



CAMILA BITTENCOURT SILVA

**RELAÇÃO INTENSIDADE-DURAÇÃO-
FREQUÊNCIA DE CHUVAS EXTREMAS NA
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

LAVRAS- MG

2016

CAMILA BITTENCOURT SILVA

**RELAÇÃO INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE CHUVAS
EXTREMAS NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias e Inovações Ambientais, área de concentração em Gestão de Resíduos e Efluentes, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira
Orientador

LAVRAS- MG

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Silva, Camila Bittencourt.

Relação intensidade-duração-frequência de chuvas extremas na
região Nordeste do Brasil / Camila Bittencourt Silva. – Lavras :
UFLA, 2016.

110 p.

Dissertação (mestrado profissional)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador(a): Luiz Fernando Coutinho de Oliveira.

Bibliografia.

1. Chuva intensa. 2. Desagregação de chuva. 3. Distribuição de
Gumbel. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CAMILA BITTENCOURT SILVA

**RELAÇÃO INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE CHUVAS
EXTREMAS NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias e Inovações Ambientais, área de concentração em Gestão de Resíduos e Efluentes, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de julho de 2016

Prof^ª. Dra. Mirléia Aparecida de Carvalho UFLA

Prof^ª Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi UFLA

Dra. Rosângela Francisca de P. Vitor Marques

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira
Orientador

LAVRAS- MG

2016

Dedico aos meus pais, fonte inesgotável de apoio e amor e às minhas tias que representam grandes parcelas de responsabilidade no trilhar deste caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por poder sentir a Sua presença constante em cada detalhe dos meus caminhos.

Aos meus pais pelo exemplo na vida, por todo o esforço, dedicação, amor e apoio incondicional. Aos meus irmãos pelo carinho, respeito, amizade, união e por se fazerem sempre presente mesmo que distante 1000 km.

Aos familiares: vó Hilda, tios, tias, primos e primas pela oportunidade de um convívio mais próximo, pelo suporte aqui em Lavras, pelos conselhos, incentivo, conversas, aprendizado e pela diversão sempre.

Aos meus amigos de longa data e longos quilômetros, pelos poucos, mas valiosos momentos juntos durante o curso do mestrado, por me fazerem perceber que eu não estive nunca sozinha na saudade e na vontade de estar junto.

Aos amigos que fiz em Lavras pela acolhida de braços abertos, pelos momentos leves de descontração, pelas corridas, festas, viagens, pelas angústias e aprendizado mútuo, obrigada por compartilharem a vida comigo!

Ao meu orientador professor Luiz Fernando Coutinho de Oliveira pela disponibilidade em orientar este trabalho, pela disposição em ajudar e ensinar sempre e por ter me proporcionado uma nova visão da pós-graduação, tornando o caminho mais leve e tranquilo.

Aos graduandos Flávia, Lucas, Thaís, Matheus e Estephane pela disposição no trabalho com os (muitos!) dados e por me proporcionarem um aprendizado na condução dessa empreitada.

À Universidade Federal de Lavras pela concessão da bolsa e pela oferta do Programa de Pós - Graduação em Tecnologias e Inovações Ambientais, pela oportunidade de aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Quem deseja ver o arco- íris precisa aprender a gostar da chuva.”
(Paulo Coelho).

RESUMO

A escassez de dados de chuva-vazão, no Brasil, cuja extensão territorial inviabiliza os programas convencionais de medição hidrológica, levou ao desenvolvimento de modelos matemáticos que utilizam das relações intensidade-duração-frequência (IDF). As relações IDF possibilitam a determinação da chuva de projeto, em lugares, que não se dispõem de dados de vazão, tornando confiável o dimensionamento de obras hidráulicas e agrícolas. Para a definição das relações IDF, utilizam-se dados obtidos de pluviógrafos, capazes de medir a intensidade, duração e altura da chuva, entretanto tais equipamentos são escassos no Brasil. Por outro lado, a rede pluviométrica nacional que fornece apenas a altura de chuva é ampla e bem distribuída, levando ao desenvolvimento de metodologias que permitam a estimação da relação IDF por meio de técnicas de desagregação de chuvas. Neste contexto, objetivou-se gerar as relações IDF, para estações pluviométricas, localizadas na região Nordeste do Brasil, por meio da técnica de desagregação de chuva de 24 horas desenvolvida pela CETESB e, a partir do ajuste das relações IDF, espacializar e interpolar seus parâmetros pelo método da Krigagem. Para tal, foram escolhidas as estações que apresentaram séries históricas com, no mínimo, 15 anos de observações diárias, totalizando 2.042 estações com registros pluviométricos extraídas do Hidroweb, as quais foram desagregadas gerando durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos. O modelo de probabilidade de Gumbel foi empregado, na análise da distribuição de frequência e na estimativa das chuvas intensas, para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Para a verificação da aderência das frequências estimadas pelo modelo de Gumbel às frequências observadas, utilizou-se o teste do Qui-quadrado para um nível de 5% de significância. Em seguida, foram realizados os ajustes das relações IDF e o desempenho dos modelos foi avaliado pelo coeficiente de determinação (r^2). Para todas as estações empregadas verificou-se uma ótima aderência das frequências teóricas obtidas pelo modelo de Gumbel, às frequências observadas, pelo teste de Qui-quadrado e pelo coeficiente de desempenho que apresentou valores acima de 0,85. Os ajustes das relações IDF, para todas as estações avaliadas, apresentaram valores de r^2 próximo de 1,0, conferindo um perfeito ajuste. Pela análise de erros, gerados pela validação cruzada, verificou-se que o modelo do semivariograma que proporcionou os melhores resultados foi o Gaussiano, permitindo, assim, a obtenção dos mapas temáticos dos parâmetros das relações IDF, utilizando a Krigagem, possibilitando, assim, a obtenção dessas relações para locais desprovidos de monitoramento.

Palavras-chave: Chuva intensa. Desagregação de chuva. Distribuição de Gumbel.

ABSTRACT

The lack of data regarding rainfall-runoff in Brazil, of which territorial extension hinders conventional hydrological measuring programs, led to the development and of mathematic models that use intensity-duration-frequency (IDF) relations. The IDF relations allow the determination of project rainfall in location, which dispose of no flow data, causing the dimensioning of hydrologic and agricultural constructions to be reliable. To define the IDF relations, data obtained from pluviographs, capable of measuring rain intensity, duration and height are used. However, such equipment are scarce in Brazil. On the other hand, national pluviometric network, which provides only rain height, is ample and well distributed, leading to the development of methodologies that allow the estimation of the IDF relation by means of rainfall disaggregation techniques. In this context, we aimed at generating IDF relations for pluviometric stations located in the northeastern region of Brazil, by means of a 24 hours rainfall disaggregation technique, developed by CETESB, and, by adjusting the IDF relations, space and interpolate its parameters by use of Kriging. For such, we chose stations that presented historical series with a minimum of 15 years of daily observations, totalizing 2,042 stations with pluviometric records extracted from the Hidroweb, which were disaggregated, generating durations of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 and 1440 minutes. The Gumbel probability model was employed in the frequency distribution analysis and in the estimation of intense rainfall for the return periods of 5, 10, 25, 50 and 100 years. For verifying the adherence of the frequencies estimated by the Gumbel model to the observed frequencies, using the Chi-square test at a level of 5% of significance. Subsequently, the IDF relations were adjusted and the performance of the IDF models was evaluated by the coefficient of determination (r^2). For all employed stations, we verified an optimum adherence of the theoretical frequencies obtained by the Gumbel model to the observed frequencies using the Chi-square test and the performance coefficient, which presented values above 0.85. The adjustments of the IDF relations for all evaluated stations presented values for r^2 close to 1.0, allowing a perfect adjustment. For analyzing the error generated by cross validation, we verified that the semivariogram model that presented the best results was the Gaussian model, allowing for thematic maps of the IDF relation parameters using kriging, thus the obtaining of these relations for locations lacking monitoring.

Keywords: Intense rainfall. Rainfall disaggregation. Gumbel distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas constituintes da atmosfera.....	18
Figura 2 - Esquema do modelo de desagregação	29
Figura 3 - Mapa da distribuição espacial das isozonas	31
Figura 4 - Semivariograma	42
Figura 5 - Modelos teóricos que podem ser aplicados no ajuste do semivariograma	43
Figura 6 - Localização das estações pluviométricas	51
Figura 7 - Fluxograma da metodologia aplicada.....	53
Figura 8 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Maceió.	65
Figura 9 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Salvador.	66
Figura 10 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Fortaleza.....	66
Figura 11 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para São Luís.	67
Figura 12 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para João Pessoa.....	67
Figura 13 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Recife.	68
Figura 14 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Teresina.....	68
Figura 15 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Natal.....	69
Figura 16 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Aracaju.....	69
Figura 17 - Ajuste dos valores de intensidades de precipitação calculada à observada para a estação de Salvador- BA	72
Figura 18 - Relações IDF definidas para durações de 0 a 60 minutos para a estação de Salvador- BA.....	74
Figura 19 - Relações IDF definidas para durações de 300 a 1500 minutos para a estação de Salvador- BA.....	75
Figura 20 - Semivariograma do parâmetro k.	79
Figura 21 - Semivariograma do parâmetro a.....	79

Figura 22 - Semivariograma do parâmetro b	80
Figura 23 - Semivariograma do parâmetro c	80
Figura 24 - Precipitação média para a região Nordeste do Brasil.....	83
Figura 25 - Superfície interpolada do parâmetro " k ".....	84
Figura 26 - Superfície interpolada do parâmetro " a ".....	86
Figura 27 - Superfície interpolada do parâmetro " b ".....	88
Figura 28 - Superfície interpolada do parâmetro " c "......	89
Figura 29 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro " k ".....	91
Figura 30 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro " a ".....	92
Figura 31 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro " b ".....	92
Figura 32 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro " c ".....	93
Figura 33 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e dadistribuição normal para o parâmetro " k "......	94
Figura 34 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e dadistribuição normal para o parâmetro " a "......	94
Figura 35 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e dadistribuição normal para o parâmetro " b ".....	95
Figura 36 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e dadistribuição normal para o parâmetro " c ".....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes relativos às isozonas de igual relação e diferentes tempos de retorno.....	32
Tabela 2 - Coeficientes de desagregação da chuva de 1 dia.....	54
Tabela 3 - Critérios de interpretação do índice de desempenho C.	58
Tabela 4 - Estatística empregada na verificação e classificação das frequências teóricas às observadas para as capitais da Região Nordeste.	70
Tabela 5 - Estimativa da intensidade de precipitação média máxima (mm h ⁻¹) pela distribuição de Gumbel para diferentes tempos de duração de chuva e períodos de retorno para a estação de Salvador.....	71
Tabela 6 - Ajuste dos parâmetros das relações IDF para as capitais da região Nordeste	73
Tabela 7 - ANOVA para a estação de Salvador- BA.	76
Tabela 8 - Estatística descritiva dos parâmetros das relações IDF para toda a região Nordeste.....	76
Tabela 9 - Análise dos erros gerados pela validação cruzada dos modelos dos semivariogramas Esférico, Exponencial e Gaussiano.	78
Tabela 10 - Parâmetros de ajuste do semivariograma empregando o modelo Gaussiano nos parâmetros das relações IDF ajustados para a região Nordeste.....	81
Tabela 11 - Grau de dependência espacial dos parâmetros das relações IDF.	82

LISTA DE SIGLAS

IDF	Intensidade-duração-frequência
SIG	Sistema de informações geográficas
SNIRH	Sistema Nacional de informações sobre recursos hídricos
ANA	Agência Nacional das águas
CNP	Curva normalizada de precipitação
VCAS	Vórtices ciclônicos de ar superior
ZCIT	Zona de convergência intertropical
POA	Perturbações ondulatórias dos ventos alísios
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico Sul
TSM	Temperatura da superfície do mar
CV	Coefficiente de variação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GD	Grau de dependência espacial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Formação das precipitações	17
2.2	Medição de chuvas	21
2.3	Modelos matemáticos que expressam a relação IDF	23
2.4	Técnicas de desagregação de chuvas	29
2.5	Distribuições de probabilidade	34
2.6	Geoprocessamento e interpoladores empregados na espacialização das chuvas	38
2.7	Histórico de trabalhos de definição das relações IDF de chuvas intensas	44
2.8	Fenômenos atmosféricos atuantes na Região Nordeste do Brasil	46
3	MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1	Área de estudo	49
3.2	Procedimentos metodológicos	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Verificação do ajuste da distribuição de Gumbel	65
4.2	Ajuste das relações IDF	71
4.3	Espacialização dos parâmetros das relações IDF	76
5	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

A precipitação pluvial é a variável meteorológica de destaque no ciclo hidrológico, pois é a responsável pela entrada de água no sistema. As avaliações que dizem respeito aos eventos de chuvas de valores extremos, como em situações de escassez e cheias, são de extrema importância, já que ambas as circunstâncias podem causar danos significativos à sociedade e ao meio ambiente.

A chuva extrema máxima é aquela que apresenta grande lâmina d'água precipitada, em curto intervalo de tempo, seu estudo é importante para quantificar, adequadamente, seus efeitos visto que a mesma intensidade de chuva pode causar distintas consequências em ambientes urbanos e rurais.

Para a caracterização das chuvas intensas, utilizam-se modelos matemáticos que definem sua intensidade-duração-frequência (IDF), importantes no planejamento e projeto de obras hidráulicas e agrícolas, como bueiros, barragens, irrigação, controle de inundações e erosão, possibilitando prognósticos que mais se aproximem da realidade.

Para a definição das relações IDF, é necessária a obtenção de séries históricas de dados de chuva, no Brasil, encontram-se disponíveis, por meio de dados de radares, satélites e estações pluviográficas e pluviométricas. Dados de radares e satélites são pouco utilizados pelas dificuldades, na obtenção da informação desejada, bem como a baixa precisão em suas estimativas. Os dados obtidos de pluviômetros fornecem apenas a altura da precipitação, ou seja, a lâmina d'água acumulada, durante o evento, chamada chuva de um dia. O pluviógrafo mede o tempo de duração da chuva e a lâmina d'água precipitada, permitindo, assim, a determinação de sua intensidade, tratando-se, portanto, de dados mais completos. Porém a densidade da rede pluviográfica, em nosso país, é baixa e mal distribuída, quando comparada com a rede de estações pluviométrica, é bastante ampla.

A maior disponibilidade de dados pluviométricos acarretou o desenvolvimento de técnicas, para obtenção de chuvas de menor duração, com base na chuva de um dia obtida de pluviômetro, para, assim, poder realizar inferências estatísticas a partir de distribuições de probabilidade.

As variáveis hidrológicas assumem aleatoriedade e, por isso, estão sujeitas às leis probabilísticas. Dentre as distribuições de probabilidade aplicada a eventos extremos, o modelo de Gumbel é o mais usual, na determinação de relações IDF de precipitações intensas, por se tratar de um modelo de fácil utilização. O ajuste das relações IDF possibilita a interpolação dos valores de seus parâmetros, gerando informações, para locais desprovidos de monitoramento.

A região Nordeste do Brasil apresenta alguns estudos que abrangem a geração de modelos IDF, para alguns estados e de forma pontual, em capitais ou cidades mais representativas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho consiste em gerar relações IDF de chuvas intensas, para toda a região Nordeste e realizar a interpolação de seus parâmetros, em ambiente de sistemas de informação geográfica (SIG), obtendo informação para locais desprovidos de monitoramento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Formação das precipitações

O planeta Terra é composto em maior parte por água e, de acordo com Marengo (2008), este elemento está presente em 70% da superfície terrestre e em constante movimento. A água é um elemento essencial, para a sobrevivência de todos os organismos vivos, estando disponível nos três estados físicos (sólido, líquido e gasoso), sendo possível observar essas três fases no ciclo hidrológico (TUNDISI, 2003).

O ciclo hidrológico é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes e na atmosfera, é o grande responsável pela distribuição e disponibilidade de água no planeta. Os principais processos que envolvem o ciclo hidrológico são: precipitação, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração, percolação e escoamento superficial (TUNDISI, 2003).

