

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS**

VICENTE FECHINE SOBRINHO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS ISOZONAS NA OBTENÇÃO DAS
EQUAÇÕES IDF DE CHUVAS INTENSAS DOS MUNICÍPIOS DE
JUAZEIRO DO NORTE, BARBALHA E CRATO - CE**

**JUAZEIRO DO NORTE-CE
2011**

VICENTE FECHINE SOBRINHO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS ISOZONAS NA OBTENÇÃO DAS
EQUAÇÕES IDF DE CHUVAS INTENSAS DOS MUNICÍPIOS DE
JUAZEIRO DO NORTE, BARBALHA E CRATO – CE**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça
Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda
Tavares

JUAZEIRO DO NORTE-CE
2011
VICENTE FECHINE SOBRINHO

APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS ISOZONAS NA OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES IDF
DE CHUVAS INTENSAS DOS MUNICÍPIOS DE JUAZEIRO DO NORTE, BARBALHA
E CRATO – CE

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 18 de novembro de 2011.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof^a. Dr^a. Celme Torres Ferreira da Costa (Conselheira)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Conselheiro)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça pela expressiva colaboração e orientação para realização deste trabalho.

Aos Professores Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro, Dr^a. Celme Torres Ferreira da Costa e Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares, pelos ensinamentos e incentivos.

Ao Professor Dr. José Carlos de Araújo, pela concessão dos dados pluviográficos da Bacia Experimental de Aiuaba – CE, do grupo de Estudos Hidosedimentológicos do Semárido – HIDROSED.

Aos colegas de curso Eng^o Marcos Luis Torres Sampaio, Eng^o Francisco Ramis da Silva e Eng^o David Andriola Colares, pelo coleguismo e ao MSc José Vidal de Figueiredo, pela colaboração.

Dedico este trabalho aos meus familiares.

A todos obrigado!

“Fazer ciência sem quantificar, ainda não é fazer ciência”

Kepler

RESUMO

SOBRINHO, Vicente Fechine. Universidade Federal do Ceará, Novembro 2011. **Aplicação do Método das Isozonas na Obtenção das Equações IDF de Chuvas Intensas dos Municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato – CE.** Orientador: Luiz Alberto Ribeiro de Mendonça. Examinadores: Celme Torres Ferreira da Costa, Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins e Pedro Henrique Augusto Medeiros.

O crescimento do uso e ocupação dos solos em áreas urbanas e rurais exige conhecimento e tratamento estatístico de dados de intensidade, duração e frequência de chuvas intensas, importantes na previsão das vazões de pico utilizadas no dimensionamento de redes de drenagem. Os transtornos causados por alagamentos ou inundações de áreas urbanas e rurais somente são evitados com obras de drenagem bem dimensionadas, que resultam em custos de construção compatíveis com os fatores de risco e adequada previsão da vazão de projeto. Estas vazões de projetos podem ser estimadas a partir da equação IDF de chuva, que relaciona uma dada intensidade (I) de uma chuva intensa com a duração (D) e a frequência (F) ou tempo de retorno da mesma. Esta equação é obtida para uma determinada localidade, geralmente por método convencional, através de registros pluviográficos de chuvas consideradas intensas para certas durações e frequências observadas. Entretanto, no Brasil não existe registros pluviográficos em quantidade suficiente, que abranja muitas áreas de importância urbana, agrícola e industrial. No Estado do Ceará, recentemente foram instalados 70 pluviógrafos digitais tipo balança, monitorados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), porém com registros inferiores a quatro anos de observação. Neste contexto, esta pesquisa objetivou desenvolver uma metodologia para obtenção da equação IDF de chuvas intensas, em áreas desprovidas de pluviógrafos, utilizando dados obtidos de pluviômetros e tratados pelo método das isozonas. Este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas: (i) obtenção e análise estatística descritiva de série de precipitações máximas anuais; (ii) obtenção do ajuste dos dados a uma função distribuição de probabilidade; (iii) geração de intensidades de chuvas através do método das isozonas; (iv) formulação da equação IDF de chuvas intensas. Esta metodologia foi aplicada aos municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato, localizados na Região Metropolitana do Cariri cearense. Antes do desenvolvimento da metodologia foi feito a validação do método das isozonas em duas zonas climatologicamente distintas, comparando com intensidades obtidas de equações IDF já formuladas. A validação mostrou, para os municípios de Fortaleza no Ceará e Miracema do Norte em Tocantins, que o método das isozonas superestima as intensidades em aproximadamente 10%, podendo ser utilizado com certa segurança. Ainda, a validação do método das isozonas foi verificada a partir de dados pluviográficos da estação climatológica de Aiuaba – CE, localizada na isozona G. Os números obtidos da estação de Aiuaba mostram o bom desempenho da metodologia das isozonas, tendo importância significativa para este trabalho, pois a área de estudo fica também na isozona G. Através da metodologia, para cada município estudado, o método das isozonas transformou os dados básicos de precipitações diárias máximas anuais, obtidos dos registros pluviométricos, em séries de intensidades máximas, durações e tempos de retornos, que foram utilizados na formulação das respectivas equações IDF de chuvas intensas, para durações de até 240 min. As utilizações destas equações tornam a aplicação do método das isozonas mais prática, eliminando a análise de mapa e tabelas, reduzindo a possibilidade de erros de transcrição.

Palavras Chaves: Precipitações máximas diárias, Região do Cariri cearense, tempo de retorno.

ABSTRACT

SOBRINHO, Vicente Fechine. Federal University of Ceará, November 2011. **Isozones Method applied in the obtention of the heavy rainfall IDF equations of the Juazeiro do Norte, Barbalha and Crato (CE) municipalities.** Advisor: Luiz Alberto Ribeiro de Mendonça. Committee: Celme Torres Ferreira da Costa, Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins e Pedro Henrique Augusto Medeiros.

The increase in use of urban and rural land demands knowledge on statistically treated data on intensity, duration and frequency of heavy rainfall, allowing better forecasting of peak flow rates - used in the design of drainage networks. The damage caused by flooding of urban and rural areas are only avoided by well dimensioned drainage works, resulting in construction costs compatible with adequate treatment of the risk factors and with projected flow prediction. These projected flows can be obtained from the rainfall IDF equation, which links a given intensity (I) of heavy rain with its duration (D), and to its frequency (F) or with the time to pass until its return. This equation is obtained for a given location, usually by a conventional method, using rain gauge rainfall records considered intense for observed durations and frequencies. However, in Brazil there is insufficiency of rain gauge records, for many large and important urban, agricultural and industrial areas. Thus, 70 digital recording rain gauges were recently installed within the state of Ceará, monitored by the Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), but still with less than four years of recorded observation. In this context, this research was aimed at developing a methodology to obtain the equation of heavy rainfall IDF in areas devoid of recording rain gauges, using data obtained from conventional rain gauges, treated by the method of isozones. This study was conducted in four stages: (i) obtention and descriptive statistical analysis of a series of annual maximal precipitations, (ii) obtention of the data fit to a distribution function, (iii) generation of the rainfall intensities by the isozones method (iv) formulation of the heavy rainfall IDF equation. This methodology was applied to the municipalities of Juazeiro, Barbalha and Crato, located in the Cariri (CE) metropolitan area. Before the development of the methodology, it was performed the validation of the isozones method in two climatologically different areas, comparing it with intensities obtained from pre-existing IDF equations. The validation showed, for the cities of Fortaleza (in Ceará) and Miracema do Norte (in Tocantins), that the isozones method overestimates the rainfall intensities in approximately 10%, and thus can be used with relative safety. Still, the validation of the isozones method was verified using rainfall data from the meteorological station of Aiuaba - EC, located in the isozone G. The numbers obtained from the Aiuaba station show the good performance of the isozones methodology, what is significantly important to this study, because the studied area is also in the isozone G. Through the methodology, for each city studied, the isozones method turned the basic data of annual daily maximal precipitation, in a series of intensities, durations and return times, which were used in the formulation of their heavy rainfall IDF equations, for durations of up to 240 min. These equations make the use of the isozones method more practical, eliminating the analysis of charts and tables, and thus reducing the probability of transcription errors.

Keywords: Daily maximal precipitation, Cariri (CE) zone, return time

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Pluviômetro tipo ville de <i>paris</i> (a), pluviógrafo convencional (b) e pluviógrafo digital de báscula (c).....	18
Figura 2 - Mapa do Brasil com as isozonas indicadas por Torrico. Fonte: Modificado de SIMÕES (2000) apud CARNEIRO et al. (2002).	28
Figura 3 – Localização da área de estudo.....	34
Figura 4 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pela Equação IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Fortaleza (CE), para o período de observação de 1974 a 1996 (N = 23 anos).	50
Figura 5 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Miracema do Norte (TO), para o período de observação de 1975 a 1994 (N = 20 anos).....	50
Figura 6 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pela Equação IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Fortaleza (CE), para o período de observação de 1974 a 2007 (N = 34 anos).	51
Figura 7 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Miracema do Norte (TO), para o período de observação de 1974 a 1996 (N = 23 anos).....	51
Figura 8 – Variabilidade temporal das precipitações máximas para o município de Juazeiro do Norte.	57
Figura 9 – Variabilidade temporal das precipitações máximas para o município de Barbalha.	57
Figura 10 – Variabilidade temporal das precipitações máximas para o município de Crato. ..	58
Figura 11 – Gráfico de $X^2 = f(s)$ para o município de Juazeiro do Norte.....	64
Figura 12 - Gráfico de $X^2 = f(s)$ para o município de Barbalha	64
Figura 13 – Gráfico de $X^2 = f(s)$ para o município de Crato	65
Figura 14 - Correlação linear entre as intensidades calculadas pela equação 5.1 e as estimadas pelo Método das Isozonas.	66
Figura 15 - Correlação linear entre as intensidades calculadas pela equação 5.2 e as estimadas pelo Método das Isozonas.	66
Figura 16 - Correlação linear entre as intensidades calculadas pela equação 5.3 e as estimadas pelo Método das Isozonas.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intensidades mínimas de chuvas a serem consideradas intensas para diferentes durações.....	17
Tabela 2 – Tempo de retorno em anos, associando ao risco e vida provável da estrutura de uma obra.....	19
Tabela 3 – Tempo de retorno para diferentes ocupações de áreas	20
Tabela 4 – Fórmulas para estimativa de tempo de retorno de amostras ordenadas, para diferentes valores de α	21
Tabela 5 - Estatísticas amostrais e os correspondentes parâmetros da população	23
Tabela 6 – Correções para as isozonas de igual relação.....	29
Tabela 7 – Coeficientes de desagregação da chuva de 24 horas de duração.....	30
Tabela 8 - Coeficientes e índices calculados a partir das intensidades obtidas das Equações IDF e do Método das Isozonas, para os municípios de Fortaleza e Miracema do Norte.	52
Tabela 9 – Precipitações diárias máximas anuais, por município	55
Tabela 10– Medidas de tendência central por município.....	56
Tabela 11 – Medidas de dispersão, assimetria e curtose, por município.....	56
Tabela 12- Estatísticas do teste de aleatoriedade, por município, considerando $\alpha=5\%$	58
Tabela 13 - Estatísticas do teste de independência, por município, considerando $\alpha=5\%$	59
Tabela 14 – Parâmetros das funções de distribuição Gumbel, Log- Normal III e Gama III, por município.....	59
Tabela 15 – Parâmetros das funções de distribuição Log-Normal II e Gama II, por município.	60
Tabela 16 - Coeficientes e índices calculados a partir das frequências observadas e estimadas, por município.....	60
Tabela 17 - Precipitações diárias máximas anuais, para diferentes tempos de retorno, por município.....	62
Tabela 18 – Intensidades de chuvas máximas para durações inferiores a 240 minutos, obtidas para o município de Juazeiro do Norte, através do método das isozonas, para diferentes tempos de retorno.	62
Tabela 19 – Intensidades de chuvas máximas para durações inferiores a 240 minutos, obtidas para o município de Barbalha, através do método das isozonas, para diferentes tempos de retorno.....	63
Tabela 20 – Intensidade de chuvas intensas para durações inferiores a 240 minutos, obtidas para o município de Crato, através do método das isozonas, para diferentes tempos de retorno.	63
Tabela 21 – Parâmetros da equação de chuvas intensas por município	65

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1.	FENÔMENOS, PROCESSOS E DADOS HIDROLÓGICOS.....	15
2.2.	AS SÉRIES TEMPORAIS E O ESTUDO DE EVENTOS EXTREMOS.....	18
2.3.	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS SÉRIES AMOSTRAIS DE VALORES EXTREMOS	20
2.3.1.	MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE USUAIS NOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	22
2.3.2.	ESCOLHA DO MODELO PROBABILÍSTICO DE MELHOR AJUSTE	24
2.4.	INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DAS CHUVAS.....	24
3.	ÁREA DE ESTUDO	33
4.	METODOLOGIA	35
4.1.	TESTES NÃO PARAMÉTRICOS DE ALEATORIEDADE E INDEPENDÊNCIA DOS DADOS AMOSTRAIS	36
4.1.1.	TESTE DE ALEATORIEDADE DOS DADOS	36
4.1.2.	TESTE DE INDEPENDÊNCIA DOS DADOS	37
4.2.	AJUSTE DOS EVENTOS MÁXIMOS ANUAIS À DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA	38
4.2.1.	DISTRIBUIÇÃO LOG - NORMAL COM DOIS PARÂMETROS	39
4.2.2.	DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL COM TRÊS PARÂMETROS.....	40
4.2.3.	DISTRIBUIÇÃO GAMA COM DOIS PARÂMETROS	40
4.2.4.	DISTRIBUIÇÃO GAMA COM TRÊS PARÂMETROS.....	41
4.2.5.	DISTRIBUIÇÃO GUMBEL.....	42
4.2.6.	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DO MELHOR MODELO DE DISTRIBUIÇÃO.....	42
4.2.6.1.	TESTE DE ADERÊNCIA PELO MÉTODO DE QUI-QUADRADO	42
4.2.6.2.	MÉTODO DE KOMOLGOROV-SMIRNOV	43
4.2.6.3.	ÍNDICES ESTATÍSTICOS E GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO.....	44
4.2.6.3.1.	ÍNDICES ESTATÍSTICOS	44
4.2.6.3.2.	GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO	44
4.3.	OBTENÇÃO DE INTENSIDADE DE CHUVAS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS ISOZONAS ..	46
4.4.	FORMULAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS IDF	46
4.4.1.	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS A, B E N.....	47
4.4.2.	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS C E S.....	48
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1.	VALIDAÇÃO DO MÉTODO DAS ISOZONAS	49
5.2.	OBTENÇÃO E ANÁLISE DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS	54

5.2.1.	DADOS BÁSICOS DE PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS.....	54
5.2.2.	SELEÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS.....	54
5.2.3.	ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS.....	55
5.2.4.	TESTE DE ALEATORIEDADE E INDEPENDÊNCIA DOS VALORES DAS PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS MÁXIMAS ANUAIS	57
5.3.	AJUSTE DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS A UMA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	59
5.4.	OBTENÇÃO DE INTENSIDADES DE CHUVAS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS ISOZONAS	62
5.5.	FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS A PARTIR DOS DADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DAS ISOZONAS.....	63
6.	CONCLUSÃO	68
7.	BIBLIOGRAFIA.....	69

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos fenômenos hidrológicos é indispensável na estimativa de precipitações máximas que possam vir a ocorrer com determinada frequência em certa localidade, para o dimensionamento adequado de sarjetas, calhas, bocas de lobo, galerias, piscinões, bueiros e pontes, na elaboração de projetos de drenagem. Esta estimativa poderá ser feita através da análise das observações das chuvas intensas durante um período de tempo longo e representativo dos eventos extremos (BERTONI & TUCCI, 1993). Assim, com base nesses dados observados, formula-se um modelo que estabeleça uma relação entre intensidade, duração e frequência das chuvas intensas, a partir da probabilidade de ocorrência de determinado evento extremo máximo.

Os fenômenos hidrológicos relacionados aos eventos extremos são estudados através de modelos probabilísticos clássicos para formação das séries de valores que melhor se ajustem aos dados coletados. As distribuições de probabilidade podem ser escolhidas a partir das observações dos valores extremos empregando séries anuais ou séries parciais. Nas séries anuais, prevalece o evento máximo observado em cada ano, enquanto que nas séries parciais a ênfase é dada ao evento considerado máximo que ocorre com mais frequência. A escolha do tipo de série dependerá do tamanho da amostra disponível e do tempo de retorno de interesse para o projeto. Para tempos de retorno inferiores a 10 anos, as séries parciais fornecem resultados mais consistentes; já para tempos de retorno iguais ou superiores a 10 anos, ambas as séries fornecem praticamente os mesmos resultados WILKEN (1978). Para qualquer tipo de série utilizada, os valores das intensidades máximas são obtidos dos diagramas de chuvas registradas em pluviógrafos convencionais, cujos valores se acham grafados para cada duração observada. Em pluviógrafos eletrônicos de resolução 0,25 mm, o registro digital da precipitação acumulada, em milímetro, é feito a cada 5 minutos, podendo ser regulado para outras durações.

Apesar da importância desses dados, no Brasil, a rede de pluviógrafos existente, apesar de várias décadas de registro pluviográficos, é insuficiente em unidades instaladas que abranja muitas áreas de importância urbana, agrícola e industrial. Neste contexto, inúmeras regiões em desenvolvimento do país não dispõem de equações IDF de chuvas intensas, por falta de uma metodologia consensual para formulação dessas equações em áreas desprovidas de pluviógrafos. No Estado do Ceará, recentemente foram instalados 70 pluviógrafos digitais

tipo báscula, monitorados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), porém com registros inferiores a quatro anos de observação.

Estudos realizados por BELL (1969) e TORRICO (1974) apresentam metodologias utilizadas na determinação de chuvas de menor duração que 24 horas com base em registros pluviométricos. OLIVEIRA et al.(2008), utilizaram séries históricas diárias de chuva para alguns municípios do Estado de Goiás e, dentre outras metodologias alternativas avaliadas, mostram que o método das isozonas desenvolvido por TORRICO (1974) é o mais adequado na estimativa de intensidade, duração e frequência de chuvas intensas no Brasil a partir de dados diários obtidos de pluviômetros.

Nesse contexto, surge a seguinte questão científica relativa ao tema: pode-se desenvolver uma metodologia confiável para obtenção da equação IDF de chuvas intensas com base em registros pluviométricos? Diante do exposto, formula-se a seguinte hipótese: a partir de dados obtidos de pluviômetros e tratados pelo método das isozonas é possível desenvolver uma metodologia para obtenção da equação de chuvas intensas IDF em áreas desprovidas de pluviógrafos.

