleza

O município de Fortaleza (Figura 6), capital do estado do Ceará, tem área equivalente a 312,407 km². A cidade está situada na macrorregião de planejamento Região Metropolitana de Fortaleza e na microrregião geográfica Fortaleza. Seus municípios limítrofes são: Aquiraz, Caucaia, Eusébio, Itaitinga, Maracanaú e Pacatuba (IPECE, 2017).

Figura 5 – Mapa de localização de Fortaleza – CE



Fonte: Autoria própria (2021).

Com altitude de 16 metros, relevo caracterizado por sertões, tabuleiros costeiros e planície litorânea, e vegetação formada por cerrado, complexo vegetacional da zona litorânea e floresta perenifolia paludosa marítima (IPECE, 2017).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a população estimada para Fortaleza em 2018 foi de 2.643.247 habitantes e a densidade demográfica em 2010 era 7,786.52 hab/km². Fortaleza é um dos 9 municípios cearenses que não foram inseridos na Região Semiárida, tendo clima tropical quente subúmido, com chuvas de janeiro a maio (FUNCEME, 2020). Segundo a FUNCEME (2020), em 2019 a capital cearense teve precipitação anual entre 1200,01 e 2457,00 mm.

3.2 Seleção de dados

Neste trabalho, foram utilizados os dados pluviométricos de um dos postos de cada cidade. Os dados são disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), no Portal Hidroweb. São

registros diários, em formato de texto (.txt), feitos pelos observadores responsáveis por cada posto pluviométrico.

Após análise das séries de dados, foi escolhido o posto com maior quantidade de anos de observação para cada cidade. Em seguida, foram geradas as séries anuais de precipitações diárias máximas para cada posto escolhido.

3.3 Distribuição de melhor ajuste

O ajuste das séries de máximos anuais foi realizado automaticamente através do programa *Gerador IDF* elaborado por Alves (2015) e Batista (2018). Para definir a distribuição na qual os dados se ajustaram de maneira mais satisfatória foram levados em consideração os resultados do teste de aderência do Qui-Quadrado e o coeficiente de determinação.

Além disso, também foram analisados os valores de três índices estatísticos: Desvio Quadrático Médio (DQM), Desvio Quadrático Residual (DQR) e Desvio Médio Absoluto (DMA), estes são dados pelas equações 28, 29 e 30, respectivamente:

$$DQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_{oi} - x_{ei}}{x_{ei}} \right)^2} \quad (28)$$

$$DQR = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (x_{oi} - x_{ei})^2} \quad (29)$$

$$DMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{|x_{oi} - x_{ei}|}{x_{ei}} \quad (30)$$

Em que:

x_{oi} : corresponde à i-ésima precipitação observada;

x_{ei} : corresponde à i-ésima precipitação calculada;

N: é o tamanho da amostra.

Os resultados desses testes são obtidos automaticamente pelo programa citado. O teste do Qui-Quadrado implementado no programa será descrito a seguir.

3.3.1 Teste do Qui-Quadrado

A fim de testar um modelo para uma variável discreta, pode-se mostrar que:

$$D_1 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i} \quad (31)$$

Em que:

N_i : é o número de vezes em que se observou $X = x_i$;

p_i : é a probabilidade $P[X = x_i]$ postulada pela hipótese básica;

k : é o número de possíveis valores de x_i ;

n : é tamanho da amostra,

A variável D_1 , da equação 31, é aproximadamente distribuída como uma variável qui-quadrada com $(k-1)$ graus de liberdade.

Deseja-se encontrar um valor de estatística de teste D_1 que seja “pequeno”, sendo assim, caso D_1 assuma um valor “grande”, o teste será rejeitado. Com o intuito de se definir o que é considerado pequeno ou grande, é necessário estabelecer um nível de significância para o teste, tendo assim, a região crítica dada por:

$$D_1 > \chi_{1-\alpha, k-1}^2 \quad (32)$$

Em que:

α : Nível de significância

$\chi_{1-\alpha, k-1}^2$: valor crítico tabelado que define a região crítica para um nível de significância α e $k-1$ graus de liberdade

Em casos de variáveis contínuas, o intervalo de variação deve ser subdividido em k intervalos. A probabilidade p_i do i -ésimo intervalo é dada por:

$$p_i = \int_{a_i}^{b_i} F_{\chi}(x) dx \quad (33)$$

Em que:

a_i, b_i : limites do intervalo;

$F_x(x)$: função densidade correspondente

É recomendável que sejam definidos o maior número de intervalos possíveis, com probabilidades aproximadamente iguais e, no mínimo, 5 observações por intervalo (PINTO, 1976).

Em situações em que há a necessidade da estimação de algum parâmetro da distribuição, o teste pode ser aplicado, sendo necessário somente alterar o grau de liberdade, GL, que passa a ser:

$$GL = k - 1 - r \quad (34)$$

Em que:

r : é o número de parâmetros estimados.

O nível de significância adotado foi de 5%.

3.3.2 Análise do coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação, R^2 , é uma medida amplamente usada para um modelo de regressão. O valor de R^2 é determinado (Equação 35) pela proporção entre a soma dos quadrados devido à regressão e a soma dos quadrados.

$$R^2 = \frac{\text{Variância Explicada}}{\text{Variância Total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (35)$$

Em que:

R^2 : coeficiente de determinação, variando de 0 a 1;

y_i : valor observado da variável dependente;

\hat{y}_i : valor estimado da variável dependente;

\bar{y} : média da variável dependente.

Interpreta-se R^2 como a proporção da variância total da variável dependente Y que é explicada pelo modelo de regressão (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

O valor de R^2 se aproxima de 1 na medida em que os dados se adequam bem ao modelo de regressão. R^2 também pode ser próximo de 1 em situações de grande dispersão dos dados ou na adição de mais termos ao modelo, logo, é necessário cautela no uso do coeficiente e na interpretação do mesmo (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Neste trabalho, a distribuição escolhida foi aquela em que os desvios calculados apresentaram menores valores, teve o teste do Qui-Quadrado aceito e com coeficiente de determinação mais próximo de 1.

3.4 Aplicação dos métodos de desagregação

Com os dados históricos ajustados a uma distribuição de probabilidade, a precipitação relativa associada a cada período de retorno pode ser encontrada pela função inversa da distribuição.

O período de retorno, T_r , está relacionado com a probabilidade de ocorrência de um evento da seguinte forma:

$$P(P \geq P_{T_r}) = \frac{1}{T_r} \quad (36)$$

Para determinação das chuvas máximas diárias associadas a cada período de retorno foi utilizado o software *Gerador IDF*.

Neste trabalho foram determinadas as intensidades associadas ao período de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 e 100 anos e durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos.

3.4.1 Aplicação do método de Bell

A precipitação padrão de 60 minutos e 2 anos de retorno, dada pela Equação 9, foi estimada usando o valor de k igual 0,51 como proposto por Righetto (1998). Este valor foi

definido após uma análise das precipitações do estado de São Paulo. No entanto, alguns autores utilizaram o mesmo coeficiente para outras localidades, como:

- Oliveira *et al.* (2008) , na estimativa de precipitação máxima para o estado de Goiás;
- Almeida, Reis e Mendonça (2016), na formulação de equações de chuvas intensas para o estado do Paraná através do método de Bell.

Além do valor de k , para calcular $P(60;2)$ é necessário o valor precipitação máxima diária para o período de retorno de 2 anos. Esse valor, como citado anteriormente, foi fornecido pelo software *Gerador IDF* após ajuste dos dados a uma distribuição de probabilidade.

Tendo o valor de $P(60;2)$ definido, foram determinados os valores de precipitação para cada tempo de retorno e cada duração de acordo com a Equação 8.

3.4.2 Aplicação do método das relações entre durações

As relações entre precipitações de diferentes durações, Equação 10, fornecem coeficientes que podem ser usados para desagregação de chuvas.

Através das relações e coeficientes dispostos na Tabela 1, a precipitação máxima diária associada a cada período de retorno foi desagregada em precipitações de durações menores.

3.5 Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas

Para cada estação pluviométrica foram geradas duas equações IDF da forma da Equação 2 (Bell e modelo tradicional) e da Equação 13 (modelo alternativo). Dessa forma, foi necessário determinar os parâmetros que constituem a equação.

3.5.1 Parâmetros a, b e d

Os valores dos parâmetros a , b e d foram obtidos pela análise de regressão linear múltipla através do método dos mínimos quadrados.

A regressão linear múltipla permite analisar o comportamento de uma função em que a variável dependente, Y , varia linearmente com duas ou mais variáveis independentes, X_i (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Como a Equação 2 não é linear, a linearização da equação foi feita aplicando o logaritmo natural. Obtendo-se a Equação 37:

$$\text{Ln}(i) = \text{Ln}(a) + b\text{Ln}(Tr) - d\text{Ln}(t + c) \quad (37)$$

Os parâmetros a, b e d são classificados como coeficientes da função linear e podem ser estimados, assim como na regressão linear simples, pela minimização do somatório dos erros quadráticos, Equação 38 (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (38)$$

Em que: $e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \sum_{j=1}^P \hat{\beta}_j X_{i,j}$; n é o número de observações e P é número de variáveis independentes.

3.5.2 Parâmetro c

Segundo Silva, Júnior e Campos (2013), existe a necessidade de se fazer uma correção introduzindo uma constante, c , ao termo referente a duração da precipitação. Não existem regras específicas para determinação dessa constante e o seu valor deve ser obtido por tentativa e erro. De acordo com Wilken (1978), para determinar o valor de c , emprega-se a curva intensidade-duração associada ao período de retorno de $T_r = N/5$, em que N é o tamanho da série histórica observada, traçada no diagrama bilogarítmico. Sendo c dado pela Equação 39:

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 \times t_2}{t_1 + t_2 - 2t_3} \quad (39)$$

Em que: t_1 e t_2 são as durações mais próximas das extremidades da curva e i_1 e i_2 são as intensidades associadas a elas, respectivamente. A Equação 40 fornece o valor de i_3 , e t_3 é sua duração correspondente.

$$i_3 = \sqrt{i_1 i_2} \quad (40)$$

3.5.3 Parâmetros f , e do modelo alternativo

A equação tem como variáveis o período de retorno, a duração e a precipitação máxima diária associada àquele período de retorno. Na forma genérica da equação, a precipitação máxima diária varia com o período de retorno de acordo com uma função logarítmica.

Os coeficientes f e e foram ajustados por regressão logarítmica dos valores de máxima precipitação diária e período de retorno com o auxílio da ferramenta *Linha de Tendência – Regressão logarítmica* disponível no software *Excel*. Além disso, o programa fornece a equação que melhor descreve o comportamento dos dados e o valor do R^2 .

3.6 Verificação da qualidade do ajuste dos parâmetros

Nesta seção serão descritos os meios utilizados para verificar a qualidade do ajuste das equações IDF construídas neste trabalho.

3.6.1 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

Para avaliação do desempenho do ajuste dos parâmetros foi utilizado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe. Este é dado pela Equação 41:

$$R = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (i_0 - i_c)^2}{\sum_{k=1}^N (i_0 - \bar{i}_0)^2} \quad (41)$$

Em que: i_c (mm/min) é intensidade calculada pela equação IDF; i_0 (mm/min) é a intensidade extraída dos dados originais; N é a quantidade de dados e $\underline{i_0}$ é a média das intensidades extraídas dos dados originais.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode variar a partir de negativo infinito a 1,0. Quando R assume valor 1,0 indica um ajuste perfeito entre as intensidades calculadas a partir de dados pluviográficos e as intensidades estimadas pelos métodos de desagregação. Sendo R superior a 0,75 o ajuste é dito adequado e bom, e é aceitável se varia entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001; MACHADO, VETTORAZZI e CRUCIANI, 2003).

3.6.2 Erro padrão da estimativa

Através da Equação 42 o Erro Padrão da Estimativa (EPE) pode ser calculado. Este valor indica quão precisos são os modelos para determinação dos parâmetros das equações IDF ajustadas. Essa precisão é calculada comparando os valores obtidos pela equação ajustada e os valores fornecidos pela distribuição de probabilidade e desagregados. O ajuste é mais satisfatório à medida que o valor do EPE se aproxima de 0.

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \left(\frac{i_c - i_0}{i_0}\right)^2}{N}} \quad (42)$$

Em que: EPE é o Erro Padrão da Estimativa, i_c (mm/h) é a intensidade calculada por meio da equação IDF ajustada, i_0 (mm/h) é a intensidade extraída dos dados originais e N é a quantidade de dados.

3.6.3 Análise da soma dos quadrados dos desvios

O ajuste da equação também foi avaliado pela função de minimização S (BACK, 2020), dada pela Equação 43:

$$S = \sum_{j=1}^N (G_{Tr}^t - I_{Tr}^t)^2 \quad (43)$$

Em que: S é a soma dos quadrados dos desvios; t é a duração da precipitação (min); Tr é o período de retorno (anos); G é a intensidade estimada pela distribuição de probabilidade; I é a intensidade estimada pela equação IDF.

3.7 Comparação dos métodos de obtenção das equações IDF

Os resultados obtidos através dos métodos de Bell, método das relações entre durações (modelo tradicional e alternativo) e a equação ajustada através da metodologia das isozonas por Batista (2018) foram comparados com os resultados gerados a partir das equações IDF propostas por Dernadin e Freitas (1982) para Quixeramobim e por Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) para Fortaleza.

Para essa comparação foram calculados os índices de concordância, (IC), descrito na Equação 44 e o índice de desempenho (ID) de Willmott (CAMARGO & SENTELHAS, 1997).

$$IC = \left(1 - \frac{\sum (O_i - E_i)^2}{\sum (|O_i - O_m| + |E_i - E_m|)^2}\right) \times 100 \quad (44)$$

Em que: O_i e E_i são as intensidades calculadas pela equação IDF feita com base em dados de pluviógrafos e pluviômetros, respectivamente. O_m e E_m são as médias das intensidades calculadas pela equação IDF feita com base em dados de pluviógrafos e pluviômetros, respectivamente.

O valor de ID é definido pelo produto entre o índice de concordância e o coeficiente de determinação, R^2 . A Tabela 4 apresenta como interpretar os valores de ID.

Tabela 3 – Critérios para interpretação do valor de ID

Índice de desempenho, ID	Classificação
>0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sofrível
0,41-0,50	Mal
≤0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

A reta de regressão linear entre cada equação feita com dados pluviométricos e a equação do pluviógrafo foi analisada juntamente com o coeficiente de determinação, R^2 , posteriormente usado para cálculo de ID.

4.2 Fortaleza

A seguir serão apresentados os resultados encontrados para a estação do município de Fortaleza e as discussões relevantes.

4.2.1 Precipitações máximas diárias anuais

Para cada município foi escolhida a estação com maior quantidade de anos de observação. Na Tabela 4 encontra-se o código, a localização geográfica e a quantidade de anos observados da estação selecionada para o município de Fortaleza.

Tabela 4 – Informações gerais da estação pluviométrica de Fortaleza

Município	Código	Lat (°)	Lon (°)	Quantidade de anos
Fortaleza	00338001	-3,75	-38,58	93

Fonte: Autoria própria (2021).