O movimento da água no ciclo hidrológico é induzido pela ação da força da gravidade, pela rotação da Terra, dinâmica da atmosfera e pela disponibilidade de radiação solar que provoca a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes, propiciando a formação de nuvens que, quando carregadas, geram precipitações na forma de chuva, granizo, orvalho e neve (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

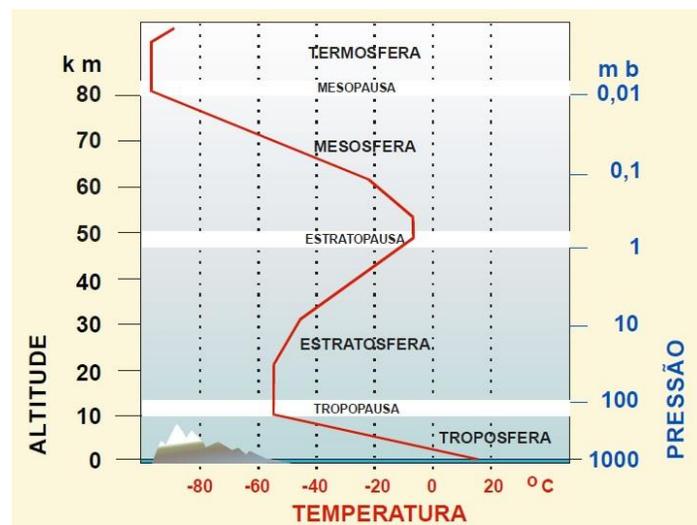
Segundo Mello e Silva (2009), dentre os processos que compõem o ciclo hidrológico, a precipitação do tipo chuva, denominada de precipitação pluvial, é fundamental para o entendimento da dinâmica do meio físico, recebendo influência de fatores climáticos como a temperatura, a umidade relativa e o vento.

A ação do ciclo hidrológico combinada com as características físicas particulares de cada região (geologia, topografia e clima), define o regime hidrológico. Desta maneira, é desigual a distribuição de água, tanto espacial

quanto temporalmente, o que leva à necessidade de ações de planejamento ambiental de acordo com a situação de excesso ou escassez (TUNDISI, 2003). Entretanto, antes da etapa do planejamento do uso dos recursos hídricos, é indispensável o conhecimento dos processos de formação e ocorrência da precipitação pluvial. Para isso, faz-se necessária a compreensão de termos e conceitos corriqueiros, nas áreas da meteorologia e hidrologia, como, por exemplo, a atmosfera e os processos que nela ocorrem gerando a precipitação.

A atmosfera é formada por um conjunto de camadas, composta por gases e poeiras, que envolvem a Terra com a função de protegê-la, está dividida em alta e baixa atmosfera. Utiliza-se, para essa classificação, o critério de variação da temperatura do ar com a altitude, sendo encontradas as seguintes camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Essas camadas são separadas pelas camadas de transição denominadas de Tropopausa, Estratopausa e Mesopausa, todas representadas na Figura 1 (BERTONI; TUCCI, 2001; VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 1 - Camadas constituintes da atmosfera



Fonte: Varejão-Silva (2006)

A baixa atmosfera apresenta maior influência na distribuição das águas superficiais e nos processos meteorológicos, sendo composta pela Troposfera, Tropopausa, Estratosfera e Estratopausa (BERTONI, 2001; VAREJÃO-SILVA, 2006).

A Troposfera é a camada de principal interesse da hidrometeorologia, pois está localizada, logo acima da superfície terrestre, é aquecida pela mesma e é onde ocorre a formação da maioria dos fenômenos meteorológicos. Nesta camada se encontra grande parte de massa (poluentes e vapor d'água) e quantidade de ventos, tornando o ambiente favorável para a formação de nuvens (BERTONI, 2001; VAREJÃO-SILVA, 2006).

A formação de nuvens ocorre pela condensação do vapor d'água, associada ao crescimento das gotículas de água às partículas de poeira, fumaça e resíduos industriais. A condensação ocorre, quando o ar atinge sua capacidade máxima de retenção de vapor, tornando-se saturado. Para que ocorra a saturação, é necessário que a temperatura do ar seja reduzida, diminuindo, assim, a capacidade de retenção de vapor d'água; ou que seja acrescentado vapor d'água ao ar (como, por exemplo, com a ação de uma frente fria), ou ainda, que ambas as situações ocorram conjuntamente (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

As nuvens que ficam em suspensão na atmosfera têm essa estabilidade pela ação dos ventos e/ou de correntes de ar ascendentes, exercendo uma força oposta à da gravidade, ocorrendo um equilíbrio de forças. Para que ocorra a precipitação pluvial, as nuvens devem atingir um peso superior às forças que estão atuando para mantê-las em suspensão (BERTONI; TUCCI, 2001; VAREJÃO-SILVA, 2006).

A chuva pode ser definida como a precipitação de partículas de água líquida sob a forma de gotas de diâmetro superior a 0,5 mm (MACHADO; TORRES, 2012). As precipitações pluviais podem ser classificadas, conforme a sua origem, de acordo com o mecanismo de ascensão do ar úmido que

proporciona a formação das nuvens, sendo que os principais tipos são: ciclônicas (frontais e não frontais), orográficas ou de relevo e convectivas ou de convecção (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

As precipitações ciclônicas são originadas em razão do encontro de massas de ar com características diferentes, são classificadas como frontais e não frontais. As chuvas não frontais podem ser produzidas pela queda da pressão, ocasionando a elevação do ar em virtude da convergência horizontal em áreas de baixa pressão. As chuvas frontais ocorrem, quando a frente fria invade o local, empurrando, para cima, o ar quente e úmido, causando resfriamento e condensação. São chuvas de longa duração, abrangem grandes áreas e de intensidade média (BERTONI; TUCCI, 2001; VILLELA; MATTOS, 1975).

Nas precipitações orográficas, também, chamadas de chuvas de relevo, ocorre a ascensão da massa de ar quente e úmida, pelo encontro de uma barreira montanhosa (Serra do Mar é um exemplo típico) forçando a elevar-se e, conseqüentemente, diminuindo a temperatura ocorrendo a condensação. Este tipo de chuva ocorre em pequenas áreas, sendo de pequena intensidade e longa duração (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010). Após a ocorrência da precipitação, algumas vezes, a massa de ar consegue transpor a barreira, projetando a sombra pluviométrica, caracterizada por regiões secas, devido à umidade já ter sido, em grande parte, descarregada no lado oposto (FORGIARINI; VENDRUSCULO; RIZZI, 2014).

Na classificação de precipitações convectivas, enquadram-se as chuvas intensas, típicas de regiões tropicais. A superfície aquecida, desigualmente, forma camadas de ar com densidades diferentes se mantendo em equilíbrio instável. Com a quebra desse equilíbrio (vento, superaquecimento), ocorre a ascensão brusca do ar menos denso, capaz de alcançar grandes altitudes, que atinge o nível de condensação e precipita (VILLELA; MATTOS, 1975).

As chuvas convectivas são típicas de verão, apresentando grande intensidade, pequena duração e abrangem áreas pequenas, podendo provocar grandes inundações prejudicando estruturas urbanas, bem como, danos no meio rural (CAMPOS et al., 2014).

2.2 Medição de chuvas

Para a realização de estudos hidrológicos, é necessária a obtenção de dados que caracterizem as precipitações pluviais. Segundo Mello et al. (2001) a caracterização é realizada conhecendo-se a intensidade, o tempo de duração e a frequência de ocorrência, permitindo, assim, definir a relação intensidade-duração-frequência (IDF). A relação IDF é de extrema importância, no planejamento e projeto de obras hidráulicas, tais como os bueiros, barragens, irrigação, controle de inundações, erosão e escoamento superficial, bem como em obras hidráulicas agrícolas, que não dispõem de dados de vazão, sendo essencial para a definição da chuva de projeto (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008).

A caracterização da variabilidade temporal das chuvas é imprescindível, para quantificar, adequadamente, os efeitos ocasionados por esse fenômeno, sendo as avaliações mais importantes as que tratam de valores extremos de precipitação, períodos de seca e enchentes.

Pinto (1995) comentou que um evento de chuva é considerado extremo, quando sua intensidade ultrapassa um valor estabelecido, para determinada aplicação. Entretanto essa generalização, na delimitação de valores, na prática, é complexa devido às características de cada região, fazendo com que as chuvas, que acarretam danos em áreas urbanas, não, necessariamente, tenham mesmo impacto em áreas rurais.

Com o intuito de se obter informações, para a realização de trabalhos que caracterizem as chuvas, conta-se com equipamentos que possibilitam a sua

medição, como os pluviômetros e pluviógrafos que fornecem a medida pela altura de água precipitada em uma superfície plana e impermeável (KÜCHLER et al., 2010).

Os pluviômetros medem apenas a altura da precipitação, ou seja, a lâmina de água acumulada durante o evento. A medição requer leituras manuais, em intervalos de tempo fixos, geralmente, às 7h, com um intervalo de 24h, fornecendo a chamada chuva de 1 dia (VILLELA; MATTOS, 1975).

Os pluviógrafos são equipamentos capazes de medir não só a altura da chuva, mas também a sua intensidade e duração, porém o custo de pluviógrafos é elevado, tornando a sua rede escassa, mal distribuída e com poucos anos de observações (OLIVEIRA et al., 2008). Por outro lado, a rede de estações pluviométricas é muito ampla, entretanto o que dificulta o trabalho com seus dados são as falhas nas séries históricas, em que se devem, basicamente, à falta de um operador, à perda de informações e à falha na transcrição (OLIVEIRA et al., 2010).

Existem, também, os pluviógrafos automáticos, em que o dispositivo de marcação consiste em uma caçamba na qual o volume de chuva é medido por meio da contagem de basculadas ao longo do tempo. A movimentação da caçamba ocorre quando o volume de chuva atingido for de 0,1; 0,2 ou 0,25 mm (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA, 2013). Alguns desses aparelhos possuem o dispositivo de sifão que realiza a descarga do excesso de água gerando eficiência na medição de chuvas intensas e seu funcionamento pode ser a energia solar com aquisição de dados via equipamento de telemetria ou por meio de conexão com a internet (PARIZZI et al., 2010).

O radar meteorológico é um instrumento que, também, possibilita a medição de chuva pela técnica do sensoriamento remoto. O radar é constituído por um sistema de antena que faz as varreduras da atmosfera, detectando obstáculos, por meio da emissão de ondas eletromagnéticas, que refletem no

objeto e retornam modificadas. O retorno da energia emitida chama-se eco e a composição das imagens com seu resultado para interpretação é realizada por programas computacionais específicos, sendo necessária, ainda, a conversão do fator de refletividade em intensidade de chuva (KAISER, 2006).

Sendo assim, os dados de precipitações pluviais obtidos por meio de radar são pouco utilizados em virtude da complexidade no processo de geração da informação necessária, da falta de confiança nos resultados por erros referentes à equação de transformação da refletividade em taxa de precipitação, do efeito da curvatura da Terra e da calibração eletrônica do equipamento e, ainda, da vaga integração entre hidrólogos e especialistas em radar (CALVETTI; BENETTI; PEREIRA FILHO, 2003; KAISER, 2006; MOREIRA, 2005).

Há, também, as estimativas de precipitação por satélites que registram em imagens a temperatura de nuvens e a quantidade de vapor d'água por meio de cores do espectro visível e infravermelho. Entretanto a precisão na estimativa utilizando essa técnica é menor pelo registro captado pelo satélite ser apenas do topo das nuvens e não da ocorrência da precipitação (GONÇALVES, 2011).

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433 de 1997, estabeleceu, como instrumento de gestão, a criação do sistema nacional de informações sobre recursos hídricos (SNIRH). A Lei nº 9.984 de 2000 criou a Agência Nacional das Águas (ANA) que atua, no gerenciamento dos recursos hídricos, disponibilizando, por meio do portal HidroWeb, um banco de dados com informações coletadas pela rede hidrometeorológica, incluindo as séries históricas pluviográficas e pluviométricas (BRASIL, 1997, 2000).

2.3 Modelos matemáticos que expressam a relação IDF

As relações IDF podem ser expressas por modelos matemáticos, ou seja, equações propostas que representam a quantidade máxima de uma chuva. A definição do modelo que representa as chuvas intensas, utilizado em cada

trabalho, deve ser de fácil manuseio, mantendo a segurança em seus resultados que devem ser o mais próximo à realidade (MELLO et al., 2001).

Segundo Villela e Mattos (1975), o modelo matemático clássico mais utilizado é expresso pela Equação 1.

$$i_m = \frac{k TR^a}{(t+b)^c} \quad (1)$$

em que:

i_m = intensidade de precipitação média máxima (mm h^{-1});

k , a , b e c = parâmetros de ajuste locais;

TR = período de retorno (ano);

t = tempo de duração da chuva (min).

Mello et al. (2001) ressaltam a importância da comparação entre os modelos que expressam a relação IDF, em situações, em que escassez de dados é maior, podendo resultar em informações confiáveis e precisas. Os autores empregaram, em seu trabalho, envolvendo as práticas de conservação do solo, os modelos exponencial e linear (Equação 2 e 3).

$$i_m = e^{B+D TR^x + E(\text{Ln } t)^2 + \varepsilon} \quad (2)$$

$$i_m = A_1 \text{Ln}(TR) + B_1 \text{Ln}(t) + C_1 [\text{Ln}(t)]^2 + D_1 \text{Ln}(TR) \text{Ln}(t) + \varepsilon \quad (3)$$

em que:

B , D , x , E , A_1 , B_1 , C_1 e D_1 = parâmetros de ajuste locais;

ε = erro produzido pelo ajuste

Os autores concluíram que o modelo exponencial gerou menores erros, originando melhores estimativas da intensidade máxima de chuvas. O modelo linear, apesar de apresentar um coeficiente de determinação r^2 maior que 0,99, foi considerado não confiável para aplicação em estudos de chuvas intensas por apresentar os maiores erros médios e, também, a maior amplitude de erros comparado ao modelo exponencial.

Pfaffstetter (1957), em seu trabalho de determinação das curvas IDF, realizou o ajuste do modelo representado pela Equação 4.

$$P = R[a t + b \text{Log}(1+c t)] \quad (4)$$

em que:

P = precipitação pluvial máxima (mm);

a , b e c = parâmetros de ajuste local;

R = fator de probabilidade.

O fator de probabilidade (R) é definido pela Equação 5, ou seja:

$$R = TR^{(\alpha+\beta/TR)^\gamma} \quad (5)$$

em que:

α e β = valores que dependem da duração da precipitação;

γ = constante adotada para todos os postos igual a 0,25.

A Equação 4 fornece a precipitação para período de retorno de 1 ano e a Equação 5 permite estimar a chuva para outros tempos de retorno (BERTONI; TUCCI, 2001).

Bertoni e Tucci (2001) e Righetto (1998) descreveram a metodologia de Bell, que associa a precipitação máxima para determinado tempo de duração e

período de retorno a uma precipitação padrão de 60 min de duração e 2 anos de período de retorno (Equação 6).

$$h_{(t_d; TR)} = (a \ln(TR) + a_1) (a_2 t_d^b - a_3) h_{(60,2)} \quad (6)$$

em que:

$h_{(t_d; TR)}$ = altura de chuva com duração t_d e período de retorno TR (mm);

a , a_1 , a_2 , a_3 e b = parâmetros regionais de ajuste do modelo;

$h_{(60,2)}$ = precipitação intensa com duração de 60 minutos e TR de 2 anos.

Sampaio (2011) comentou que a metodologia de Bell se baseia em séries de chuva, observadas em vários continentes, destacando que o valor máximo das chuvas está relacionado a células convectivas com características similares no mundo todo; assinalando isso como uma desvantagem do método, já que as equações são obtidas de valores médios e não específicos para uma determinada localidade. O autor, também, apontou como desvantagem que o valor da precipitação máxima obtida é válido apenas para durações entre 5 a 120 min.

Mello et al. (2003b) comentaram que a principal característica do método de Bell é o ajuste da equação, que pode ser regionalizada e que alguns autores optam pelo emprego do modelo de Bell, para o Brasil, atribuindo valores fixos aos parâmetros de ajuste, variando apenas o período de retorno e a intensidade da chuva.

Os mesmos autores desenvolveram ajustes do modelo de Bell para as regiões Norte, Sul, Centro, Leste e Triângulo Mineiro e obtiveram desvio máximo de 7,6% entre os valores das precipitações observadas e estimadas.

De acordo com estudo realizado por Oliveira, Antonini e Griebeler (2008), o método de Bell se mostrou adequado, para estimar precipitações máximas de curta duração, sendo uma alternativa na determinação das chuvas

críticas de projeto quando se dispõem de séries históricas com poucos anos de observação. Oliveira et al. (2011) aplicaram o modelo de Bell para estações no Estado do Mato Grosso e constataram que, comparado com as relações IDF geradas pelo modelo clássico (apresentado na Equação 1), o modelo de Bell superestimou a chuva de projeto.