Neste método, a princípio, as precipitações máximas anuais obtidas de pluviômetros são analisadas estatisticamente para se conhecer a melhor distribuição de probabilidade que represente as mesmas. Em seguida, pode-se utilizar uma metodologia possível de ser avaliada por critérios estatísticos através de coeficientes e testes paramétricos, para obtenção de certo grau de precisão e para validação dos resultados.

Neste trabalho é desenvolvida uma metodologia para obtenção da Equação IDF de chuvas intensas em áreas desprovidas de dados pluviográficos, utilizando como experimental a área dos municípios Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato, na Região do Cariri cearense.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é aplicar o Método das Isozonas (TORRICO, 1974) na obtenção de equações IDF de chuvas intensas de áreas desprovidas de pluviógrafos.

Para isso foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Validar o Método das Isozonas a partir da comparação com intensidades de chuvas obtidas de equações IDF formuladas criteriosamente em zonas climatológicas distintas e a partir da verificação de zona, utilizando dados pluviográficos recentes;
- Obter e analisar, utilizando estatística descritiva, séries de precipitações máximas anuais;

- Fazer o teste de aleatoriedade e independência dos valores das precipitações máximas anuais;
- Ajustar as precipitações máximas anuais a uma função de distribuição de probabilidade;
- Obter as intensidades, durações e frequências das chuvas através do método das isozonas;
- Formular a equação IDF de chuvas intensas para tornar mais prática a utilização do Método das Isozonas em áreas onde se dispõe somente de séries de precipitações diárias.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fenômenos, processos e dados hidrológicos

Segundo CHOW (1959), hidrologia é a ciência que trata da água na terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente, inclusive sua relação com as formas de vida.

Nas últimas décadas, as demandas crescentes resultaram em impactos ao meio ambiente decorrentes da ocupação de bacias hidrográficas, da utilização da água para o consumo humano, agrícola e industrial e para geração de energia, dentre outras. Nesse contexto, o estudo dos fenômenos Hidrológicos torna-se vital para a humanidade no que concerne ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, ao monitoramento de mananciais, ao controle de cheias e estimativa de chuvas intensas, etc.

As variações com que os fenômenos hidrológicos ocorrem podem ser função do tempo, do espaço, ou de ambos, em escalas geográficas diversas que vão desde a global até a local, passando pela escala usual da bacia hidrográfica. A essas funções associa-se o conceito de processos hidrológicos.

Os processos hidrológicos são gerados por fenômenos físicos de extrema complexidade que, geralmente, impossibilitam uma estimativa confiável da magnitude dos mesmos com base em leis físicas que resultam em modelos extremamente complexos e de difícil controle (APARÍCIO, 1989 apud LAURA, 1997). Estes processos são naturais e não podem ser reproduzidos na escala em que ocorrem, além de serem aleatórios, razão pela qual não é possível conhecer a evolução dos mesmos, a exemplo da temperatura, vento, insolação, evaporação e vazão em determinada seção pluvial, ao longo do tempo ou do espaço (TUCCI, 2004).

Os processos associados ao ciclo das águas podem ser descritos por variáveis que quantificam suas diversas fases e suas inter-relações, e têm sua variabilidade registrada por meio das séries temporais; todavia, essa quantificação requer a coleta sistemática de dados básicos que se desenvolvem ao longo do tempo e do espaço. As respostas aos diversos problemas de hidrologia aplicada serão tão mais corretas, quanto mais longos e precisos forem os registros dos dados.

Os registros são organizados em séries e podem compreender dados climatológicos, pluviométricos, pluviográficos, evaporimétricos, sedimentométricos e de indicadores de qualidade de água, obtidos em instalações próprias, localizadas em pontos específicos de uma região, em intervalos de tempo pré-estabelecidos e com sistemática de coleta definida por padrões conhecidos. O conjunto dessas instalações, denominadas postos ou estações, constitui as redes hidrométricas e/ou hidrometeorológicas, cuja manutenção e densidade são essenciais para qualidade dos estudos hidrológicos (TUCCI, 2004).

As principais entidades produtoras de dados hidrométricos e ou hidrometeorológicos no Brasil são a Agência Nacional de Águas (ANA), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e, no Ceará, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Estas entidades disponibilizam informações diárias na internet, onde, entre outras publicações, se encontram os dados das precipitações diárias, mensais e anuais, para muitas localidades do território brasileiro.

A precipitação é toda água meteórica (líquida ou sólida), oriunda do vapor atmosférico, que cai sobre a superfície da terra, em forma de chuva, garoa, neve, orvalho ou granizo (GARCEZ, 1976). No Brasil o mais importante tipo de precipitação é a chuva, cujas ocorrências, dependendo da intensidade, podem afetar obras hidráulicas.

A duração de uma chuva é o período de tempo durante o qual ela ocorre. Já a expectativa de que certa altura de chuva cairá em um dado tempo ou número de anos corresponde à frequência; a partir deste conceito entende-se por tempo de retorno o número médio de anos que uma dada precipitação é igualada ou excedida. A intensidade é a medida da quantidade de chuva que cai em um dado intervalo de tempo ou duração. Quando esta intensidade ultrapassa um valor preestabelecido para determinado projeto ou aplicação tem-se uma chuva intensa.

Segundo GARCEZ (1976), a duração das chuvas intensas varia bastante e a área atingida pode ser de poucos quilômetros quadrados, quando ocorrem chuvas convectivas, a milhares de quilômetros quadrados, quando ocorrem chuvas frontais. Segundo WILKEN (1978), as intensidades mínimas de chuvas a serem consideradas intensas para diferentes durações estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Intensidades mínimas de chuvas a serem consideradas intensas para diferentes durações.

Duração (min)	Intensidade (mm/min)	Duração (min)	Intensidade (mm/min)
5	2,00	60	0,42
10	1,20	90	0,31
15	1,00	120	0,25
20	0,85	180	0,18
30	0,67	240	0,15
45	0,51	-	-

Fonte: WILKEN (1978)

A estimativa de precipitação máxima, ou chuva intensa, com duração e frequência têm grande importância nos projetos de drenagem, no que diz respeito ao dimensionamento de calhas, galerias, etc.

No estudo do escoamento superficial para certa intensidade de chuva igualmente distribuída sobre uma bacia hidrográfica, a vazão máxima que passa numa determinada seção corresponde ao escoamento superficial produzido por uma chuva de duração igual ao tempo de concentração. Se a duração de uma dada chuva intensa ultrapassar esse tempo, a vazão na seção mantém-se constante, após atingir o máximo (GARCEZ, 1976).

Resulta daí a necessidade de se conhecer a relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas, para o dimensionamento correto de obras hidráulicas. A estimativa destes eventos extremos se faz a partir de uma seqüência de observações para a formação das séries amostrais (aleatórias), de valores extremos. A precipitação diária máxima é obtida da leitura do pluviômetro (Figura 1a), instrumento que indica a altura precipitada em certo período; já as precipitações para as durações menores que 24 horas são lidas em diagramas gerados no pluviógrafo convencionais (Figura 1b) com valores de precipitação acumulada ao longo do tempo. Atualmente, se dispõe do pluviômetro de balança, modelo digital, indicado na Figura 1c, cujos registros de precipitações e durações, ao longo do tempo, se faz em arquivo eletrônico.

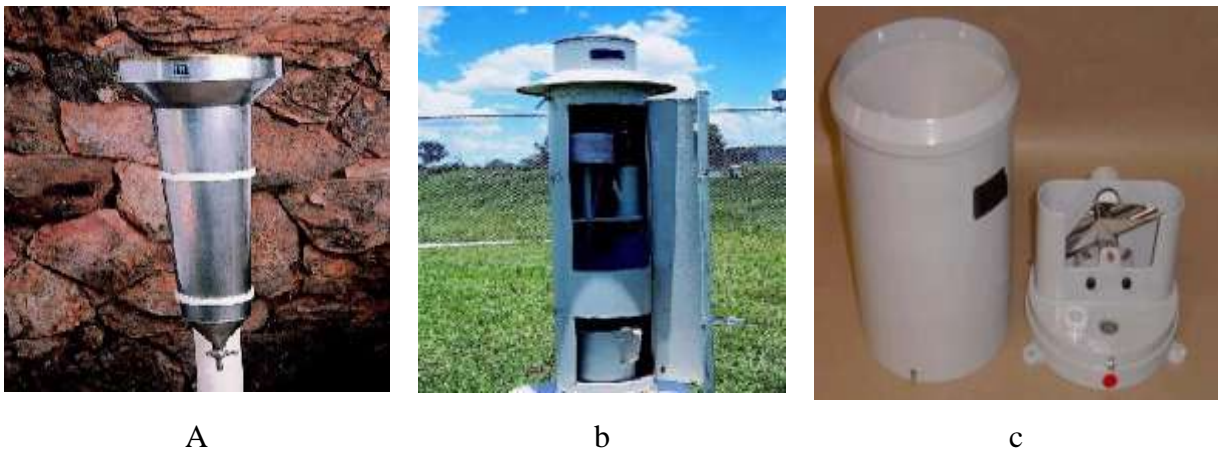


Figura 1- Pluviômetro tipo ville de *paris* (a), pluviógrafo convencional (b) e pluviógrafo digital de báscula (c)

2.2. As séries temporais e o estudo de eventos extremos.

Na análise de frequência das chuvas intensas, as séries amostrais são de três tipos: anual, parcial e completa. As séries anuais são formadas pelos maiores valores observados em cada ano, desprezando-se os demais valores, ainda que superiores aos de outros anos, assim, em n anos observados tem-se n valores. As séries parciais são constituídas pelos x_i valores, superiores ao valor limite pré-estabelecido, observados no período total de n anos, e neste caso em n anos de observações tem-se um registro com n ou mais valores. A série completa é formada por todos os valores disponíveis.

A escolha do tipo de série depende do tamanho da amostra disponível e do objetivo do estudo (BERTONI & TUCCI, 1993). A metodologia das séries parciais é utilizada quando o tamanho do registro é pequeno (menor que 12 anos) e os tempos de retorno adotados inferiores a 5 anos. As séries anuais possuem uso mais difundido que as séries parciais, pois são mais simples e de obtenção mais fácil (TUCCI, 2004).

No estudo de eventos extremos é de grande importância a adoção de tempos de retorno compatíveis com o tipo de projeto, a vida útil da obra e o risco de danos a sua infraestrutura. CHOW et al. (1988) e WILKEN (1978) definem risco como a probabilidade de acontecer um evento não desejável pelo menos uma vez em N anos, devido a danos possíveis associados a tal evento.

Em projetos de contenção de cheias, como barragens, em que acidentes ocasionam grandes prejuízos, com alto grau de risco à vida humana, é comum serem adotados tempo de

retorno de 1.000 a 10.000 anos. Nestes casos, é importante que se tenha uma longa série de dados, que permita a extrapolação dos valores, com segurança, para grandes tempos de retorno.

No caso de obras de canalização de cursos d'água de pequenas bacias de drenagem para controle de inundações, o tempo de retorno usualmente utilizado varia de 5 a 50 anos (KESSLER, 1978; WILKEN, 1978).

A escolha do tempo de retorno está associada ao risco e à vida útil provável da estrutura de uma obra. LINSLEY, KOHLER e PAULHUS (1949) *apud* AZEVEDO NETO (1998) propuseram os valores da Tabela 2 para a escolha do tempo de retorno, associando ao risco e vida provável.

Tabela 2 – Tempo de retorno em anos, associando ao risco e vida provável da estrutura de uma obra

Risco a ser assumido	Vida provável da estrutura em anos				
	1	10	25	50	100
0,01	100	910	2440	5260	9100
0,10	10	95	238	460	940
0,25	4	35	87	175	345
0,50	2	15	37	72	145
0,75	1,3	8	18	37	72
0,99	1,01	2,7	6	11	22

Fonte: AZEVEDO NETO (1998)

Em micro drenagem, cujo objetivo é escoar vazões mais frequentes, adota-se baixo tempo de retorno e intensidade, admitindo-se ocorrência de alagamentos pontuais, quando aumenta a intensidade da chuva.

Os valores usuais de tempo de retorno em obras de drenagem, de acordo com os tipos de obra e ocupação da área estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Tempo de retorno para diferentes ocupações de áreas

Tipos de Obra	Tipo de Ocupação da Área	T(anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Áreas com edifícios de serviço público	5
	Aeroportos	2-5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5-10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50-100
	Áreas de importância específica	500

Fonte: DAEE/CETESB (1980)

2.3. Análise de frequência das séries amostrais de valores extremos

Uma série amostral é constituída por um conjunto finito de valores observados ou variáveis aleatórias, extraídos de uma população infinita. Todas as amostras possíveis tiradas de uma população formam um espaço amostral e qualquer item ou subconjunto de um espaço amostral é um evento.

Nas séries amostrais de eventos extremos ou valores excedentes máximos, a frequência estimada (F) com que um dado evento seja igualado ou superado, pelo menos uma vez, pode ser obtida de modo simplificado, a exemplo do Método Califórnia. Neste método, os valores são ordenados do maior para o menor, sendo a frequência F dada pela equação 2.1

$$F = \frac{m}{n} \quad (2.1)$$

em que m é o número de ordem do evento na amostra ordenada e n é o número de itens observados.

Para as séries anuais, o tempo de retorno (T) pode ser expresso pela equação 2.2

$$T = \frac{1}{F} \quad (2.2)$$

Este método foi muito usado no dimensionamento de bueiros em rodovias do Estado da Califórnia.

Existem alguns outros estudos que mostram que esta abordagem não é a melhor opção. Uma revisão sobre esses estudos pode ser vista, por exemplo, em KITE (1977). Esse procedimento pode dar resultados satisfatórios para tempos de retorno menores, compatíveis com o número de observações; mas para chuvas mais raras, é conveniente um estudo probabilístico mais acurado, através de modelos teóricos de probabilidade para a estimativa

das frequências. Nestes modelos teóricos são possíveis a interpolação e extrapolação de valores aos dados amostrais, adequando sua aplicação para tempo de retorno relativo a qualquer evento de interesse.

CUNNANE (1978), analisando as principais fórmulas apresentadas para essas estimativas, notou que elas podem ser enquadradas em uma estrutura geral dada pela equação 2.3.

$$T = \frac{1}{F} = \frac{n-2\alpha+1}{m-\alpha}, \quad (2.3)$$

em que α é um parâmetro específico para cada distribuição da amostra testada.

A Tabela 4 apresenta os valores de α adequados a diversas distribuições.

Tabela 4 – Fórmulas para estimativa de tempo de retorno de amostras ordenadas, para diferentes valores de α

α	Fórmulas	Autor	Utilização
0	$(n + 1)/m$	Weibull	Mais comum
3/8	$(n + 0,25)/(m - 0,375)$	Blom	Normal e Log-Normal
0,44	$(n + 0,12)/(m - 0,44)$	Grigorten	Assintótica Extremos I
0,5	$(n)/(m - 0,5)$	Hazen	Gama 3 parâmetro
0,4	$(n + 0,2)/(m - 0,4)$	Cunnane	Compromisso

Fonte: TUCCI (2004)

As fórmulas apresentadas são modelos empíricos formulados com base nos dados amostrais, isto é, com aplicação específica ao tamanho e aos valores ordenados da amostra, dando resultados satisfatórios para pequenos períodos de retorno.

Segundo HOLTZ (1976) apud DAEE/CETESB (1980) o valor da frequência é igualado à probabilidade teórica, para período de retorno bem menores que o número de anos de observação da série utilizada. No caso de períodos de retorno altos, adota-se o procedimento da distribuição de frequência, estimada por uma lei de probabilidade teórica, possibilitando um cálculo mais preciso da probabilidade.

No campo da teoria das probabilidades foram desenvolvidos modelos teóricos de probabilidades para processos com determinadas características. Comparadas certas características teóricas, verificou-se que elas convergiam para diversos processos naturais, sendo possível assim um ajuste dos modelos aos valores observados em muitos fenômenos hidrológicos.

O estudo da ocorrência de eventos extremos torna possível estimar com certa segurança chuvas intensas associadas a uma dada frequência. Neste contexto, estudos foram desenvolvidos por inúmeros autores pertencentes ao campo da hidrologia denominado hidrologia estatística.

2.3.1. Modelos de distribuição de probabilidade usuais nos processos hidrológicos

Em geral, os modelos de distribuição de valores extremos mais utilizados em Hidrologia são: distribuição Gumbel, Log-Normal com dois e três parâmetros, e Gama também com dois e três parâmetros (TUCCI, 2004).

Os dados de eventos extremos apresentam um padrão peculiar de distribuição e as funções probabilísticas acumuladas possuem formas bem caracterizadas. É comum o emprego destas expressões matemáticas na forma parametrizada em relação à média, desvio padrão, variância, coeficiente de assimetria e outros parâmetros da distribuição, conforme apresentados na Tabela 5.

A utilização destas expressões matemáticas facilita a análise estatística dos eventos extremos, como por exemplo, chuvas intensas, já que a determinação da respectiva função de distribuição pode ser feita a partir de dados amostrais, com o uso de processos tradicionais, como o método dos momentos ou da máxima verossimilhança. Na obtenção das funções de distribuição pelo método dos momentos, os parâmetros são estimados igualando os momentos teóricos aos momentos amostrais; e no método da máxima verossimilhança, os parâmetros são estimados com a maximização da função de verossimilhança da função de distribuição.

Na hidrologia estatística, sempre que o tamanho da amostra de uma população infinita seja inferior a trinta, considera-se a amostra pequena. Ao crescer o tamanho da amostra, cresce também a precisão da estimativa de um parâmetro populacional a partir do análogo na amostra.

Tabela 5 - Estatísticas amostrais e os correspondentes parâmetros da população

Estatísticas amostrais	Parâmetros da população
<p>Média</p> $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ <p>Em que: n é o número de observações ou tamanho da amostra e x_i cada elemento da amostra.</p>	$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx$ <p>Em que: f(x) é a função densidade de probabilidade</p>
<p>Variância</p> $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	$\sigma^2 = E[(x - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$
<p>Desvio padrão</p> $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	$\sigma = \sqrt{E[(x - \mu)^2]} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx}$
<p>Coefficiente de Variação</p> $CV = \frac{s}{\bar{x}}$	$CV = \frac{\sigma}{\mu}$
<p>Coefficiente de assimetria</p> $C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1) \cdot (n-2) s^3}$	$\gamma = \frac{E[(x - \mu)^3]}{\sigma^3} = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx$

Fonte: LAURA (1997)

Neste contexto, devido à pequena quantidade de pluviógrafos instalados cobrindo extensas áreas, há uma grande dificuldade de obtenção dos dados de precipitação de durações inferiores a um dia. Esta dificuldade reflete na grande maioria dos estudos de chuvas intensas que apresentam séries de tamanhos inferiores ao recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia, que é de trinta anos (DAEE/CETESB, 1980).