Fortaleza é o município cearense com a maior série de dados pluviométricos. Dados estes que datam de abril de 1919 até os dias atuais.

Após escolhida a estação, os dados diários foram analisados e as precipitações máximas diárias anuais foram definidas para cada ano observado. Na Tabela 5 estão as precipitações máximas diárias associadas a cada um dos 93 anos de observação.

Tabela 5 – Precipitações máximas diárias anuais para a estação do município de Fortaleza

Ano	Pmáx	Ano	Pmáx	Ano	Pmáx	Ano	Pmáx	Ano	Pmáx
1920	125,5	1941	94,5	1962	81,2	1982	74,7	2003	146,7
1921	97,5	1942	51	1963	172,1	1983	91,4	2004	173,8
1922	74,5	1943	131,2	1964	112,4	1984	112,4	2005	97,4
1923	91,2	1944	84	1966	63,4	1985	145,5	2006	119
1926	67,7	1945	69	1967	113,4	1986	142,8	2007	81,4
1927	65,3	1946	94,5	1968	65,4	1987	83,1	2008	68,1
1928	97,8	1947	98,2	1969	72,1	1990	61,4	2009	84,7
1929	81,1	1948	110,8	1970	134,2	1991	104,4	2010	65,6
1930	64,4	1949	227,2	1971	138,5	1992	82,6	2011	128,8
1931	85,1	1950	78,5	1972	136,2	1993	83,5	2012	197,6
1932	56	1951	67,3	1973	76,8	1994	83	2013	47,7
1933	65,9	1952	118,2	1974	128,5	1995	137,3	2014	43,4
1934	103,8	1953	59,3	1975	65,5	1996	85,2	2015	88
1935	102,7	1954	68,5	1976	85,5	1997	92,8	2016	100,6
1936	69,7	1955	66	1977	168	1998	86	2017	107,8
1937	83,8	1956	69	1978	122,2	1999	44,2	2018	115
1938	148,4	1957	120,7	1979	117,7	2000	90,8	2019	105,8
1939	91,4	1959	106,2	1980	84,1	2001	103		
1940	61,2	1960	115,4	1981	161,6	2002	110		

Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.2 Distribuição de melhor ajuste

Com auxílio do software *Gerador IDF*, os dados históricos foram submetidos ao teste de aderência Qui-Quadrado e ao cálculo dos índices estatísticos para 5 diferentes distribuições de probabilidade. Este processo foi feito com o intuito de decidir a qual função de probabilidade os dados se ajustam de maneira mais satisfatória.

As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados do teste de aderência e os valores dos índices estatísticos para o município de Fortaleza.

Tabela 6 – Resultado do teste de aderência Qui-Quadrado – Fortaleza

Distribuição	Valor crítico	Estatística de teste
Gama 2P	14,067	4,620
Gumbel	14,067	2,106
Log-normal 2P	14,067	2,416
Gama 3P	12,592	2,565
Log-normal 3P	12,592	2,005

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 7 – Resultados dos índices estatísticos – Fortaleza

Distribuição	DQM	DQR	DMA	Coefficiente Angular	R ²
Gama 2P	0,235	0,027	6,754	0,996	0,992
Gumbel	0,068	0,019	3,943	0,996	0,996
Log-normal 2P	0,198	0,019	4,594	1,003	0,996
Gama 3P	0,069	0,018	3,826	1,004	0,996
Log-normal 3P	0,153	0,018	4,683	1,003	0,996

Fonte: Autoria própria (2021).

A distribuição de probabilidade selecionada foi em função dos resultados do teste de aderência e dos valores dos índices estatísticos. O valor crítico é diferente para as distribuições de três parâmetros porque estas possuem um grau de liberdade a menos do que as outras. Os dados do município de Fortaleza, de acordo com o teste de aderência, se ajustaram melhor a distribuição de Gumbel. Quando analisados os índices estatísticos, a distribuição de Gumbel e a Gama 3P apresentaram os valores mais satisfatórios. Portanto, foi escolhida a distribuição de Gumbel.

4.2.2.1 Determinação da precipitação máxima diária para vários períodos de retorno

O software *Gerador IDF* também foi utilizado para estimar as precipitações diárias máximas considerando os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 e 100 anos para a estação analisada. As estimativas podem ser consultadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Precipitação diária máxima para cada período de retorno – Fortaleza

T_r (anos)	Precipitação diária máxima (mm)
2	92,7
5	122,9
10	142,9
15	154,1
20	162,0
25	168,1
30	173,0
50	182,5
100	205,4

Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.3 Aplicação dos métodos de desagregação

4.2.3.1 Aplicação do método de Bell (1969)

Sousa, Amorím e Torres (2016) ajustaram a equação de chuvas intensas proposta por Bell considerando os dados pluviométricos e pluviográficos do estado do Mato Grosso. Os valores médios de k obtidos variaram entre 0,5622 e 0,5581. Righetto (1998) com base nas estações do estado de São Paulo afirmou que k seria 0,51. A semelhança entre os valores mostra que há um padrão no comportamento das variáveis $P(60;2)$ e $P(\text{dia};2)$ para todo o Brasil (SOUSA, AMORÍM E TORRES; 2016).

Sendo assim, adotou-se k como 0,51. Substituindo os valores de t , T_r , P_{1dia} e k nas equações 10 e 11 foram obtidas as intensidades para diferentes durações e períodos de retorno.

Os valores para Fortaleza estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método de Bell para Fortaleza

t (min)	Tr (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	122,4	160,4	189,2	206,0	217,9	227,2	234,7	255,9	284,7
10	100,1	131,2	154,7	168,5	178,3	185,8	192,0	209,4	232,9
15	84,7	111,0	130,9	142,6	150,8	157,3	162,5	177,2	197,1
20	74,2	97,2	114,7	124,9	132,1	137,7	142,3	155,1	172,6
25	66,5	87,2	102,8	111,9	118,4	123,4	127,5	139,1	154,7
30	60,6	79,4	93,7	102,0	107,9	112,5	116,2	126,7	141,0
60	41,6	54,5	64,3	70,0	74,1	77,2	79,8	87,0	96,8
360	14,2	18,6	21,9	23,9	25,2	26,3	27,2	29,6	33,0
480	11,8	15,5	18,3	19,9	21,0	21,9	22,7	24,7	27,5
600	10,3	13,4	15,8	17,3	18,3	19,0	19,7	21,4	23,8
720	9,1	12,0	14,1	15,4	16,2	16,9	17,5	19,1	21,2
1440	5,8	7,6	9,0	9,8	10,4	10,8	11,2	12,2	13,5

Fonte: Autoria própria.

4.2.3.2 Aplicação do método das relações entre durações

Com as precipitações máximas diárias estimadas pela distribuição de probabilidade para os diferentes períodos de retorno e usando os coeficientes de desagregação da Tabela 1 foram calculadas as intensidades associadas a durações de 5 a 1440 minutos e períodos de retorno de 2 a 100 anos. Os valores obtidos estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método das relações entre durações para Fortaleza

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	129,3	171,4	199,3	214,9	226,0	234,5	241,3	254,6	286,5
10	102,7	136,1	158,3	170,7	179,4	186,2	191,6	202,2	227,5
15	88,7	117,6	136,8	147,5	155,1	160,9	165,6	174,7	196,6
20	77,0	102,1	118,7	128,0	134,6	139,7	143,7	151,6	170,6
25	69,2	91,8	106,7	115,1	121,0	125,5	129,2	136,3	153,4
30	63,4	84,0	97,7	105,4	110,8	114,9	118,3	124,8	140,4
60	42,8	56,8	66,0	71,2	74,8	77,7	79,9	84,3	94,9
360	12,2	16,2	18,9	20,3	21,4	22,2	22,8	24,1	27,1
480	9,9	13,2	15,3	16,5	17,4	18,0	18,6	19,6	22,0
600	8,4	11,1	12,9	13,9	14,6	15,2	15,6	16,5	18,5
720	7,2	9,6	11,1	12,0	12,6	13,1	13,5	14,2	16,0
1440	4,2	5,6	6,5	7,1	7,4	7,7	7,9	8,4	9,4

Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.4 Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas

Os dados do método de Bell e do modelo tradicional do método das relações entre durações foram ajustados, isoladamente, a forma da Equação 2, estimando os parâmetros a , b , c e d , e o dados do modelo alternativo do método das relações entre durações foram ajustados a uma equação da forma da Equação 13 estimando os parâmetros f e e .

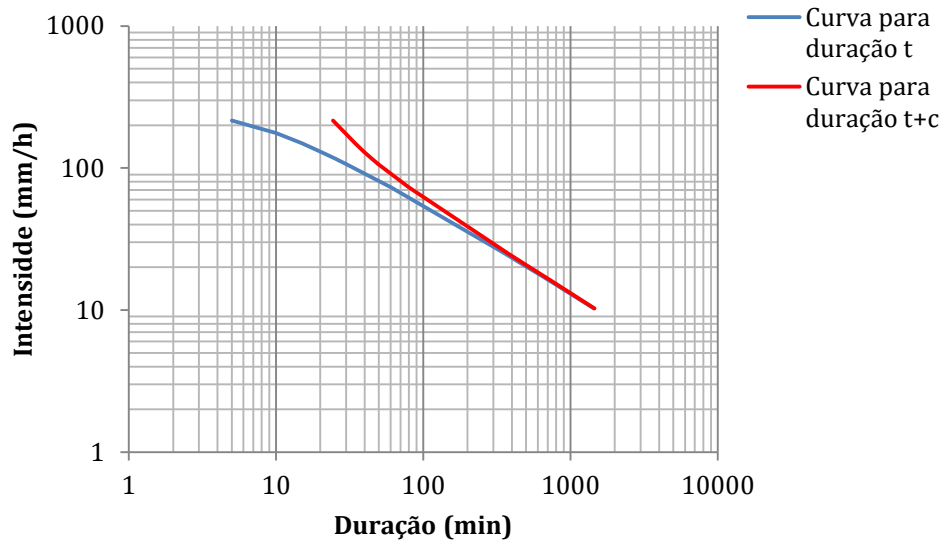
4.2.4.1 Parâmetro c

Inicialmente, para ajuste do parâmetro c de cada equação, foram plotadas no diagrama bilogarítmico as curvas intensidade – duração associadas a um período de retorno igual ao número de anos observados dividido por cinco. Fortaleza com 93 anos de observação, teve a curva associada a um período de retorno de 19 anos.

Quando plotadas as curvas, foram escolhidos dois pontos próximos às extremidades das curvas i_1, t_1 e i_2, t_2 . Com base nesses valores e na Equação 40 foi calculada a intensidade de um terceiro ponto. De posse do valor de i_3 e da curva, o valor de t_3 foi estimado. Esse processo foi feito utilizando os dados de Fortaleza com base no método de Bell e no modelo tradicional do método das relações entre durações. Aplicando as intensidades e durações dos três pontos a Equação 39, o parâmetro c foi definido.

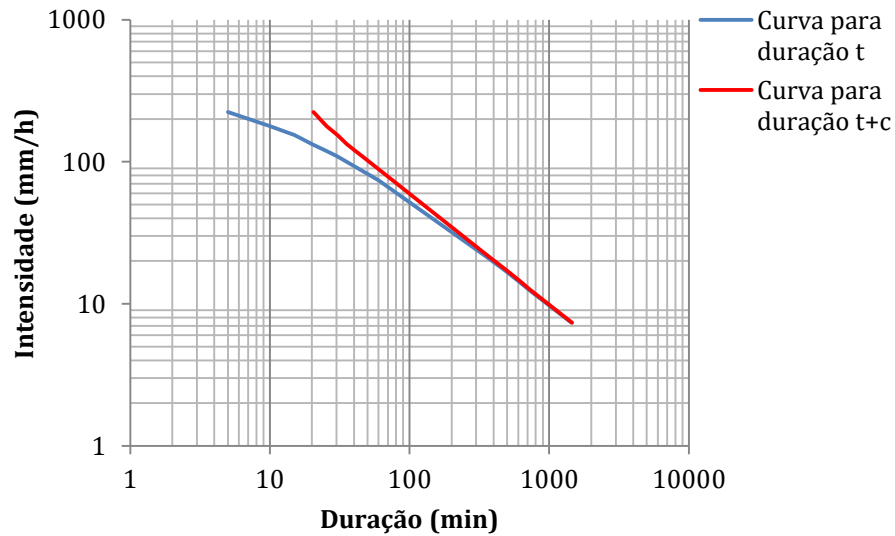
Nas figuras 8 e 9 estão apresentadas as curvas sem incremento do parâmetro c (cor azul) e as curvas de durações corrigidas com o valor de c (cor vermelha). Por se tratar de uma linearização, o ideal é que a curva tenha forma de uma reta.

Figura 7 - Curva intensidade-duração para $Tr=19$ anos de acordo o método de Bell para Fortaleza



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 8 - Curva intensidade-duração para $Tr=19$ anos de acordo com a metodologia da CETESB para Fortaleza.



Fonte: Autoria própria (2021).

O trecho em curva mais acentuada é visto na curva azul para pequenas durações e consequentemente maiores intensidades. Nota-se, portanto, que quando o termo referente à duração é corrigido a curva aproxima-se de uma reta, indicando a linearização da função logarítmica.

4.2.4.2 Parâmetros *a, b e d*

Após definido o valor do parâmetro *c* para cada método, com auxílio do software *Excel* os demais parâmetros foram estimados por regressão linear múltipla com nível de confiança de 95%. A Tabela 11 apresenta os parâmetros estimados para cada método.

Tabela 11 – Parâmetros estimados para os métodos de Bell e das relações entre durações – Fortaleza

Método	Parâmetros			
	a	b	c	d
Bell	1013,283	0,214	19,430	0,729
Modelo tradicional	1234,703	0,197	15,480	0,788

Fonte: Autoria própria (2021).

Inserindo os parâmetros encontrados tem-se as Equação 45 e a Equação 46:

$$i = \frac{1013,283 \times T_r^{0,214}}{(t+19,430)^{0,729}} \quad (45)$$

$$i = \frac{1234,703 \times T_r^{0,197}}{(t+15,480)^{0,788}} \quad (46)$$

Em que: *i* é a intensidade da precipitação em mm/h, *t* é a duração da precipitação em minutos e T_r é o período de retorno.

4.2.4.3 Parâmetros *f e e*

Este modelo tem a vantagem de permitir que a equação IDF seja ajustada para cada localidade alterando apenas o valor estimado da precipitação máxima diária (BACK, 2020).