Em estudo desenvolvido por Chen (1983), o autor propôs uma equação de intensidade-duração-frequência utilizando três alturas de precipitação: chuva com duração de 1 hora e período de retorno de 10 anos; chuva com duração de 24 horas e período de retorno de 10 anos; chuva com duração de 1 hora e período de retorno de 100 anos. De acordo com o autor, verificou-se que, nas precipitações a partir da duração de 2 horas, as relações de duração em relação à chuva de 24 horas variaram em função da relação da chuva de 1 hora e à de 24 horas. A Equação 7, proposta por Chen (1983), foi desenvolvida para as séries anuais.

$$h_{(td, TR)} = \frac{a h_{(1;10)} \text{Log} \left\{ 10^{(2-w)} \left[\text{Ln} \frac{TR}{TR-1} \right]^{(1-w)} \right\}}{(d+b)^c} \frac{d}{60} \quad (7)$$

em que:

$h_{(td, TR)}$ = altura de chuva com duração d em min (mm);

$h_{(1;10)}$ = altura de chuva com uma hora de duração e período de retorno de 10 anos;

a , b e c = parâmetros obtidos em função da relação $h_{(1; TR)}$ e $h_{(24; TR)}$;

w = relação entre a chuva de uma hora de duração e período de retorno de 100 anos ($h_{(1;100)}$) e a chuva de uma hora de duração e período de retorno de 10 anos ($h_{(1;10)}$).

Hernandez (1991) propôs uma adaptação ao modelo de Chen (1983), diante da necessidade da obtenção de três alturas de chuva, a rede escassa de pluviógrafos tornaria difícil a estimativa de chuvas de curta duração, para maiores períodos de retorno, como acontece com a altura de chuva de 1 hora de duração e período de retorno de 100 anos. Sendo assim, Hernandez (1991) substituiu a altura de chuva de 1 hora pela altura de 24 horas e manteve o período de retorno de 100 anos, considerando, então, as seguintes alturas de precipitação: chuva com duração de 1 hora e 10 anos de período de retorno; chuva com duração 24 horas e 10 anos de período de retorno e chuva de duração 24 horas e 100 anos de período de retorno (Equação 8).

$$h_{(td;TR)} = \frac{a D h_{(24;10)} \text{Log}[10^{(2-w)} TR^{(1-w)}]}{(d+b)^c} \left(\frac{d}{1440} \right) \quad (8)$$

em que:

w = relação entre a chuva de 24 horas de duração e período de retorno de 100 anos e a chuva de 24 horas de duração e período de retorno de 10 anos ($h_{(24; 100)} / h_{(24; 10)}$).

O d é definido pela Equação 9.

$$d = 24 \frac{h_{(1;10)}}{h_{(24;10)}}; \quad (9)$$

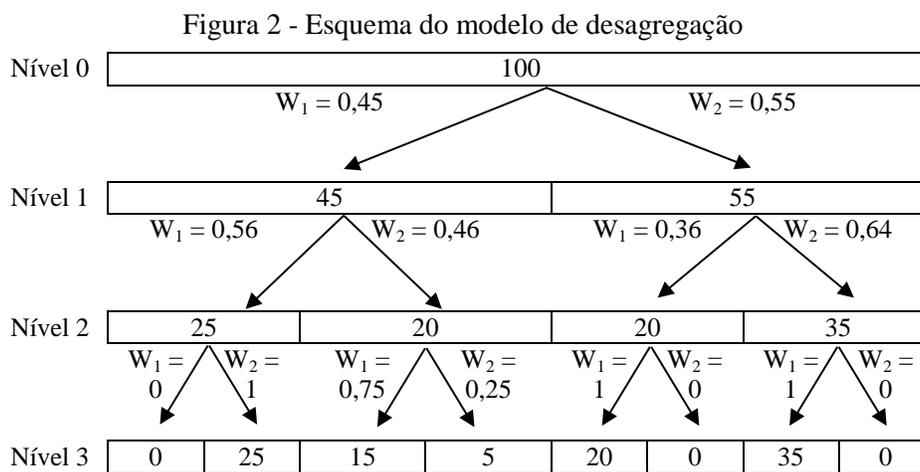
Levando em consideração que se pode admitir uma relação constante entre chuva máxima de 24 horas e de 1 dia, as alturas de chuva de 24 horas, para um determinado período de retorno, podem ser substituídas por alturas de chuva com o mesmo período de retorno, mas duração de 1 dia (HERNANDEZ, 1991). Portanto o único dado de pluviógrafo necessário, para a aplicação do método

proposto por Hernandez (1991), é o de o de chuva com duração de uma hora e período de retorno de 10 anos (FALAGUASTA; GENOVEZ, 2003).

2.4 Técnicas de desagregação de chuvas

Em razão da maior disponibilidade de informações extraídas de pluviômetros, foram desenvolvidas algumas técnicas de obtenção de chuva de menor duração, a partir da chuva de um dia, sendo, portanto, possível definir a relação IDF para áreas com características homogêneas (ADAMOWSKI; ALILA; PILON, 1996; MELLO et al., 2001, 2003a; OLIVEIRA et al., 2008).

Em um estudo realizado por Olsson (1998), foi avaliado o modelo de cascata, para a desagregação temporal de chuvas, cuja proposta parte de uma rede de ramificação do volume de chuva em sucessivos volumes menores. Um determinado volume de chuva (V) e tempo de duração (T) é representado por uma caixa (módulo), se $V = 0$, o módulo é chamado de seco e se $V > 0$, o módulo é chamado de molhado. A Figura 2 representa o esquema do modelo empregado por Olsson (1998) para desagregar chuvas de maior duração em chuvas de menores durações.



A desagregação se dá a partir do módulo molhado que é dividido em dois submódulos, em que o volume total é redistribuído de acordo com dois pesos multiplicativos W_1 ($0 \leq W_1 \leq 1$) e W_2 ($0 \leq W_2 \leq 1$); de modo que $W_1 + W_2 = 1$ e os valores dos módulos subsequentes são determinados assim: $V_1 = W_1 + V$ e $V_2 = W_2 + V$ (OLSSON, 1998).

O autor descreve, ainda, que a redistribuição do volume se dá nas três seguintes situações: se o volume total ocorreu em T_1 , o peso W_1 é, então, atribuído ($W_1 = 1$ e $W_2 = 0$) mostrando uma probabilidade 1/0. A segunda situação é, quando ocorre o inverso, o volume total ocorre em T_2 sendo os pesos distribuídos da seguinte maneira $W_1 = 0$ e $W_2 = 1$, mostrando uma probabilidade 0/1. Na terceira situação, é quando V é diferente de zero ($V \neq 0$) tanto em T_1 quanto em T_2 sendo os pesos considerados: $0 < W_1 < 1$ e $0 < W_2 < 1$ e a probabilidade x/x .

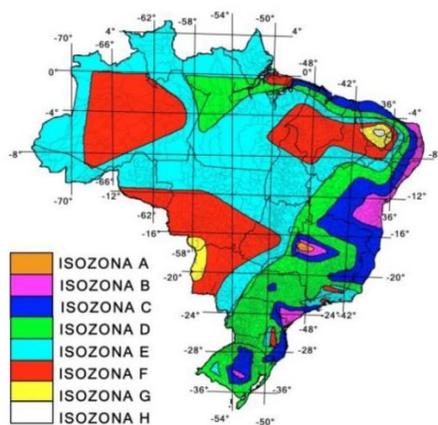
Souza e Silva (1998) apresentaram uma técnica alternativa, o método da Curva Normalizada de Precipitação (CNP) que utiliza dados diários de precipitação pluvial e associa o percentual acumulado do total de chuva e o percentual acumulado do número de dias com chuva. Os autores concluíram que a metodologia foi útil em áreas onde não se dispõem de registros pluviográficos, destacando, ainda, os resultados satisfatórios de sua aplicação em diversas partes do mundo.

Segundo Fachine Sobrinho (2011), o método das Isozonas foi proposto por Torrico, ao verificar que as precipitações de 24 horas e de 1 hora, de diferentes estações pluviográficas, apresentavam no prolongamento das semirretas de altura de chuva com relação ao tempo de duração, uma tendência a cortar o eixo das abcissas em um mesmo ponto para determinadas áreas geográficas as quais chamou de Isozonas.

Essa tendência significa que, em cada área semelhante, a relação entre as precipitações de 1 hora e de 24 horas, para um mesmo período de retorno, independe das alturas de precipitação (OLIVEIRA et al., 2008).

O território brasileiro foi dividido em oito zonas (FIGURA 3) que, relacionadas a um período de retorno, permitem estimar precipitações com durações inferiores a 24 horas, por meio de coeficientes percentuais como pode ser visto na Tabela 1, devendo, inicialmente, converter a chuva de 1 dia em chuva de 24 horas multiplicando por um fator de 1,095 com desvio padrão de $\pm 6,6\%$ (FECHINE SOBRINHO, 2011; OLIVEIRA et al., 2008; SANTOS; LUCENA; CARVALHO, 2015).

Figura 3 - Mapa da distribuição espacial das isozonas



Fonte: Santos, Lucena e Carvalho (2015)

Tabela 1 - Coeficientes relativos às isozonas de igual relação e diferentes tempos de retorno.

Zonas	Período de retorno em anos						
	5	10	20	50	100	5 a 50	100
	1h/24h					6 min/24h	
A	36,2	35,8	35,5	35,0	34,7	7,0	6,3
B	38,1	37,8	37,4	36,9	36,6	8,4	7,5
C	40,1	39,7	39,3	38,8	38,4	9,8	8,8
D	42,0	41,6	41,2	40,7	40,3	11,2	10,0
E	44,0	43,6	43,2	42,6	42,2	12,6	11,2
F	46,0	45,5	45,1	44,5	44,1	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,0	46,4	45,9	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,3	47,8	16,7	14,9

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2008)

O método de desagregação de chuvas que mais tem sido utilizado na literatura é o proposto pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (SÃO PAULO, 1980), chamado método das relações de duração. A proposta foi feita a partir de um estudo que analisou a relação entre alturas pluviométricas das chuvas máximas de 1 dia e de 24 horas. Os resultados apontaram que, no que se refere à altura pluviométrica, a média das chuvas de 1 e 2 dias pode ser considerada como uma estimativa bastante representativa da chuva de 24 horas de mesma frequência. Apontaram, também, que há uma relação constante, com valor de 1,14, entre as alturas pluviométricas máximas das chuvas de 1 dia e de 24 horas; esse valor, praticamente, coincide com o valor de 1,13 adotado pelo U. S. Weather Bureau¹ para a mesma relação.

O estudo, realizado por São Paulo (1980), afirmou, ainda, que para diferentes locais, existe uma grande similaridade nas relações entre precipitações médias máximas de diferentes durações, analisando, também, as relações das

¹ Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos que compõe a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), unidade operacional do Departamento de Comércio.

seguintes alturas pluviométricas: 5 min/30 min; 10 min/30 min; 15 min/30 min; 20 min/30 min; 25 min/30 min; 30 min/1h; 1h/24h; 6h/24h; 8h/24h; 10h/24h e 12h/24h.

Para cada uma das relações analisadas, encontraram-se valores próximos, para períodos de retorno entre 2 a 100 anos, utilizando o valor da média como fator para se obter as chuvas com menores durações. Além das constatações do estudo realizado, o uso de um valor bem próximo, para uma mesma relação, por uma instituição de renome, fornece mais embasamento, confiabilidade e justificativa lógica para a utilização do fator 1,14 em dados de pluviômetro para obtenção da chuva de 24 horas de mesma frequência.

A metodologia de Beltrame considera a existência de duas relações de validade regional ou subregional. A relação regional, representada por $X(TR,d)/X_m(d)$, possibilita a estimativa de valores adimensionais com o período de retorno (TR), dos totais precipitados com qualquer duração (d). A relação subregional, representada por $X_m(d)$, permite que seja estimada a média dos totais precipitados em determinada duração de chuva. O produto dessas duas relações, $X(TR,d)/X_m(d)$ por $X_m(d)$, fornece o valor da altura máxima precipitada, para determinado período de retorno e duração, para se obter a intensidade máxima, divide-se $X(TR,d)$ por d (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008).

A metodologia empregada por Robaina e Peiter parte do pressuposto de que a expressão matemática, representada pela Equação 10, define a relação entre a precipitação máxima anual em determinada duração e a precipitação anual no período de 24 horas (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008; SAMPAIO, 2011).

$$P(t,TR) = P(24) F(t) F(TR) \quad (10)$$

em que:

$P(t, TR)$ = lâmina total precipitada de duração e período de retorno pré-estabelecido;

$P(24)$ = lâmina precipitada média com duração de 24 horas;

$F(t)$ = função de desagregação;

$F(TR)$ = função do período de retorno.

As funções de desagregação e período de retorno são obtidas pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$F(t) = 0,0000768 t + 0,1396 \ln(1 + 0,3333 t) \quad (11)$$

Devendo o tempo de duração ser expresso em minutos

$$F(TR) = 0,4297^m TR^m \quad (12)$$

O expoente m é função da duração da precipitação, obtido pela Equação 13.

$$m = \frac{0,2086 t}{(t + 4,5969)} \quad (13)$$

2.5 Distribuições de probabilidade

As variáveis hidrológicas assumem valores característicos do local e do tempo considerados na análise e na aleatoriedade dos eventos, por isso, estão sujeitas às leis probabilísticas, sendo fundamental a análise estatística (NAGHETTINI; PINTO, 2007; RIGHETTO, 1998).

A análise de frequência de dados de estações pluviométricas é uma ferramenta que possibilita conhecer o comportamento da precipitação em determinada frequência de ocorrência por meio de distribuições de probabilidade. O emprego dessas distribuições possibilita demonstrar que os

dados observados no passado seguem uma distribuição teórica, permitindo seu uso para inferir a probabilidade de ocorrência associada a diferentes frequências. Lembrando que não se tratam de representações exatas do processo natural, mas, sim, da tentativa de prever sua ocorrência e os efeitos causados de forma que mais se aproxime a realidade (DAMÉ et al., 1996).

Para definir qual distribuição se ajusta melhor à série de dados observados, utiliza-se de testes de aderência, em que se analisam o ajuste das frequências teóricas às observadas (FRANCO et al., 2014). O procedimento consiste na determinação da frequência teórica pelo ajuste dos parâmetros da distribuição de probabilidade com base nas observações. Verificada a aderência da frequência teórica à observada, permite-se a utilização da distribuição de probabilidade avaliada na extrapolação dos valores de precipitação extrema associada a uma probabilidade para períodos superiores à série histórica (BACK, 2001).

Dentre as distribuições de probabilidade empregadas no estudo de chuvas extremas estão a Log-Normal a 2 e 3 parâmetros, Fisher-Tippet tipo I (Gumbel), Assintótica de Valores Extremos do Tipo II (Fréchet), Generalizada de Valores Extremos (GEV) e Pearson Tipo III (BACK, 2001). Naghettini e Pinto (2007) citam, ainda, outras distribuições utilizadas na modelagem de eventos extremos como a assintótica de máximos do tipo III (Weibull), Gama a 2 e 3 parâmetros e Log-Pearson Tipo III

A distribuição de Gumbel é a que vem sendo mais utilizada, para a análise de frequência na determinação de relações IDF de precipitações intensas, pela simplicidade do modelo matemático e pela aderência desta distribuição aos dados observados (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Silva et al. (1999) realizaram os ajustes dos parâmetros das distribuições de Gumbel, Log-Normal a 2 e 3 parâmetros, Pearson e Log-Pearson tipo III,

para dados de chuva dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, obtendo melhor ajuste nas durações consideradas para a distribuição de Gumbel.

Silva et al. (2002) testaram as distribuições de Gumbel, Log-Normal a 2 e 3 parâmetros, Pearson e Log-Pearson III, para o ajuste de modelos teóricos de distribuição de probabilidade a dados de chuvas intensas do Estado da Bahia. Concluíram pelo teste de Kolmogorov-Smirnov em um nível de significância de 20% que, exceto o modelo Log-Pearson III que apresentou ajuste inadequado, todos os demais apresentaram bom comportamento com destaque, para a distribuição de Gumbel, que proporcionou melhor ajuste, para a maior parte das combinações entre estações e durações estudadas, sendo possível determinar as relações IDF para 19 estações do estado.

Silva et al. (2003), com o objetivo de ajustar modelos teóricos de distribuição de probabilidade aos dados de chuvas intensas e gerar as relações IDF para 10 estações pluviométricas no Estado do Tocantins, compararam os resultados obtidos pelas distribuições de Gumbel, Log-Normal a 2 e 3 parâmetros, Pearson e Log-Pearson III. Verificaram pelo teste de Kolmogorov-Smirnov que o melhor ajuste, para a maior parte das combinações entre estações e durações estudadas, ocorreu pela distribuição de Gumbel.

O grau de ajuste das distribuições de probabilidade é influenciado pela metodologia de estimativa dos parâmetros da distribuição, as mais utilizadas em estudos de chuvas intensas são: método dos momentos, máxima verossimilhança e mínimos quadrados (FRANCO et al., 2014).