2.3.2. Escolha do modelo probabilístico de melhor ajuste

Após a estimativa dos parâmetros, através do método dos momentos ou da máxima verossimilhança, obtêm-se vários modelos probabilísticos ajustáveis aos dados amostrais. A seleção do modelo de melhor ajuste aos dados se faz a partir de estimadores centrados no valor médio de cada distribuição testada, através dos testes de aderência.

Os testes de aderência mais utilizados são o Qui-Quadrado e o método de Komolgorov-Smirnov.

O ajuste também pode ser efetuado graficamente, com o uso de papéis de probabilidade, ou pelo método dos fatores de frequência K_T proposto por (CHOW, 1951).

Especialmente, quando se trata da Distribuição Gumbel o fator de frequência K_T^G , indicada pelo índice G, se obtém, conforme HAAN (1977), pela equação 2.4

$$K_T^G = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ \delta + \text{Ln}\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right\} \quad (2.4)$$

em que δ é a constante de Euler e T o tempo de retorno.

Quando o tamanho da amostra tende para infinito, a constante de Euler assume o valor 0,5772.

No método dos fatores de frequência, os valores K_T , referente à distribuição testada, são grafados na abscissa, e as intensidades observadas na ordenada, ambas em escala normal, para os vários tempos de retorno e dada duração. Assim, pode-se verificar entre as funções a de melhor ajuste, pelo valor do coeficiente angular e do coeficiente de determinação da reta de tendência.

Outras opções são os índices: Desvio Quadrático Médio (DQM), Desvio Quadrático Residual (DQR) e Desvio Percentual Médio Absoluto (DPMA), cujos valores são utilizados na comparação entre duas ou mais distribuições, para a escolha do modelo probabilístico mais eficiente.

2.4. Intensidade, duração e frequência das chuvas

No meio rural, o conhecimento das características das chuvas intensas é de grande importância, uma vez que a sua intensidade é fator expressivo de erosão do solo. Nas áreas urbanas, chuvas intensas provocam cheias nos sistemas de drenagem naturais e causam picos

de escoamento nas galerias pluviais, sendo seu estudo fundamental para a determinação da chuva de projeto para esses sistemas (RIGHETTO, 1998).

A intensidade máxima de uma chuva pode ser expressa por equações genéricas de intensidade, duração e frequência (IDF) que têm a forma da equação 2.5

$$i = \frac{a \cdot (Tr+s)^b}{(t+c)^n} \quad (2.5)$$

em que:

i - intensidade (mm/h ou mm/min);

Tr - tempo de retorno (anos);

t - duração da chuva (minutos);

a, b, c e n - parâmetros a serem determinados para cada local.

A determinação dos parâmetros a, b, c e n deve ser feita de forma direta e específica, através do valor da intensidade da chuva referente a cada duração obtido dos pluviogramas (diagramas de intensidade – duração traçados dos pluviógrafo) para a estação meteorológica em estudo; as séries assim geradas são ajustadas a certa distribuição teórica. Vale salientar que esses parâmetros variam entre largos limites, de local para local, e somente podem ser determinados por meio da análise estatística de uma longa série de observações.

Conforme SANTOS (2009), alguns pesquisadores têm-se dedicado à tarefa de gerar informações regionalizadas para estados que tenham estações com séries contínuas de dados. O trabalho clássico de estudo de chuvas intensas no Brasil foi publicado por PFAFSTETTER (1957). Na literatura, os mais recentes são os de PINTO *et al.* (1999) e MELLO *et al.* (2003), para o Estado de Minas Gerais; COSTA & BRITO (1999), para o Estado de Goiás e duas cidades de Tocantins; SILVA *et al.* (1999a, 1999b, 2002, 2003), para os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Tocantins; e OLIVEIRA *et al.* (2005, 2008), para o Estado de Goiás e Distrito Federal.

A dificuldade na identificação dos modelos que descrevem a equação IDF se resume na disponibilidade dos registros pluviográficos e na baixa densidade desses registros no território brasileiro, isto é, não há dados suficientes para o estudo do padrão temporal e espacial das precipitações intensas no Brasil. Além disso, a metodologia para sua obtenção exige um exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de grande quantidade de pluviogramas (CECÍLIO & PRUSKI, 2003).

Por outro lado, existe uma vasta rede pluviométrica instalada principalmente para atender ao setor de geração de energia elétrica (OLIVEIRA *et al.*, 2005). A ausência de dados

pluviográficos e a pequena quantidade de séries observadas fomentou o desenvolvimento de vários estudos que objetivaram minimizar esta dificuldade. Na literatura existem algumas metodologias utilizadas na determinação de chuvas de menor duração a partir de registros pluviométricos.

BELL (1969), utilizando dados de vários continentes, ajustou uma equação, com a qual se pode determinar a equação IDF, dispondo apenas de dados pluviométricos (equações 2.6, 2.7 e 2.8)

$$P_T^t = (0,35 \ln T_r + 0,76) \cdot (0,54 t^{0,25} - 0,5) \cdot P_2^{60}, \quad (2.6)$$

para $5 \text{ min} \leq t \leq 120 \text{ min}$ e $2 \leq T_r \leq 100 \text{ anos}$;

$$P_2^{60} = 6,69 \cdot 10^{-3} \cdot M \cdot n^{0,33}, \quad (2.7)$$

para $0 \text{ min} \leq M \leq 50,8 \text{ min}$ e $1 \leq n \leq 80$;

$$P_2^{60} = 8,27 \cdot 10^{-3} \cdot M^{0,67} \cdot n^{0,33}, \quad (2.8)$$

para $50,8 \text{ min} \leq M \leq 114,3 \text{ min}$ e $1 \leq n \leq 80$;

em que:

t - duração (min);

T_r - tempo de retorno (anos);

P_2^{60} - precipitação de 1 hora de duração para um tempo de retorno de 2 anos;

M - média das precipitações máximas anuais com durações diárias;

n - número médio de dias de precipitações máximas.

Assim, com base nas equações 2.6, 2.7 e 2.8, estima-se a relação entre intensidade, duração e tempo de retorno para localidades onde existam apenas dados de pluviômetros.

O modelo proposto por Bell tem a vantagem de ser ajustado para regiões, ponderando o valor da chuva de projeto por uma precipitação intensa padrão cujo tempo de retorno é de 2 anos e tempo de duração de 60 minutos.

Segundo BELL (1969), existe algumas variações destas relações com a geografia, mas nos dados analisados por ele, estas variações são pequenas em comparação com os erros de amostragem e outras fontes de incertezas.

Uma possível explicação física deste fenômeno poderia provavelmente ser as dimensões e propriedades comuns dos mecanismos de chuvas convectivas, responsáveis pelas altas intensidades e curta duração das chuvas em diferentes partes do mundo. No entanto, segundo TUCCI (2004), o modelo só é válido para chuvas de duração inferior a 120 minutos e tempo de retorno entre 2 e 100 anos.

As precipitações convectivas são típicas de regiões tropicais. Sua formação se dá através do aquecimento desigual da superfície terrestre, provocando o aparecimento de camadas de ar com densidades diferentes, o que gera uma estratificação térmica da atmosfera em equilíbrio instável. Se este equilíbrio, por qualquer motivo (vento, superaquecimento), for quebrado, provoca-se uma ascensão brusca e violenta do ar menos denso, capaz de atingir grandes altitudes. Essas precipitações caracterizadas pela grande intensidade e curta duração, concentram-se em pequenas áreas. Este tipo de precipitação é o causador das vazões críticas em pequenas bacias hidrográficas (VILLELA & MATTOS, 1975).

No Brasil foram desenvolvidas outras metodologias para a obtenção de chuvas de menor duração a partir de registros pluviométricos diários, empregando coeficientes multiplicativos. Dentre estas metodologias estão a das Isozonas, a da Desagregação da Chuva de 24 horas e a das Relações de Durações (TUCCI, 2004).

O método das isozonas foi criado pelo engenheiro civil José Jaime Taborga Torrico, que ao plotar, em papel de probabilidade de Hershfield e Wilson, as precipitações de 24 horas e 1 hora em diferentes estações pluviográficas do Brasil, verificou que ao prolongar as respectivas semi-retas de altura de chuva versus duração, elas tendiam a cortar o eixo das abscissas em um mesmo ponto para determinadas áreas geográficas e tais áreas foram chamadas de isozonas (TORRICO, 1974). Nesse estudo ele utilizou as mesmas estações utilizadas por PFAFSTETTER (1957).

O objetivo da pesquisa de TORRICO (1974) foi contribuir para o estudo e elaboração de projetos de drenagem de vias terrestres no Brasil. Este método teve importante papel na redução de custos de empreendimentos rodoferroviários, cuja vida útil depende das boas condições de drenagem.

No método das Isozonas, TORRICO (1974) estabeleceu no Brasil oito zonas de igual relação entre as alturas de precipitação máxima anual de uma hora e a altura de precipitação máxima anual de 24 horas, para os tempos de retorno de 5 a 30 anos, com intervalo de 5, 50, 100, 1 000 e 10 000 anos (Figura 2). Os valores médios máximos de cada uma das isozonas, para o tempo de retorno base de um ano e duração de 24 horas, são: isozona A, 37%; B, 39%; C, 41%; D, 43%; E, 45%; F, 47%; G, 49%; e H, 51%. Neste método, estes percentuais são multiplicados pelo coeficiente empírico $T^{0,014}$ de PFAFSTETTER (1957), para a obtenção de outros tempos de retorno T (Tabela 6).

A introdução do conceito de isozonas tem importância fundamental nessa metodologia. Os resultados obtidos conferem uma confiabilidade até então não encontrada

para chuvas intensas de curta duração, em locais onde não há postos pluviográficos em suas proximidades (TORRICO, 1974).

Para cada isozona, ele também apresentou as relações entre as alturas de precipitação de 6 minutos e de 24 horas, para tempos de retorno de 5 a 50 anos e para 100 anos. Na conversão da chuva de um dia em chuva de 24 horas ele propõe a multiplicação por um fator de 1,095, com um desvio padrão de $\pm 6,6\%$. Tendo-se a chuva de 24 horas e identificando-se a isozona de interesse, pelas relações apresentadas podem-se obter as alturas de chuva de 1 hora e de 6 minutos, para o tempo de retorno escolhido.

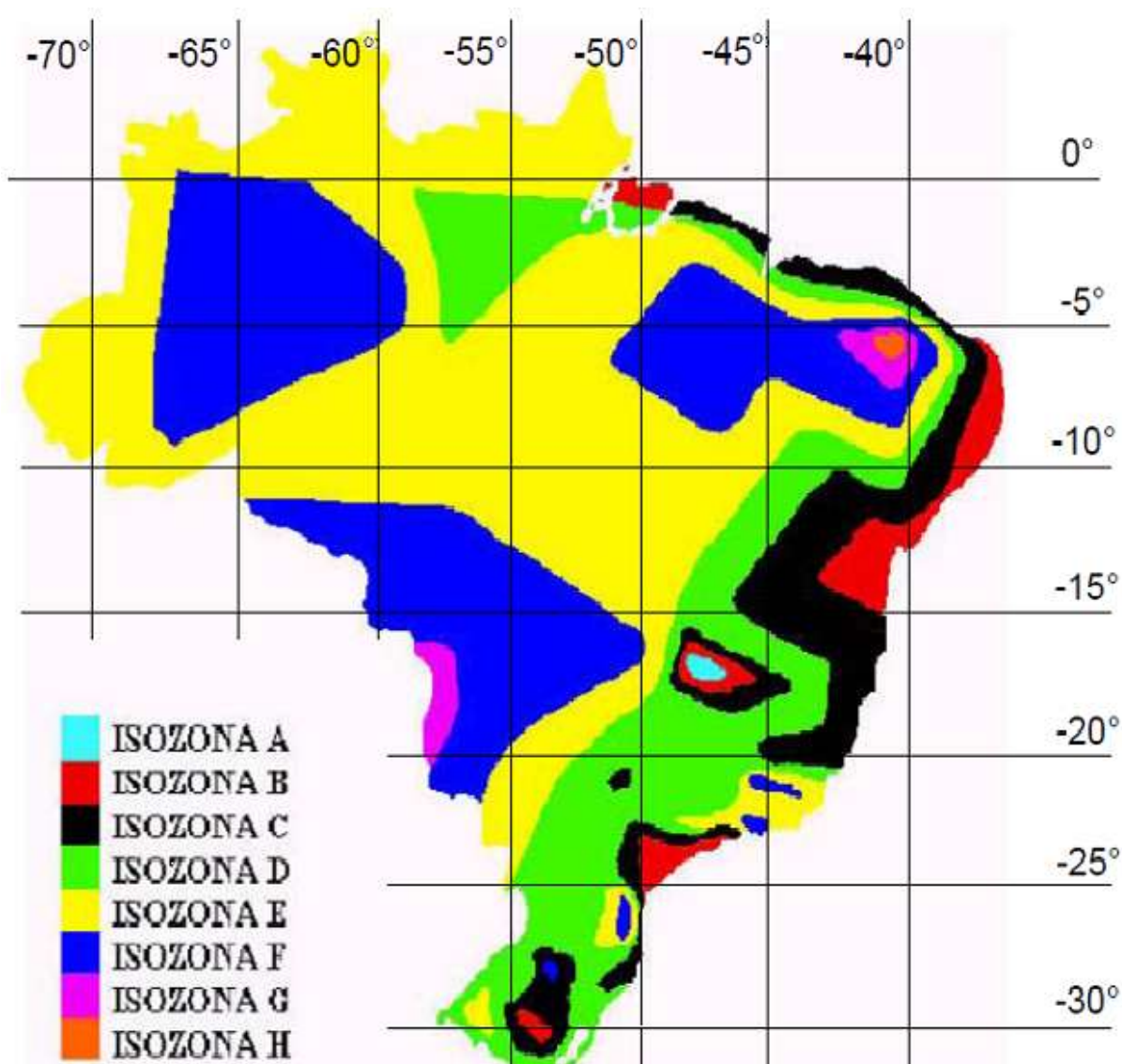


Figura 2 - Mapa do Brasil com as isozonas indicadas por Torrico. Fonte: Modificado de SIMÕES (2000) apud CARNEIRO et al. (2002).

Tabela 6 – Correções para as isozonas de igual relação

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

Fonte: TORRICO (1974).

As isozonas indicadas na Figura 2 possuem as seguintes características:

- B e C: zonas de influência marítima, com coeficientes de intensidade suaves;
- E e F: zonas continental e noroeste, com coeficientes de intensidade altos;
- D: zona de transição, entre continente e marítima, caracterizada como zona de influência do rio Amazonas;
- G e H: zonas de caatinga nordestina, com coeficientes de intensidade muito altos;
- A: zona de maior precipitação anual do Brasil, com coeficientes de intensidade baixos.

A zona da Guanabara aparece com características típicas de coeficientes de intensidade continentais (isozonas E e F).

Segundo TORRICO (1974), as relações de 1 hora/24 horas para durações entre 1 hora e 24 horas o desvio padrão é de $\pm 0,7\%$; e na relação 6 minutos/24 horas para durações de 6 e 18 minutos, os desvios padrões são de respectivamente $\pm 17,3\%$ e $\pm 9,6\%$. Assim observa-se que, entre 18 minutos e 24 horas, a aproximação é razoável para determinação de vazões de projeto; e entre 6 minutos e 18 minutos, a aproximação também parece razoável, tendo em vista que as vazões de projeto serão utilizadas para obras de arte comuns, de pequenas dimensões.

Ainda neste estudo, TORRICO (1974) concluiu que o tempo de retorno não tem influência prática no fator 1,095 de conversão da chuva de um dia em chuva de 24 horas, porque a precipitação de um dia equivale a uma duração média de 15 horas e 50 minutos para o tempo de retorno de um ano, e 16 horas e 10 minutos, para o tempo de retorno de 10.000

anos (correspondendo a aproximadamente 0,1% de influência na estimativa dessas precipitações).

Segundo GENOVEZ e ZUFFO (2000), estudos realizados por U.S. Weather Bureau e o de OCCHIPINTI e SANTOS (1966) e GENOVEZ et al. (1994) mostraram empiricamente que a proporção entre as alturas pluviométricas das chuvas máximas de um dia, registradas em pluviômetro e as de 24 horas, registrada em pluviógrafo é praticamente constante e independente do período de retorno na mesma estação. OCCHIPINTI e SANTOS (1966) obtiveram 1,14, para a cidade de São Paulo e U.S Weather Bureau obteve 1,13, para as chuvas dos Estados Unidos. Entretanto, GARCEZ (1976) observou que o fator de majoração da chuva diária para a de 24 horas, varia conforme a distribuição das intensidades no decorrer da duração da chuva.

Nesse contexto, não parece possível indicar uma regra fixa: para autores franceses, o momento de máxima intensidade se dá no início da precipitação; já para os autores americanos, esse momento se dá a 1/3 da duração (GARCEZ, 1976).

No Método da Desagregação, propostos pelo DAEE-CETESB (1980), as chuvas de 24 horas são transformadas em chuvas de menores durações pelo emprego de coeficientes de desagregação, independente do tempo de retorno (Tabela 7).

Tabela 7 – Coeficientes de desagregação da chuva de 24 horas de duração.

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

Fonte: DAEE/CETESB(1980)

O método das relações de durações, segundo BERTONI & TUCCI (1993), baseia-se em duas características observadas nas curvas das equações (IDF) de chuvas intensas, obtidas em postos localizados em diversas partes do mundo: i) existe a tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações manterem-se paralelas entre si; e ii) para diferentes locais, existe uma grande similaridade nas relações entre intensidade média máxima de diferentes durações, havendo leves variações com o tempo de retorno.

As relações entre as durações t_1 e t_2 são obtidas pela equação 2.9:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\text{precipitação de duração } t_1}{\text{precipitação de duração } t_2} \quad (2.9)$$

O método das relações entre durações tem grande aplicabilidade em locais onde existe um posto pluviográfico nas proximidades e cujas relações de durações são conhecidas. Estas relações são mantidas para locais próximos, tornando esse método muito útil no processo de regionalização de dados pluviográficos.

OLIVEIRA et al. (2008), objetivando avaliar o desempenho das metodologias de BELL (1969), das Isozonas e da Desagregação, utilizaram séries históricas diárias de chuva para alguns municípios do Estado de Goiás e dentre as metodologias alternativas avaliadas, a das Isozonas apresentou o melhor desempenho, seguido do método da Desagregação. O Método de BELL (1969) mostrou-se adequado na estimativa das precipitações máximas de curta duração, o que representa uma alternativa na determinação das chuvas críticas de projeto.

PFAFSTETTER (1957) também apresenta alternativa na obtenção das equações IDF. Ele utilizou 98 postos distribuídos geograficamente pelo Brasil, baseando-se em dados das estações do serviço de meteorologia do Ministério da Agricultura. Por se tratar de um estudo feito há muito tempo, os períodos de dados observados foram muito curtos, sendo para a maioria dos locais da ordem de 10 anos de dados pluviográficos.