As precipitações máximas diárias associadas a cada período de retorno foram estimadas através do ajuste a uma distribuição de probabilidade com o auxílio do software

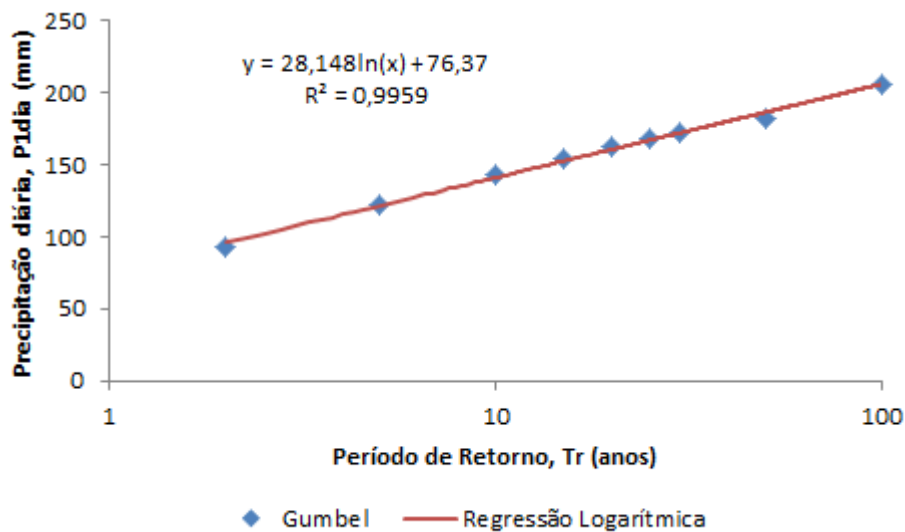
Gerador IDF, conforme já descrito anteriormente.

A equação proposta Back (2020) depende somente da duração, t , e da precipitação máxima diária associada ao período de retorno para o qual se deseja calcular a intensidade. No entanto, a fim de se obter uma equação generalizada definiu-se uma relação onde P_{1dia} varia com o período de retorno, T_r .

Essa relação é da forma da Equação 47. Os parâmetros f e e foram ajustados por regressão logarítmica dos valores dos períodos de retorno e das precipitações máximas diárias. A Figura 10 mostra o resultado da regressão para estação de Fortaleza.

$$P_{1dia} = f \ln(T_r) + e \quad (47)$$

Figura 9 – Ajuste dos parâmetros f e e – Fortaleza



Fonte: Autoria própria (2021).

Neste caso, os dados históricos se ajustaram melhor a distribuição de Gumbel. É possível perceber que os valores obtidos pela distribuição de probabilidade (pontos em azul) estão bem próximos da reta de regressão (reta vermelha). Além disso, o valor do R^2 é maior que 0,99, o que sugere que o ajuste da distribuição ao modelo logarítmico é muito bom. Na Tabela 13 estão os valores estimados para os parâmetros.

Tabela 12 – Parâmetros estimados para o modelo alternativo – Fortaleza

Método	Parâmetros	
	f	e
Back	28,148	76,37

Fonte: Autoria própria (2021).

Inserindo os parâmetros tem-se a Equação 48.

$$i = \frac{60}{27,9327 + 3,8346t^{0,7924}} [28,148 \ln(T_r) + 76,37] \quad (48)$$

4.2.5 Verificação da qualidade do ajuste dos parâmetros

A qualidade do ajuste dos parâmetros foi verificada com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe, Erro Padrão de Estimativa e análise do Quadrado das Somas dos Desvios. Na Tabela 14 estão os valores obtidos para cada método.

Tabela 13 – Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do Erro Padrão de Estimativa – Fortaleza

Método	Nash-Sutcliffe	Erro Padrão de Estimativa
Bell	0,98	0,07
Modelo tradicional	0,99	0,05
Modelo alternativo	1,00	0,04

Fonte: Autoria própria (2021).

Os coeficientes de Nash encontrados foram todos acima de 0,98 indicando como muito bom o ajuste das três equações. A equação ajustada seguindo o modelo alternativo teve o menor Erro Padrão de Estimativa, de 4% e o melhor coeficiente de Nash, indicando ajuste perfeito de seus parâmetros.

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os valores do quadrado dos desvios entre os valores de intensidades desagregados e os valores gerados pelas equações ajustadas para cada par duração/período de retorno, segundo a Equação 43, analisado para o método de Bell e relações entre durações (tradicional e alternativo), respectivamente.

Tabela 14 – Quadrado dos desvios – Bell – Fortaleza – (mm/h)²

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	64,4	451,8	770,2	896,4	942,1	948,1	932,7	791,9	419,0
10	0,1	94,7	191,1	219,2	219,3	206,9	189,0	110,0	4,9
15	18,8	7,2	27,6	30,3	25,6	18,8	12,2	0,0	75,2
20	42,0	0,9	0,6	0,5	0,0	0,7	3,1	30,8	190,7
25	55,5	7,9	2,5	3,6	7,0	12,6	20,1	67,7	261,0
30	61,1	14,6	8,4	11,0	16,8	25,0	35,1	91,2	292,5
60	46,4	19,2	16,2	20,3	26,8	34,9	44,2	88,9	227,3
360	1,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,5	7,9
480	0,7	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3	3,2
600	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	1,4
720	0,2	0,1	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2	0,0	0,6
1440	0,0	0,3	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,4	0,0

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 15 – Quadrado dos desvios – Relações entre durações (Tradicional)-Fortaleza-(mm/h)²

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	3,2	207,9	374,1	400,0	386,2	356,7	318,2	55,2	10,3
10	58,8	15,6	45,8	43,2	33,1	22,1	12,2	34,8	120,4
15	50,2	8,2	27,3	25,0	18,1	11,0	5,0	35,5	109,6
20	64,0	0,1	4,0	2,5	0,6	0,0	1,5	75,0	171,3
25	54,9	0,0	2,2	1,2	0,1	0,3	2,1	67,2	149,7
30	42,5	0,1	3,0	2,0	0,5	0,0	0,8	49,1	113,1
60	16,6	0,4	2,7	2,1	1,1	0,3	0,0	16,8	41,7
360	1,0	0,1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,8	2,3
480	0,5	0,2	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	1,0
600	0,4	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,8
720	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,7
1440	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 16 – Quadrado dos desvios – Relações entre durações (Alternativo) – Fortaleza (mm/h)²

t (min)	T _r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	78,2	15,0	16,7	24,1	30,9	37,2	44,3	199,5	106,0
10	74,6	26,3	31,7	41,9	50,7	58,6	67,0	206,2	135,6
15	36,9	7,1	7,9	11,4	14,6	17,6	21,0	94,2	50,1
20	39,6	13,0	15,6	20,7	25,3	29,3	33,7	108,2	69,4
25	30,0	9,2	10,8	14,6	17,9	20,9	24,1	81,3	50,7
30	21,0	4,9	5,6	7,8	9,9	11,7	13,7	54,8	31,1
60	7,7	1,2	1,3	1,9	2,5	3,1	3,7	19,2	9,5
360	1,0	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	2,8	1,8
480	0,6	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	1,5	0,9
600	0,4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	1,2	0,8
720	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	1,2	0,8
1440	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3

Fonte: Autoria própria (2021).

Nota-se das tabelas acima que o quadrado dos desvios diminui à medida que a duração aumenta. Além disso, a função S tem valor inferior no modelo alternativo do que no método de Bell e o tradicional, sendo estes, respectivamente, 2353,3; 9481,11 e 3691,46 $(mm \cdot h^{-1})^2$. O valor de S é ainda menor para o modelo alternativo quando se usa a equação não ajustada, isto é, utilizando apenas a precipitação máxima diária associada àquele período de retorno. No caso da estação de Fortaleza, esse valor é de 2131,1 $(mm \cdot h^{-1})^2$. Esta diferença está associada ao acúmulo de erros em função do ajuste dos parâmetros.

4.2.6 Comparação dos métodos de obtenção de equações IDF

As equações obtidas neste estudo foram comparadas a Equação 49. Esta equação foi construída por Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) a partir de 30 anos de registros pluviográficos (1970-1999) da estação climatológica da Universidade Federal do Ceará. Esta equação tem validade para durações inferiores a 120 minutos e períodos de retorno inferiores a 100 anos.

$$i = \frac{2345,29 \times T_r^{0,173}}{(t+28,31)^{0,904}} \quad (49)$$

Em que: i é a intensidade em mm/h; T_r é o período de retorno e t é a duração da chuva em minutos.

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os gráficos de correlação entre a Equação 49 e as equações 45, 46 e 48, respectivamente. Estas três últimas equações foram obtidas através da desagregação de chuvas diárias com base nas metodologias de Bell, modelo tradicional do método das relações entre durações e o modelo alternativo proposto por Back (2020), respectivamente.

A Equação 50 foi desenvolvida pela metodologia da isozonas de Taborga Torrico (1974) por Batista (2018) para o município de Fortaleza. Os dados correspondem a 98 anos de observação (1919-2016) do posto pluviométrico localizado no campus Pici da Universidade Federal do Ceará. Esta equação tem validade para durações inferiores a 240 minutos e períodos de retorno inferiores a 100 anos.

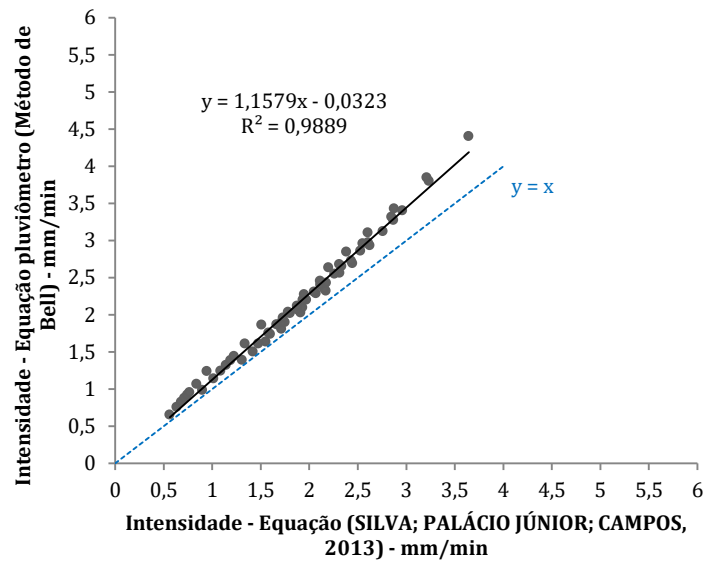
$$i = \frac{21,711 \times (T_r - 2,07)^{0,138}}{(t+15,945)^{0,76}} \quad (50)$$

Em que: i é a intensidade em mm/min; T_r é o período de retorno e t é a duração da chuva em minutos.

A Figura 14 apresenta o gráfico de correlação entre a equação proposta por Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) e a equação desenvolvida por Batista (2018). Os gráficos de correlação foram construídos com base nos valores de intensidade para período de retorno

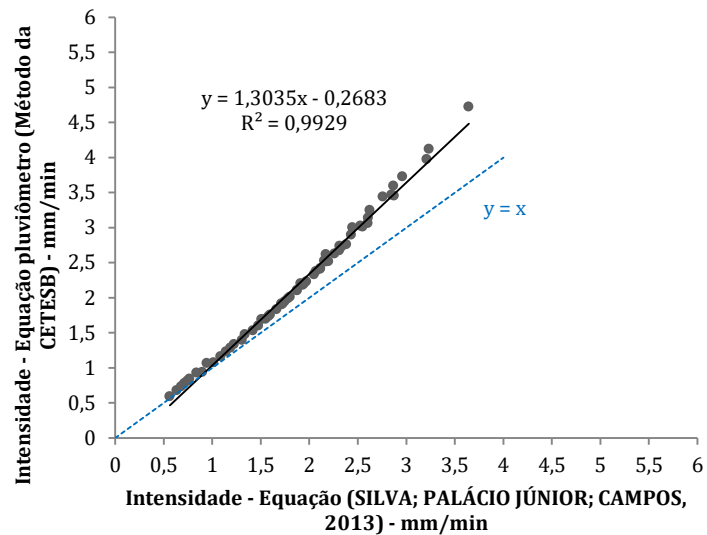
variando de 5 a 100 anos e duração de 5 a 120 minutos.

Figura 10 - Correlação linear – Pluviógrafo x Bell



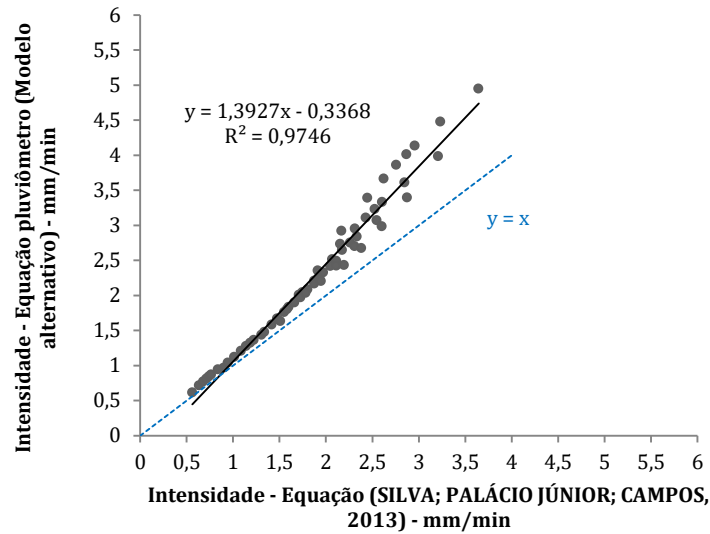
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 11 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo tradicional



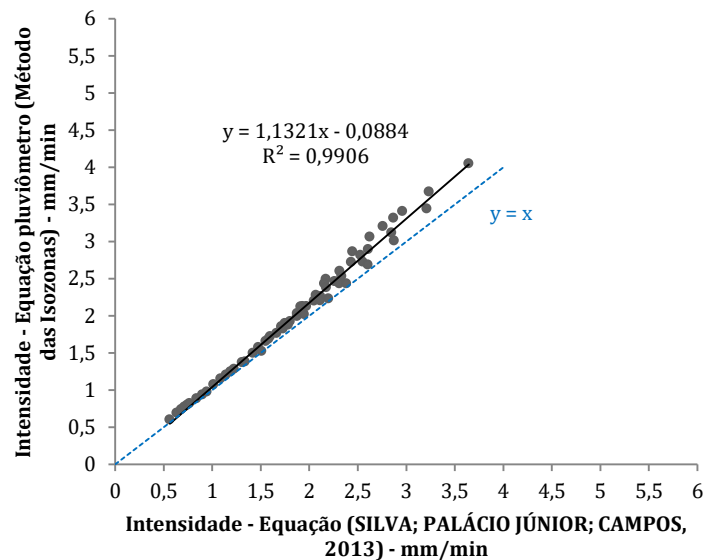
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 12 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo alternativo



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 13 - Correlação linear – Pluviógrafo x Isozonas



Fonte: Autoria própria (2021).

Nas quatro situações é possível notar um bom ajuste à reta de regressão, tendo em vista que o coeficiente de determinação R^2 está sempre acima de 0,97. Os melhores valores de R^2 foram obtidos pelo modelo tradicional das relações entre as durações e das isozonas, em que o valor está acima de 0,99. Percebe-se, pelo coeficiente angular das retas, que os valores das intensidades calculadas pelas equações geradas com dados de pluviômetros tendem a ser sempre superiores aos valores calculados pela equação padrão. Os melhores valores para o

coeficiente angular da reta e para o termo independente são encontrados para o método das isozonas, aproximando-se do ajuste perfeito que ocorre quando $Y=X$ e $R^2=1$, seguido pelo método de Bell.