O método da máxima verossimilhança é considerado o mais eficiente para grandes amostras por apresentar menor variância dos estimadores, entretanto a utilização é complexa. O método dos momentos apresenta maior qualidade, em pequenas amostras, contudo é um método que apresenta facilidade em sua utilização. O método dos mínimos quadrados, considerado de aplicação mais adequada, busca o melhor ajuste do modelo aos dados

observados, minimizando a soma dos quadrados dos erros (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Em estudo realizado por Mello e Silva (2005), para 7 estações pluviométricas, localizadas na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, foram testados dois métodos de estimativa de parâmetros da distribuição de Gumbel. Por meio do teste do Qui-quadrado, observou-se que tanto o método da máxima verossimilhança quanto o método dos momentos apresentaram ajustes adequados, porém o método da máxima verossimilhança proporcionou valores menores, conferindo a este maior precisão no ajuste da distribuição de Gumbel.

Beijo et al. (2003) utilizaram os métodos dos momentos e da máxima verossimilhança, para a estimativa dos parâmetros da distribuição de Gumbel, para a região de Jaboticabal, no Estado de São Paulo. Por meio do teste Kolmogorov-Smirnov, verificou-se a adequabilidade de ambos os métodos com valores próximos entre si. Entretanto a estimativa de chuva apresentou valores menores, quando se utilizou o método da máxima verossimilhança, para níveis de probabilidade menores que 50% nos meses de fevereiro, junho, julho e agosto.

Back (2001), em seu trabalho com dados de chuvas em Santa Catarina, observou que a distribuição de Gumbel com o ajuste de parâmetros pelo método dos momentos apresentou fácil estimativa, da mesma maneira, Caldeira et al. (2015) com dados do Estado do Rio Grande do Sul.

Diversos autores se dedicaram a identificar a melhor distribuição de probabilidade, a ser utilizada, na modelagem de eventos extremos em distintas regiões do Brasil e, por meio do teste Kolmogorov-Smirnov, verificaram uma melhor aderência da distribuição de Gumbel comparada às outras distribuições. Dentre os autores, pode-se citar Oliveira et al. (2000) para algumas localidades no Estado de Goiás; Freitas et al. (2001) para estações nos Estados de Minas Gerais e limites da Bahia e Espírito Santo; Oliveira et al. (2005) para localidades

de Goiás e Distrito Federal; Santos et al. (2009) para o Estado do Mato Grosso do Sul e Garcia et al. (2011) para o Estado do Mato Grosso.

2.6 Geoprocessamento e interpoladores empregados na espacialização das chuvas

O geoprocessamento possibilita a obtenção de informações sem que se tenha contato com a área de estudo, é um conjunto de técnicas relacionadas ao tratamento da informação espacial. O sistema de informação geográfica (SIG) é uma ferramenta, para a realização do geoprocessamento, trata-se de uma série de operações para adquirir, armazenar, manipular, visualizar e analisar dados (SILVA et al., 2008). Desta maneira, a aplicação do geoprocessamento, em estudos de precipitações, ocorre por meio das técnicas de espacialização e interpolação de dados relativos a tais eventos, possibilitando a confecção de mapas com informações aplicáveis a projetos hidráulicos (MELLO et al., 2008).

A estimativa do valor de uma informação em um local não amostrado dentro da área é denominada interpolação (CARVALHO; ASSAD, 2005). Devido à importância do conhecimento das relações IDF de chuvas intensas e pela dificuldade na sua determinação, a interpolação facilita a obtenção de tais informações em locais desprovidos de monitoramento (CECÍLIO; PRUSKI, 2003).

A determinação de características de uma região traz junto a preocupação da escolha da técnica e estimadores que se mostre mais adequada à estimativa de informação (WOJCIECHOWSKI et al., 2009). Existem vários métodos de interpolação que podem ser utilizados para espacialização dos parâmetros das relações IDF de chuvas intensas. De acordo com Souza et al. (2011), os mais utilizados para este tipo de representação são: inverso ponderado da distância, krigagem, curvatura mínima ou spline, vizinho mais próximo, triangulação com interpolação linear, médias móveis e polinômio local.

Em seu trabalho, Cecílio e Pruski (2003) utilizaram a metodologia do inverso de potências da distância para a interpolação dos parâmetros das relações IDF de chuvas intensas do Estado de Minas Gerais. Com informações de 50 estações pluviográficas, utilizaram cinco diferentes expoentes da distância, totalizando 20 interpolações para cada estação, realizando todas as combinações possíveis entre os valores interpolados, obtendo 625 valores diferentes de intensidade de chuva, referentes às distintas combinações. Apenas 28 combinações apresentaram erro médio percentual pequeno, ou seja, recomendadas para a interpolação dos parâmetros, sendo a mais indicada a que combina os parâmetros “ k ” e “ c ” da Equação 1 interpolados com o inverso da quinta potência da distância, “ a ” interpolado com o inverso da distância e “ b ” interpolado com o inverso do cubo da distância.

Cecílio et al. (2009) realizam uma avaliação de metodologias para a interpolação dos parâmetros das equações de chuvas intensas para o Estado do Espírito Santo. Os valores de intensidade de precipitação estimados, por meio da interpolação com inverso de potências da distância, foram comparados com os valores observados para diferentes durações e períodos de retorno. Para essa avaliação, utilizou-se da técnica de validação cruzada, da qual se extrai uma estação da base de dados e, após a interpolação realizada, recoloca-se a estação, anteriormente, excluída e escolhe-se outra para extrair e realizar a interpolação novamente. Esse procedimento foi realizado, separadamente, para 20 estações pluviográficas, utilizando quatro expoentes diferentes da distância (2, 3, 4 e 5), concluindo que o inverso da quinta potência da distância apresentou melhores resultados na interpolação dos parâmetros por proporcionar menores erros médios percentuais.

Senna et al. (2010) avaliaram métodos para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas por meio do interpolador inverso de potências da distância e vizinho mais próximo, para o Estado do Espírito Santo. Concluíram

que a estimativa de intensidades máximas médias apresentou melhores resultados pelo método do vizinho mais próximo que gerou erros médios percentuais menores.

Fernandes et al. (2015), em estudo para o Estado do Rio de Janeiro, avaliaram 625 diferentes combinações entre os quatro parâmetros da relação IDF expressa pela Equação 1 interpolados com a utilização da metodologia do inverso da potência da distância, empregando cinco diferentes potências. Os autores verificaram que as combinações entre os parâmetros interpolados, utilizando-se o inverso das cinco diferentes potências da distância, apresentaram tendência de subestimativa do valor da intensidade máxima média de precipitação pluvial. A interpolação de “*k*”, “*a*” e “*c*” com o inverso da primeira potência da distância, e “*b*” com o inverso da quinta potência da distância, é recomendada por ser a combinação que apresentou menor variação entre o erro mínimo e o máximo, além de baixos valores de erro percentual máximo.

Mello et al. (2003a) testaram interpoladores para a espacialização dos parâmetros da equação de chuva. Os autores apontaram o método da Krigagem como melhor interpolador por apresentar menores erros na determinação da informação quando comparado com o método do inverso do quadrado da distância.

Marcuzzo, Cardoso e Mello (2010) compararam os métodos da Krigagem e da interpolação matemática por Spline, para a distribuição espacial da chuva, utilizando dados da média anual de um período de 35 anos para a região metropolitana de Goiânia e seu entorno. Definiram que o método da Krigagem apresentou melhores resultados por gerar menor número de isolinhas, ou seja, o nível de detalhamento se mostrou mais adequado para a interpretação das diferentes zonas de precipitação.

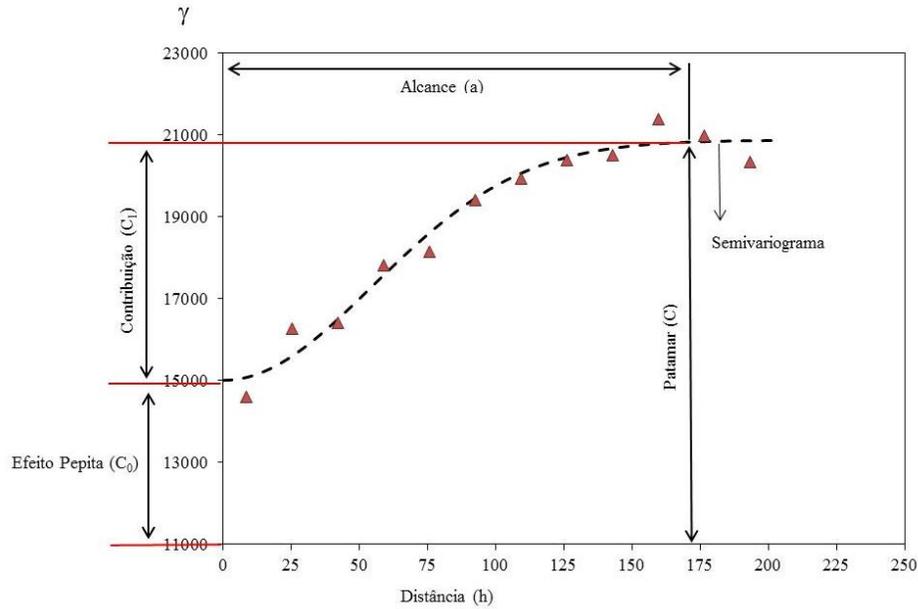
Souza et al. (2011), em estudo realizado no território identidade Portal do Sertão, Bahia, compararam os métodos de curvatura mínima, inverso ponderado da distância, triangulação com interpolação linear e Krigagem, apontaram o último apresentando melhores resultados na interpolação aplicada à espacialização de intensidades de chuvas, gerando as isoietas condizentes aos dados amostrados.

Silva et al. (2011) mostraram que o método da Krigagem apresentou erros percentuais médios menores que o método do inverso da potência da distância na interpolação espacial da precipitação no Estado do Espírito Santo.

A Krigagem é um interpolador geoestatístico que utiliza das propriedades estatísticas e estimativas de configuração espacial de pontos amostrados, para estimar pontos em que o valor é desconhecido (KANEGA JÚNIOR, 2007). Essa metodologia apresenta várias técnicas de estimativa, sendo a mais usual a Krigagem ordinária. Os recursos computacionais vêm fornecendo suporte para aplicação das técnicas geoestatísticas e sua utilização tem sido vista nas mais diversas áreas como na agricultura, cartografia, climatologia, hidrogeologia, pedologia, entre outras (LANDIM, 2006).

A ferramenta básica da geoestatística é o semivariograma que representa a estrutura de um conjunto de dados de uma variável regionalizada (LUCAS et al., 2014). Para a construção de um semivariograma, são usadas as diferenças ao quadrado de pares de pontos separados por intervalos regulares de uma mesma distância, denominada de semivariância, podendo ser considerada para cálculo apenas uma ou várias direções (Norte-Sul, Leste- Oeste) da variável em questão (LANDIM, 2006). Cada valor de semivariância obtido, em função da distância entre os pontos amostrais, é plotado o gráfico denominado semivariograma (FIGURA 4).

Figura 4 - Semivariograma



Fonte: Camargo (1998)

De acordo com Camargo (1998), as principais grandezas que caracterizam o semivariograma são:

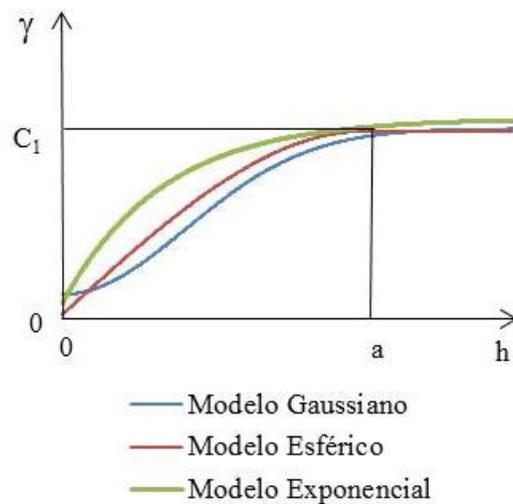
- Alcance (a) : distância dentro da qual ocorre a dependência espacial das amostras.
- Patamar (C) : é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (a) . Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial, pois a distância já não apresenta influência no valor da variância.
- Efeito Pepita (C_0) : representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras idealmente, $\gamma(0) = 0$. Entretanto, na prática, à medida que a

distância entre os pontos amostrais h tende para zero, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita.

- d) Contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

Com base no semivariograma experimental, podem-se ajustar os modelos teóricos, sendo os mais comumente utilizados o Esférico, o Exponencial e o Gaussiano (FIGURA 5).

Figura 5 - Modelos teóricos que podem ser aplicados no ajuste do semivariograma



Fonte: Camargo (1998)

Os modelos teóricos ajustados para descrever o semivariograma são empregados na interpolação empregando a técnica da Krigagem. Para isso, é realizada a soma de amostras adjacentes, determinando um peso para cada uma, por meio da correlação de dados estruturais, objetivando calcular a melhor estimativa e reduzindo a variância do erro (TEIXEIRA et al., 2011).

Sendo a estimação dos parâmetros das relações IDF de chuvas intensas, baseada em dados de chuvas máximas diárias, Vieira, Lombardi e Burrows (1991) optaram pela utilização da Krigagem, na esperança de, também, encontrar uma dependência espacial nos valores dos parâmetros locais. Os autores mapearam as chuvas máximas diárias, para 232 estações no Estado de São Paulo, obtendo melhor ajuste do semivariograma pelo modelo exponencial. Mello et al. (2003a) compararam o interpolador inverso do quadrado da distância e Krigagem para o Estado de São Paulo na espacialização dos parâmetros da equação de chuvas. Obtiveram menores erros médios para a Krigagem, apresentando melhor ajuste do semivariograma pelos modelos exponencial (para os parâmetros “ k ”, “ b ”, “ c ”) e esférico (para o parâmetro “ a ”) por apresentarem baixo efeito pepita e patamar elevado, capazes de produzir uma estrutura de dependência espacial.

2.7 Histórico de trabalhos de definição das relações IDF de chuvas intensas

O estudo de chuvas intensas no Brasil tem como precursor o trabalho de Pfafstetter (1957) em que foram ajustadas relações IDF de 98 estações distribuídas por todo o país.

Depois da publicação do trabalho de Pfafstetter, houve uma grande lacuna de trabalhos com o enfoque na definição de relações IDF, constando novas publicações, somente a partir da década de 1980, com o trabalho de Denardin et al. (1980), no ajuste das relações IDF, para 14 localidades no Estado do Rio Grande do Sul, e Denardin e Freitas (1982) que realizaram o trabalho de obtenção das relações IDF de chuvas intensas para 80 estações distribuídas por todo o território brasileiro.

Na década de 1990, Fendrich (1998) gerou os gráficos das relações IDF, a partir da obtenção das equações de chuvas intensas, para 31 estações do Estado do Paraná, utilizando séries históricas com períodos entre 10 e 37 anos. Para o

Estado de São Paulo, Oliveira, Fogaccia e Almeida (1998) realizaram uma caracterização preliminar das chuvas intensas, avaliando a frequência de ocorrência desses eventos para 6 cidades. Martinez Junior e Magni (1999) realizaram o estudo, para 30 estações pluviográficas do Estado de São Paulo, esse material possui atualização e sua última publicação é do ano de 2014, na qual foram incorporadas estações de diferentes autores e contemplou regiões em que as equações, ainda, não existiam, analisando 52 estações em 43 municípios (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 2014).

Pinto et al. (1996) estimaram os parâmetros das relações IDF de chuvas intensas para 29 estações do Estado de Minas Gerais. Silva et al. (1999) realizaram o trabalho de obtenção dos parâmetros das relações IDF para 13 localidades do Estado do Rio de Janeiro e para 9 localidades do Estado do Espírito Santo. Davis e Naghettini (2000) analisaram os dados de 44 estações do Estado do Rio de Janeiro, utilizando observações históricas de 8 a 49 anos, para definir 4 regiões de características homogêneas relativas à precipitação, verificando, dessa maneira, melhores estimativas de precipitação quando comparada aos modelos locais.

O Brasil dispõe de um número considerável de relações IDF determinadas para diversas localidades. Dentre as quais se podem citar os trabalhos realizados por Oliveira et al. (2000, 2005) para o Estado de Goiás e Distrito Federal; Nerilo et al. (2002) para Santa Catarina; Silva et al. (2003) para Tocantins; Santos et al. (2009) para Mato Grosso do Sul; Oliveira et al. (2011) para Mato Grosso; Fernandes et al. (2015) para o Rio de Janeiro. Além do trabalho de Freitas et al. (2001) para os estados de Minas Gerais e estações limítrofes dos Estados da Bahia e Espírito Santo.

Para a região Nordeste destacam-se os trabalhos realizados por Silva et al. (2002) para a Bahia; Coutinho et al. (2010) e Silva et al. (2012) para Pernambuco; Aragão et al. (2013) para Sergipe; Fachine Sobrinho et al. (2014)

para as estações de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha no Sul do CE e Campos et al. (2014) para o Estado do Piauí.