Muitos dos trabalhos sobre chuvas intensas, apresentados no Brasil, foram baseados nos dados de PFAFSTETTER (1957), e, portanto, deveriam ser atualizados (GENOVEZ & ZUFFO, 2000). Assim, a importância desse trabalho deve-se ao pioneirismo no assunto e pela grande área de abrangência. Embora a maioria dos locais analisados por esse estudo possuísse série histórica curta, ele ainda continua sendo a base de dados para muitos estudos de chuvas intensas. Ele foi novamente publicado em 1982, ou seja, 25 anos após sua primeira publicação, mas sem alteração nos dados, o que evidencia a sua relevância. A rigor, esse

método só deve ser utilizado quando não se dispuser de dados mais recentes e de outros métodos mais precisos.

PFAFSTETTER (1982) define as chuvas intensas, em milímetros, pela equação empírica:

$$P_{máx} = T_r^{\alpha + \frac{\beta}{T_r^\gamma}} \cdot [at + b \cdot \log(1 + ct)] \quad (2.10)$$

em que:

$P_{máx}$ - precipitação máxima (mm);

T_r - tempo de recorrência (anos);

t - duração da precipitação (minutos);

α, β - valores que dependem da duração da precipitação;

γ, a, b, c - valores constantes para cada posto.

3. ÁREA DE ESTUDO

Os municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato situam-se na Região Metropolitana do Cariri, localizada no extremo sul do estado do Ceará, a aproximadamente 550 km de Fortaleza, composta de nove municípios e tendo Juazeiro do Norte como cidade pólo (Figura 3). Estas três cidades estão conurbadas e juntas possuem população de aproximadamente 425.000 habitantes, correspondendo a 80% da população da região metropolitana, que é o segundo maior conglomerado urbano do Estado. Nela há uma expansão urbana com forte pressão de uso e ocupação do solo e essa expansão não é acompanhada de investimento em drenagem urbana e saneamento ambiental. Futuros investimentos em drenagem urbana e outros projetos hidráulicos necessitam de estudos de chuvas intensas e a falta de pluviógrafos na área em estudo é um entrave na execução de projetos em curto prazo.

Os três municípios estão situados sobre a Bacia Sedimentar do Araripe, constituída de sistemas aquíferos de expressiva reserva hídrica subterrânea, principal fonte de água utilizada no abastecimento público e privado.

Quanto ao relevo, encontra-se a depressão sertaneja com altitude média de 450 m, bordejada pela elevação do embasamento cristalino ao norte de Juazeiro do Norte, com desnível de aproximadamente 100 m, representado na serra do Horto; e pela elevação no pacote sedimentar ao sudoeste de Barbalha e Crato, com desnível de aproximadamente 400 m, representado na Chapada do Araripe.

Nessa área, a precipitação média anual é de aproximadamente 1000 mm, comparável a faixa costeira do estado do Ceará. A principal estação chuvosa ocorre nos meses de janeiro a maio, quando precipita aproximadamente 70% das chuvas anuais (FUNCEME, 2006).

A temperatura média anual é de 26 °C e a umidade relativa média do ar são de 80% na quadra chuvosa e 50% na seca. A insolação total anual média é de 2.848 h e a evapotranspiração potencial de 1.387 mm ano⁻¹ (FUNCEME, 2006; DNPM, 1996).

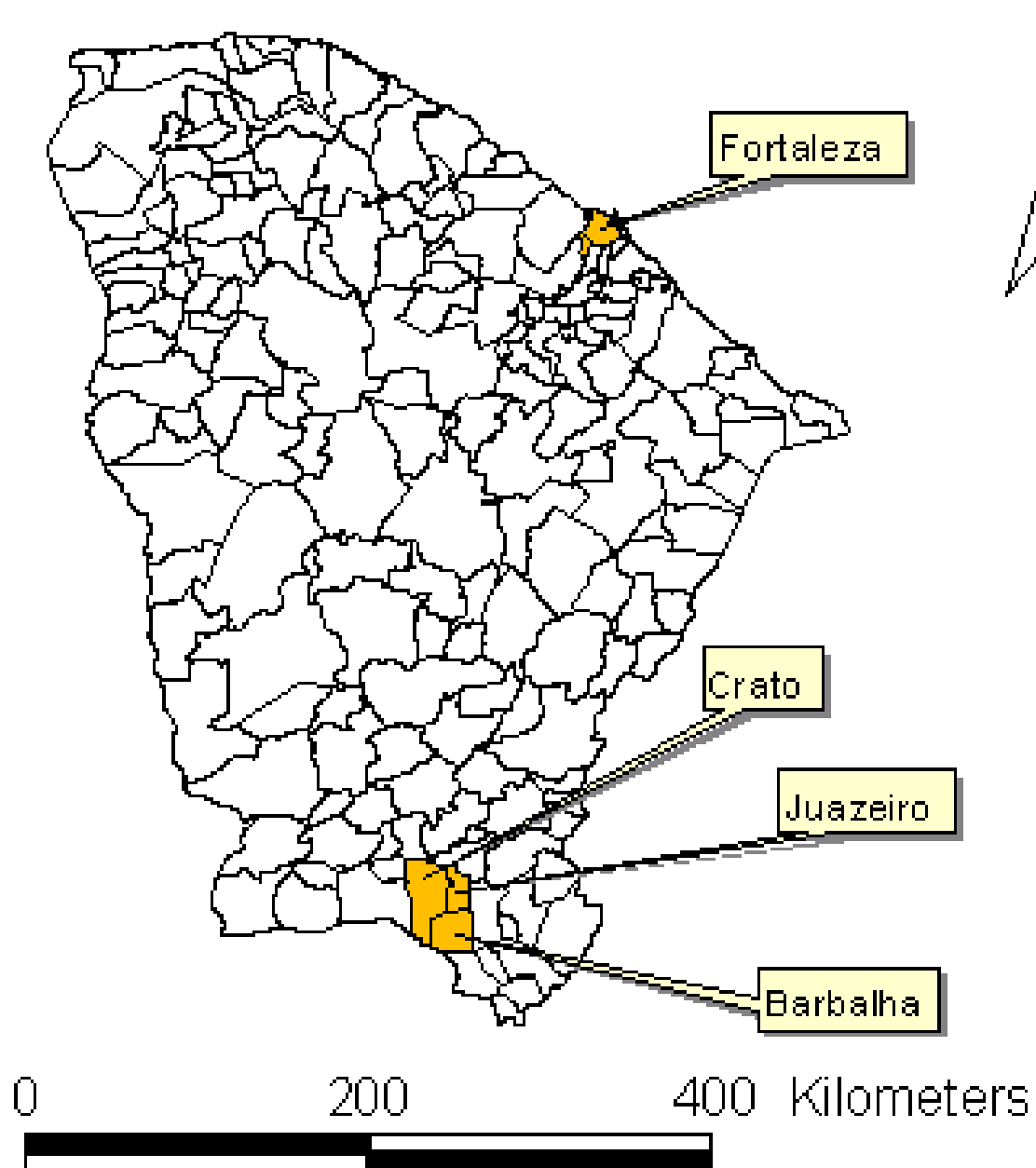


Figura 3 – Localização da área de estudo.

4. METODOLOGIA

Para o estudo das durações e freqüências das chuvas intensas são necessários dados obtidos de registros de pluviógrafos. Contudo, como em nosso País estas informações pluviográficas inexitem na grande maioria das cidades, nesta pesquisa aplicar-se-á o método das Isozonas, desenvolvido por TORRICO (1974), que utiliza apenas registros obtidos de pluviômetro para determinar valores de precipitações intensas numa bacia hidrográfica para durações menores que 24 horas.

A metodologia aplicada consiste inicialmente em selecionar um dado posto e, para cada ano, o valor da precipitação diária máxima, formando uma série de máximas anuais, cujos itens serão testados quanto à aleatoriedade e independência.

A série de máximas anuais testada será ajustada a uma ou mais distribuições de probabilidade e, para cada distribuição ajustada, serão aplicados testes de aderência para verificar a qualidade do ajuste.

A distribuição de probabilidade de melhor ajuste será utilizada para estimar, para um dado período de retorno, a chuva intensa de um dia de duração.

A chuva intensa de um dia de duração, para certo tempo de retorno, será transformada em chuva virtual de 24 horas de duração, que através das relações contidas na tabela de isozonas será fracionada em precipitações de durações de 6, 12, 24, 36, 48, 60, 90, 120, 180 e 240 minutos.

Dividindo cada precipitação pela respectiva duração, ter-se-á uma série de intensidades médias de chuva correspondentes às durações anteriormente especificadas, para certo tempo de retorno.

As séries de intensidades assim obtidas, considerando os tempos de retorno de 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 100 anos, formam uma lista de sete séries de intensidades máximas de chuva nas durações já especificadas.

Essa lista de série de intensidade máxima, duração e tempo retorno, gerada pela metodologia das isozonas, representa os dados amostrais e terão seus valores ajustados à equação 2.5, enunciada no item 2.4 (intensidade, duração e freqüências das chuvas) da revisão de literatura, através do método dos mínimos quadrados, para obtenção dos parâmetros a, b e n da equação IDF.

Antes da aplicação da metodologia utilizada neste trabalho será feita a validação do método das isozonas para dados de postos localizados nas regiões nordeste e norte, em zonas

climatológicas distintas: zona C, para o município de Fortaleza, no Ceará, e zona E, para o município de Miracema do Norte, em Tocantins.

Na validação, serão comparadas as intensidades calculadas pelas equações IDF obtidas criteriosamente por LAURA (1997) para os municípios referidos (utilizando dados de pluviógrafos), com as estimadas pelo método das isozonas (utilizando dados de pluviômetros – em CD Anexo).

A comparação será feita através da análise dos desvios entre os dados de intensidades calculados e estimados, utilizando índices estatísticos e gráficos.

Ainda na validação será feita a verificação da zona do município de Aiuaba – CE, utilizando a metodologia de TORRICO (1974) aplicada a dados pluviográficos recentes, registrados de 2003 a 2010 (estes registros pluviográficos estão em CD Anexo).

4.1. Testes não paramétricos de aleatoriedade e independência dos dados amostrais

Os fenômenos hidrológicos ocorrem de forma aleatória, sobretudo quando se trata das séries de precipitações máximas anuais, devido aos eventos de valores máximos serem observados de ano para ano. Assim, em períodos tão distintos de ocorrência, é de se esperar que precipitações máximas anuais sejam aleatórias e independentes entre si. A verificação da aleatoriedade e independência de dados amostrais pode ser feita através de testes não paramétricos.

Nessa pesquisa, os testes não paramétricos serão utilizados para ratificar a aleatoriedade e independência entre si dos dados de precipitações diárias máximas anuais.

4.1.1. Teste de aleatoriedade dos dados

Para NAGHETTINI & PINTO (2007), a aleatoriedade de uma série hidrológica não pode ser demonstrada, mas pode ser rejeitada pela presença de uma estrutura ou por alguma intervenção de natureza não aleatória. NERC (1975) sugere que a rejeição ou a não rejeição da hipótese de aleatoriedade de uma série hidrológica possa ser decidida por meio do teste não-paramétrico do número de inflexões e de pontos de máximos ou mínimos.

Por exemplo, para uma série de vazões máximas anuais, grafando no eixo x o ano de ocorrência (t) e no eixo y a vazão correspondente (Q), uma inflexão, um ponto de máximo ou de mínimo poderá ocorrer, neste diagrama. Um número excessivamente pequeno, ou excessivamente grande desses pontos é um indicador de não-aleatoriedade.

Assim, se uma amostra de N observações é aleatória, o valor esperado do número de máximos, mínimos e inflexões, denotado por p, é dado pela equação 4.1

$$E(p) = \frac{2(N-2)}{3}, \quad (4.1)$$

com variância aproximada pela equação (4.2)

$$Var(p) = \frac{16N-29}{90} \quad (4.2)$$

Para uma amostra de tamanho $N > 30$, a variável p segue aproximadamente uma distribuição Normal. Essa hipótese vem do teorema do limite central que enuncia:

- a) Se a população sob amostragem tem distribuição Normal, a distribuição das médias amostrais também será Normal para todos os tamanhos da amostra;
- b) Se a população básica é não Normal, a distribuição de médias amostrais será aproximadamente Normal para grandes amostras (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Para a hipótese nula H_0 (a amostra é aleatória), a estatística do teste não-paramétrico pode ser formulada através da equação (4.3)

$$T = \frac{p - E(p)}{\sqrt{Var(p)}} \quad (4.3)$$

Em que:

T é a estatística teste.

Para um nível de significância α , a decisão deve ser de rejeitar a hipótese nula se

$$|T| > Z_{(1-\alpha)/2},$$

em que Z é número de desvio padrão a contar da média.

4.1.2. Teste de independência dos dados

Para NAGHETTINI & PINTO, (2007) o termo “independência” significa que nenhuma observação presente na amostra pode influenciar a ocorrência, ou não ocorrência, de qualquer outra observação seguinte. Assim, mesmo que uma série seja considerada aleatória, as observações que a constituem podem não ser independentes.

A rejeição ou não- rejeição da hipótese de independência de uma série hidrológica é freqüentemente decidida por meio do teste não – paramétrico de WALD & WOLFOWITZ (1943). *apud* NAGHETTINI & PINTO (2007)

Nesse teste, para uma dada amostra (X_1, X_2, \dots, X_n) , de tamanho N, e diferenças $(X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ entre as observações X_i e a média amostral \bar{x} , tem-se a equação 4.4.

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i \cdot X'_{i+1} + X'_1 \cdot X'_N \quad (4.4)$$

Considerando a hipótese de que as observações são independentes a estatística R segue uma distribuição normal de média igual a

$$E(R) = \frac{-s_2}{N-1} \quad (4.5)$$

e variância

$$Var(R) = \frac{s_2^2 - s_4}{N-1} + \frac{s_2^2 - 2s_4}{(N-1)(N-2)} - \frac{s_2^2}{(N-1)^2} \quad (4.6)$$

Na equação 4.6, o índice subscrito de S (S_r , com $r=2$ e 4) denota a ordem dos momentos amostrais em relação à origem.

$$\text{Assim, } S_r = N \cdot M_r, \quad (4.7)$$

$$\text{em que: } M_r = \left(\sum_{i=1}^N X_i^r \right) \cdot \frac{1}{N} \quad (4.8)$$

Para a hipótese nula H_0 (elementos da amostra independentes), a estatística do teste não-paramétrico pode ser formulada como:

$$T = \frac{R - E(R)}{\sqrt{Var(R)}} \quad (4.9)$$

que segue uma distribuição normal padrão.

Assim, por ser um teste bilateral, para um nível de significância α , a decisão deve ser de rejeitar a hipótese nula se

$$|T| > Z_{(1-\alpha)/2}.$$

4.2. Ajuste dos eventos máximos anuais à distribuição de frequência

A análise de frequência objetiva a escolha de uma determinada função teórica que melhor se ajusta aos dados amostrais das precipitações diárias máximas anuais. Assim, uma dada série amostral de N itens é submetida a critérios estatísticos para identificação do modelo probabilístico de melhor concordância.

Os modelos de distribuição de eventos extremos máximos comumente testados são: Log-Normal e Gama com dois e três parâmetros e Gumbel.

A distribuição Gumbel, conhecida por distribuição de valores extremos do Tipo I, também recebe outras denominações: Fisher, Tippet Tipo I e Dupla Exponencial. A distribuição Gumbel é a distribuição extremal mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações na determinação de relações intensidade-duração-freqüência de precipitações intensas e estudo de vazões de enchentes (TUCCI, 2004).

Não obstante, o modelo de distribuição de frequência a ser escolhido para representar os dados de precipitações máximas anuais, aqui analisados, será a função de distribuição que atenda ao maior número de testes e de índices, apresentados no item 4.2.6.

4.2.1. Distribuição Log - Normal com dois parâmetros

A função densidade de probabilidade $f(x)$ da distribuição Log-Normal com dois parâmetros de variável aleatória x contínua é dada por

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right); \quad x > 0 \quad (4.10)$$

em que:

$y = \ln x$;

μ_y – média de y ;

σ_y - desvio padrão de y .

Obtem-se os parâmetros μ_y e σ_y pelo método dos momentos

$$\mu_y = \ln\left(\frac{\sigma}{\eta}\right) - 0,5 \cdot \ln(\eta^2 + 1) \quad (4.11)$$

e

$$\sigma_y^2 = \ln\left(\frac{\mu^2 + \sigma^2}{\mu^2}\right). \quad (4.12)$$

Sendo μ e σ a média e o desvio padrão da variável x , e η o coeficiente de variação dado por

$$\eta = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4.13)$$

Assim, a função de distribuição acumulada é dada por

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) dx \quad (4.14)$$

ou

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = P(X \leq x) \quad (4.15)$$

4.2.2. Distribuição Log-Normal com três parâmetros

Esta distribuição diferencia da Log – Normal a dois parâmetros pela introdução de um parâmetro de posição x_0 , tal que $y = \ln (x- x_0)$.

Neste caso a função densidade de probabilidade é dada por

$$f(x) = \frac{1}{(x-x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{2\sigma_y}\right) ; \quad (x - x_0) > 0 \quad (4.16)$$

e a função de distribuição acumulada por

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{(x-x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{2\sigma_y}\right) dx \quad (4.17)$$

ou

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = P(X \leq x) \quad (4.18)$$

4.2.3. Distribuição Gama com dois parâmetros

A função densidade de probabilidade da variável aleatória x contínua é dada por

$$f(x) = \frac{\beta^{-\nu} x^{\nu-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(\nu)} , \quad x \geq 0 \quad (4.19)$$

em que:

β – parâmetro de forma;

ν – parâmetro de escala;

e – base do logaritmo neperiano;

$\Gamma(\nu)$ – função Gama, definida por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{\nu-1} e^{-x} dx. \quad (4.20)$$

Os parâmetros β e ν podem ser obtidos pelo método dos momentos:

$$E(x) = \nu \cdot \beta; \quad (4.21)$$

$$VAR(x) = \nu \cdot \beta^2; \quad (4.22)$$

e

$$A(x) = \frac{2}{\sqrt{\nu}} \quad (4.23)$$

em que:

$E(x)$ – valor esperado da variável x ;

$VAR(x)$ – variância de x ;

$A(x)$ – coeficiente de assimetria.

Ou então podem ser obtidos em função das estimativas amostrais, média (μ) e desvio padrão(s):

$$\beta = \frac{s^2}{\mu} \quad (4.24)$$

e

$$v = \frac{\mu^2}{s^2} \quad (4.25)$$

A função de distribuição acumulada Gama II-P é dada por

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \int_0^x \frac{\beta^{-v} x^{v-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(v)} dx, \quad x \geq 0 \quad (4.26)$$

ou

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = P(X \leq x). \quad (4.27)$$

4.2.4. Distribuição Gama com três parâmetros

Esta distribuição diferencia da Gama II-P pela introdução de um parâmetro de locação δ .