Na Tabela 17 estão apresentados os valores do índice de concordância, IC, e as classificações dos métodos de acordo com o índice de desempenho, ID, de Willmott.

Tabela 17 – Classificações de acordo com o índice de desempenho, ID – Fortaleza

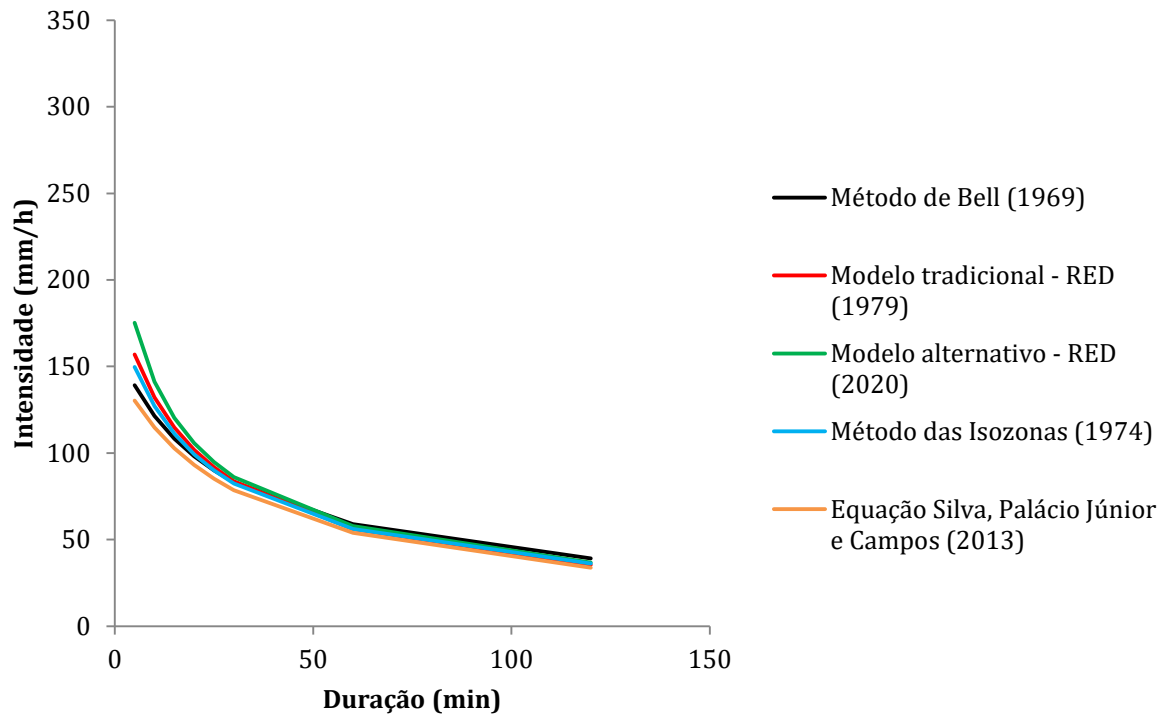
Método	IC	ID	Classificação
Bell	0,96	0,95	Ótimo
Modelo tradicional	0,95	0,94	Ótimo
Modelo alternativo	0,91	0,89	Ótimo
Isozonas	0,98	0,97	Ótimo

Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que os melhores desempenhos foram da metodologia das isozonas seguido pelo método de Bell. Oliveira *et al.* (2008), em um estudo voltado para alguns municípios do estado de Goiás, identificaram que a metodologia das isozonas apresentou o melhor desempenho na determinação de precipitações máximas do estado com índice de concordância médio de 98,32%, seguido pelo método das relações entre durações com 96,99% e por último o método de Bell com 76,06%.

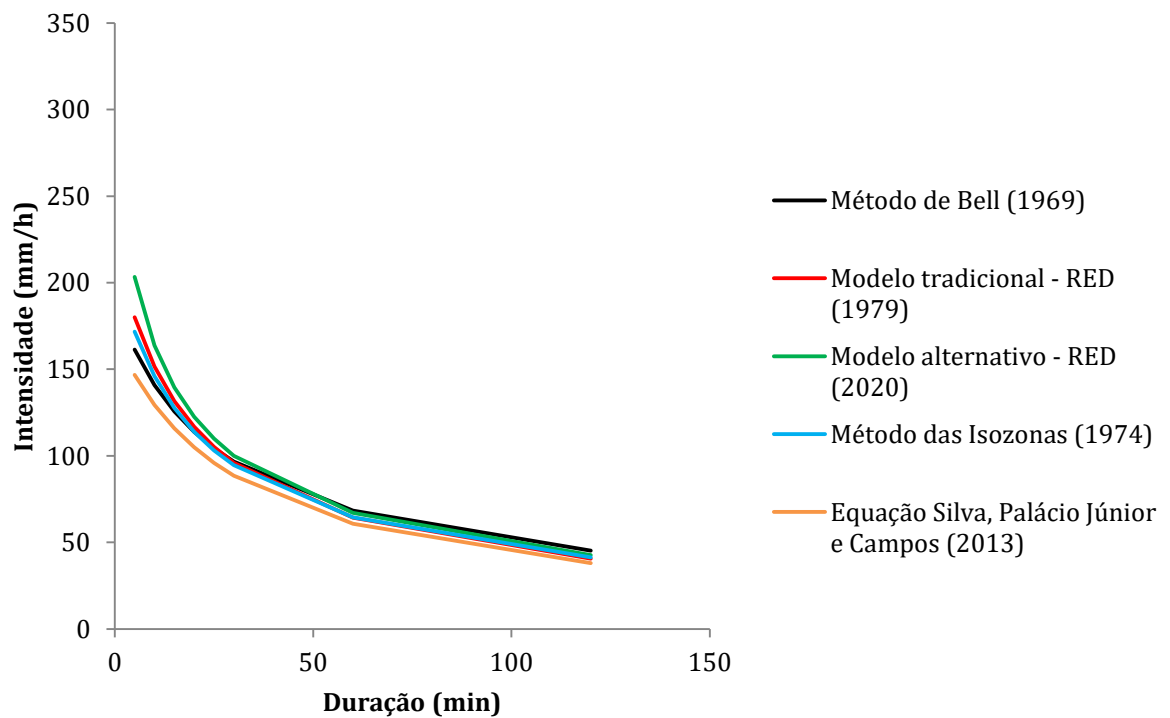
As Figuras 15 a 22 apresentam as curvas intensidade-duração para diferentes períodos de retorno. A sigla RED refere-se ao método das relações entre durações.

Figura 14 - Curva intensidade-duração para $T_r = 5$ anos – Fortaleza



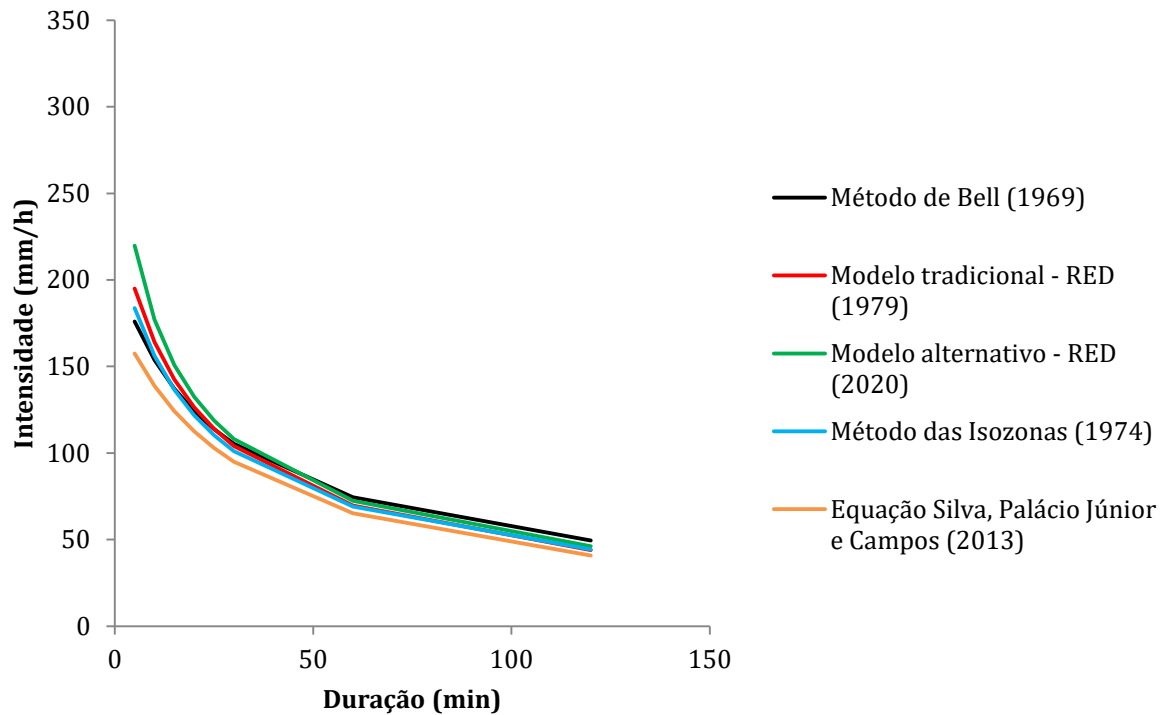
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 15 - Curva intensidade-duração para $T_r = 10$ anos – Fortaleza



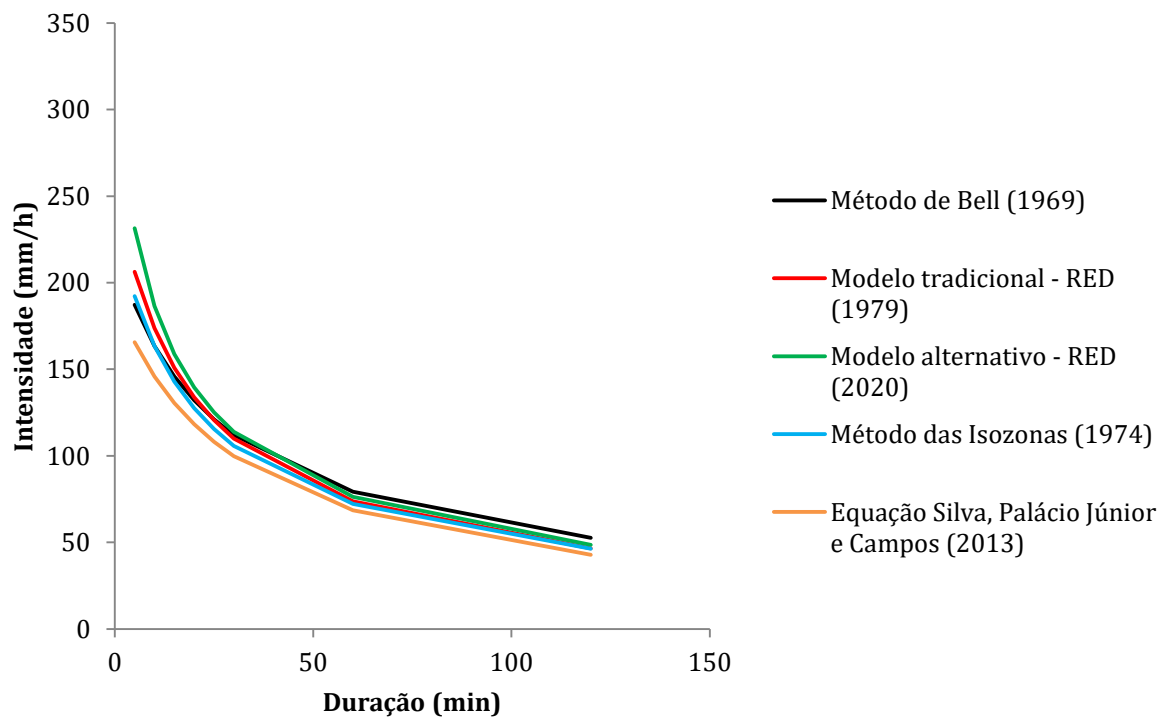
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 16 - Curva intensidade-duração para $T_r = 15$ anos – Fortaleza



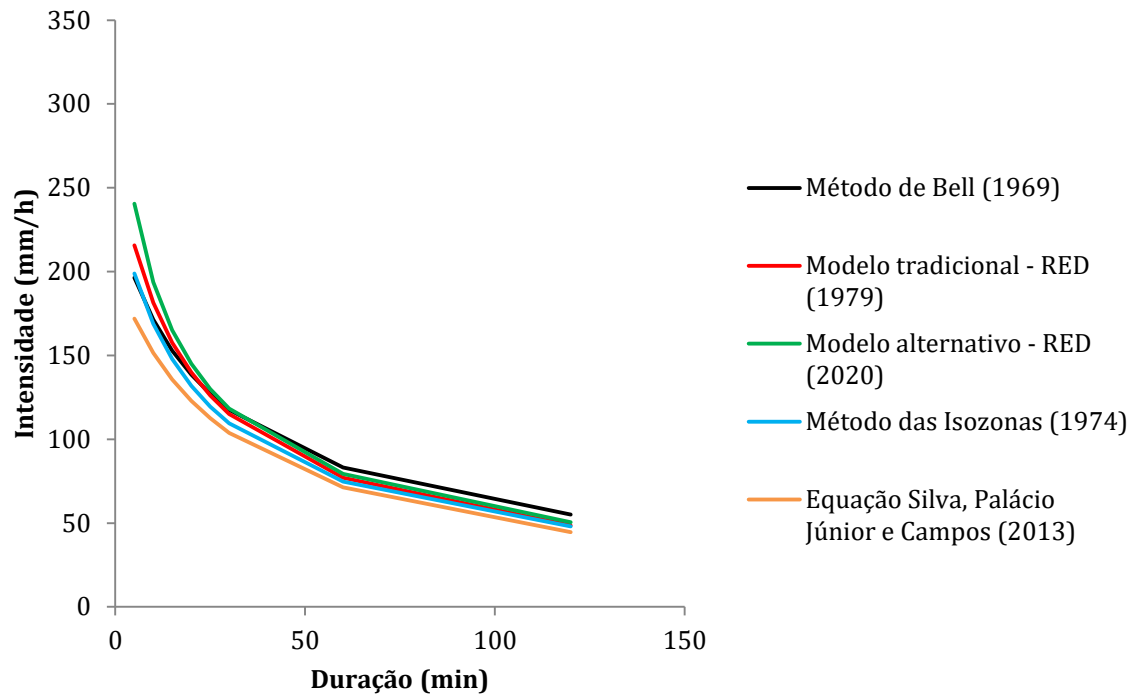
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 17 - Curva intensidade-duração para $T_r = 20$ anos – Fortaleza