Nota-se um crescente aumento dos trabalhos com o objetivo de se determinar as relações IDF, em todas as regiões do país, havendo uma preocupação, também, na escolha do melhor método e melhor distribuição de probabilidade na intenção de se obter resultados cada vez mais confiáveis.

2.8 Fenômenos atmosféricos atuantes na Região Nordeste do Brasil

A região Nordeste apresenta grande irregularidade de precipitação que se explica pelas suas características fisiográficas e influência de diversos sistemas atmosféricos que, historicamente, provocaram grandes secas ou grandes cheias (ARAÚJO et al., 2008; MARENGO, 2007).

Os principais sistemas atmosféricos de grande escala que atuam na região Nordeste são os vórtices ciclônicos de ar superior (VCAS), zona de convergência intertropical (ZCIT) e sistemas frontais (ARAÚJO et al., 2008; MOLION; BERNARDO, 2002). Dentre os mecanismos de mesoescala estão às perturbações ondulatórias dos ventos Alísios (POA ou, também, distúrbios de leste), complexos convectivos e brisas marítimas e terrestres. Considerando a microescala atuam as circulações orográficas e pequenas células convectivas (MOLION; BERNARDO, 2002).

De acordo com Araújo et al. (2008), as precipitações causadas por influência do sistema atmosférico VCAS ocorrem, no seu entorno, no centro, o movimento descendente de massas de ar inibe a formação de nuvens podendo manter-se atuante durante meses. Os VCAS são encontrados de forma irregular quanto à posição, mas atuam, em toda a região Nordeste, produzindo chuvas intensas e, também, grandes estiagens. O aparecimento de VCAS se relaciona, também, com a penetração de frentes frias advindas do Sul e com a posição da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Considerado como o principal sistema atuante na produção de chuvas, ao Norte da região Nordeste, a ZCIT tem forte atuação pelo aumento da temperatura da superfície do mar (TSM) do atlântico sul e pelo enfraquecimento dos alísios de sudeste permitindo o deslocamento mais para o sul provocando chuvas; já, quando a ZCIT fica presa mais ao norte da posição normal, produz grandes secas (MOLION; BERNARDO, 2002). A influência da ZCIT ocorre de fevereiro a maio podendo ser notada, principalmente, no Ceará, Oeste do Rio Grande do Norte e interior da Paraíba e Pernambuco (ARAÚJO et al., 2008).

O avanço de frentes frias ao Sul da região Nordeste é um dos principais mecanismos de formação de chuvas. Durante a primavera- verão do hemisfério sul, os sistemas frontais se posicionam, na porção central da América do Sul, criando a zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma zona de convergência de umidade que causa a estação chuvosa de forma localizada na parte Sul interior do Estado da Bahia, entre os meses de novembro a março (MOLION; BERNARDO, 2002).

Os distúrbios de Leste são a convergência de sistemas frontais com ventos de leste, formando massas de ar instáveis e úmidas pela ação dos ventos alísios de Sudeste gerando as POAs. A intensidade de atuação depende de vários fatores, como TSM, o cisalhamento do vento e dos efeitos da orografia e da circulação de brisa marítima e terrestre que podem ser intensos, propagando-se até 300 km a oeste (ARAÚJO et al., 2008; KOUSKY, 1979; MOLION; BERNARDO, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A região Nordeste do Brasil ocupa uma área de 1.579.098 km², que corresponde a 18% do território brasileiro, com a maior costa litorânea nacional, tendo como limites o Oceano Atlântico ao Norte e ao Leste, os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais ao Sul e os Estados de Goiás, Pará e Tocantins ao Oeste. A região é caracterizada como semiárida, é habitada por 57 milhões de pessoas com uma economia baseada na agricultura do sequeiro (SILVA; PEREIRA; ALMEIDA, 2012).

A temperatura da região varia de 16,8 a 33,8 °C, apresentando como principal característica o baixo nível de precipitação, com menores chuvas ocorrendo no centro do semiárido na faixa dos 400 mm anuais e as maiores na faixa litorânea, atingindo 1800 mm anuais. A alta taxa de evaporação é outra característica marcante da região, podendo ultrapassar 10 mm dia⁻¹ (SILVA et al., 2006, 2009).

O Nordeste Brasileiro recebe a influência de cinco tipos de clima, de acordo com a classificação climática de Köppen os climas atuantes na região são: Tropical Úmido (Af), Clima de Monção (Am), Clima Tropical com estação seca no inverno (Aw), Clima Semiárido de baixa latitude e altitude (BSh) e Clima Desértico quentes de baixa latitude e altitude (BWh) (CARVALHO, 1994). A região apresenta, também, uma subdivisão representada por quatro zonas geográficas: Meio-Norte, Sertão, Agreste e Zona da Mata (SILVA et al., 2011).

O Meio-Norte abrange os Estados do Maranhão e Piauí, é a transição entre a Amazônia e o Sertão, o clima predominante é o Aw, Tropical com estação seca no inverno e chuvas no verão, apresentando valores de precipitação de em média 700 mm anuais e valores mais elevados no litoral. O Noroeste do

Estado do Maranhão recebe influência, também, do Clima de Monção (Am), caracterizado por apresentar elevados índices de precipitação (CARVALHO, 1994; SILVA et al., 2011).

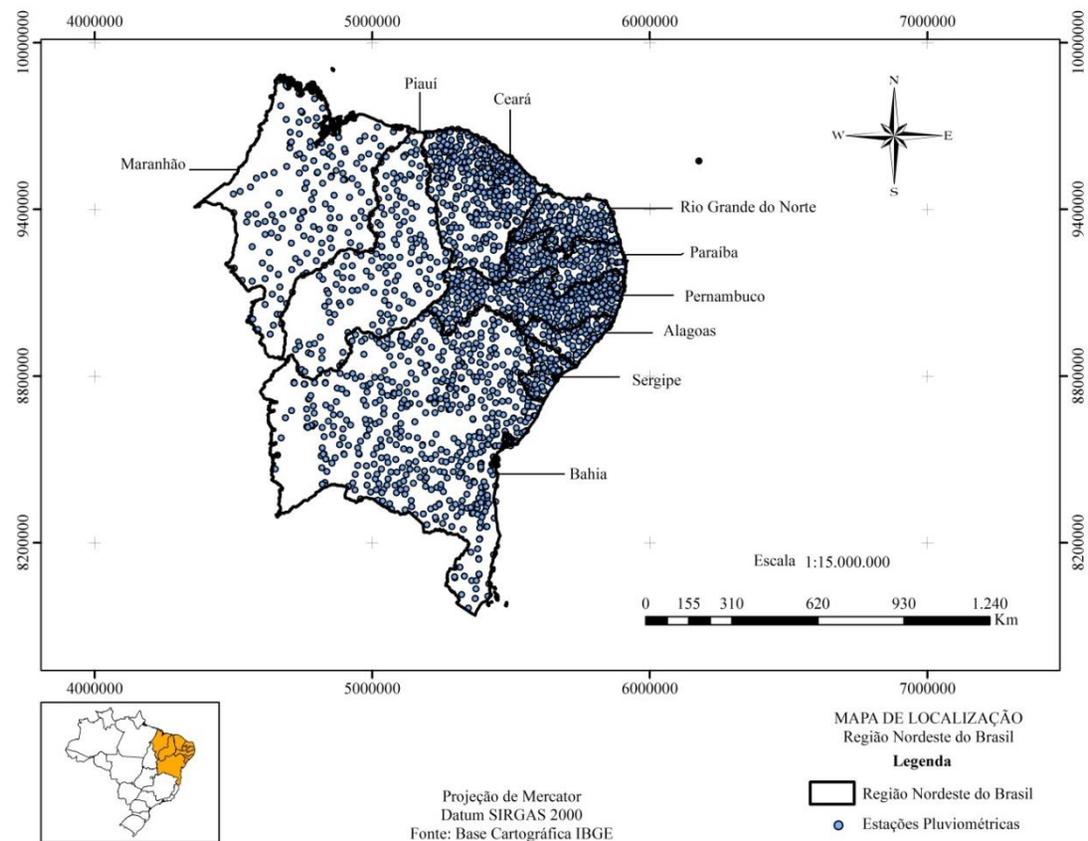
A maior subregião Nordestina é o Sertão que abrange o Estado do Ceará, uma pequena parte de Sergipe e Alagoas, grande parte do Piauí, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. O clima característico da região é o BWh, típico de regiões desérticas, apresentando escassez e irregularidade na distribuição de chuvas, forte insolação e, como consequência, grandes taxas de evaporação (SILVA et al., 2011).

O Agreste é representado por uma estreita faixa entre o Sertão e a Zona da Mata, apresenta o clima BSh, Semiárido, por se tratar de uma região de transição, apresenta características úmidas (presentes na Zona da Mata) e secas (características do Sertão). Esta região tem, no planalto da Borborema, seu principal acidente geográfico, que representa um obstáculo natural para a chegada das chuvas no Sertão (SILVA et al., 2011).

A Zona da Mata é representada pela faixa litorânea Leste Nordestina, apresenta chuvas abundantes, com clima característico Af, Tropical Úmido ou equatorial, não apresenta estação seca e as maiores precipitações ultrapassam os 1500 mm anuais. Em pequenas faixas litorâneas da Bahia, Alagoas e Pernambuco, ocorre, também, a influência do Clima de Monção (Am) caracterizado por elevados índices de precipitação (CARVALHO, 1994).

Neste estudo, foram analisadas 2.042 estações pluviométricas, localizadas na Região Nordeste e, destas, 78 pertencentes ao Estado de Alagoas, 632 ao Estado da Bahia, 394 ao Estado do Ceará, 166 ao Estado do Maranhão, 123 ao Estado da Paraíba, 288 ao Estado de Pernambuco, 165 ao Estado do Piauí, 138 ao Estado do Rio Grande do Norte e 61 ao Estado de Sergipe (FIGURA 6).

Figura 6 - Localização das estações pluviométricas



3.2 Procedimentos metodológicos

As etapas aplicadas como metodologia, deste trabalho, podem ser visualizadas, na Figura 7 e são explicadas a seguir. Inicialmente foram obtidas as séries históricas de precipitação, a partir do banco de dados disponíveis, no site da ANA, por meio do sistema de informação hidrológica Hidroweb². Em seguida, para cada estação pluviométrica, foram selecionadas as precipitações máximas, para cada ano, que compõem a série histórica, obtendo-se, assim, a série anual das chuvas máximas de 1 dia de duração.

Apesar da Organização Mundial de Meteorologia recomendar a seleção de séries com, no mínimo, 30 anos de observação, para a realização, deste trabalho, foram selecionadas as estações que apresentaram séries com observações diárias acima de 15 anos sem falhas. A escolha de série com dados de pelo menos 15 anos, justifica-se por se tratar de um período que pode ser usado para dimensionar pequenas obras de engenharia e as falhas existentes nas séries históricas. A redução para 15 anos possibilitou aumentar a quantidade de estações utilizadas.

Ressalta-se que não foi adotado um período base de análise das estações, pois os dados disponíveis não se apresentam em períodos fixos coincidentes. Assim, o critério utilizado foi o uso de todo o período de dados disponível, para cada estação, desprezando os meses que apresentaram falhas.

As chuvas máximas de 1 dia de duração foram desagregadas em chuvas de menores durações, empregando o método das relações proposto por São Paulo (1980), em que se aplicam os coeficientes multiplicativos apresentados na Tabela 2.

² <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>

Figura 7 - Fluxograma da metodologia aplicada.

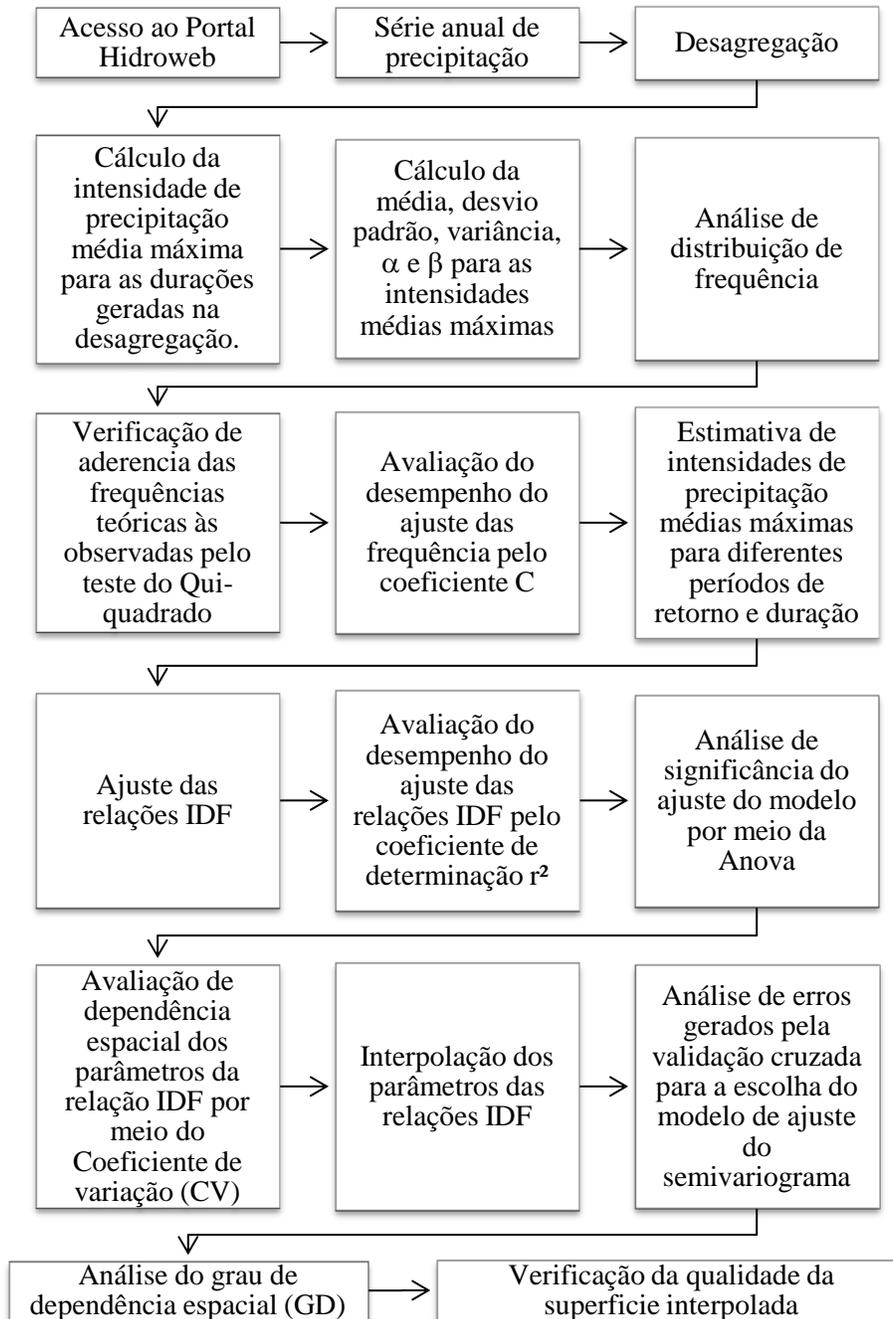


Tabela 2 - Coeficientes de desagregação da chuva de 1 dia.

Duração	Coefficiente	Duração	Coefficiente
24h/1 dia	1,14	30 min/1h	0,74
12h/24h	0,85	25 min/30 min	0,92
10h/24h	0,82	20 min/30 min	0,81
8h/24h	0,78	15 min/30 min	0,70
6h/24h	0,72	10 min/30 min	0,54
1h/24h	0,42	5 min/30 min	0,34

Fonte: São Paulo (1980)

Foram obtidos os valores das lâminas de água precipitadas, para as durações de 24, 12, 10, 8, 6 e 1 hora e de 30, 25, 20, 15, 10 e 5 minutos, calculando, em seguida, a intensidade de precipitação média máxima para cada duração (Equação 14).

$$i_m = 60 \frac{P}{t} \quad (14)$$

em que:

i_m = intensidade de precipitação média máxima (mm h^{-1});

P = altura da lâmina de água precipitada (mm) para a duração t da chuva (min).

Para as intensidades de precipitação médias máximas obtidas, foram determinados os valores das médias, desvios padrões e variâncias, permitindo, assim, a determinação dos parâmetros α e β da distribuição de Gumbel, empregando para tal o método de estimação dos momentos (Equações 15 e 16 respectivamente).

$$\alpha = \bar{X} - 0,557 \beta \quad (15)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\sigma^2}{1,645}} \quad (16)$$

em que:

\bar{X} = média das intensidades de precipitação para as diferentes durações (mm h⁻¹);

σ^2 = variância das intensidades de precipitação para as diferentes durações (mm² h⁻²).