Neste caso, a função densidade de probabilidade da variável aleatória x contínua é dada por:

$$f(x) = \frac{\beta^{-v} (x-\delta)^{v-1} e^{-(x-\delta)/\beta}}{\Gamma(v)}, \quad x \geq \delta \quad (4.28)$$

Os parâmetros β , v e δ podem ser obtidos pelo método dos Momentos:

$$E(x) = \delta + v\beta, \quad (4.29)$$

em que:

$$v = \frac{4}{A_s^2}; \quad (4.30)$$

$$\beta = \frac{sA_s}{2}; \quad (4.31)$$

e

$$\delta = \mu - \frac{2s}{A_s}. \quad (4.32)$$

A função de distribuição acumulada é dada por

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \int_0^x \frac{\beta^{-v} x^{v-1} e^{-(x-\delta)/\beta}}{\Gamma(v)} dx, \quad x \geq 0 \quad (4.33)$$

ou

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = P(X \leq x). \quad (4.34)$$

4.2.5. Distribuição Gumbel

A função densidade de probabilidade da variável aleatória x contínua é dada por

$$f(x) = \alpha \exp\{-\alpha(x - \beta) - \exp[-\alpha(x - \beta)]\}, \quad (4.35)$$

para: $-\infty < x < \infty$; $-\infty < \beta < \infty$; e $\alpha > 0$,

em que, α é o parâmetro de escala e β o parâmetro de posição.

Os parâmetros α e β podem ser obtidos pelo método dos momentos:

$$E(x) = \beta + \frac{0,577}{\alpha} \quad (4.36)$$

e

$$VAR(x) = \frac{1,645}{\alpha^2}. \quad (4.37)$$

Os parâmetros α e β também podem ser dados em função das estimativas amostrais, média (μ) e desvio padrão(s):

$$\beta = \mu - 0,451.s \quad (4.38)$$

e

$$\alpha = \frac{1,2826}{s}. \quad (4.39)$$

A função de distribuição acumulada é dada por

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \exp[-\exp(-\alpha(x - \beta))] \quad (4.40)$$

4.2.6. Critérios de seleção do melhor modelo de distribuição

A decisão de qual modelo de distribuição de frequência irá representar os dados de precipitações máximas anuais terá como critério a análise de testes de aderência e de índices estatísticos e gráficos, sem ponderação. Neste caso, será escolhido modelo que atenda ao maior número de testes e de índices.

4.2.6.1. Teste de aderência pelo método de Qui-Quadrado

O teste de aderência pelo método de Qui-Quadrado (X^2) é baseado nas seguintes hipóteses:

H_0 : Os valores observados e estimados têm a mesma distribuição;

H₁: Os valores observados e estimados não são de uma mesma população.

A estatística teste é obtida a partir da expressão:

$$X_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(Fo_i - Fe_i)^2}{Fe_i}, \quad (4.41)$$

em que:

Fo_i – Freqüência observada;

Fe_i – Freqüência estimada.

Neste método, o X^2 calculado é comparado com o teórico. Na tabela de valores críticos do X^2 constam os valores teóricos de $X^2_{v(1-\alpha)}$, para um nível de significância α e grau de liberdade dado por

$$v = k-1-m, \quad (4.42)$$

em que:

k - n° de intervalos da classe da distribuição de freqüência;

m - n° de estatísticas utilizadas na determinação dos parâmetros ou freqüências teóricas.

Neste método, se $X^2_{v(1-\alpha)} > X^2$ aceita-se a hipótese H₀.

4.2.6.2. Método de Komolgorov-Smirnov

O Método de Komolgorov-Smirnov K-S consiste na seguinte hipótese: se duas amostra são de uma mesma população, então as distribuições de probabilidade acumuladas das mesmas devem estar muito próximas. Assim, um grande desvio pode indicar uma rejeição da hipótese H₀ (de serem da mesma população).

O Método K-S é baseado nos desvios da função de distribuição da amostra de eventos P(x) em relação à função de distribuição contínua testada P₀(x), ou seja,

$$D_n = \max |P(x) - P_0(x)|, \quad (4.43)$$

se o valor da distribuição contínua encontrado for inferior ao valor da distribuição de freqüência da amostra de eventos para um determinado nível de significância. Nesse caso, se o valor de D_n for maior que o valor crítico tabelado D_T, rejeita-se H₀.

O valor crítico tabelado é função do nível de significância α e do tamanho da amostra N.

Por exemplo, para N>35 e $\alpha=5$, o D_T pode ser calculado pela equação 4.44

$$D_T = \frac{1,36}{\sqrt{N}} \quad (4.44)$$

4.2.6.3. Índices estatísticos e gráficos de comparação

Serão utilizados índices estatísticos e gráficos de comparação para a estimativa dos desvios entre as frequências de cada distribuição teórica testada e as frequências amostrais.

4.2.6.3.1. Índices estatísticos

Índices estatísticos a serem utilizados: Desvio Quadrático Médio (DQM) (equação 4.45), Desvio Quadrático Residual (DQR) (equação 4.46) e Desvio Percentual Médio Absoluto (DPMA) (equação 4.47).

Esses índices indicam as discrepâncias das frequências estimadas e as frequências observadas, sinalizando qual a distribuição teórica é mais eficiente.

$$DQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_{o_i} - x_{c_i}}{x_{c_i}} \right)^2} \quad (4.45)$$

$$DQR = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{o_i} - x_{c_i})^2} \quad (4.46)$$

$$DPMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_{o_i} - x_{c_i}|}{x_{o_i}} \quad (4.47)$$

Em que:

x_{o_i} - I-ésima precipitação observada;

x_{c_i} - I-ésima precipitação calculada;

N - tamanho da amostra.

4.2.6.3.2. Gráficos de comparação

A partir da amostra ordenada, do valor mais raro para o menos raro, o tempo de retorno T_r pode ser estimado através do Método Califórnia ou através da metodologia proposta por CUNNANE (1978). Pelo Método Califórnia tem-se

$$Tr = \frac{m}{N}, \quad (4.48)$$

em que:

N – tamanho da amostra;

m - colocação do valor na amostra ordenada.

Através da metodologia de CUNNANE (1978) tem-se

$$Tr = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{N-2\alpha+1}{i-\alpha}, \quad (4.49)$$

em que:

N – tamanho da amostra;

i – colocação do valor na amostra ordenada;

α – parâmetro específico da distribuição.

Os valores de α específicos para cada distribuição são 0,375 para a distribuição Log-Normal; 0,440 para a distribuição Gumbel; e 0,500 para a distribuição Gama.

A comparação gráfica consiste em correlacionar linearmente as frequências observadas dadas pela equação 4.49, com o valor de α atribuído conforme a distribuição teórica testada, e as frequências calculadas correspondentes da distribuição teórica.

Através da reta de tendência passando pela origem dos eixos, verifica-se o grau de aderência por meio do coeficiente de determinação R^2 e da inclinação da reta de tendência ou coeficiente angular.

Nesse caso, a distribuição teórica testada cujos valores obtidos de R^2 e do coeficiente angular da reta de tendência se aproximarem mais da unidade, corresponderá à melhor aderência da distribuição teórica à série amostral.

4.3. Obtenção de intensidade de chuvas através do método das isozonas

O método das Isozonas se baseia no estabelecimento de zonas climatológicas geográficas caracterizadas por valores praticamente invariáveis da relação entre as alturas de chuva de 1 hora e 24 horas para um dado período de retorno. Assim, conhecendo-se as chuvas máximas diárias anuais de um dado posto de coleta, é possível determinar intensidades para durações inferiores a 24 horas.

Essa chuva intensa de um dia de duração é então transformada em uma chuva virtual de 24 horas de duração através da equação 4.50.

$$P_{24\text{horas}} = 1,096 P_{\text{intensidade de 1 dia}} \quad (4.50)$$

Em seguida, é feita a localização da isozona do posto estudado. Essa determinação é possível utilizando um Sistema de Informação Geográfica – SIG, onde faz-se a intersecção do mapa das isozonas do Brasil com o mapa da região em estudo devidamente georreferenciado.

Após constatação da isozona, obtém-se da tabela de isozonas os valores das relações entre a chuva de 24 horas, para um dado período de retorno, e as chuvas de 1 hora e 6 minutos (Tabela 6) do item 2.4 da Revisão de Literatura.

Para calcular a chuva intensa de 1 hora e 6 minutos de duração, multiplica-se a chuva virtual de 24 horas de duração pelas respectivas relações obtidas da tabela de isozonas.

A partir desses resultados, plota-se gráficos correlacionando linearmente cada duração, em escala logarítmica, com suas respectivas chuvas intensa, em escala aritmética, e através da equação de correlação linear desses gráficos obtém as chuvas intensas de durações intermediárias relativas a cada tempo de retorno.

4.4. Formulação da Equação de Chuvas Intensas IDF

A equação de chuvas intensas IDF relaciona a intensidade (I), a duração (t) e a frequência (F), sendo representada geralmente através da equação 2.5 citada no item 2.4 (intensidade, duração e frequência das chuvas) da revisão de literatura.

Também existem outras equações usuais e que são variações da equação 2.5 de chuvas intensas

$$I = \frac{aTr^b}{(t+c)^n} \quad (4.51)$$

$$I = \frac{a+b \cdot \log Tr}{(t+c)^n} \quad (4.52)$$

em que:

I – intensidade (mm/min);

Tr - tempo de retorno (anos);

t – duração da chuva (min);

a, b, c e n – parâmetros a serem determinados para cada local.

Seguem alguns exemplos de equações de chuvas intensas para algumas capitais brasileiras:

- Para São Paulo $I = \frac{3\,462,7 \cdot Tr^{0,172}}{(t+22)^{1,025}}$, equação elaborada por Paulo S. Wilken (AZEVEDO NETO, 1998);

- Para Curitiba $I = \frac{1239 \cdot Tr^{0,15}}{(t+20)^{0,74}}$, equação elaborada por Ulisses Alcântara (AZEVEDO NETO, 1998);

- Para Fortaleza $I = \frac{36,16 \cdot (Tr-1)^{0,154}}{(t+26,94)^{0,864}}$, para $5\text{min} \leq t \leq 240$ (LAURA, 1997);

- Para Miracema do Norte em Tocantins $I = \frac{28,99 \cdot (Tr-1)^{0,101}}{(t+17)^{0,796}}$, para $t \leq 45$ min e

$I = \frac{16,66 \cdot (Tr-1)^{0,134}}{t^{0,737}}$, para $t > 45$ min (LAURA, 1997).

4.4.1. Determinação dos parâmetros a, b e n.

Os parâmetros a, b e n da equação 2.5 serão determinados pela análise de regressão linear múltipla, através do método dos Mínimos Quadrados. Aplicando logaritmo na equação 2.5 tem-se:

$$\ln(I) = \ln(a) + b \cdot \ln(Tr + s) - n \cdot \ln(t + C) \quad (4.53)$$

O método dos mínimos quadrados aplicado à equação 2.5 leva a um sistema de três equações (equações 4.54, 4.55 e 4.56) e três incógnitas, que são os parâmetros a, b e n.

$$\sum \ln(i) = N \cdot \ln(a) + b \cdot \sum \ln(Tr + s) + n \cdot \sum \ln(t + C) \quad (4.54)$$

$$\sum (\ln(Tr + s) \cdot \ln(i)) = \ln(a) \cdot \sum \ln(Tr + s) + \ln(a) \cdot \sum (\ln(Tr + s))^2 + n \cdot \sum (\ln(Tr + s) \cdot \ln(t + C)) \quad (4.55)$$

$$\sum (\ln(t + C) \cdot \ln(i)) = \ln(a) \cdot \sum \ln(t + C) + b \cdot \sum (\ln(Tr + s) \cdot \ln(t + C)) + n \cdot \sum (\ln(t + C))^2 \quad (4.56)$$

4.4.2. Determinação dos parâmetros c e s

A estimativa do valor de c será feita pelo método proposto por WILKEN (1975) *apud* LAURA (1997). De acordo com esse método, na série cujo período de retorno é de cinco anos, locam-se três pares de valores de intensidade e tempo de duração: (I₁; t₁), (I₂; t₂) e (I₃; t₃), em que

i₁ é a intensidade para uma duração t₁ de 5 minutos;

i₂ é a intensidade para uma duração t₂ de 240 minutos;

i₃ é a duração para uma intensidade i₃ dada por $i_3 = \sqrt{i_1 \cdot i_2}$.

O valor de c será dado pela equação 4.57

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2 - 2 \cdot t_3} \quad (4.57)$$

O parâmetro s será obtido por um processo gráfico - analítico, visando minimizar o valor do qui-quadrado (X²) através de uma função do tipo polinomial X²=f(s) referente a linha de tendência dos pontos (s; X²).

Assim, o X² irá comparar as séries de valores da intensidades (I) geradas pela Equação 2.5 para cada conjunto de parâmetros a, b, n e c, em função de s, com os respectivos valores originais invariáveis das séries de intensidades. Assim, para cada (s) ter-se-á um X². O valor de s que minimizará X², otimizará a equação 2.5 de chuvas intensas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Validação do Método das Isozonas

As Equações IDF para os municípios de Fortaleza e Miracema do Norte, utilizadas na validação do método das isozonas, estão descritas no item 3.4 (Formulação da equação de chuvas intensas) da Metodologia.

Para a formulação da Equação do município de Fortaleza, LAURA (1997) utilizou o período de observação de 1974 a 1996 (registro de 23 anos), com os dados de intensidade obtidos de um pluviógrafo do posto da FUNCEME, localizado nas coordenadas geográficas de latitude 3°49'S e longitude 38°32'W. Um dos postos deste município foi utilizado por TORRICO (1974) na formulação do método das Isozonas.

Para as Equações de Miracema do Norte, LAURA (1997) utilizou o período de observação de 1975 a 1994 (registro de 20 anos), com os dados de intensidade obtidos de um pluviógrafo instalado no atual posto, Miracema do Tocantins, código 948000, da Agência Nacional de Águas, localizado nas coordenadas geográficas de latitude 9°33'S e longitude 48°23'W. Nenhum posto deste município foi utilizado por TORRICO (1974) na formulação do método das Isozonas.

Neste estudo, os valores de intensidade, duração e tempo de retorno para Fortaleza e Miracema do Norte, foram calculados através das respectivas Equações IDF, para durações de até 240 minutos.

Em seguida, para cada posto, utilizou-se o Método das Isozonas para estimar as intensidades e durações a partir dos dados pluviométricos.

Para os mesmos períodos de observações de LAURA (1974), as Figuras 4 e 5 apresentam as correlações lineares entre as intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para os municípios de Fortaleza e Miracema do Norte.

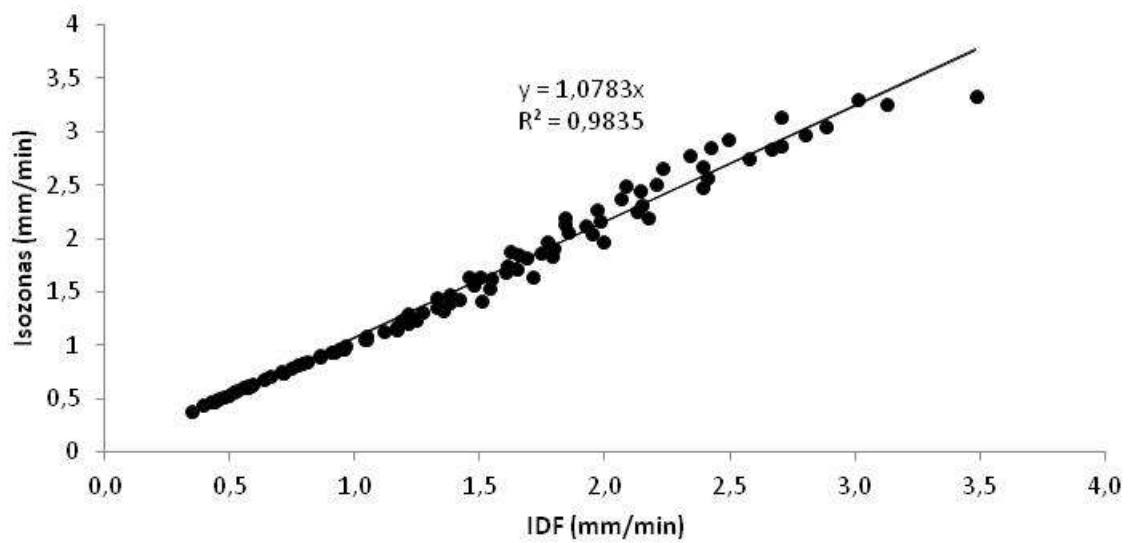


Figura 4 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pela Equação IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Fortaleza (CE), para o período de observação de 1974 a 1996 (N = 23 anos).

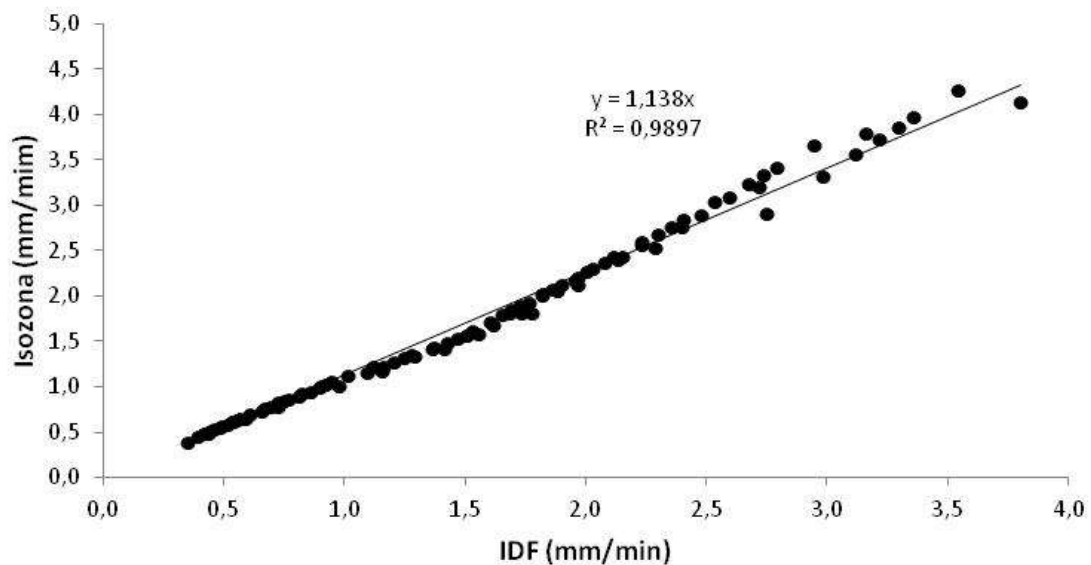


Figura 5 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Miracema do Norte (TO), para o período de observação de 1975 a 1994 (N = 20 anos).