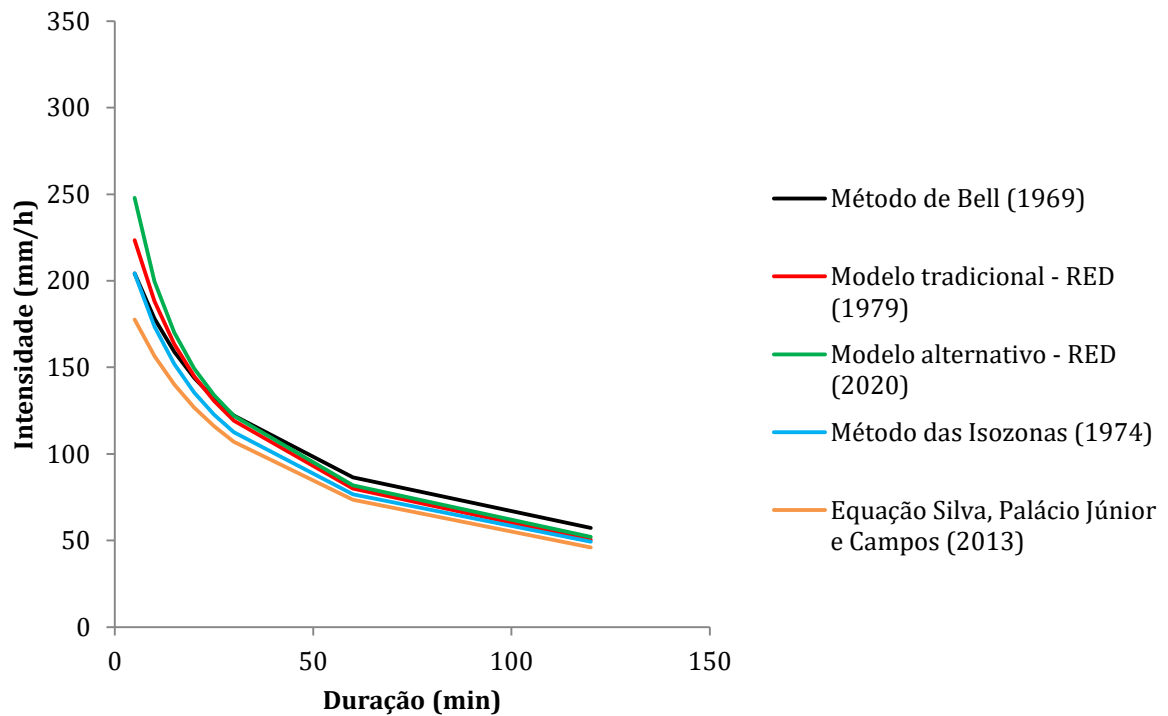
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 18 - Curva intensidade-duração para $T_r = 25$ anos – Fortaleza



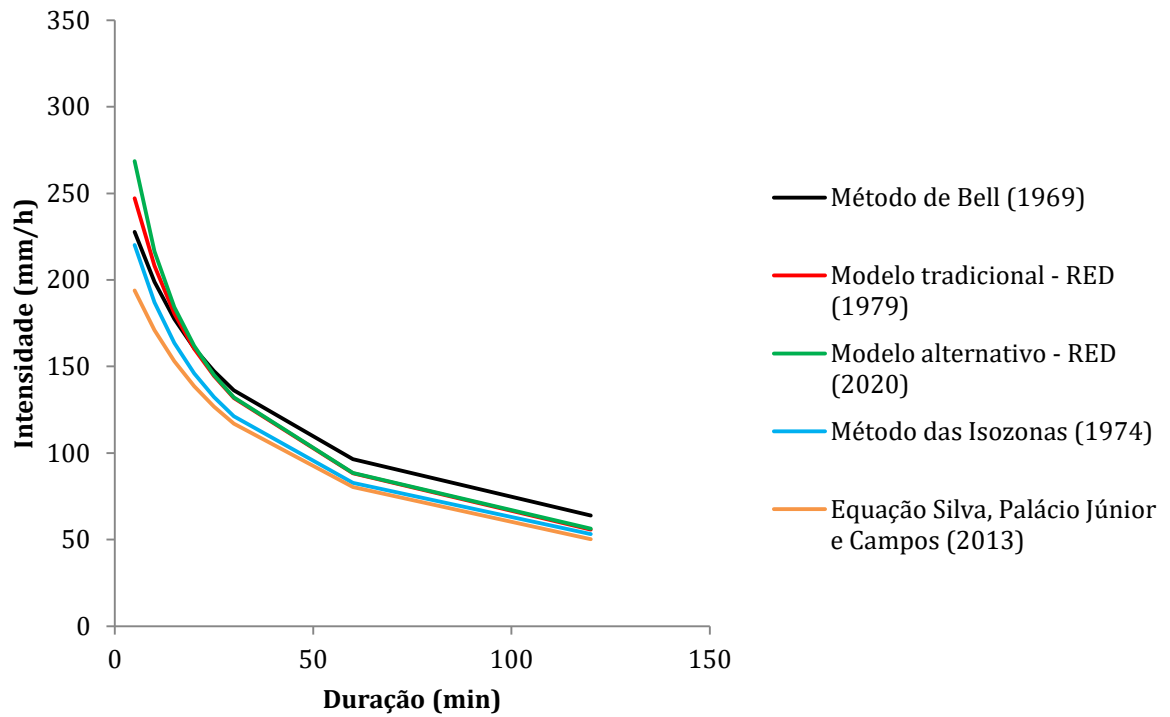
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 19 - Curva intensidade-duração para $T_r = 30$ anos – Fortaleza



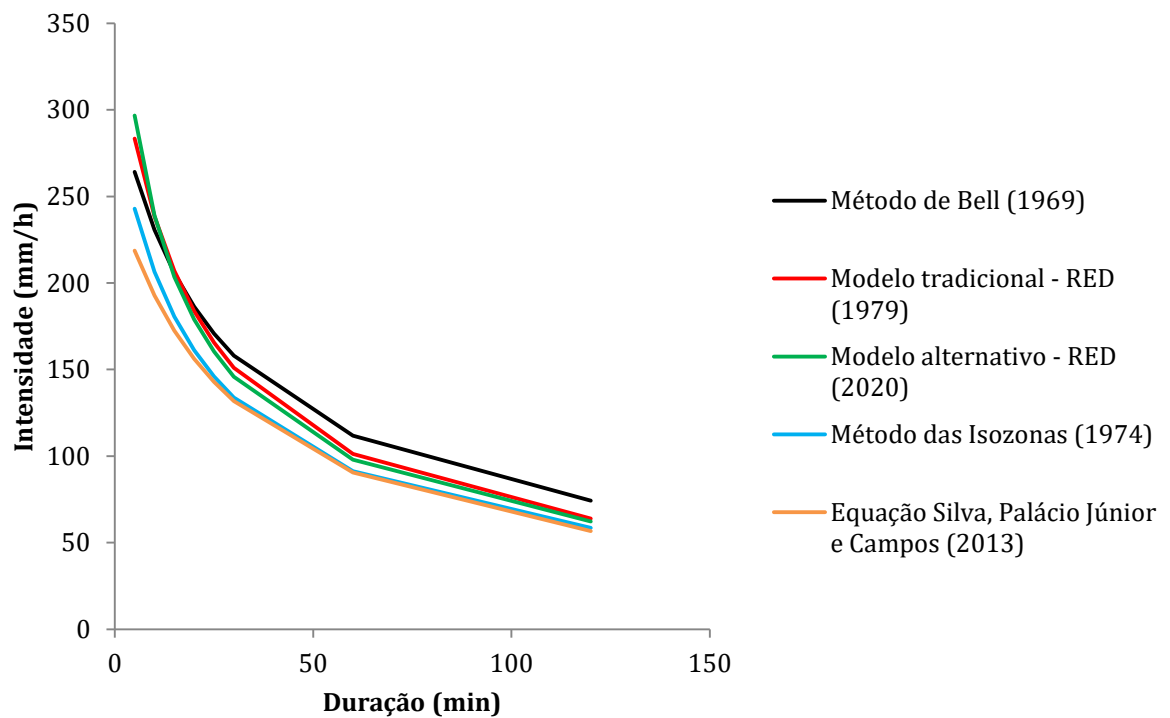
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 20 - Curva intensidade-duração para $T_r = 50$ anos – Fortaleza



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 21 - Curva intensidade-duração para $T_r = 100$ anos – Fortaleza



Fonte: Autoria própria (2021).

Inferese das curvas que, para cada período de retorno analisado, os métodos de desagregação fornecem intensidades superiores aos valores fornecidos pela equação de Silva, Palácio Júnior e Campos (2013). Os resultados das análises estatísticas sugerem que é aceitável, na ausência de equações desenvolvidas a partir de dados pluviográficos, utilizar métodos de desagregação para construir equações IDF.

Na curva de intensidade-duração para o período de retorno de 5 anos, nota-se que a curva da equação de Righetto (1998) (construída com base no método de Bell) está bem próxima da curva da equação de Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) para duração curtas. À medida que a duração e período de retorno aumentam, as curvas se distanciam. Este comportamento já era previsto tendo em vista que o método é indicado para durações inferiores a 120 minutos e com período de retorno de até 20 anos (TUCCI, 1997).

O melhor desempenho do método de Bell quando comparado ao método das relações entre durações pode estar associado a uma amostra de dados para a qual o método é mais indicado (curtas durações e pequenos períodos de retorno). Isso se deve à limitação imposta pela equação de Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) de ser válida somente para durações inferiores a 120 minutos.

4.3 Quixeramobim

4.3.1 Precipitações máximas diárias anuais

Nas Tabelas 18 e 19 encontram-se as informações gerais sobre a estação de Quixeramobim e as precipitações máximas registradas, respectivamente.

Quixeramobim possui estações com dados desde 1912, porém apenas uma estação com dados atuais atende à recomendação da OMM de no mínimo 30 anos de observação.

Tabela 18 – Informações gerais da estação pluviométrica de Quixeramobim

Município	Código	Lat (°)	Lon (°)	Quantidade de anos
Quixeramobim	00539012	-5,20	-39,28	46

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 19 – Precipitações máximas diárias da estação de Quixeramobim

Ano	Pmáx (mm)	Ano	Pmáx (mm)	Ano	Pmáx (mm)	Ano	Pmáx (mm)	Ano	Pmáx (mm)
1974	65	1984	109	1994	88	2004	85,5	2014	42
1975	72	1985	98,9	1995	63,6	2005	45	2015	41,1
1976	55	1986	84,6	1996	67	2006	62	2016	49
1977	60	1987	57,6	1997	61,8	2007	45	2017	63
1978	60	1988	49,6	1998	29,4	2008	43	2018	79
1979	50	1989	93	1999	71,2	2009	98,6	2019	51
1980	95	1990	86,4	2000	69,4	2010	82,6		
1981	58	1991	64,2	2001	49	2011	62		
1982	93,5	1992	81,2	2002	78	2012	54		
1983	57,4	1993	59,6	2003	91,2	2013	70		

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.2 Distribuição de melhor ajuste

As Tabelas 20 e 21 apresentam os resultados do teste de aderência e os valores dos índices estatísticos para o município de Quixeramobim.

Tabela 20 – Resultados do teste de aderência Qui-Quadrado – Quixeramobim

Distribuição	Valor crítico	Estatística de teste
Gama 2P	9,488	4,628
Gumbel	9,488	4,107
Log-normal 2P	9,488	4,062
Gama 3P	7,815	5,648
Log-normal 3P	7,815	4,943

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 21 – Resultados dos índices estatísticos – Quixeramobim

Distribuição	DQM	DQR	DMA	Coefficiente Angular	R²
Gama 2P	0,173	0,033	11,868	0,99	0,988
Gumbel	0,217	0,037	13,717	0,991	0,984
Log-normal 2P	0,198	0,035	10,046	1,003	0,985
Gama 3P	0,166	0,038	11,58	0,983	0,985
Log-normal 3P	0,183	0,035	9,743	0,998	0,985

Fonte: Autoria própria (2021).

Os dados da estação de Quixeramobim se ajustaram melhor a distribuição Gama 2P, com teste de aderência aceito, tendo desvios menores, coeficiente angular e coeficiente de determinação mais próximos de 1. É válido ressaltar que em todos os casos as cinco distribuições atenderam aos critérios. Entretanto, foi escolhida a que estatisticamente forneceu as melhores estimativas.

4.3.2.1 Determinação da precipitação máxima diária para vários períodos de retorno

O software *Gerador IDF* também foi utilizado para estimar as precipitações diárias máximas considerando os tempos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 e 100 anos para a estação analisada. A Tabela 22 apresenta os valores de precipitação estimados para cada período de retorno de acordo com a distribuição Gama 2P.

Tabela 22 – Precipitações diárias máximas estimadas para diferentes períodos de retorno – Quixeramobim

T_r (anos)	Precipitação diária máxima(mm)
2	65,5
5	82,1
10	91,7
15	96,8
20	100,2
25	102,8
30	104,8
50	110,3
100	117,5

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.3 Aplicação dos métodos de desagregação

4.3.3.1 Aplicação do método de Bell (1969)

Realizou-se o mesmo procedimento de Fortaleza. Substituindo os valores de t , T_r ,

P_{1dia} e k nas equações 8 e 9 foram obtidas as intensidades. O resultado está na Tabela 23.

Tabela 23 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método de Bell para Quixeramobim

t (min)	Tr (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	86,5	113,3	133,7	145,5	154,0	160,5	165,9	180,8	201,1
10	70,8	92,7	109,3	119,1	126,0	131,3	135,7	147,9	164,5
15	59,9	78,5	92,5	100,8	106,6	111,1	114,8	125,2	139,2
20	52,4	68,7	81,0	88,2	93,3	97,3	100,5	109,6	121,9
25	47,0	61,6	72,6	79,1	83,7	87,2	90,1	98,3	109,3
30	42,8	56,1	66,2	72,1	76,2	79,5	82,1	89,5	99,6
60	29,4	38,5	45,4	49,5	52,3	54,6	56,4	61,5	68,4
360	10,0	13,1	15,5	16,9	17,8	18,6	19,2	20,9	23,3
480	8,4	10,9	12,9	14,1	14,9	15,5	16,0	17,5	19,4
600	7,2	9,5	11,2	12,2	12,9	13,4	13,9	15,1	16,8
720	6,4	8,4	10,0	10,8	11,5	12,0	12,4	13,5	15,0
1440	4,1	5,4	6,4	6,9	7,3	7,6	7,9	8,6	9,6

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.3.2 Aplicação do método das relações entre durações

Com as precipitações estimadas pelas distribuições de probabilidade para os diferentes T_r e usando os coeficientes de desagregação da Tabela 1 foram calculadas as intensidades. Na Tabela 24 estão as intensidades calculadas para a cidade de Quixeramobim.