Na análise da distribuição de frequência dos dados, as frequências observadas foram obtidas, empregando o método de Kimbal (Equação 17) e as frequências teóricas pela distribuição de probabilidade de Gumbel (Equação 18).

$$F_{\text{obs}} = m/(N+1) \quad (17)$$

em que:

m = corresponde à posição dos valores das intensidades de precipitação médias máximas na ordenação decrescente;

N = número total de anos que compõem a série.

$$F_{\text{teórica}} = 1 - e^{-e^{-Y_{\text{TR}}}} \quad (18)$$

em que:

$F_{\text{teórica}}$ = probabilidade de um valor extremo da série ser maior ou igual à magnitude de um determinado evento;

Y_{TR} = variável reduzida da distribuição de Gumbel.

Para obter o valor da variável reduzida da distribuição de Gumbel, aplicou-se a função de distribuição de frequência de Chow (Equações 19 e 20) (OLIVEIRA et al., 2000).

$$Y_{TR} = \frac{K_{TR} + 0,45}{0,78} \quad (19)$$

$$K_{TR} = \frac{X - \bar{X}}{S} \quad (20)$$

em que:

K_{TR} = fator de frequência;

X = evento extremo no decorrer da série histórica (mm h^{-1});

\bar{X} = média dos valores extremos da série histórica (mm h^{-1});

S = desvio padrão dos valores extremos da série histórica (mm h^{-1}).

Para a verificação da aderência da distribuição de Gumbel às séries anuais de chuvas intensas, foi elaborada a hipótese de que as frequências teóricas explicam as observadas. Para tal, empregou-se o teste do Qui-quadrado, implementado no Excel[®], ao nível de significância de 5% (Equação 21).

$$\chi^2 = \sum \frac{(F_{teórica} - F_{obs})^2}{F_{teórica}} \quad (21)$$

em que:

χ^2 = valor calculado da distribuição de probabilidade Qui-quadrado.

O valor calculado da distribuição de probabilidade do Qui-quadrado foi comparado com o valor teórico, para um nível de significância de 5% e N graus de liberdade, obtido pela diferença entre o número de anos que compõem a série histórica subtraído do número de parâmetros empregados na distribuição de Gumbel (média e variância).

A hipótese de que as frequências teóricas, obtidas pela distribuição de Gumbel, aderem-se às observadas foram verificadas para os casos em que os valores da distribuição de probabilidade do Qui-quadrado, obtidos pela Equação 21, foram inferiores aos valores tabelados. O teste de aderência foi implementado, retornando, no teste de hipótese, o status *Verdadeiro*, quando da aceitação da hipótese formulada ou *Falso* quando da rejeição da hipótese.

Com a finalidade de se avaliar o desempenho do ajuste das frequências teóricas estimadas pela distribuição de Gumbel às frequências observadas, utilizou-se o coeficiente de desempenho (C), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), obtido pelo produto do índice de Willmott (d) com o coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equações 22, 23 e 24, respectivamente).

$$C = r \times d \quad (22)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (F_{\text{obs}} - F_{\text{teórica}})^2}{\sum (|F_{\text{teórica}} - \bar{F}_{\text{obs}}| + |F_{\text{obs}} - \bar{F}_{\text{obs}}|)^2} \right] \quad (23)$$

$$r = \frac{\sqrt{\sum (F_{\text{teórica}} - \bar{F}_{\text{obs}})^2}}{\sqrt{\sum (F_{\text{obs}} - \bar{F}_{\text{obs}})^2}} \quad (24)$$

em que:

\bar{F}_{obs} = média das frequências observadas.

O critério adotado, para interpretar o desempenho do ajuste da distribuição de Gumbel, empregando o índice C, está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios de interpretação do índice de desempenho C.

Valor de C	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

Após a verificação da aderência da distribuição de Gumbel aos dados observados, foram estimadas as intensidades de precipitação médias máximas, para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, empregando-se a distribuição de Gumbel. Para tal, a distribuição de Gumbel foi explicitada, para a obtenção da intensidade de precipitação, em função do período de retorno (Equação 25). Os períodos de retorno escolhidos foram definidos, com base em valores, usualmente, adotados no meio técnico para diversos tipos de obra.

$$i_m = \alpha - \beta \text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{\text{TR}}{\text{TR}-1} \right) \right] \quad (25)$$

em que:

α e β = parâmetros obtidos do método de estimação dos momentos;

TR = período de retorno

No ajuste das relações IDF, empregou-se, na planilha eletrônica Excel[®], o processo iterativo Solver com o método de otimização, de forma a minimizar a

soma de quadrados dos desvios entre os valores das intensidades de precipitação médias máximas observadas e calculadas, empregando-se para tal a rotina SOLVER. O Solver resolve o problema na busca dos parâmetros que minimizem a soma de quadrado dos desvios entre i_{obs} e i_{cal} .

$$SQD = \Sigma(Y - \hat{Y})^2 \quad (26)$$

$$SQR = \Sigma(Y - \bar{Y})^2 \quad (27)$$

$$SQR = \Sigma(\hat{Y} - \bar{Y})^2 \quad (28)$$

em que: $Y = i_{obs}$, $\hat{Y} = i_{cal}$ e $\bar{Y} = \text{média}$.

A avaliação do desempenho dos ajustes das relações IDF foi realizada pelo coeficiente de determinação r^2 que expressa a relação entre a soma dos quadrados da regressão e a soma de quadrados totais (Equação 29).

$$r^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (29)$$

Quanto mais próxima a soma de quadrados da regressão for da soma de quadrados totais, menor será a soma de quadrados dos desvios e r^2 se aproximará de 1,0, portanto quanto mais próximo de 1,0 melhor o ajuste.

Para a análise de significância do ajuste do modelo, utilizou-se a análise de variância (Anova), em que o grau de liberdade (GL) da regressão é dado pelo número de parâmetros a serem ajustados menos 1 e do total, o número de dados menos 1. O GL do resíduo é dado pela diferença entre o GL_{total} e o $GL_{regressão}$. Os

quadrados médios (QM) são as variâncias obtidas pela relação entre as somas de quadrados pelos graus de liberdade.

Na análise de variância, empregou-se a distribuição de F de Snedecor, dada pela relação entre os quadrados médios da regressão e do resíduo. Na planilha desenvolvida, foi formulada a hipótese de que, para nível de probabilidade da distribuição de F menor que 1%, o ajuste é considerado significativo.

Ao final dessa etapa estatística, foi possível obter o modelo ajustado para todas as estações. De posse das relações IDF para as 2.042 estações pluviométricas empregadas, neste estudo, foi realizada a avaliação de dependência espacial dos parâmetros da equação de chuvas intensas, por meio do coeficiente de variação (CV), que mostra o quanto os valores da amostra variam em relação à média. Na literatura, há várias maneiras de classificar o CV, a utilizada, neste trabalho, segue o definido por Ramos et al. (2009) que classificam como baixa variabilidade o CV abaixo de 12%, média de variabilidade entre 12 e 60 % e alta variabilidade acima de 60%.

O manuseio da base de dados e a construção dos mapas temáticos dos parâmetros das relações IDF foram realizados pelo programa Arcgis® versão 10.2. Para tal, foi criada uma planilha no Excel®, contendo informações referentes a cada estação pluviométrica utilizada, como o estado, o nome, o código, as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e os parâmetros da equação (“*k*”, “*a*”, “*b*”, e “*c*”).

Esta planilha foi importada para o Arcgis®, nomeada como *Estações Pluviométricas* e transformada em arquivo shapefile contendo as informações geoespaciais, em formato de vetor, possibilitando a representação de cada estação associada ao seu banco de dados (estado, nome, código e parâmetros). O

arquivo shapefile do Brasil foi obtido no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)³ do qual foi extraído apenas a região Nordeste.

No processo de interpolação, utilizaram-se se 1.988 estações pluviométricas, retirando estações que, por serem muito próximas, eram apontadas com uma mesma localização, e a estação de Fernando de Noronha por se tratar de um ponto isolado podendo gerar erros de tendência no processo de interpolação das informações.

No ambiente do programa Arcgis®, utilizou-se a ferramenta *Geostatistical Analyst*, que permite a escolha do método de interpolação, no caso, utilizou-se a *Krigagem Ordinária*, que fornece opções para a escolha do modelo teórico que se deseja empregar para o ajuste do semivariograma. Para os quatro parâmetros das relações IDF (“k”, “a”, “b” e “c”), foram testados os 3 modelos teóricos mais utilizados na obtenção do semivariograma teórico, ou seja os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano (Equações 30, 31 e 32 respectivamente), aplicando a todos a otimização do ajuste do modelo baseado na minimização do erro quadrático médio.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (30)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(- \frac{h}{a} \right) \right] \quad (31)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (32)$$

³ http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm

em que:

h = distância;

C_0 = efeito pepita;

C_1 = contribuição;

γ = variância

Adotou-se, como critério de escolha do melhor modelo a ser utilizado na espacialização dos parâmetros das relações IDF, a análise dos erros gerados pela validação cruzada. De acordo com Jakob e Young (2006), na análise de erros, deve-se encontrar o menor valor do erro médio quadrático, o erro médio padronizado deve ter seu valor próximo de zero, o erro quadrático médio padronizado próximo de 1 e o valor do erro padrão médio próximo do valor do erro quadrático médio.

De maneira a complementar a análise do modelo do semivariograma a ser empregado, calculou-se, também, o grau de dependência espacial (GD) dos parâmetros das relações IDF. De acordo com Mello et al. (2008), o GD consiste na razão entre a contribuição e o patamar, sendo obtido pela Equação 33.

$$GD = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) 100 \quad (33)$$

em que:

C_0 = efeito pepita;

C_1 = contribuição;

$C_0 + C_1$ = patamar.

Considerando os seguintes valores para classificação: até 25% grau de dependência fraco, entre 25 e 75% moderado e acima de 75% forte (CAMBARDELLA et al., 1994).

Para conferência da qualidade da superfície interpolada gerada, utilizaram-se, também, os dados obtidos pela validação cruzada que compara os valores medidos com os preditos, bem como os erros e o valor da distribuição normal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Verificação do ajuste da distribuição de Gumbel

Para as 2.042 estações estudadas neste trabalho, verificaram-se pelo teste do Qui-quadrado, ao nível de significância de 5%, que as frequências teóricas determinadas pela distribuição de Gumbel empregando no ajuste dos parâmetros o método dos momentos, aderiram-se às frequências observadas, conforme apresentado nas Figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 para estações das capitais dos estados da região Nordeste.

Figura 8 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Maceió.

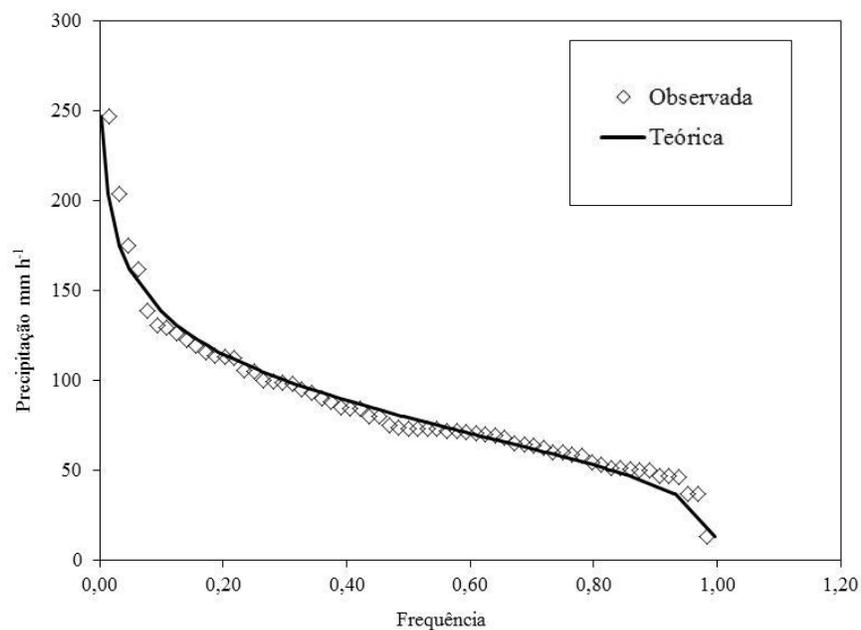


Figura 9 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Salvador.

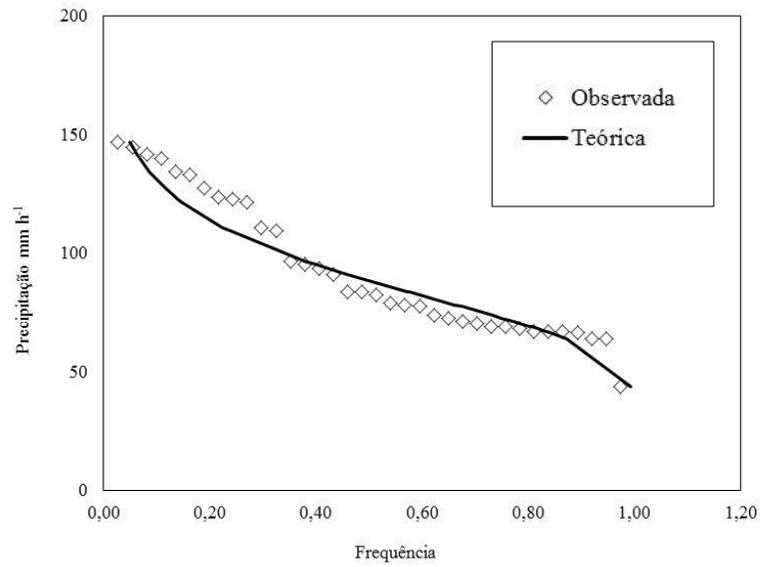


Figura 10 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Fortaleza.

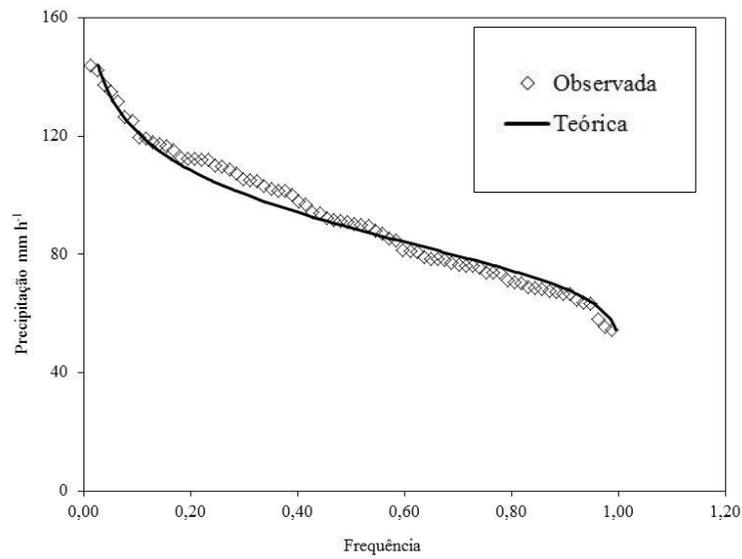


Figura 11 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para São Luís.

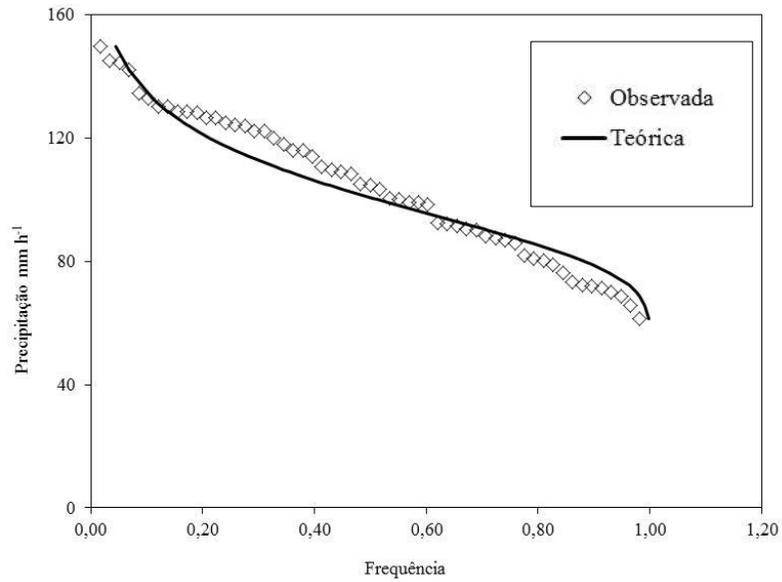


Figura 12 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para João Pessoa.