Para períodos de observações diferentes dos utilizados por LAURA (1974), utilizou-se para os municípios de Fortaleza e Miracema do Norte as séries anuais de respectivamente 1974 a 2007 e 1974 a 1996. As Figuras 6 e 7 apresentam as correlações lineares entre as

intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas.

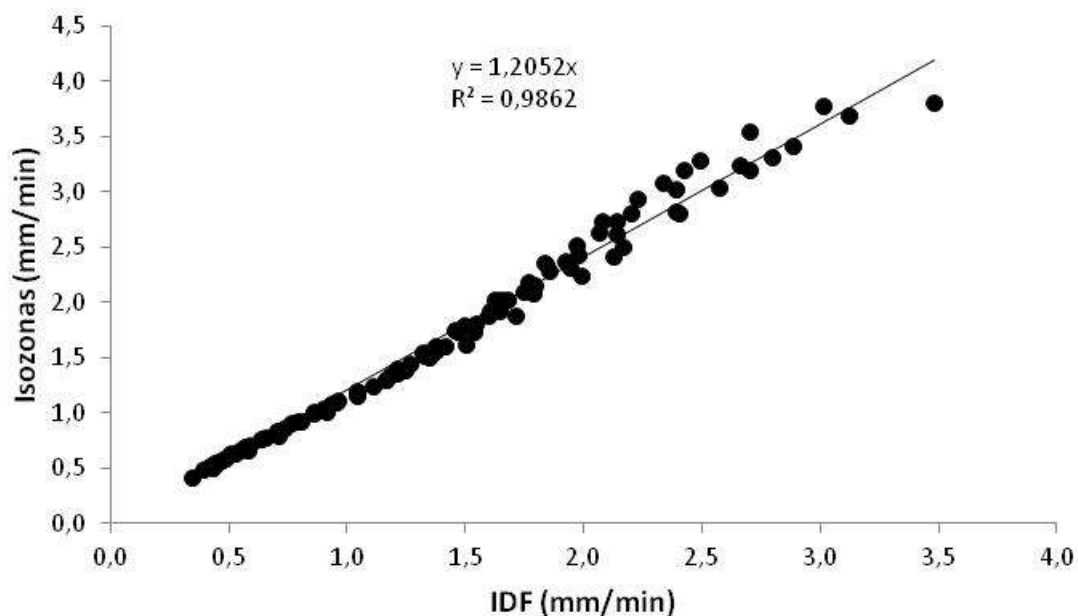


Figura 6 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pela Equação IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Fortaleza (CE), para o período de observação de 1974 a 2007 (N = 34 anos).

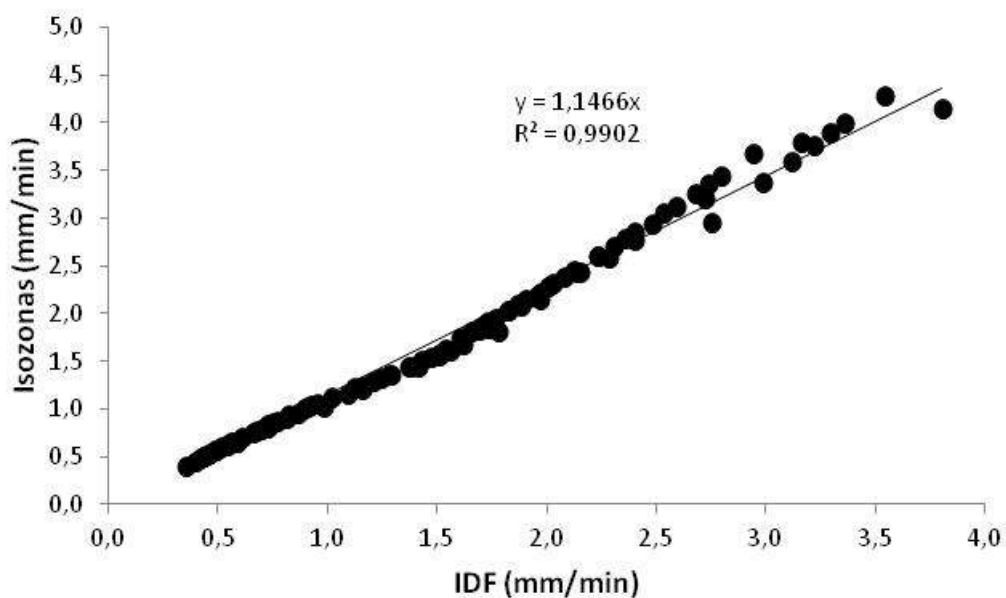


Figura 7 – Correlação linear entre as intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, para o município de Miracema do Norte (TO), para o período de observação de 1974 a 1996 (N = 23 anos).

Os coeficientes e índices calculados a partir das intensidades obtidas das Equações IDF e do Método das Isozonas, para os municípios de Fortaleza e Miracema do Norte, estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes e índices calculados a partir das intensidades obtidas das Equações IDF e do Método das Isozonas, para os municípios de Fortaleza e Miracema do Norte.

Municípios/ N	a	R ²	DQM	DPMA
Fortaleza				
23 anos	1,078	0,983	0,090	7,430
34 anos	1,205	0,986	0,199	19,060
Miracema do Norte				
20 anos	1,138	0,989	0,128	11,770
23 anos	1,146	0,990	0,137	12,700

a e R²: coeficiente angular e de determinação das retas de correlação; DQM: desvio quadrático médio; DPMA: desvio percentual médio absoluto; e N número de registro.

As Figuras 4 e 5 e a Tabela 8 mostram os valores dos coeficientes de correlação linear entre as intensidades calculadas pelas Equações IDF e as intensidades estimadas pelo Método das Isozonas, considerando os mesmos períodos de observações de LAURA (1997), para os municípios de Fortaleza (N = 23 anos) e Miracema do Norte (N=20 anos), de respectivamente 98,3 e 98,9%, mostrando um bom ajuste entre os dois métodos confrontados. Os coeficientes angulares ligeiramente superiores à unidade para os dois ajustes indicam que valores obtidos pelo Método das Isozonas são superestimados em aproximadamente 10%. Estes resultados associados aos índices DQM e DPMA indicam que o Método das Isozonas pode ser utilizado com certa segurança, validando sua aplicabilidade para estimativa de chuvas intensas para durações inferiores a 240 minutos para os municípios analisados.

De acordo com as Figuras 6 e 7 e a Tabela 8, considerando os períodos de observações diferentes dos adotados por LAURA (1997) (N = 34 anos para Fortaleza e N = 23 anos para Miracema do Norte), observa-se que os coeficientes a e R² e os índices DQM e DPMA, são mais discrepantes, pois, em séries amostrais distintas as médias e variâncias são diferentes, afetando os parâmetros da função de distribuição de probabilidade e conseqüentemente os tempos de retorno.

Na validação do método quanto à localização da isozona G, analisou-se os dados pluviográficos da estação pluviométrica (EP1) da Bacia Experimental de Aiuaba-BEA, monitorada pelo Grupo de Pesquisas Hidrosedimentológicas do Semiárido (www.hidrosed.ufc.br) instalada no âmbito do Projeto FINEP/IBESA, nas coordenadas geográficas de latitude 06°42'17" S e longitude 40°17'17"W. Estes dados foram utilizados parcialmente por ARAÚJO et al.(2009) e MEDEIROS et al.(2009). Nesta etapa utilizou-se oito anos de registros pluviográficos (de 2003 a 2010). Salienta-se que, na calibragem do Método das Isozonas, TORRICO (1974) utilizou séries a partir de 10 anos de registros.

Inicialmente, com base nos registros das precipitações diárias máximas anuais, obteve-se, através da distribuição Gumbel, para um tempo de retorno um ano, uma precipitação média máxima de aproximadamente 37 mm. Em seguida, selecionaram-se as precipitações diárias com alturas próximas a 37 mm, e, a partir dos registros pluviográficos, obtiveram-se as precipitações de 1 hora e de 6 minutos de duração. Como esse pluviógrafo digital de balança foi programado para registrar a cada 5 minutos, as precipitações de 6 minutos foram obtidas por extrapolação.

As precipitações diárias próximas a 37 mm foram registradas em dois eventos dos anos de 2004 (27 de janeiro e 28 de fevereiro), 2006 (23 de março e 31 de dezembro) e 2007 (18 e 20 de fevereiro) e um evento do ano de 2009 (01 de março).

Os resultados mostraram que o valor esperado da relação 1 h/ 24 h, para o tempo de retorno base de um ano foi de 48,9%. Este valor corresponde a zona G de 49% proposta por TORRICO (1974). De acordo com o mapa de isozonas da Figura 2, as coordenadas geográficas da estação de Aiuaba confirmam que a mesma está localizada na isozona G. Para a relação 6 minutos/ 24 h, o valor esperado foi de aproximadamente 14,1%, subestimado em aproximadamente 9,1% em relação ao valor estabelecido por TORRICO (1974) para a isozona G que foi de 15,4%.

Os números obtidos da estação de Aiuaba mostram o bom desempenho da metodologia das isozonas e têm importância significativa para este trabalho, pois respaldam os valores de intensidades / durações obtidos da isozona G, onde estão também localizados os postos pluviométricos de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato.

O Método das Isozonas também foi validado para a região amazônica brasileira. Esta validação foi feita por VENDRAME & PONTES (2002), utilizando dados de estações pluviométricas instaladas em Manaus – AM, Barra do Corda – MA, Alto Tapajós - PA e Boa Vista – RO, as duas primeiras localizadas na isozona F e as demais na isozona E. As estações

de Manaus e Boa Vista eram as mais recentes (com respectivamente 16 e 11 anos de observação) e não tinham sido utilizadas no estudo de TORRICO (1974), ao contrário das estações de Barra do Corda e Alto Tapajós que eram as mais antigas. Neste trabalho, a partir dos pluviogramas de cada estação, eles calcularam o valor da relação de 1 hora/24 horas e compararam com o valor estabelecido por TORRICO (1974) para cada isozona. Para a estação de Manaus, os resultados mostraram que o Método das Isozonas subestima os valores em aproximadamente 10,15 % e para a estação de Boa Vista superestimam em aproximadamente 10,55 %. Para as estações de Barra da Corda e Alto Tapajós o método das isozonas subestimaram os valores apenas em respectivamente 1,92 % e 0,23 %. Estes resultados mostram uma razoável aproximação, principalmente para as estações de Manaus e Boa Vista, que não tinham sido utilizadas por TORRICO (1974) na formulação do método, e estão localizadas em zonas que cobre uma extensa área territorial, estando submetidas à influência de muitos microclimas que podem afetar o comportamento das chuvas.

5.2. Obtenção e análise das séries de precipitações máximas anuais

5.2.1. Dados Básicos de Precipitações diárias

Os dados básicos de precipitação diária obtidos dos registros dos postos pluviométricos da FUNCEME dos municípios de Juazeiro do Norte (latitude 7°19'58"S, longitude 39°18'00"W), Barbalha (latitude 7°07'48"S e longitude 39°11'24"W) e Crato (latitude 7°14'19"S e longitude 39°24'50"W), estão disponibilizados em CD Anexo.

5.2.2. Seleção das precipitações máximas anuais

Dos registros diários das precipitações, em CD Anexo, selecionou-se as precipitações diárias máximas de cada ano, por município, para formação das séries amostrais das máximas anuais Tabela 9.

Tabela 9 – Precipitações diárias máximas anuais, por município

Ano	Precipitações Diárias Máximas Anuais (mm)		
	Juazeiro do Norte	Barbalha	Crato
1974	126,0	115,2	137,0
1975	56,0	107,8	84,0
1976	93,0	48,0	127,0
1977	62,0	56,2	139,0
1978	93,0	124,6	82,2
1979	125,0	163,9	125,1
1980	90,0	99,0	140,0
1981	55,0	69,3	91,0
1982	74,0	55,9	127,0
1983	61,0	125,6	85,0
1984	72,0	77,9	73,0
1985	112,8	118,2	100,0
1986	112,0	73,0	98,0
1987	91,0	60,6	110,0
1988	77,0	99,2	110,0
1989	63,0	92,6	55,0
1990	81,4	125,1	63,0
1991	110,0	75,0	72,3
1992	110,2	103,0	125,2
1993	58,0	85,0	55,4
1994	54,0	78,2	94,2
1995	112,0	74,0	87,0
1996	102,0	98,9	82,2
1997	88,0	131,0	83,6
1998	63,0	78,5	108,6
1999	107,0	62,0	83,2
2000	64,0	72,0	62,0
2001	75,0	67,0	66,0
2002	86,0	78,0	91,8
2003	115,0	79,0	120,0
2004	166,0	117,0	156,0
2005	85,0	112,5	101,0
2006	60,0	100,5	98,0
2007	80,0	141,5	110,2
2008	130,0	108,0	93,2
2009	75,0	85,0	113,2
2010	77,0	101,0	87,5

5.2.3. Estatística descritiva das séries de precipitações máximas anuais

O sumário das estatísticas descritivas das séries amostrais de precipitações máximas diárias, por município, está nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10– Medidas de tendência central por município.

Municípios	\bar{x}	Md	Mo
Juazeiro do Norte	88,1	85,0	93,0
Barbalha	93,5	92,6	85,0
Crato	98,3	94,2	127,0

\bar{x} : média, Md: mediana, Mo: moda.

Tabela 11 – Medidas de dispersão, assimetria e curtose, por município.

Municípios	s^2	s	Cv	C	As	Ax	Mmax	Mmin	S
Juazeiro do Norte	669,2	25,9	0,29	0,64	0,82	112,0	166,0	54	3261,4
Barbalha	708,3	26,6	0,28	-0,12	0,14	115,9	163,9	48	3459,2
Crato	636,1	25,2	0,26	-0,48	-0,53	101,0	156,0	55	3636,9

s^2 : variância; s : desvio padrão; Cv: coeficiente de variação; C: curtose, As: assimetria; Ax amplitude; Xmax: máximo, Xmin: mínimo; S: soma.

Na Tabela 10, observa-se que a média das precipitações máximas diárias de Crato, no período de 1974 a 2010, é superior à média de Barbalha, em 5%, a qual, por sua vez, é maior que a de Juazeiro, também, em torno de 5%.

Na Tabela 11, observa-se que em Barbalha as dispersões das precipitações são um pouco mais acentuadas que as verificadas em Juazeiro, que, por sua vez, são maiores que as de Crato. As amplitudes, os valores máximos e mínimos das precipitações são bem aproximados entre os três municípios.

Quanto à assimetria, os municípios de Barbalha e Juazeiro apresentam valores positivos de respectivamente 0,14 e 0,82, indicando que as médias das precipitações são maiores que as medianas. O município do Crato apresenta assimetria negativa, com média superior a mediana, o que não é normal em série de eventos máximo. Esta constatação se deve ao fato que o cálculo da assimetria é muito sensível à presença de extremos em amostras de tamanho reduzido.

Ainda na Tabela 11, observa-se coeficiente de Curtose com valores próximos a zero, indicando que as curvas de frequência das séries de precipitação para os três municípios são do tipo mesocúrtica.

5.2.4. Teste de aleatoriedade e independência dos valores das precipitações diárias máximas anuais

A variabilidade temporal das precipitações diárias máximas anuais dos municípios Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato estão nas Figuras 8, 9 e 10.

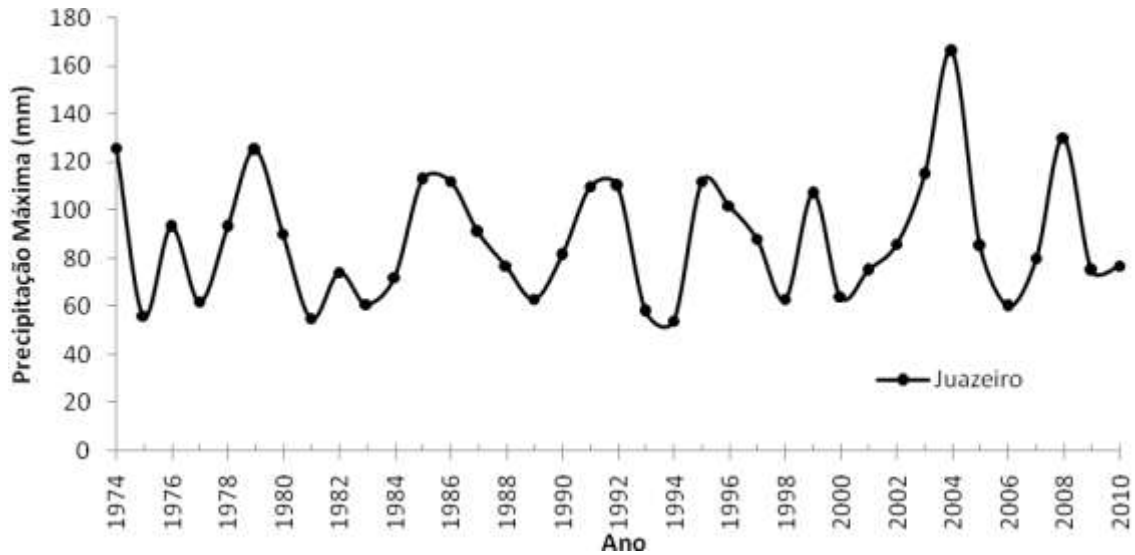


Figura 8 – Variabilidade temporal das precipitações máximas para o município de Juazeiro do Norte.

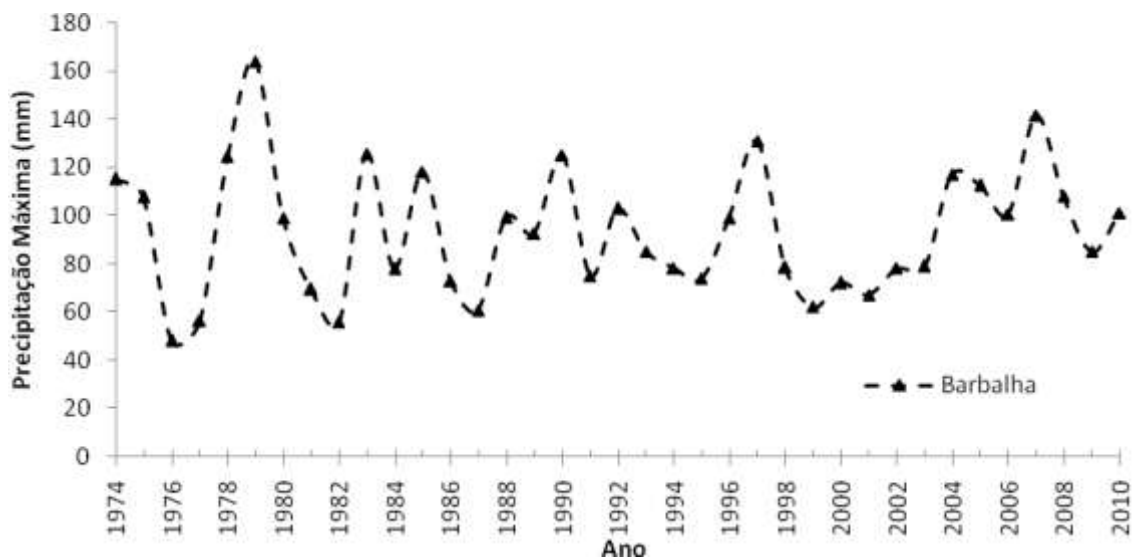


Figura 9 – Variabilidade temporal das precipitações máximas para o município de Barbalha.