Tabela 24 – Intensidades máximas associadas a diferentes períodos de retorno e durações (mm/h) – Método das relações entre durações para Quixeramobim

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	91,4	114,5	127,9	135,0	139,8	143,4	146,2	153,9	163,9
10	72,6	90,9	101,6	107,2	111,0	113,9	116,1	122,2	130,2
15	62,7	78,6	87,8	92,7	95,9	98,4	100,3	105,6	112,5
20	54,4	68,2	76,2	80,4	83,2	85,4	87,1	91,6	97,6
25	48,9	61,3	68,5	72,3	74,8	76,8	78,3	82,4	87,7
30	44,8	56,1	62,7	66,2	68,5	70,3	71,7	75,4	80,3
60	30,3	37,9	42,4	44,7	46,3	47,5	48,4	51,0	54,3
360	8,6	10,8	12,1	12,8	13,2	13,6	13,8	14,6	15,5
480	7,0	8,8	9,8	10,4	10,7	11,0	11,2	11,8	12,6
600	5,9	7,4	8,3	8,7	9,0	9,3	9,5	9,9	10,6
720	5,1	6,4	7,1	7,5	7,8	8,0	8,2	8,6	9,2
1440	3,0	3,8	4,2	4,4	4,6	4,7	4,8	5,1	5,4

Fonte: Autoria própria (2021).

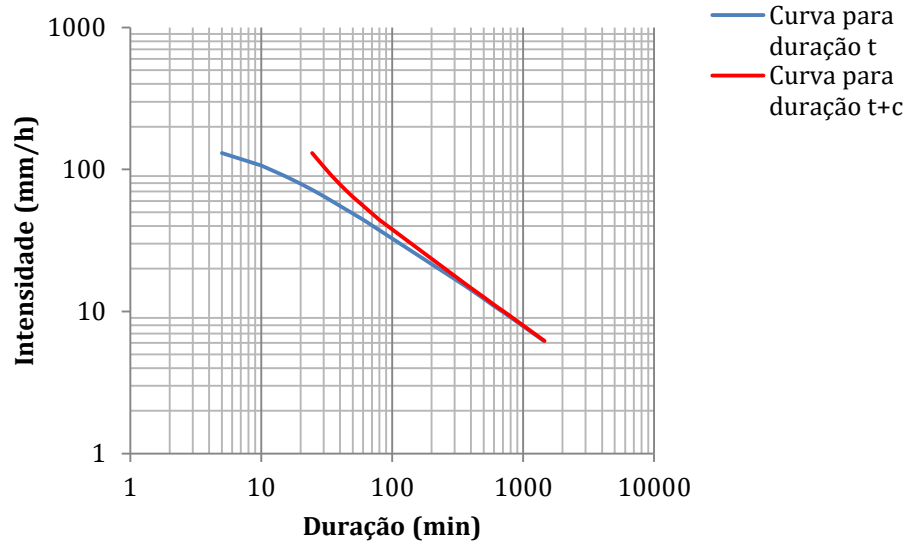
4.3.4 Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas

4.3.4.1 Parâmetro c

Para ajuste do parâmetro c foi aplicado o mesmo procedimento adotado nas equações de Fortaleza. Quixeramobim com 46 anos de observação, teve a curva plotada

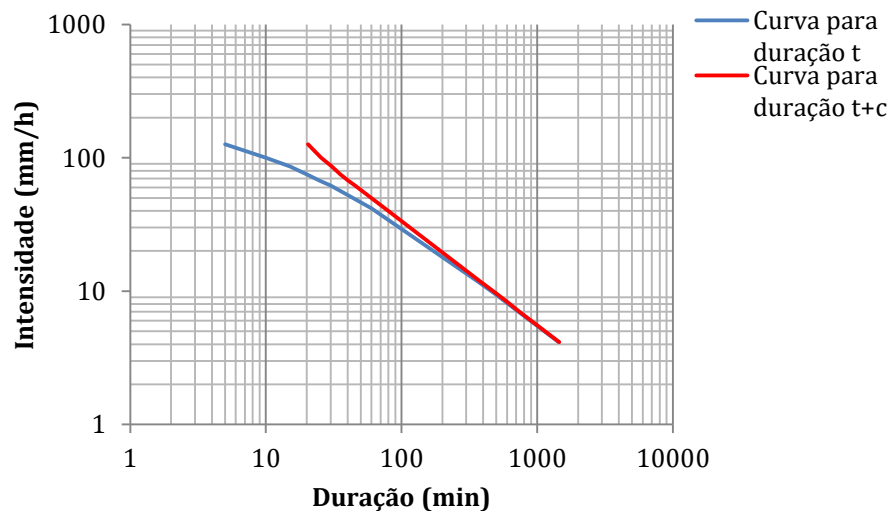
associada ao período de retorno de 9 anos, como mostram as Figuras 23 e 24

Figura 22 - Curva intensidade-duração para $Tr=9$ anos de acordo com o método de Bell para Quixeramobim



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 23 - Curva intensidade-duração para $Tr=9$ anos de acordo com a metodologia da CETESB para Quixeramobim



Fonte: Autoria própria (2021).

O trecho em curva mais acentuada é visto na curva azul para pequenas durações e conseqüentemente maiores intensidades. Nota-se, portanto, que quando o termo referente à duração é corrigido a curva aproxima-se de uma reta, indicando a linearização da função logarítmica.

4.3.4.2 Parâmetros a, b e d

Após definido o valor do parâmetro c para cada método, com auxílio do software *Excel* os demais parâmetros foram estimados por regressão linear múltipla com nível de confiança de 95%. Os valores estimados estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Parâmetros estimados para os métodos de Bell e das relações entre durações – Quixeramobim

Método	Parâmetros			
	a	b	c	d
Bell	715,873	0,214	19,427	0,729
Modelo tradicional	897,0236	0,145	15,480	0,788

Fonte: Autoria própria (2021).

Com os parâmetros estimados, as equações 51 e 52 foram ajustadas.

$$i = \frac{715,873 \times T_r^{0,214}}{(t+19,427)^{0,729}} \quad (51)$$

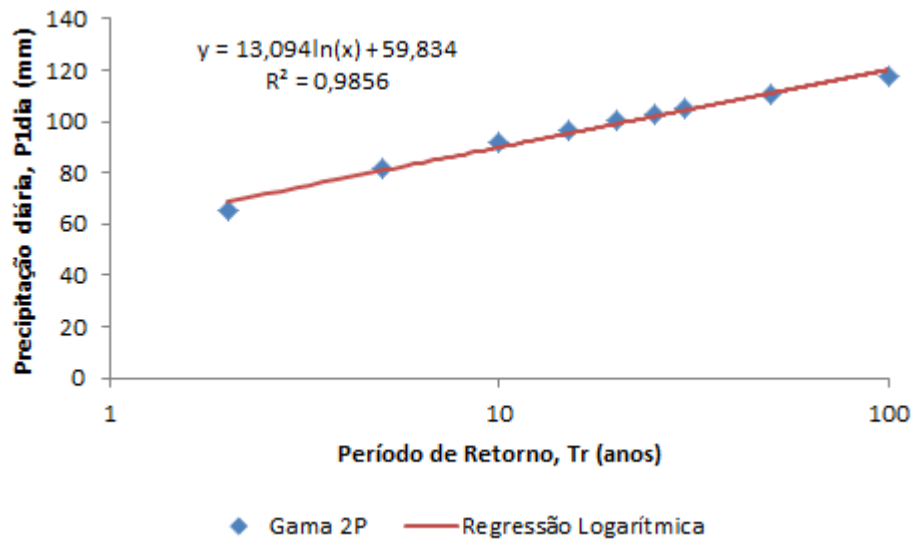
$$i = \frac{897,0236 \times T_r^{0,145}}{(t+15,480)^{0,788}} \quad (52)$$

Em que: i é a intensidade da precipitação em mm/h; t é a duração da precipitação em minutos e T_r é o período de retorno.

4.3.4.3 Parâmetros f e e

Na Figura 25 está apresentado o resultado da regressão logarítmica para o município de Quixeramobim.

Figura 24 - Ajuste dos parâmetros f e e - Quixeramobim



Fonte: Autoria própria (2021).

Os pontos em azul representam os valores estimados pela distribuição Gama 2P das precipitações máximas diárias associadas aos diferentes períodos de retorno. Na Figura 25 nota-se que estes valores estão bem alinhados à reta de regressão com R² igual a 0,9856, o que sugere que o ajuste da distribuição Gama 2P ao modelo logarítmico é muito bom. A Tabela 27 apresenta os valores estimados para os parâmetros f e e.

Tabela 25 – Parâmetros estimados para o modelo alternativo – Quixeramobim

Método	Parâmetros	
	f	e
Back	13,094	59,834

Fonte: Autoria própria (2021).

Com os parâmetros estimados, a Equação 53 foi ajustada.

$$i = \frac{60}{27,9327+3,8346t} [13,094 \ln \ln (T_r) + 59,83] \tag{53}$$

Em que: i é a intensidade da precipitação em mm/h; t é a duração da precipitação em minutos e T_r é o período de retorno.

4.3.5 Verificação da qualidade do ajuste dos parâmetros

A qualidade do ajuste dos parâmetros foi verificada com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe, Erro Padrão de Estimativa e análise da soma do quadrado dos desvios. Na Tabela 28 estão os valores obtidos para cada método.

Tabela 26 – Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do Erro Padrão de Estimativa – Quixeramobim

Método	Nash-Sutcliffe	Erro Padrão de Estimativa
Bell	0,98	0,07
Modelo tradicional	0,99	0,04
Modelo alternativo	1,00	0,05

Fonte: Autoria própria (2021).

O coeficiente de Nash indica um ajuste muito bom dos dados ao modelo, apresentando valores iguais ou superiores a 0,98 nos três casos. O menor Erro Padrão de Estimativa está associado ao ajuste da equação de acordo com o método das relações entre durações (modelo tradicional) e o modelo alternativo teve ajuste considerado perfeito por ter coeficiente de NASH igual a 1.

Os valores do quadrado dos desvios estão apresentados nas Tabelas 27, 28 e 29.

Tabela 27 – Quadrado dos desvios – Bell – Quixeramobim (mm/h)²

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	32,2	225,7	384,7	447,7	470,6	473,6	465,9	395,6	209,4
10	0,0	47,3	95,5	109,6	109,6	103,4	94,5	55,0	2,5
15	9,3	3,6	13,8	15,2	12,8	9,4	6,1	0,0	37,4
20	21,0	0,4	0,3	0,2	0,0	0,3	1,5	15,3	95,0
25	27,7	3,9	1,2	1,8	3,5	6,2	10,0	33,7	130,1
30	30,5	7,3	4,2	5,5	8,4	12,4	17,5	45,4	145,8
60	23,1	9,6	8,1	10,1	13,4	17,4	22,0	44,3	113,3
360	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,7	3,9
480	0,4	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	1,6
600	0,2	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,7
720	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3
1440	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,0

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 28 – Quadrado dos desvios – Modelo Tradicional - Quixeramobim (mm/h)²

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	0,2	92,3	141,7	143,9	132,2	118,9	102,9	54,1	3,7
10	22,8	6,9	15,3	13,3	9,0	5,4	2,4	1,3	38,6
15	19,8	3,6	8,9	7,4	4,6	2,4	0,8	2,3	35,2
20	26,6	0,0	0,9	0,4	0,0	0,3	1,4	11,4	55,3
25	22,9	0,0	0,4	0,1	0,0	0,5	1,6	10,7	48,4
30	17,7	0,0	0,7	0,3	0,0	0,1	0,8	7,3	36,5
60	6,8	0,2	0,7	0,5	0,2	0,0	0,1	2,1	13,5
360	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7
480	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3
600	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
720	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
1440	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 29 – Quadrado dos desvios – Modelo Alternativo - Quixeramobim (mm/h)²

t (min)	T_r (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	50	100
5	62,7	4,2	3,0	5,2	8,7	12,5	17,5	37,9	84,4
10	55,5	8,9	8,4	11,6	16,1	20,5	25,8	45,6	86,8
15	29,6	2,0	1,4	2,4	4,1	5,9	8,3	17,9	39,8
20	29,7	4,3	4,0	5,6	7,9	10,2	13,0	23,5	45,6
25	22,8	3,0	2,7	3,8	5,5	7,2	9,3	17,3	34,3
30	16,5	1,5	1,2	1,8	2,9	4,0	5,4	10,9	23,2
60	6,3	0,3	0,2	0,4	0,7	1,0	1,5	3,5	8,1
360	0,8	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,2
480	0,4	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6
600	0,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5
720	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5
1440	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2

Fonte: Autoria própria (2021).

Infere-se das tabelas acima que, o mesmo comportamento observado na estação de Fortaleza, repete-se aqui. O quadrado dos desvios diminui à medida que a duração, t, aumenta. O valor da soma dos quadrados dos desvios é menor no modelo alternativo, sendo 975,4 $(mm \cdot h^{-1})^2$, seguido pelo modelo tradicional e por último o método de Bell, com 1263 e 4734,2 $(mm \cdot h^{-1})^2$, respectivamente. Quanto à equação não ajustada do modelo alternativo, o valor da função S foi de 808,1 $(mm \cdot h^{-1})$. Essa diferença está relacionada ao acúmulo de erros que acontece quando é feito o ajuste dos parâmetros.

4.3.6 Comparação dos métodos de obtenção de equações IDF

As equações obtidas neste estudo foram comparadas a Equação 54. Esta equação foi construída por Dernadin e Freitas (1982) a partir da representação gráfica, feita por Pfafstetter (1957), das alturas pluviométricas para diversos intervalos de tempo. Esta equação tem validade para durações inferiores a 1440 minutos e períodos de retorno inferiores a 15 anos.

$$i = \frac{2847,22 \times T_r^{0,30}}{(t+43)^{0,97}} \quad (54)$$

Em que: i é a intensidade em mm/h; T_r é o período de retorno e t é a duração da chuva em minutos.

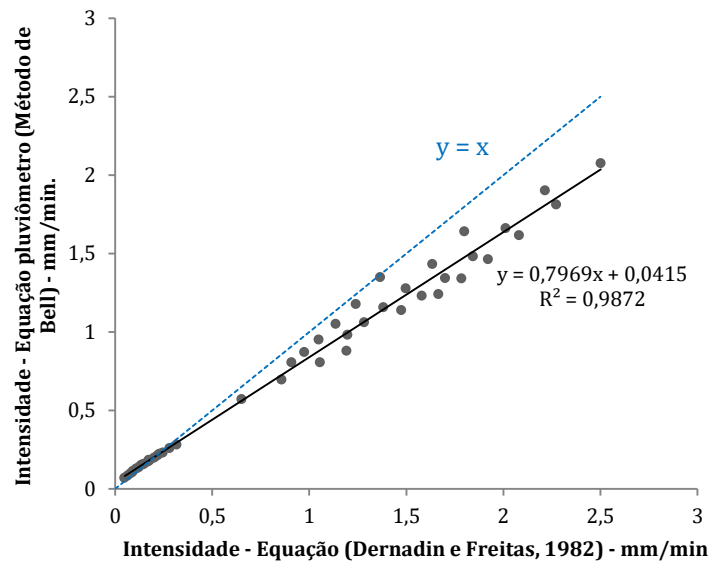
A Equação 55 foi desenvolvida pela metodologia da isozonas de Taborga Torrico (1974) por Batista (2018) para o município de Quixeramobim. Os dados correspondem a 43 anos de observação. Esta equação tem validade para durações inferiores a 240 minutos e períodos de retorno inferiores a 100 anos.

$$i = \frac{19,035 \times (T_r - 2,1)^{0,105}}{(t+9,805)^{0,794}} \quad (55)$$

Em que: i é a intensidade em mm/min; T_r é o período de retorno e t é a duração da chuva em minutos.