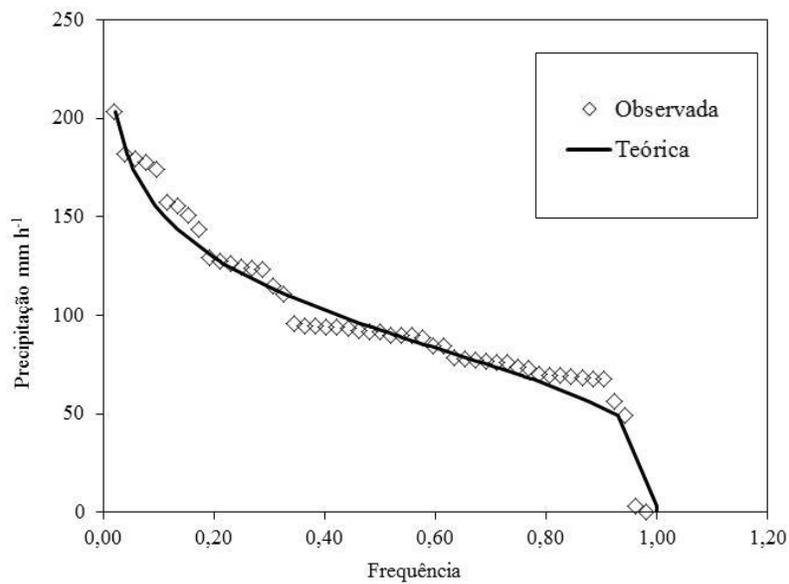


Figura 13 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Recife.

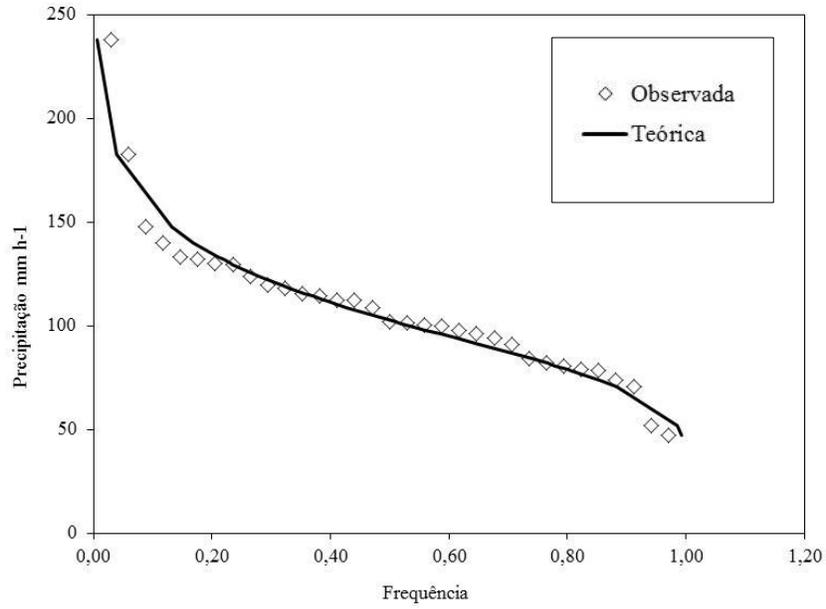


Figura 14 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Teresina.

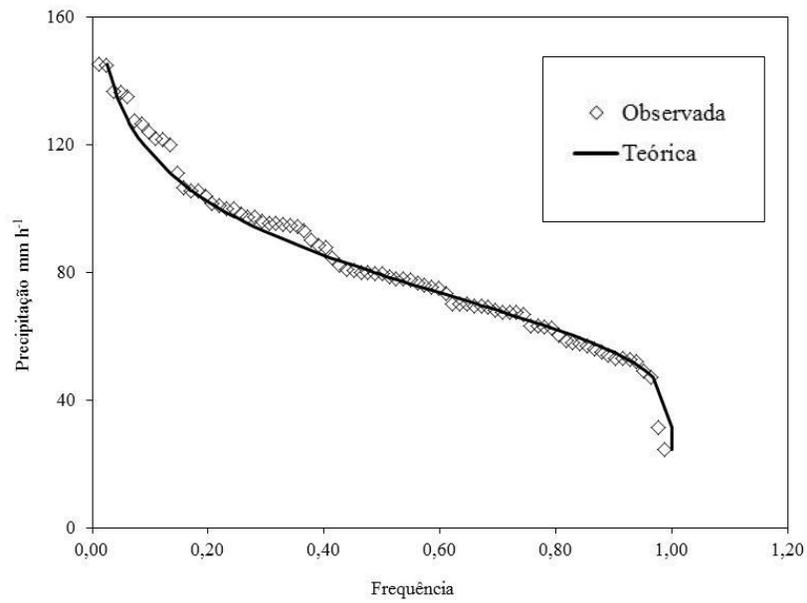


Figura 15 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Natal.

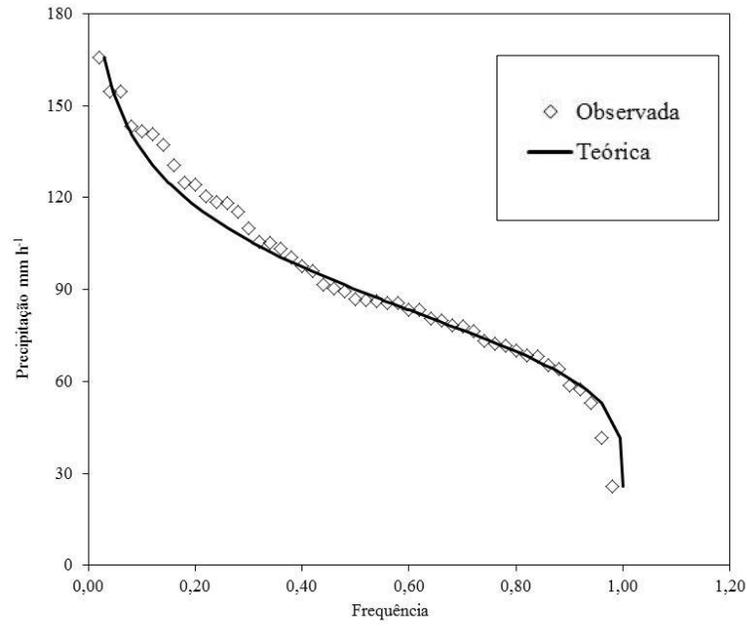
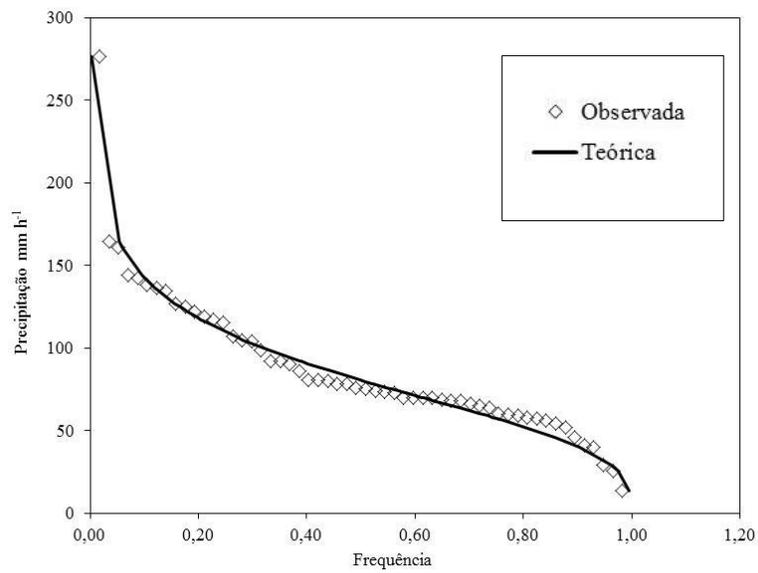


Figura 16 - Ajuste das frequências teóricas às observadas para Aracaju.



A Tabela 4 apresenta as estatísticas empregadas na verificação e classificação da aderência das frequências teóricas, obtidas pela distribuição de Gumbel às observadas, ou seja, teste de Qui-quadrado, índice de Willmott, coeficientes de correlação (r) e de desempenho (d).

Para as estações apresentadas na Tabela 4, observa-se que os valores calculados da distribuição de Qui-quadrado foram inferiores aos valores teóricos para o nível de significância de 5%, permitindo, assim, a aceitação da hipótese de que as frequências teóricas obtidas pela distribuição de Gumbel se aderem às frequências observadas.

Tabela 4 - Estatística empregada na verificação e classificação das frequências teóricas às observadas para as capitais da Região Nordeste.

Estação	χ^2		d	r	c	Classificação
	Calculado	Teórico				
Maceió	0,22	80,23	1,00	0,99	0,99	Ótimo
Salvador	0,62	48,60	0,99	0,97	0,95	Ótimo
Fortaleza	0,52	95,08	0,99	0,99	0,98	Ótimo
São Luís	0,85	73,31	0,99	0,97	0,96	Ótimo
João Pessoa	0,32	66,34	0,99	0,98	0,97	Ótimo
Recife	0,22	44,99	1,00	0,99	0,99	Ótimo
Teresina	0,23	100,75	1,00	1,00	0,99	Ótimo
Natal	0,19	64,00	1,00	1,00	0,99	Ótimo
Aracaju	0,32	28,87	0,99	0,99	0,98	Ótimo

Analisando os valores dos coeficientes de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 4), verificou-se que a aderência da distribuição de Gumbel aos dados observados foi classificada como ótima para as estações localizadas nas capitais de cada estado da região Nordeste. Seguindo essa mesma tendência, resultados semelhantes são encontrados, para todas as estações estudadas, corroborando, dessa maneira, com a hipótese de que as frequências teóricas estimadas pela distribuição de Gumbel se aderem às

freqüências observadas. Permitindo, assim, estimar intensidades de precipitações extremas para períodos de retorno maiores que o número de anos que compõem as séries históricas. Comportamento semelhante foi observado para as 2.042 estações pluviométricas, empregadas neste estudo, no que se refere à ótima aderência da distribuição de Gumbel às series históricas das chuvas intensas.

A Tabela 5 apresenta as estimativas das intensidades de precipitação médias máximas pela distribuição de Gumbel, para a estação de Salvador- BA, para diferentes tempos de duração de chuva e períodos de retorno.

Tabela 5 - Estimativa da intensidade de precipitação média máxima (mm h^{-1}) pela distribuição de Gumbel para diferentes tempos de duração de chuva e períodos de retorno para a estação de Salvador.

Duração	TR				
	5	10	25	50	100
24 h	5,43	6,24	7,35	8,00	8,75
12 h	9,24	10,60	12,33	13,60	14,87
10 h	10,69	12,27	14,27	15,75	17,22
8 h	12,71	14,59	16,97	18,73	20,87
6 h	15,65	17,96	20,88	23,05	25,20
1 h	54,77	62,86	73,08	80,67	88,20
30 min	81,05	93,03	108,16	119,39	130,53
25 min	88,51	101,59	118,11	130,37	142,54
20 min	98,48	113,03	131,42	145,06	158,60
15 min	113,48	130,24	151,43	167,15	182,75
10 min	131,31	150,71	175,22	193,41	211,46
5 min	165,35	189,78	220,65	243,55	266,29

4.2 Ajuste das relações IDF

A Tabela 6 apresenta os parâmetros ajustados das relações IDF para as estações localizadas nas capitais dos estados da região Nordeste com os respectivos coeficientes de determinação (r^2). Observa-se, na referida tabela, que em todas as estações os valores dos coeficientes de determinação (r^2) foram próximos de 1,0, evidenciando um perfeito ajuste das relações IDF ajustadas

pela metodologia empregada, neste trabalho, às intensidades de precipitação observadas.

Santos et al. (2009) e Silva et al. (2003) realizaram trabalhos semelhantes para os Estados de Tocantins e Mato Grosso, obtendo coeficientes de determinação r^2 médios de 0,98 e 0,99, respectivamente.

A Figura 17 apresenta a comparação entre as intensidades de precipitação observadas e estimadas, para diferentes tempos de duração e período de retorno, empregando a relação IDF ajustada para a estação de Salvador- BA. Evidencia-se o perfeito ajuste da relação IDF que proporcionou valores próximos à reta 1:1 na estimativa das intensidades de precipitação. Para as 2.042 estações estudadas foi observada uma tendência de ajuste semelhante.

Figura 17 - Ajuste dos valores de intensidades de precipitação calculada à observada para a estação de Salvador- BA

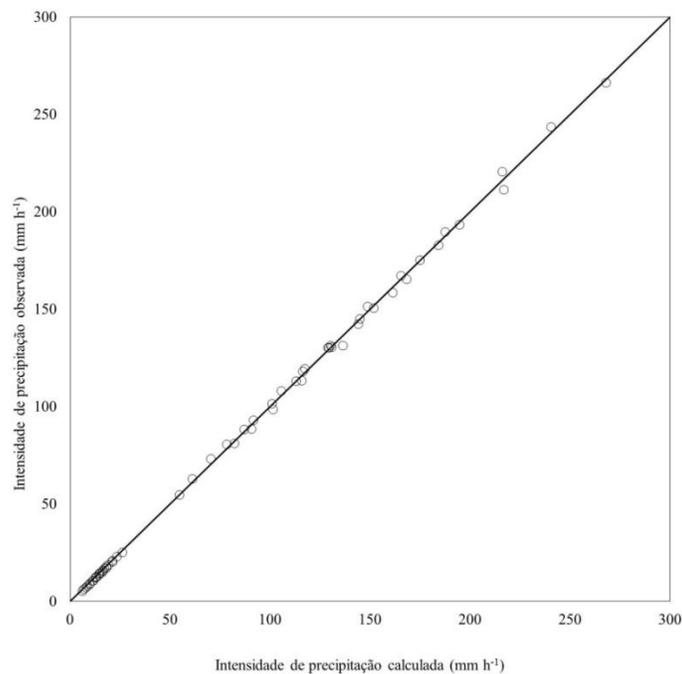


Tabela 6 - Ajuste dos parâmetros das relações IDF para as capitais da região Nordeste

Estação	Latitude			Longitude			k	a	b	c	r ²	Período observado
	o	'	"	o	'	"						
Maceió	-9	-34	0	-35	-46	-60	886,0284	0,1954	9,7839	0,7240	0,99	1913- 1991
Salvador	-13	-1	0	-38	-30	-60	922,2271	0,1551	9,7861	0,7242	0,99	1912- 1983
Fortaleza	-3	-44	0	-38	-32	-60	861,4825	0,1473	9,7823	0,7241	0,99	1920- 1985
São Luís	-2	-53	0	-44	-21	0	1020,2781	0,1249	9,7839	0,7242	0,99	1913- 2014
João Pessoa	-7	-6	-60	-34	-53	0	1011,8743	0,1846	9,7855	0,7242	0,99	1912- 1985
Recife	-8	-1	-60	-34	-53	-60	1082,0212	0,1620	9,7820	0,7240	0,99	1924- 1958
Teresina	-5	-5	-16	-42	-47	-57	826,1809	0,1552	9,7847	0,7242	0,99	1914- 2002
Natal	-5	-48	0	-35	-13	0	944,4026	0,1595	9,7825	0,7241	0,99	1926- 1977
Aracaju	-10	-54	0	-37	-2	-60	908,3115	0,1997	9,7844	0,7242	0,99	1913- 1974

Analisando as curvas IDF de intensidades das precipitações médias máximas estimadas pela distribuição de Gumbel e as calculadas pela relação IDF ajustada para a estação de Salvador-BA (Figuras 18 e 19), observa-se que, conforme o tempo de duração da precipitação aumenta, sua intensidade diminui, já, para os maiores períodos de retorno, são encontradas chuvas com maiores intensidades para todas as durações. Esse comportamento é típico das curvas IDF, como pode ser verificado em trabalhos de Beijo, Muniz e Castro Neto (2005) para a cidade de Lavras, Moruzzi e Oliveira (2009) para a cidade de Rio Claro no Estado de São Paulo, em trabalho de Santos et al. (2009) para o Estado do Mato Grosso do Sul e de Castro, Silva e Silveira (2011) para o Município de Cuiabá.