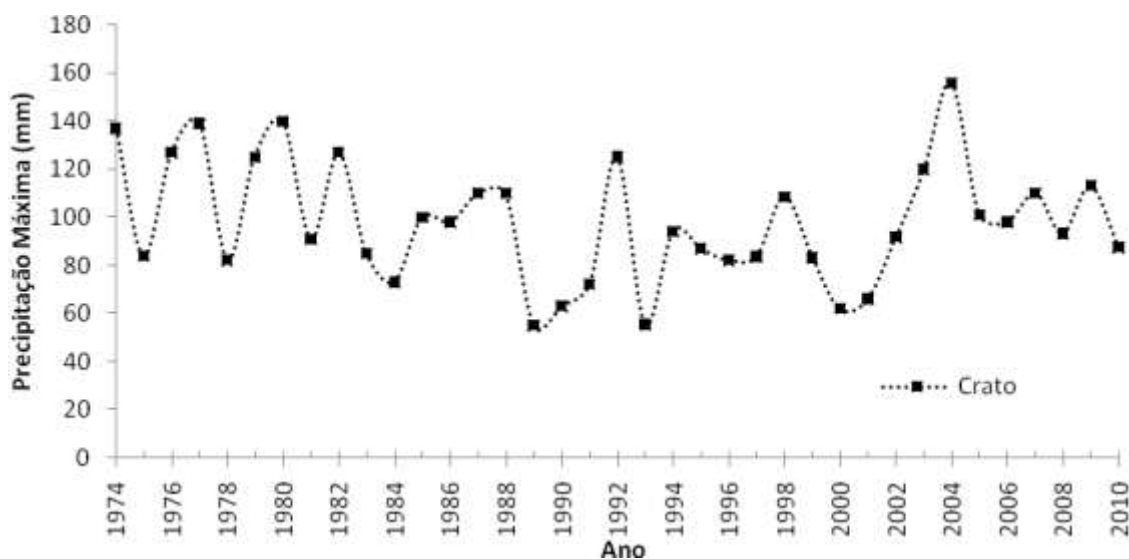


Figura 10 – Variabilidade temporal das precipitações máximas para o município de Crato.

Observa-se nas Figuras 8, 9 e 10 que o número p de inflexões acentuadas, máximos e mínimos locais são de respectivamente 23, 25 e 26, para os municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato.

Sendo o tamanho das amostras iguais a 37 itens para os três municípios, tem-se as estatísticas do teste de aleatoriedade expressas na Tabela 12.

Tabela 12- Estatísticas do teste de aleatoriedade, por município, considerando $\alpha=5\%$.

Municípios	E(p)	Var(p)	$ T $	$Z_{1-\alpha/2}$
Juazeiro do Norte	23,33	6,26	0,13	1,96
Barbalha	23,33	6,25	1,06	1,96
Crato	23,30	6,25	0,66	1,96

E(p): valor esperado de p ; Var(p): Variância de p ; $|T|$: módulo do teste T e $Z_{1-\alpha/2}$: desvio padrão.

De acordo com a Tabela 12, como $Z_{1-\alpha/2} > |T|$, para os três municípios, a decisão é de não rejeitar a hipótese nula H_0 , de que as observações são aleatórias. As estatísticas do teste de independência das precipitações diárias máximas anuais, por município, estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Estatísticas do teste de independência, por município, considerando $\alpha=5\%$.

Municípios	R	S2	S4	E(R)	Var(R)	T	Z _{1-α/2}
Juazeiro do Norte	1098,8	24089,6	53314587,0	-669,2	14566966,0	0,46	1,96
Barbalha	5185,1	26557,5	59177436,0	-737,7	17869508,0	1,40	1,96
Crato	6474,3	26712,2	55064656,0	-742,0	18219399,0	1,69	1,96

R: distribuição estatística; S2: momento de segunda ordem da amostra; S4: momento de quarta ordem da amostra; E(R): valor esperado de R; Var(R): Variância de R e |T|: módulo da estatística teste T.

De acordo com a Tabela 13, como $Z_{1-\alpha/2} > |T|$, para os três municípios, a decisão é de não rejeitar a hipótese nula H_0 , de que as observações são independentes.

Os resultados das Tabelas 12 e 13 indicam que os dados básicos de precipitação são aleatórios e independentes entre si.

Estas conclusões são indispensáveis, por serem hipóteses fundamentais às análises estatísticas contidas neste trabalho.

5.3. Ajuste das precipitações máximas anuais a uma função de distribuição de probabilidade

Na escolha da função de distribuição de probabilidade de melhor ajuste aos dados de precipitações máximas anuais, testou-se as funções Gumbel, Log-Normal II e III e Gama II e III.

Através do método da verossimilhança foram estimados, para os municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato, os parâmetros α e β da função de distribuição Gumbel; μ_y , σ_y e x_0 da função Log-Normal III; e β , ν e δ da função Gama III, Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros das funções de distribuição Gumbel, Log- Normal III e Gama III, por município.

Municípios	Gumbel		Log-Normal III			Gama III		
	α	β	μ_y	σ_y	x_0	β	ν	δ
Juazeiro do Norte	0,050	76,30	3,73	0,56	40	10,61	5,94	25,00
Barbalha	0,045	80,90	4,70	0,23	-19	6,44	17,06	16,00
Crato	0,045	86,20	5,01	0,16	-54	3,52	51,25	-82,00

Através do método dos momentos foram estimados, por município, os parâmetros μ_y e σ_y da função de distribuição Log-Normal II, e β e ν da função Gama II, Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros das funções de distribuição Log-Normal II e Gama II, por município.

Municípios	Log-Normal II		Gama II	
	μ_y	σ_y	β	ν
Juazeiro do Norte	4,44	0,28	7,50	11,61
Barbalha	4,50	0,27	7,60	12,34
Crato	4,56	0,25	6,50	15,19

A partir das funções de distribuição Gumbel, Log-Normal II e III e Gama II e III foram estimadas frequências das precipitações máximas anuais por município. Os coeficientes e índices calculados a partir das frequências observadas e estimadas, utilizados na escolha da função de distribuição de melhor ajuste, por município, estão na Tabela 16.

Tabela 16 - Coeficientes e índices calculados a partir das frequências observadas e estimadas, por município.

Municípios	Função	a	R ²	X ²	KS	DQM	DQR	DPMA
Juazeiro do Norte	Gumbel	0,980	0,981	4,560	0,100	0,179	0,040	10,060
	Log-Normal II	0,970	0,983	3,910	0,099	0,228	0,039	9,930
	Log-Normal III	0,990	0,975	5,710	0,093	0,184	0,045	13,380
	Gama II	0,980	0,985	2,820	0,085	0,230	0,037	10,850
	Gama III	0,990	0,986	3,030	0,078	0,183	0,034	9,870
Barbalha	Gumbel	1,000	0,980	6,190	0,113	0,15	0,040	11,170
	Log-Normal II	0,990	0,980	9,200	0,105	0,125	0,040	9,160
	Log-Normal III	0,986	0,981	4,380	0,102	0,122	0,040	9,040
	Gama II	0,989	0,983	2,570	0,103	0,109	0,037	8,280
	Gama III	0,987	0,983	6,270	0,106	0,111	0,037	8,130
Crato	Gumbel	1,010	0,987	1,170	0,098	0,163	0,033	13,270
	Log-Normal II	1,000	0,988	1,130	0,083	0,143	0,030	9,270
	Log-Normal III	0,993	0,989	1,080	0,069	0,136	0,029	8,210
	Gama II	0,997	0,990	1,100	0,074	0,138	0,028	8,990
	Gama III	0,990	0,989	2,060	0,067	0,131	0,030	8,590

a e R²: coeficiente angular e de determinação da reta de tendência (distribuição versus série amostral); X²: qui-quadrado; KS: estatística teste do método de Komolgorov-Smirnov; DQM: desvio quadrado médio; DQR: desvio quadrático residual; DPMA: desvio quadrado médio absoluto.

De acordo com a Tabela 16, para o município de Juazeiro do Norte, o coeficiente angular da reta de correlação de melhor ajuste foi o da função Log-Normal III, seguido da

função Gama III, que foi ligeiramente inferior. Já o melhor coeficiente de determinação foi o da função Gama III.

Com relação aos coeficientes calculados X^2 e KS, observa-se que todos são inferiores aos respectivos valores críticos 9,49 (para quatro graus de liberdade) e 0,22 (para 37 itens), ao nível de significância de 5%. Porém, observa-se o menor coeficiente calculado de X^2 para a função Gama II, ligeiramente inferior ao da função Gama III; e o menor coeficiente calculado KS para a função Gama III.

O índice DQM apresenta menor valor para função Gumbel, enquanto os índices DQR e DPMA, apresentam menores valores para a função Gama III.

De acordo com essa análise, para o município de Juazeiro do Norte a função de distribuição de frequência que atende ao maior número de testes e índices é a Gama III. Assim, escolhe-se esta função como a de melhor ajuste.

Para o município de Barbalha, o coeficiente angular da reta de correlação de melhor ajuste foi o da função Gumbel, seguido da função Log-Normal II, que foi ligeiramente inferior. Já o melhor coeficiente de determinação foi o das funções Gama II e Gama III.

Com relação aos coeficientes calculados X^2 e KS, observa-se que todos são inferiores aos respectivos valores críticos 9,49 (para quatro graus de liberdade) e 0,22 (para 37 itens), ao nível de significância de 5%. Porém, observa-se o menor coeficiente calculado de X^2 para a função Gama II; e o menor coeficiente calculado KS para a função Log-Normal III. Para os índices DQM, DQR e DPMA, observa-se que para Gama II os menores valores de DQM e DQR, e para Gama III o menor valor DPMA.

De acordo com essa análise, escolhe-se a função de distribuição Gama II como a de melhor ajuste para o município de Barbalha.

Para o município de Crato, o coeficiente angular da reta de correlação de melhor ajuste foi o da função Log-Normal II, seguido da função Log-Normal III, que foi ligeiramente inferior. Já o melhor coeficiente de determinação foi o da função Gama II. Com relação aos coeficientes calculados X^2 e KS, observa-se que todos são inferiores aos respectivos valores críticos 9,49 (para quatro graus de liberdade) e 0,22 (para 37 itens), ao nível de significância de 5%. Observa-se os menores coeficientes calculados de X^2 para a função Log-Normal III e Gama II, sendo ligeiramente maior para esta última e o menor coeficiente calculado KS para a função Log-Normal III.

O índice DQM apresenta o menor valor para a função Gama III; o DQR, para a Gama II; e o DPMA, para Log-Normal III. De acordo com essa análise, escolhe-se a função

de distribuição Log.Normal III como a de melhor ajuste para o município de Crato, por atender o maior número de testes e índices.

5.4. Obtenção de intensidades de chuvas através do método das isozonas

Através da função de distribuição de melhor ajuste, estimou-se os valores das precipitações diárias máximas anuais, por município, para os tempos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 e 100 anos, Tabela 17.

Tabela 17 - Precipitações diárias máximas anuais, para diferentes tempos de retorno, por município.

Municípios	Precipitações máximas (mm)							
	Tempos de retorno (anos)							
	5	10	15	20	25	30	50	100
Juazeiro do Norte	108,60	122,80	130,60	135,89	139,88	143,10	151,85	163,30
Barbalha	115,06	128,90	136,20	140,63	144,90	147,88	155,90	166,26
Crato	118,60	131,44	138,20	142,80	146,28	149,00	156,14	166,04

Aplicando o Método das Isozonas às precipitações diárias máximas anuais, obtidas para diferentes tempos de retorno (Tabela 17), obtém-se as intensidades para durações inferiores a 240 minutos, por município (Tabelas 18, 19 e 20).

Tabela 18 – Intensidades de chuvas máximas para durações inferiores a 240 minutos, obtidas para o município de Juazeiro do Norte, através do método das isozonas, para diferentes tempos de retorno.

t (min)	i (mm/min)							
	T (anos)							
	5	10	15	20	25	30	50	100
6	3,07	3,47	3,69	3,83	3,95	4,04	4,29	4,10
12	2,51	2,82	2,99	3,10	3,19	3,26	3,44	3,50
18	2,05	2,30	2,44	2,53	2,60	2,65	2,80	2,90
24	1,74	1,95	2,07	2,14	2,20	2,25	2,37	2,48
30	1,52	1,70	1,80	1,87	1,91	1,95	2,06	2,17
36	1,35	1,51	1,60	1,66	1,70	1,74	1,83	1,93
48	1,11	1,25	1,32	1,37	1,40	1,43	1,51	1,60
60	0,95	1,07	1,13	1,17	1,20	1,22	1,29	1,37
90	0,72	0,81	0,86	0,89	0,92	0,93	0,99	1,05
120	0,59	0,66	0,70	0,73	0,75	0,76	0,81	0,86
180	0,44	0,49	0,52	0,54	0,56	0,57	0,60	0,64
240	0,35	0,39	0,42	0,44	0,45	0,46	0,48	0,52

Tabela 19 – Intensidades de chuvas máximas para durações inferiores a 240 minutos, obtidas para o município de Barbalha, através do método das isozonas, para diferentes tempos de retorno.

t (min)	i(mm/min)							
	T (anos)							
	5	10	15	20	25	30	50	100
6	3,25	3,63	3,84	3,97	4,09	4,17	4,40	4,17
12	2,65	2,95	3,11	3,21	3,30	3,36	3,53	3,56
18	2,17	2,41	2,54	2,61	2,69	2,74	2,87	2,95
24	1,84	2,04	2,15	2,21	2,27	2,32	2,43	2,52
30	1,60	1,78	1,87	1,93	1,98	2,02	2,11	2,20
36	1,43	1,58	1,67	1,71	1,76	1,79	1,88	1,96
48	1,17	1,30	1,37	1,41	1,45	1,47	1,55	1,63
60	1,01	1,12	1,17	1,21	1,24	1,26	1,32	1,40
90	0,76	0,85	0,89	0,92	0,94	0,96	1,01	1,07
120	0,62	0,69	0,73	0,75	0,77	0,79	0,83	0,87
180	0,46	0,51	0,54	0,56	0,57	0,58	0,61	0,65
240	0,37	0,41	0,43	0,45	0,46	0,47	0,49	0,53

Tabela 20 – Intensidade de chuvas intensas para durações inferiores a 240 minutos, obtidas para o município de Crato, através do método das isozonas, para diferentes tempos de retorno.

t (min)	i (mm/min)							
	T (anos)							
	5	10	15	20	25	30	50	100
6	3,35	3,71	3,90	4,03	4,13	4,21	4,42	4,17
12	2,74	3,02	3,16	3,26	3,33	3,39	3,55	3,56
18	2,24	2,46	2,58	2,66	2,71	2,76	2,88	2,95
24	1,90	2,09	2,19	2,25	2,30	2,34	2,44	2,52
30	1,66	1,82	1,91	1,96	2,00	2,04	2,13	2,20
36	1,47	1,62	1,69	1,74	1,78	1,81	1,89	1,97
48	1,22	1,33	1,40	1,44	1,47	1,49	1,55	1,63
60	1,04	1,14	1,19	1,23	1,25	1,27	1,33	1,40
90	0,79	0,87	0,91	0,94	0,96	0,97	1,02	1,07
120	0,64	0,71	0,74	0,77	0,78	0,80	0,83	0,88
180	0,48	0,53	0,55	0,57	0,58	0,59	0,62	0,65
240	0,38	0,42	0,44	0,46	0,47	0,48	0,50	0,53

5.5. Formulação das equações de chuvas intensas a partir dos dados obtidos pelo método das isozonas

Na formulação das equações de chuvas intensas por município, estimou-se os parâmetros a, b e n das Equações IDF, aplicando-se o método dos mínimos quadrados aos valores das intensidades das Tabelas 18, 19 e 20.

O parâmetro c foi obtido pelo método de WILKEN (1978); e o parâmetro s pelo processo gráfico analítico de minimização do X^2 expresso pela função $X^2 = f(s)$.

Os gráficos definidos pelas funções $X^2 = f(s)$ estão nas Figuras 11, 12 e 13 e os parâmetros a, b, c, n e s, por município, estão na Tabela 21.