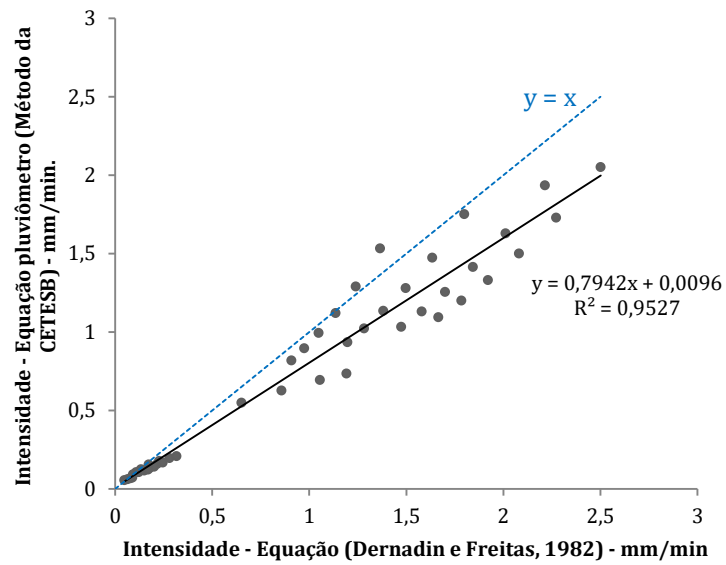
Tendo em vista que a comparação deve ser feita em intervalos em que as equações são válidas, foram analisadas duas situações. A princípio, comparou-se as equações para $T_r = 2, 5, 10$ e 15 anos e $t = 5, 10, 15, 20, 30, 60, 360, 480, 720$ e 1440 minutos. Nesse primeiro caso não consideramos a equação de Batista (2018) por ser válida apenas para durações inferiores a 240 minutos. As Figuras 26 a 28 apresentam os gráficos de correlação entre a equação de Dernadin e Freitas (1982) e as demais equações ajustadas a partir de métodos de desagregação para durações até 1440 minutos.

Figura 25 – Correlação linear –Pluviógrafo x Bell



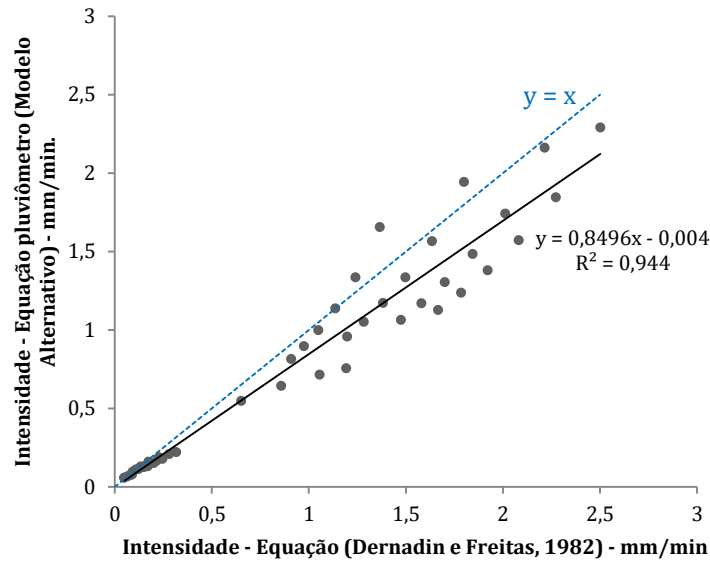
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 26 – Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo tradicional



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 27 – Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo alternativo



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados do índice de concordância, IC, e a classificação de Willmott de acordo com o índice de desempenho, ID, estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 30 – Classificações de acordo com o índice de desempenho – Quixeramobim

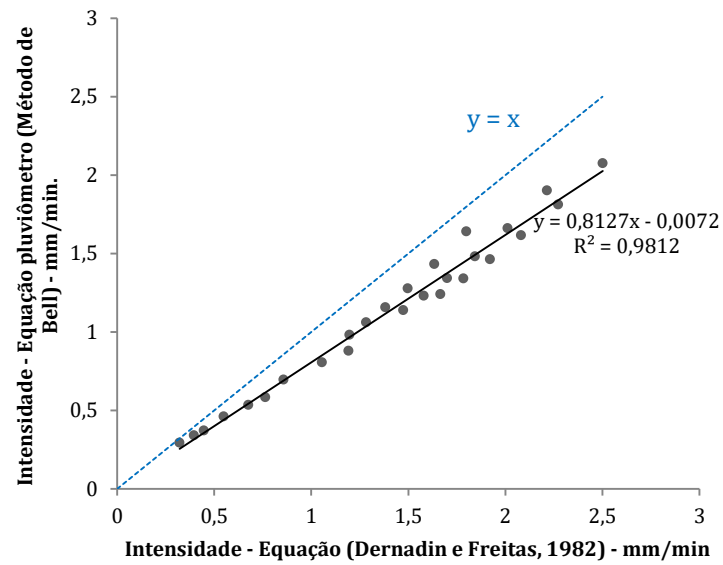
Método	IC	ID	Classificação
Bell	0,97	0,96	Ótimo
Modelo tradicional	0,96	0,92	Ótimo
Modelo alternativo	0,97	0,92	Ótimo

Fonte: Autoria própria (2021).

Em seguida, foi feito o mesmo processo para $T_r = 5, 10$ e 15 anos e $t = 5, 10, 15, 20, 30, 120$ e 240 minutos. Incluindo a equação ajustada por Batista (2018) pela metodologia de isozonas.

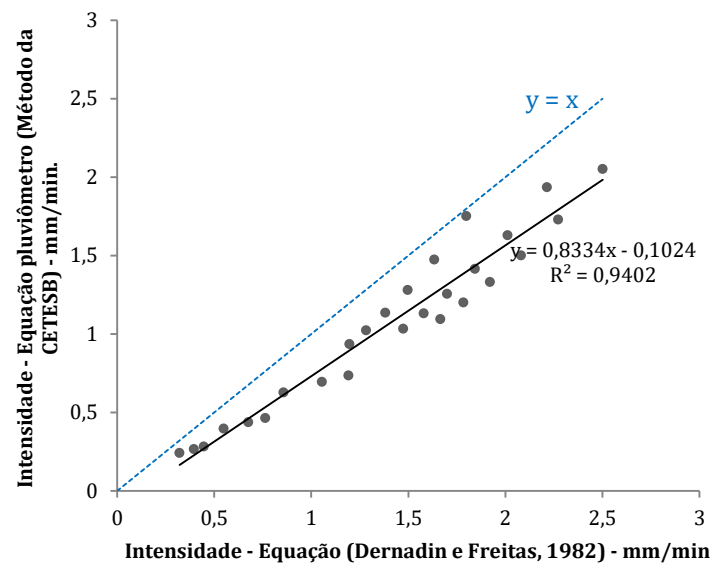
As Figuras 29 a 32 apresentam os gráficos de correlação entre a equação de Dernadin e Freitas (1982) e as demais equações ajustadas a partir de métodos de desagregação para durações de até 240 minutos.

Figura 28 - Correlação linear – Pluviógrafo x Bell



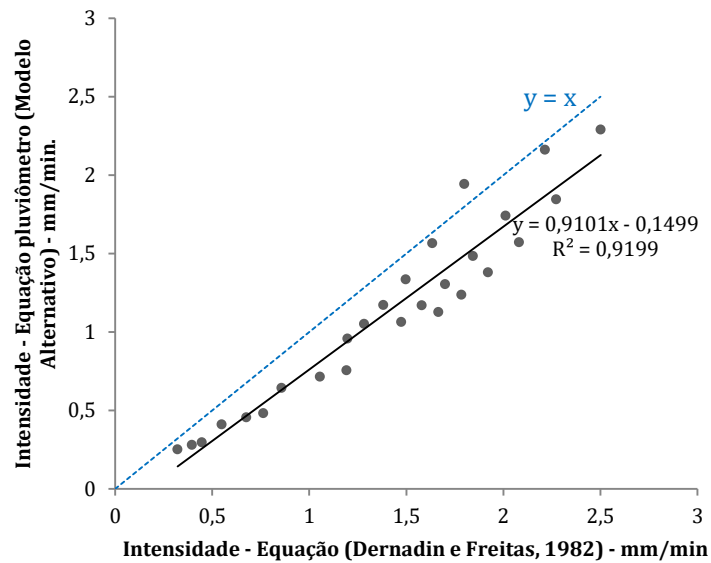
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 29 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo tradicional



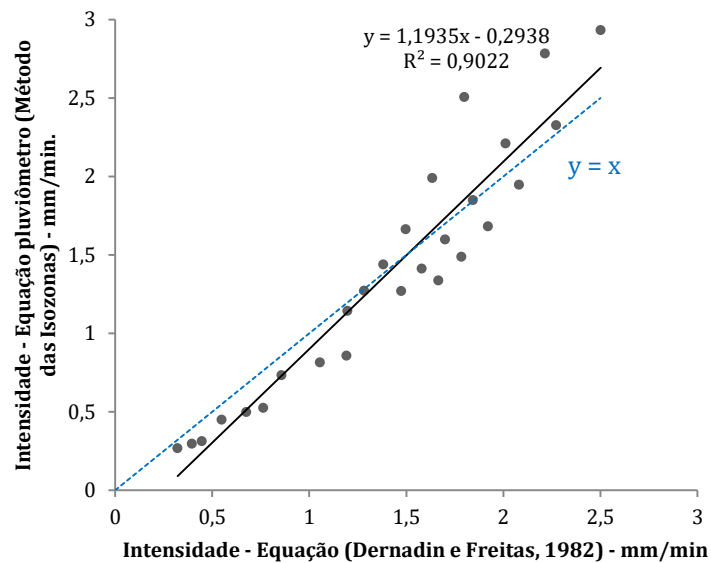
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 30 - Correlação linear – Pluviógrafo x Modelo alternativo



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 31 - Correlação linear – Pluviógrafo x Isozonas



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados do índice de concordância, do índice de desempenho e a classificação de Willmott encontram-se expostos na Tabela 32.

Tabela 32 – Classificações de acordo com o índice de desempenho – Quixeramobim

Método	IC	ID	Classificação
Bell	0,92	0,87	Ótimo
Modelo tradicional	0,87	0,91	Ótimo
Modelo alternativo	0,92	0,83	Muito bom
Isozonas	0,96	0,85	Muito bom

Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com o Índice de Desempenho, o modelo de Bell apresentou melhor desempenho nos dois cenários apresentando menor dispersão. Porém, observando o coeficiente angular da reta de regressão, é possível perceber que ele corresponde ao método que tem uma maior tendência a subestimar os valores das intensidades quando comparados aos valores gerados pela equação padrão.

No caso de Quixeramobim, não é possível definir, com base no coeficiente de desempenho, o método que melhor descreve os eventos de chuvas intensas no município. O fato da equação do município de Quixeramobim ser antiga pode explicar essa discrepância entre os resultados encontrados pelos modelos de desagregação e pela equação padrão. O período de abrangência dos dados foi diferente para as duas situações. Zuffo (2004) alerta para a necessidade de revisão periódica, pelo menos uma vez a cada 10 anos, das equações de chuvas intensas com mais de 20 anos de idade. As mudanças climáticas podem acarretar alterações no padrão de comportamento das chuvas intensas. (Weschenfelder *et al.*, 2019). A não atualização dessas equações pode acarretar problemas, provocando o subdimensionamento ou o superdimensionamento de estruturas hidráulicas. Esse comportamento indica a necessidade de um novo ajuste dos parâmetros da equação IDF proposta por Dernadin e Freitas (1982).

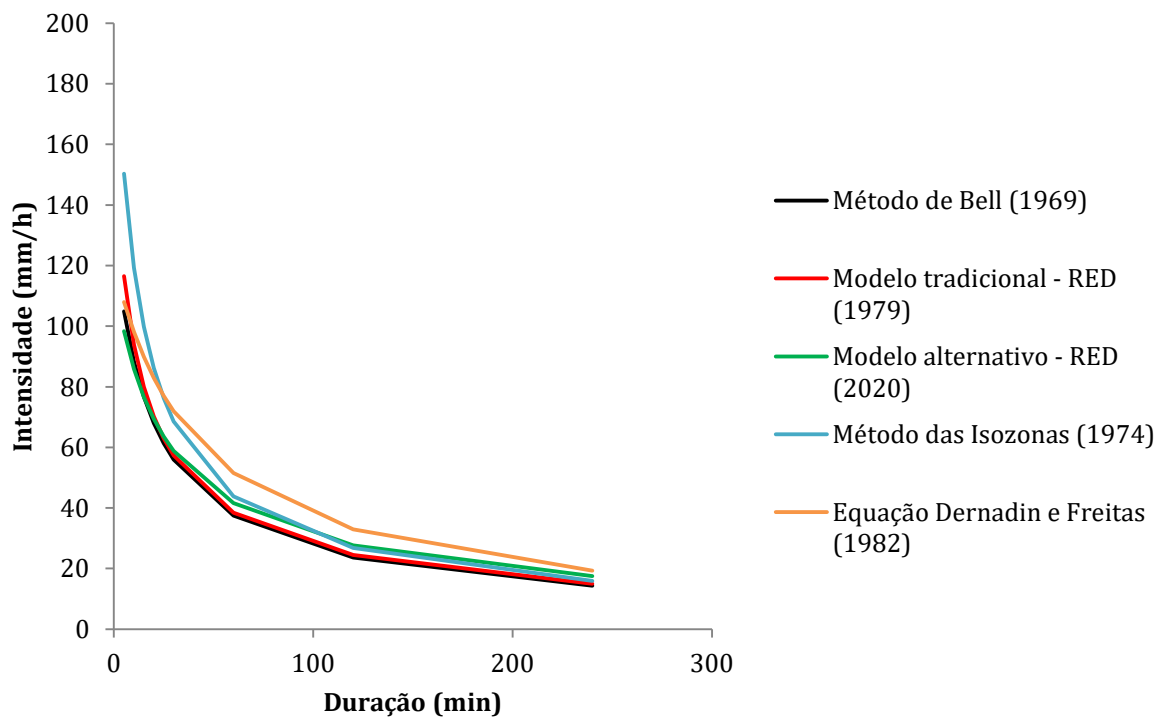
Nesse caso, para o município de Quixeramobim, até que seja atualizada a equação que se baseia em dados de pluviógrafos, recomenda-se que sejam utilizadas equações IDF geradas com base em dados mais recentes de pluviômetros, utilizando metodologias que já foram validadas em outros locais como, por exemplo, as metodologias mostradas neste trabalho que apresentaram resultados satisfatórios para o município de Fortaleza.