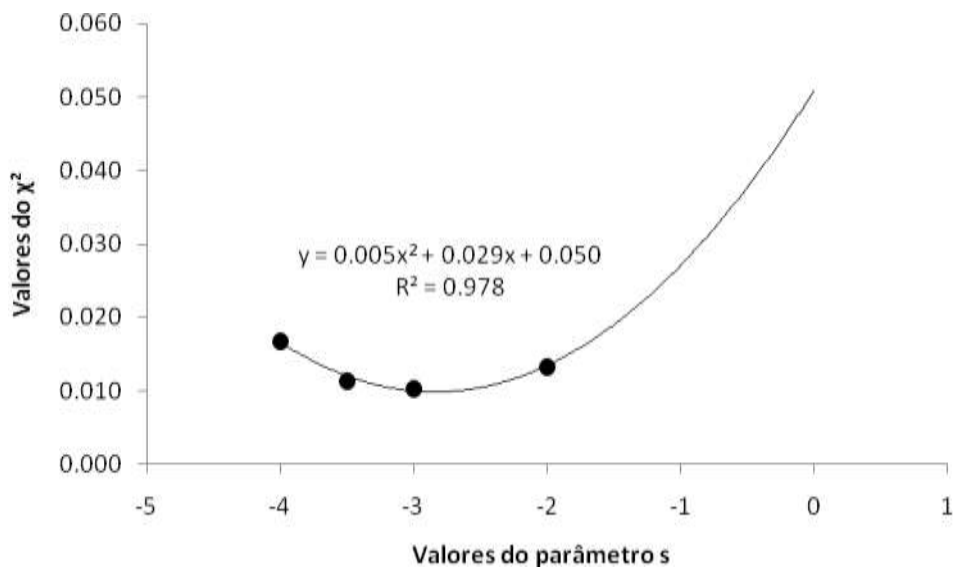


Figura 11 – Gráfico de $X^2 = f(s)$ para o município de Juazeiro do Norte

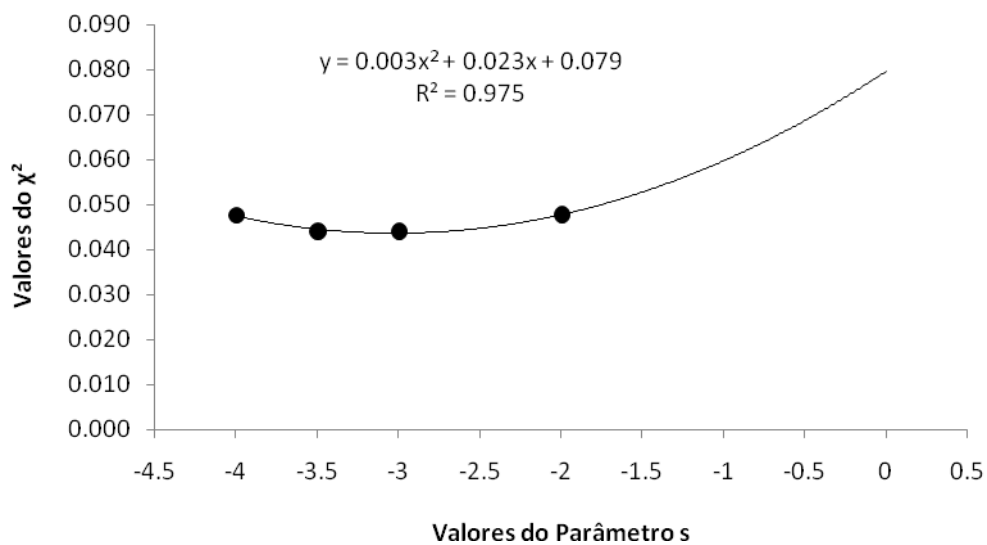


Figura 12 - Gráfico de $X^2 = f(s)$ para o município de Barbalha

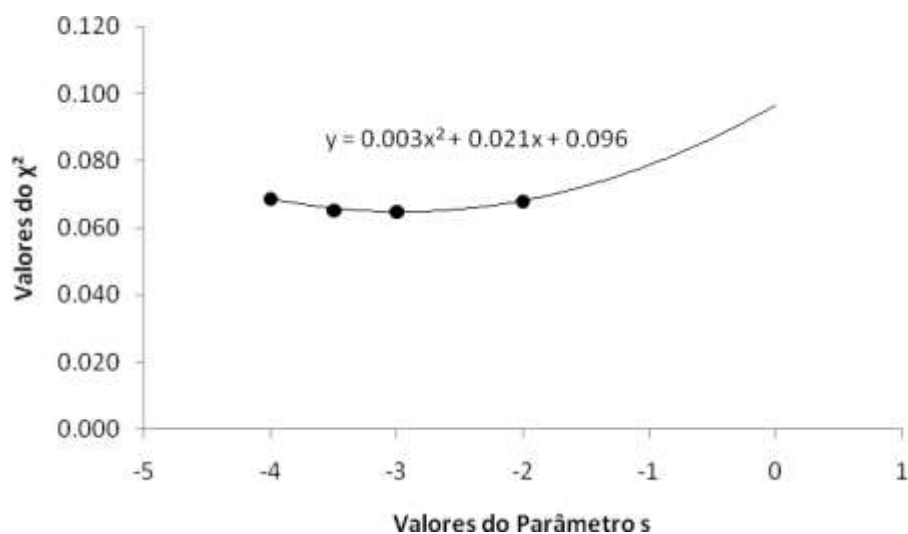


Figura 13 – Gráfico de $X^2 = f(s)$ para o município de Crato

Tabela 21 – Parâmetros da equação de chuvas intensas por município

Municípios	a	b	c	n	s
Juazeiro do Norte	26,734	0,0980	10,14	0,798	-2,90
Barbalha	21,020	0,0918	6,82	0,750	-3,05
Crato	20,240	0,0769	5,45	0,723	-2,99

A partir dos dados da Tabela 21 têm-se as equações de chuvas intensas que melhor representam os dados básicos de precipitações máximas para os municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato, para durações inferiores a 240 min:

$$\text{Juazeiro do Norte} \quad I = \frac{26,734 \cdot (T_r - 2,90)^{0,098}}{(t + 10,14)^{0,798}} ; \quad (5.1)$$

$$\text{Barbalha} \quad I = \frac{21,02 \cdot (T_r - 3,05)^{0,092}}{(t + 6,82)^{0,750}} ; \quad (5.2)$$

$$\text{Crato} \quad I = \frac{20,240 \cdot (T_r - 2,98)^{0,0769}}{(t + 5,45)^{0,723}} ; \quad (5.3)$$

em que: I é a intensidade de chuva em mm/min, t é a duração em min e Tr é o tempo de retorno em anos.

Os ajustes das equações 5.1, 5.2 e 5.3 foram avaliados estatisticamente e estão apresentados nas Figuras 14, 15 e 16.

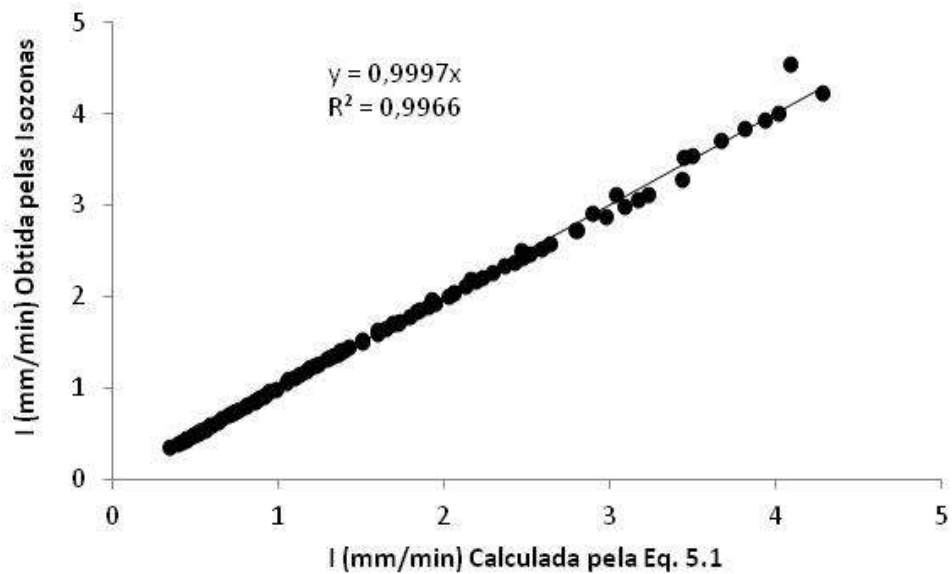


Figura 14 - Correlação linear entre as intensidades calculadas pela equação 5.1 e as estimadas pelo Método das Isozonas.

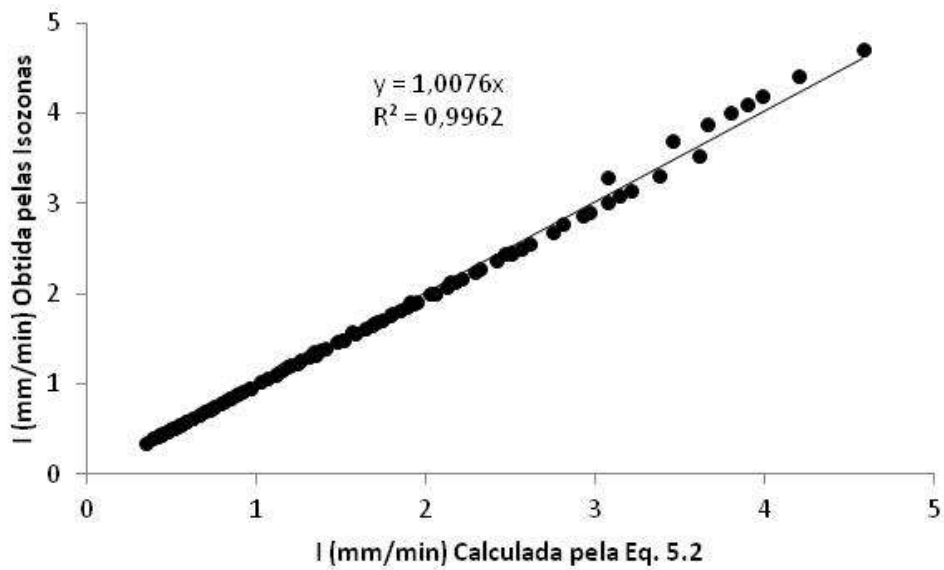


Figura 15 - Correlação linear entre as intensidades calculadas pela equação 5.2 e as estimadas pelo Método das Isozonas.

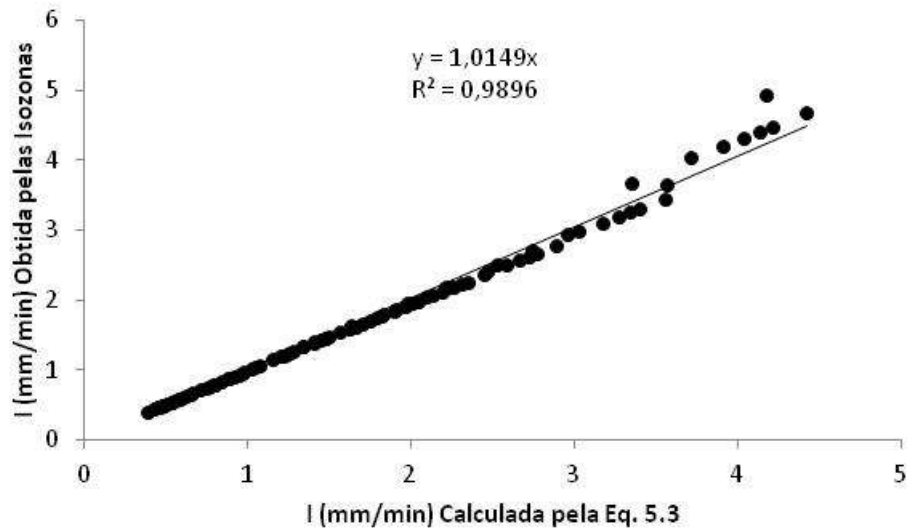


Figura 16 - Correlação linear entre as intensidades calculadas pela equação 5.3 e as estimadas pelo Método das Isozonas.

Observa-se nas Figuras 14, 15 e 16 que os modelos de correlações lineares foram explicados respectivamente com 99,6, 99,6 e 98,9% de ajuste, com coeficientes angulares de 0,999, 1,007 e 1,014 muito próximos à unidade, o que demonstra que as equações IDF determinadas neste estudo reproduzem adequadamente o comportamento das chuvas, estudado por TORRICO (1974).

6. CONCLUSÃO

O Método das Isozonas foi validado em duas zonas climatologicamente distintas: zona C, utilizando-se dados do município de Fortaleza no Ceará; e zona E, utilizando-se dados do município de Miracema do Norte em Tocantins. Nesta validação, as intensidades para diferentes durações e tempos de retorno, calculadas através de equações IDF obtidas criteriosamente, foram comparadas com as calculadas pelo método das isozonas. Os resultados mostraram que o método das isozonas superestima as intensidades em aproximadamente 10%, podendo ser utilizado com certa segurança. Verificou-se também que a validação é mais consistente quando o período de observação dos registros utilizados na elaboração das equações IDF coincide com o período das precipitações máximas anuais, utilizadas no método das isozonas. Ainda na validação, verificou-se, através de registros pluviométricos recentes, que a estação pluviográfica de Aiuaba – CE encontra-se na mesma isozona G proposta por TORRICO (1974).

A metodologia aplicada para a formulação da equação de chuvas intensas IDF, utilizando dados de precipitações diárias máximas anuais tratadas pelo método das isozonas, pode ser sistematizada e por isto mostrou-se bastante prática. Além do mais, as equações obtidas tornaram a aplicação do método das isozonas mais prática, uma vez que elimina a análise de mapa e tabelas, reduzindo a possibilidade de erros de transcrição.

A aplicação da metodologia para os municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato, localizados na Região Metropolitana do Cariri cearense, conduziu aos seguintes resultados:

- ✓ Ajuste das precipitações máximas anuais às funções distribuição de probabilidade Gama III para Juazeiro do Norte, Gama II para Barbalha e Log-Normal III para Crato;
- ✓ Possível o desmembramento das séries de precipitações máximas anuais de cada município, através do método das isozonas, gerando séries de intensidades, durações (mínima de 6 e máxima de 240 minutos) e tempos de retorno (mínimo de 5 e máximo de 100 anos);
- ✓ O estudo permitiu a obtenção das equações de chuvas intensas IDF padrões para cada município, a partir das séries geradas de intensidades, durações e tempos de retorno, com os parâmetros a , b , c e n obtidos através da metodologia clássica e o parâmetro s estimado por processo gráfico-analítico de minimização do X^2 .

7. BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, G.; IVÁN, J. Comparative Hydrology: Analysis of a Semiarid Tropical Watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 178, 2009.

AZEVEDO NETTO; FERNANDEZ, M. F.Y. ; ARAÚJO, R. de.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1998.

BELL, F. C. Generalized rainfall duration frequency relationships. **Journal of the Hydraulics Division** [of American Society of Civil Engineers], New York, v. 95, n.1, Jan.1969, p. 311-327.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 1993. p.177-242.

CARNEIRO, P. H., MARTINZ, D. D. G., STUDART, T. M. C., CAMPOS, J. N. C. Emprego de Ferramentas Computacionais na Determinação de Chuvas Intensas: Um Instrumento Adicional para o Ensino de Hidrologia. In: VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2002, Maceió. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2002.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.501-504, 2003.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGRAWHILL International Editions: Civil Engineering Series. 1988. 572 p.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. [International student Edition]. McGraw-Hill Kogakusha, LTD.

CHOW, V.T. A general for hydrologic frequency analysis. **Transactions of American Geophysical Union, Richmond**, v. 32, n. 2, p. 231-237, 1951.

COSTA, A. R.; BRITO, V. F. Equações de chuva intensa para Goiás e sul de Tocantins. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. 1CD-ROM.

COSTA, A. R.; RODRIGUES, A. A. Método das isozonas: desvios entre resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 1999. 1CD-ROM.

CUNNANE, C. Unbiased plotting positions. In: **A review: Journal of Hydrology**, v. 37, 1978. p. 205–222.

DAEE-CETESB. Departamento de Água e Energia Elétrica - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana: Manual de projeto**. São Paulo: DAEE-CETESB, 1980. 466p.

DNPM. **Projeto Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe**. Recife, 1996. 101 p.

FUNCEME. **Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará – Parte II: Mesorregião do Sul Cearense**. Fortaleza: FUNCEME, 2006. 128 p.

GENOVEZ, A. M.; ZUFFO, A. C. Chuvas intensas no Estado de São Paulo: Estudos existentes e análise comparativa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.3, p.45-58, 2000.

GENOVEZ, A. M.; ZUFFO, A. C.; BORRI GENOVEZ, A. I. Relação entre chuvas intensas de diferente duração e avaliação das equações de chuvas generalizadas. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16, 1994, Santiago. **Anais...** Santiago: IAHR, p. 279-90, 1994.

GARCEZ, L.N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgar Blucher, 1976. 249p.

HAAN, C.T. **Statistical methods in hydrology**. The Iowa University Press, Iowa, U.S.A., 1977.

LAURA, A. A. **Estudo do uso de séries parciais e anuais na análise de frequência de chuvas intensas aplicando modelos de distribuição de probabilidade**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1997.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill. 1949. 689 p.

KESSLER, J.; RAAD, S. J. **Análise de dados pluviométricos**. In: International Institute for Land Reclamation and Improvement: Principios y aplicaciones del drenaje. Wageningen: ILRI. v.3, p.16-5, 1978. Publication 16.

KITE, G. W. **Frequency and Risk Analysis in Hydrology**. Water Resources Publications, Fort Collins, CO, 1977, 224 p.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. Interception Measurements And Assessment of Gash Model Performance For a Tropical Semi – Arid Region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, p. 165 – 174, 2009.

MELLO, C. R. SILVA, Antônio M. da, LIMA, José M. de, et al. Modelos matemáticos para predição da chuva de projeto para regiões do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.121-128, 2003.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

NERC. **Floods Studies Reports**. London, v. 5. 1975.

OCCHIPINTI, A. G.; SANTOS, P. M. **Relações entre as precipitações máximas de “um dia” e de “24 horas” na cidade de São Paulo**. São Paulo: IAG/USP, 1966.

- OLIVEIRA, L. F. C. CORTÊS, F. C., WEHR, T. R., et.al. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.35, n.1, p.13-18, 2005.
- OLIVEIRA, L.F.; ANTONINI, J.C.; GRIEBELER, N.O. Estimativa de chuvas intensas para o Estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.22-33, 2008.
- PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro: DNOS, 426 p.
- _____. **Chuvas intensas no Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 1957. 246 p.
- PINTO, F. A.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F.; ALVES, A. R.; CECON, P. R. Equações de chuvas intensas para algumas localidades do Estado de Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, v.16, n.1, p.91-104, 1999.
- RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.
- SANTOS, G. G.; FIGUEIREDO, C. C. de; OLIVEIRA, F. C. de; GRIEBELER, N. P. Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 899–905, 2009.
- SILVA, D. D.; GOMES FILHO, R. R.; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F. Chuvas intensas para o Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.362-367, 2002.
- SILVA, D. D.; PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; GOMES FILHO, R. R.; LANA, A. M. Q.; BAENA, L. G. N. Equações de Intensidade-Duração-Frequência da precipitação pluvial para o Estado de Tocantins. **Engenharia na Agricultura**, v.11, n.1-4, p.7-14, 2003.
- SILVA, D. D.; PINTO, F. R. L. P.; PRUSKI, F. F.; PINTO, F. A. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. **Engenharia Agrícola**, v.18, n.3, p.11-21, 1999.
- SILVA, D. D.; VALVERDE, A. E. L.; PRUSKI, F. F.; GONÇALVES, R. A. B. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para o Estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, v.7, n.2, p.70-87, 1999.
- TORRICO, J. J. T. **Práticas Hidrológicas**. Rio de Janeiro: Transcon, 1974. 119 p.
- TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 3. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.
- VENDRAME, I. F.; PONTES, S. H. N. Atualização do método das isozonas para a região amazônica. In: VIII ENCITA, 2002, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Biblioteca do ITA, v. 1, p. 322-328. 2002.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p

WILKEN, P. S. **Engenharia de Drenagem Superficial**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), São Paulo. 1978, 478 p.