Em uma análise comparativa entre os estudos existentes sobre equações IDF do estado de São Paulo, Genovez e Ruffo (2013) afirmaram que métodos como o de Bell e o das isozonas podem ser utilizados para estimar as precipitações intensas do estado de São Paulo.

No entanto, é conveniente que sejam utilizados dados locais para definir novos coeficientes e que, métodos generalizados como o de Bell, sejam evitados e usados somente para estimativas razoáveis em casos de escassez de dados.

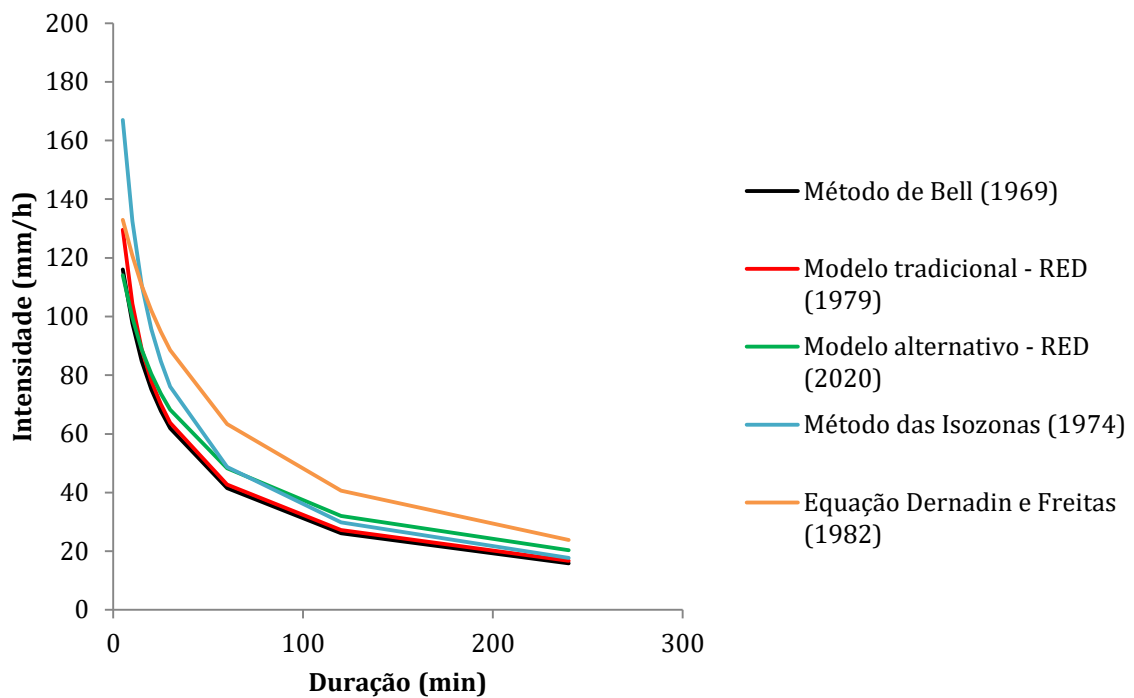
As Figuras 33, 34 e 35 apresentam as curvas intensidade-duração para períodos diferentes períodos de retorno. A sigla RED refere-se ao método das relações entre durações.

Figura 32 - Curva intensidade-duração para $T_r = 5$ anos – Quixeramobim



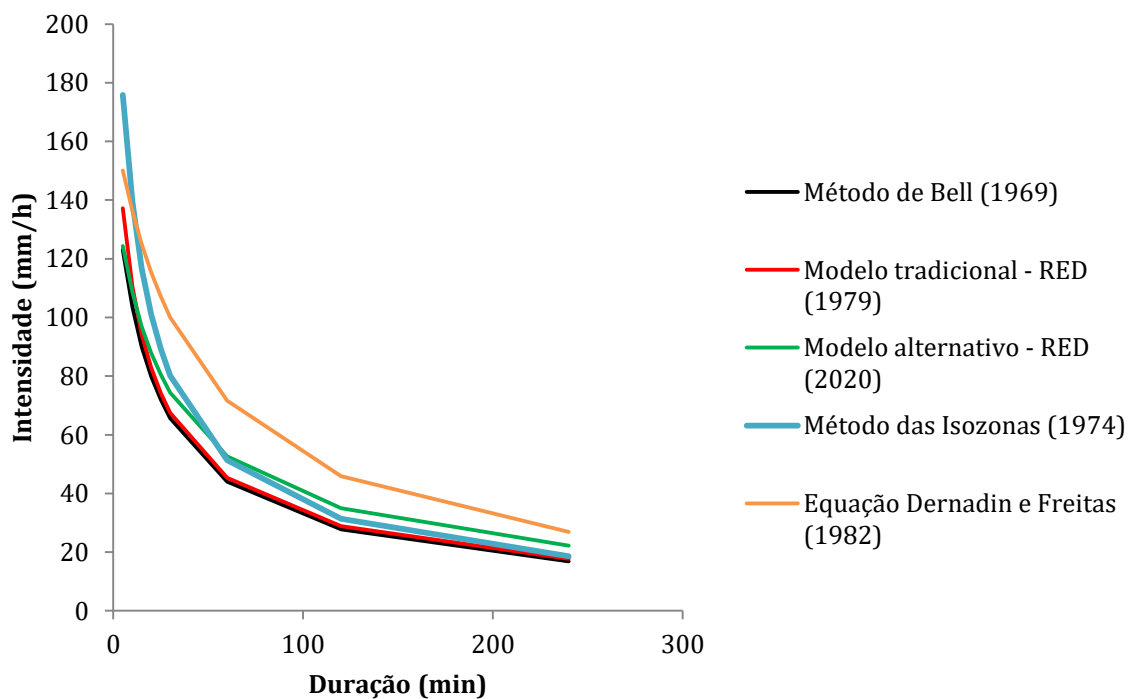
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 33 - Curva intensidade-duração para $T_r = 10$ anos – Quixeramobim



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 34 - Curva intensidade-duração para $T_r = 15$ anos – Quixeramobim



Fonte: Autoria própria (2021).

Infere-se das curvas apresentadas acima que as equações ajustadas com base nos métodos de desagregação tendem a fornecer intensidades inferiores às aquelas fornecidas pela equação do pluviógrafo. A equação proposta por Batista (2018) fornece valores superiores ao da equação de Dernadin e Freitas (1982) para valores de duração inferiores a 25 minutos para $T_r = 5$ anos, inferiores a 20 minutos para $T_r = 10$ anos e inferiores a 10 minutos para $T_r = 15$ anos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de fazer um levantamento das equações de pluviógrafos de dois municípios cearenses, além de propor equações IDF a partir de métodos de desagregação e analisar o desempenho destas.

Os municípios analisados possuem equações de pluviógrafos e equações obtidas através da desagregação de chuvas diárias. A equação de Fortaleza que está atualmente em uso é relativamente recente e, portanto, tende a fornecer dados mais representativos. No entanto, a equação de Quixeramobim, datada de 1982, foi construída a partir de uma série de dados obtida há mais de 40 anos, fazendo com que o cenário atual do então município não seja bem representado.

As equações obtidas utilizando o método de Bell e o método das relações entre durações (modelo tradicional e modelo alternativo) apresentaram bons ajustes para os municípios, demonstrando melhores resultados para o município de Fortaleza-CE.

No caso de Fortaleza, as equações obtidas através de dados pluviométricos forneceram valores sempre superiores aqueles fornecidos pela equação de Silva, Palácio Júnior e Campos (2013). Esse aumento é da ordem de 13 %, considerando a metodologia das isozonas, a que mais se adequou aos resultados obtidos pela equação padrão. Isso indica que estes modelos são seguros para prever eventos de chuvas intensas no município de Fortaleza. O mesmo não acontece no caso de Quixeramobim, neste caso apenas a equação de Batista (2018) fornece valores superiores e somente para durações curtas de até 25 minutos. Este comportamento pode estar associado ao fato de que a equação do pluviógrafo foi ajustada há quase 40 anos e, portanto, com uma série de dados menor.

Para Fortaleza, a metodologia das isozonas foi a que apresentou melhor índice de desempenho quando comparada à equação de Silva, Palácio Júnior e Campos (2013), seguida pela metodologia de Bell. O bom desempenho do método de Bell pode estar associado às durações analisadas, estas foram curtas e o modelo representa melhor precipitações de durações curtas e pequenos períodos de retorno. Este mesmo modelo representou com ótimo desempenho as intensidades da estação de Quixeramobim, o que pode estar relacionado aos curtos períodos de retorno analisados. No entanto, considerando a equação da reta de regressão, ele é o método que mais subestima os valores das intensidades em comparação com os resultados obtidos pela equação padrão. Em seguida, tem-se a metodologia das isozonas

com desempenho também considerado ótimo e sendo mais indicado por apresentar bons resultados para durações e períodos de retorno superiores.

O comportamento do método de Bell foi semelhante ao encontrado em outros estudos citados ao longo das discussões realizadas neste trabalho, apresentando resultados mais adequados para durações curtas e períodos de retorno de até 20 anos.

O modelo alternativo proposto por Back (2020) para a metodologia das relações entre durações apresentou bons resultados, apesar de não se sobressair em todos os casos ao modelo tradicional. É um modelo que possui vantagens relacionadas a uma maior facilidade para encontrar valores de intensidades de chuvas intensas associadas a uma duração e a um período de retorno, utilizando apenas o valor da chuva diária associada ao período de retorno correspondente.

Devido à inexistência de grandes séries de dados pluviográficos na maior parte do território cearense, seja por ausência do dispositivo ou não digitalização de seus dados, os métodos de desagregação são os mais utilizados na construção de equações IDF nesta região. Por não haver amostra suficiente de municípios com pluviógrafos, é inviável afirmar qual dos métodos analisados representa melhor os eventos de chuvas intensas do estado. Pode-se dizer que, considerando as análises realizadas neste trabalho, globalmente, o método das isozonas se sobressaiu, gerando os melhores resultados. Sugere-se, então, a atualização da equação do município de Quixeramobim e um novo estudo comparativo entre os métodos aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Francismário de Menezes. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para obtenção de equações IDF em regiões desprovidas de pluviógrafos utilizando o método das isozonas (Brasil)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11412>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- BACK, Á. J. Modelo alternativo de equação de chuvas intensas obtida a partir da desagregação da chuva diária. **RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.25, e2, 2020.
- BACK, Á. J.; HENN, A.; OLIVEIRA, J. L. R. Equações de chuvas intensas para o estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2127-2134, nov./dez. 2011.
- BASSO, R. E. et al. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [s.l.], v. 21, n. 4, p. 635-641, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016133691>.
- BATISTA, Tatiane Lima. **Geração de equações IDF dos municípios cearenses pelo método de desagregação por isozonas implementado em um programa computacional (Brasil)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/30690>. Acesso em: 02 set. 2020.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89-97, 1997.
- CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação de Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.
- COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias (Brasil)**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COUTINHO, A. P. *et al.* O efeito do método de desagregação de chuva no hidrograma de projeto para uma bacia hidrográfica rural no semiárido nordestino. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. v. 4 n. 2, p. 146-156, 2019.
- DENARDIN, J. E.; FREITAS, P. L. de. **Características fundamentais da chuva no Brasil**. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 17, n.10: 1409-1416, out. 1982. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/16306>. Acesso em: 24 abr. 2020.

FECHINE SOBRINHO, Vicente. **Aplicação do método das isozonas na obtenção das equações IDF de chuvas intensas dos municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato - CE (Brasil)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/3752>. Acesso em: 10 set. 2020.

FECHINE SOBRINHO, V. *et al.* Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 7, p. 727-734, jul. 2015.

GENOVEZ, A. M.; ZUFFO, A. C.; Chuvas intensas no estado de são paulo: estudos existentes e análise comparativa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Campinas- SP, v. 5, n. 3, p. 45-58, set. 2000.

HERNANDEZ, V. Regionalização dos Parâmetros de Escala em Chuvas Intensas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 91-98, mar. 2008.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Ceará em mapas**. Fortaleza- CE, 2017/2020. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/>. Acesso em: 12 ago. 2020

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil básico municipa - 2012 – Quixeramobim**. Fortaleza- CE, 2012. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/>. Acesso em: 12 jul. 2020

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil das regiões de planejamento – Grande Fortaleza 2017**. Fortaleza- CE, 2017. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/>. Acesso em: 12 jul. 2020

LIMA NETO, V. de S.; BATISTA, T. L.; NUNES, J. D.; TAVARES, P. R. L. **Estudo comparativo de equações intensidade-duração-frequência da cidade de Fortaleza - CE, Brasil**. Congresso Latinoamericano de hidráulica. Buenos Aires – Argentina, set. 2018.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.147-155, 2003.

NAGHETTINI, Mauro; ÉBER, José de Andrade. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OLIVEIRA, L. F. C. de.; ANTONINI, J. C. dos A.; FIOREZE, A. P.; SILVA, M. A. S. da. Métodos de estimativa de precipitação máxima. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande- PB, v.12, n.6, p.620–625, 2008.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., 1976.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M. de.; OLIVEIRA, T. S. de.; LOBATO, F. A. de O. **Equações de intensidade – duração – frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará.** Biblioteca Digital de Periódicos- UFPR. Paraná, v. 9, n. 4, 2008.

SANTOS, D. L. *et al.* Determinação das equações de intensidade, duração e frequência de precipitação para cidades do sudeste do estado do Ceará. **Revista Científica Rural.** v.21, n.2, 2019.

SILVA, B. M.; **Chuvas intensas em localidades do Estado de Pernambuco.** UFPE (Universidade Federal de Pernambuco). Recife- PE, mai. 2009.

SILVA, D. D. da. *et al.* Chuvas intensas no Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 362-367, dez. 2002.

SILVA, F. O. E. da.; PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE.** Fortaleza, n. 192, mai/ago. 2013.

SOUSA, I. L. S. e. AMORÍM, R. S. S.; TORRES, G. N. **Calibração do modelo de Bell para estimativa de chuvas intensas para sete estações meteorológicas de Mato Grosso.** Geografia, Rio Claro, v. 41, n. 3, p. 429-446, set./dez. 2016.

SOUZA, V. A. S. de. *et al.* Determining idf equations for the state of Rondônia. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 18, p. 10-26, 15 jul. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/44119>
Acesso em: 12 set. 2020.

TORRICO, José Jaime Taborga. **Práticas Hidrológicas.** Rio de Janeiro: Transcon, 1974.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABHR, 1997.

VIEIRA, D. B.; LOMBARDI NETO, F., SANTOS, R. P. dos.; Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Mococa, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** Brasília-DF, v.33, n.8, ago. 1998.

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1975.

WESCHENFELDER, A. B. *et al.* Geração de curvas IDFs para cenários projetados na cidade Porto Alegre/RS, **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 34, n.2, p. 201-216, 2019.

WILKEN, Paulo Sampaio. **Engenharia de drenagem superficial.** São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.

ZUFFO, A. C. **Equações de Chuvas São Eternas?** In XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro/SP. Brasil, 2004.