Figura 18 - Relações IDF definidas para durações de 0 a 60 minutos para a estação de Salvador- BA

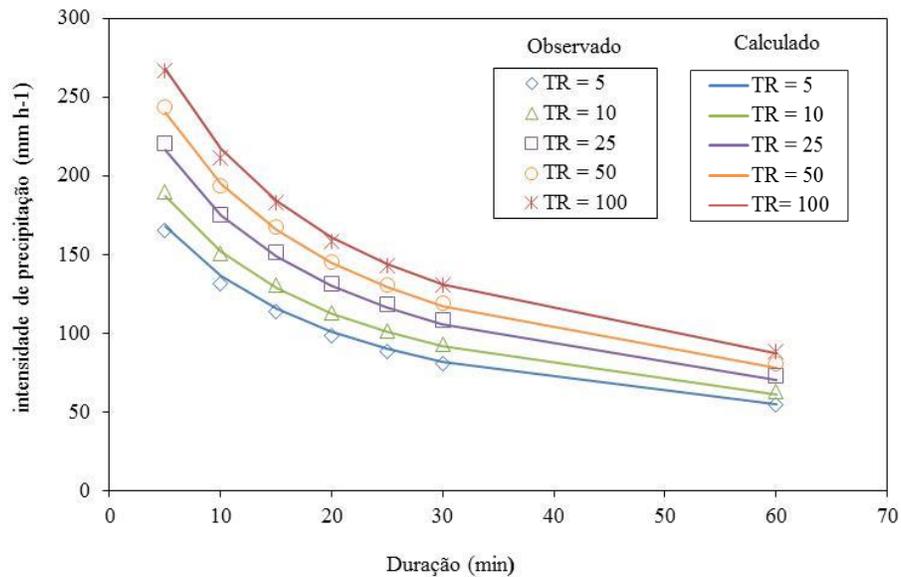
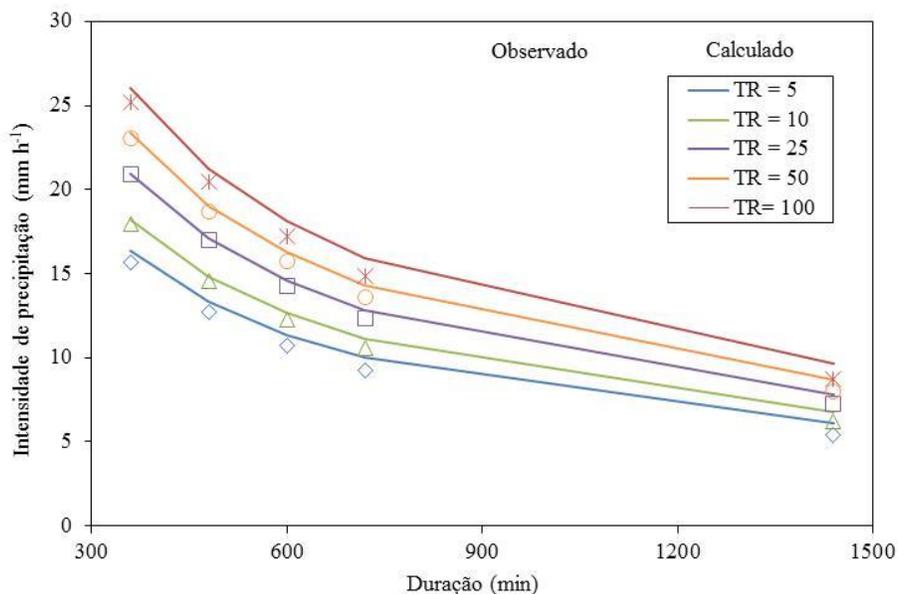


Figura 19 - Relações IDF definidas para durações de 300 a 1500 minutos para a estação de Salvador- BA



A inclusão de variáveis físicas ambientais como a chuva intensa, em um modelo estatístico, torna a sua aplicação mais complexa em razão da alta variabilidade apresentada pelo fenômeno diante do grande número de atributos envolvidos em sua dinâmica (MELLO; SILVA, 2009). Entretanto os resultados obtidos, nessa etapa estatística, podem ser considerados excelentes, pois geraram dados confiáveis que foram classificados de tal maneira após verificação de igual qualidade, como pode ser visto na análise de variância do ajuste da relação IDF para a estação de Salvador, BA (Tabela 7).

Pela análise de variância do ajuste, verificou-se que o ajuste das relações IDF foi altamente significativo pelo teste de F, com nível de significância inferior a 1,0%. Para todas as estações estudadas, o ajuste das relações IDF analisado pelo teste de F apresentaram resultados semelhantes ao observado para a para a estação de Salvador, BA.

Tabela 7 - ANOVA para a estação de Salvador- BA.

CV	GL	SQ	QM	F	Nível de significância
ajuste	3	308532,24	102844,08	29201,06	$2,15 \times 10^{-89}$ *
resíduo	56	197,23	3,52		Significativo
total	59	308729,47			

* altamente significativo pelo teste de F.

Desta maneira, aceita-se a hipótese de que o método da desagregação de chuva de um dia e o modelo que expressa a relação entre a intensidade, a duração e a frequência são adequados para se estimar chuvas de diferentes durações associadas a um período de retorno.

4.3 Espacialização dos parâmetros das relações IDF

Com as relações IDF ajustadas para as estações pluviométricas empregadas neste estudo, foi realizada a avaliação de dependência espacial dos parâmetros da equação de chuvas intensas por meio do coeficiente de variação (CV). A Tabela 8 apresenta a estatística descritiva dos parâmetros das relações IDF para toda a região Nordeste.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos parâmetros das relações IDF para toda a região Nordeste.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)**
k	280,6237	1669,1108	764,7916	142,7882	18,67
a	0,0348	0,2979	0,1606	0,0271	16,89
b	8,9300	13,1124	9,7795	0,0949	0,97
c	0,7029	0,7928	0,7241	0,0021	0,29

** < 12% baixa variabilidade; entre 12 e 60% média variabilidade; > 60% alta variabilidade

Os parâmetros “k” e “a” obtiveram valores que os classificam com média variação, indicando a existência de uma dependência espacial, mesmo que baixa, tal como obtido por Mello et al. (2003a) e Vieira, Lombardi Neto e

Burrows (1991) que encontraram CV, para o parâmetro “*a*”, no Estado de São Paulo com valores semelhantes ao encontrado neste trabalho.

Esses resultados indicam, também, a relação entre os parâmetros “*k*” e “*a*” com a variação das intensidades de precipitação, para locais diferentes da região, pois, para ambos os parâmetros, as estações que apresentaram maiores valores apresentaram, também, maiores intensidades de chuva.

Considerando um evento com duração de 5 minutos e período de retorno de 5 anos, a intensidade encontrada, para a estação de Bom Jardim, PE (maior valor encontrado do parâmetro “*k*”), foi de 309,43 mm h⁻¹, contra 59,58 mm h⁻¹ para a estação de Ilha do Ouro, SE (menor valor do parâmetro “*k*”). A mesma situação ocorre com o parâmetro “*a*”, com intensidade encontrada de 363,71 mm h⁻¹ para a estação de Arizona, PE contra 102,65 mm h⁻¹ para a estação de Palmeira dos Índios no Estado de Alagoas.

Essa grande variação, também, foi encontrada dentro de um mesmo estado, conforme estudos de Campos et al. (2014) para o Estado do Piauí, Santos et al. (2009) para o Estado do Mato Grosso do Sul, Silva et al. (2002) para o Estado da Bahia, Silva et al. (2003) para o Estado do Tocantins e Silva et al. (2012) para o Estado de Pernambuco. E, até mesmo dentro de uma mesma localidade, como no trabalho de Rodrigues et al. (2008), para Fortaleza e Pentecostes, no Estado do Ceará, reforçando o conceito de que as chuvas convectivas têm a característica de abranger pequenas áreas.

Com relação aos parâmetros “*b*” e “*c*”, a variação apresentada ficou abaixo de 1%, com valores do CV que os classificam com baixa variabilidade, indicando uma homogeneidade nos dados sendo possível admitir os valores médios desses parâmetros como sendo um valor regionalizado. Resultados semelhantes foram obtidos por Mello et al. (2003a), para o Estado de São Paulo, Santos et al. (2009) para o Estado do Mato Grosso do Sul, Oliveira et al. (2011)

para o Estado do Mato Grosso, por Souza et al. (2012) para o Estado do Pará e por Campos et al. (2014) para o Estado do Piauí.

A interpolação dos parâmetros das relações IDF ajustados pode apresentar resultados mais precisos conforme o método utilizado e o parâmetro interpolado. A Tabela 9 apresenta a análise dos erros gerados pela validação cruzada para a escolha do modelo teórico do semivariograma.

Tabela 9 - Análise dos erros gerados pela validação cruzada dos modelos dos semivariogramas Esférico, Exponencial e Gaussiano.

Parâmetro	Modelo	Erro quadrático médio ^{*1}	Erro médio padronizado ^{*2}	Erro quadrático médio padronizado ^{*3}	Erro padrão médio ^{*4}
k	Esférico	114,5007	-0,0067	0,8925	129,2083
	Exponencial	114,7569	-0,0058	0,8769	131,6944
	Gaussiano	114,6251	-0,0061	0,8980	128,6153
a	Esférico	0,0245	-0,0033	0,9458	0,025982
	Exponencial	0,0244	-0,0025	0,9452	0,025988
	Gaussiano	0,0245	-0,0030	0,9455	0,025990
b	Esférico	0,0953	0,00026	0,9130	0,1048
	Exponencial	0,09481	0,00033	0,8993	0,1055
	Gaussiano	0,0956	0,00024	0,9163	0,1049
c	Esférico	0,00209	0,0002	0,8830	0,002377
	Exponencial	0,00208	0,0002	0,8766	0,002383
	Gaussiano	0,00210	0,0001	0,8910	0,002371

*1 Menor

*2 Mais próximo de 0

*3 Mais próximo de 1

*4 Mais próximo do erro quadrático médio

Para os parâmetros “k”, “b” e “c”, os valores mais adequados foram encontrados no modelo Gaussiano, para o parâmetro “a”, ocorreu a coincidência de valores mais adequados entre os modelos Esférico e Exponencial. Pela

tendência dos menores desvios obtidos pelo modelo Gaussiano, optou-se pela sua utilização, para a espacialização de todos os parâmetros das relações IDF, além disso, esse modelo foi o que gerou uma superfície mais suavizada.

Nas Figuras 20, 21, 22 e 23, são apresentados os semivariogramas ajustados pelo modelo teórico Gaussiano para cada um dos parâmetros das relações IDF da região Nordeste.

Figura 20 - Semivariograma do parâmetro k.

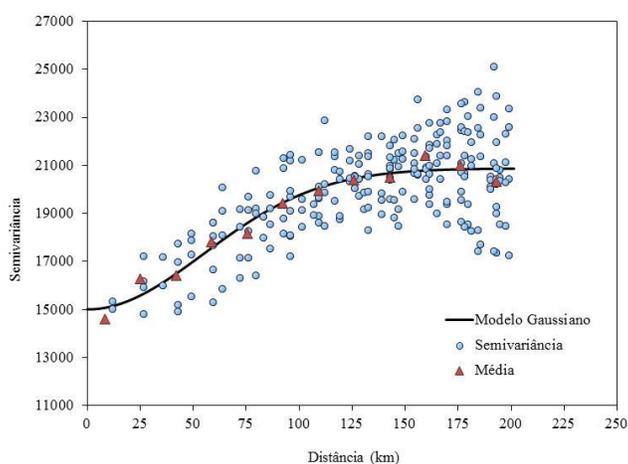


Figura 21 - Semivariograma do parâmetro a.

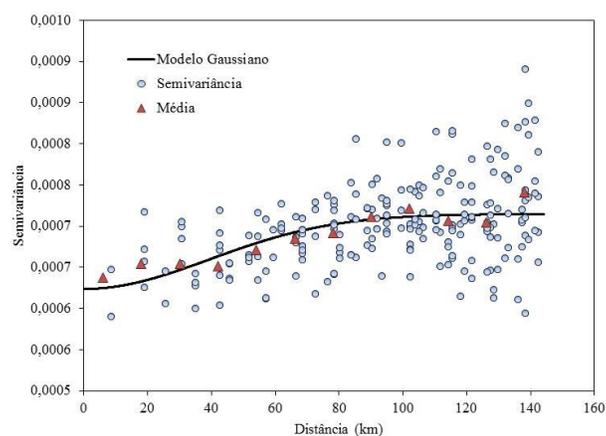


Figura 22 - Semivariograma do parâmetro b

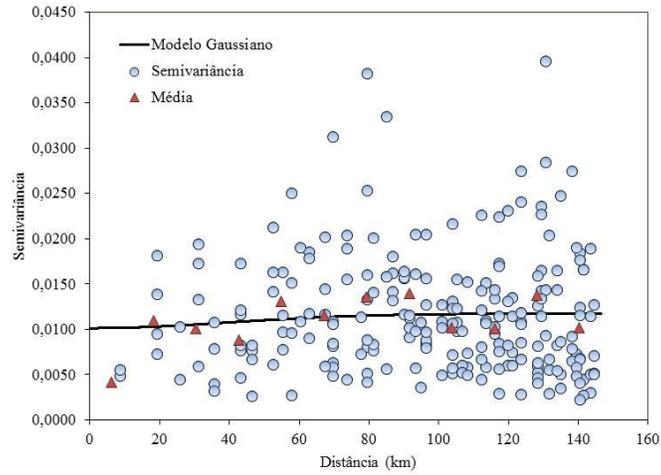
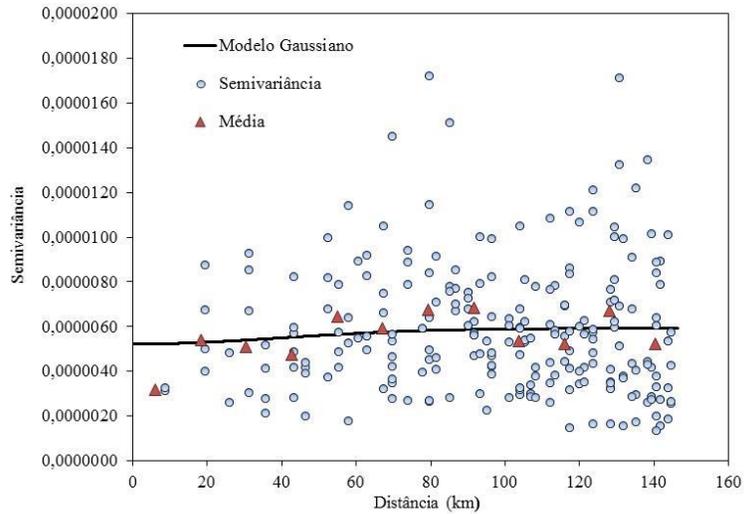


Figura 23 - Semivariograma do parâmetro c.



A Tabela 10 apresenta as características dos semivariogramas teóricos para o modelo Gaussiano empregado nos parâmetros das relações IDF ajustados para a região Nordeste. Santos et al. (2005), em seu trabalho de ajuste de

modelos para parâmetros de precipitação, na área de transposição do Rio São Francisco, comentam que o efeito pepita nulo indica que a distância entre as estações é adequada para revelar a estrutura de dependência espacial. Entretanto os valores de efeito pepita encontrados para os parâmetros da equação de chuvas intensas da região Nordeste variam bastante, visto que os que mais se aproximam de 0 (“a”, “b” e “c”) (Tabela10) têm o valor do patamar já bem próximo, conferindo uma baixa dependência espacial.

Tabela 10 - Parâmetros de ajuste do semivariograma empregando o modelo Gaussiano nos parâmetros das relações IDF ajustados para a região Nordeste.

Parâmetro	Efeito Pepita	Alcance (m)	Contribuição	Patamar
k	15010,864616	134267,942764	5865,326414	20876,191031
a	0,000623	96079,018648	0,000090	0,000715
b	0,010133	97622,447285	0,001604	0,011738
c	0,000005	97622,447285	0,000001	0,000006

O comportamento do alcance do semivariograma está associado à existência de dependência espacial, que é a distância abaixo da qual se pode verificar uma estrutura de dependência. Para o parâmetro “k” foi detectado o maior alcance com 134,27 km, já os parâmetros “a”, “b” e “c” ficaram na faixa entre 96 e 98 km. Mello et al. (2003a) encontraram valores de alcance para os parâmetros de equação de chuva, na faixa de 90 a 100 km, para o Estado de São Paulo, bem como Vieira, Lombardi Neto e Burrows (1991) obtiveram resultados semelhantes para o mesmo estado. Silva et al. (2010), também, encontraram valores próximos de alcance para características diferentes, porém dependentes entre si. Esses valores, relativamente, próximos garantem um padrão espacial semelhante, comprovando a interligação entre todos os parâmetros da equação de chuvas, reforçando sua relação com as chuvas máximas diárias (MELLO et al., 2003a).

Apenas a título de estabelecer o quanto os parâmetros da equação de chuvas apresentam estrutura de dependência espacial, a Tabela 11 apresenta o grau de dependência das variáveis locais. Observa-se, na referida tabela, que a estrutura de dependência espacial, ainda que baixa, está presente em todos os parâmetros, evidenciando a utilização do interpolador geostatístico no estudo da regionalização dos parâmetros das relações IDF ajustados neste trabalho.

Tabela 11 - Grau de dependência espacial dos parâmetros das relações IDF.

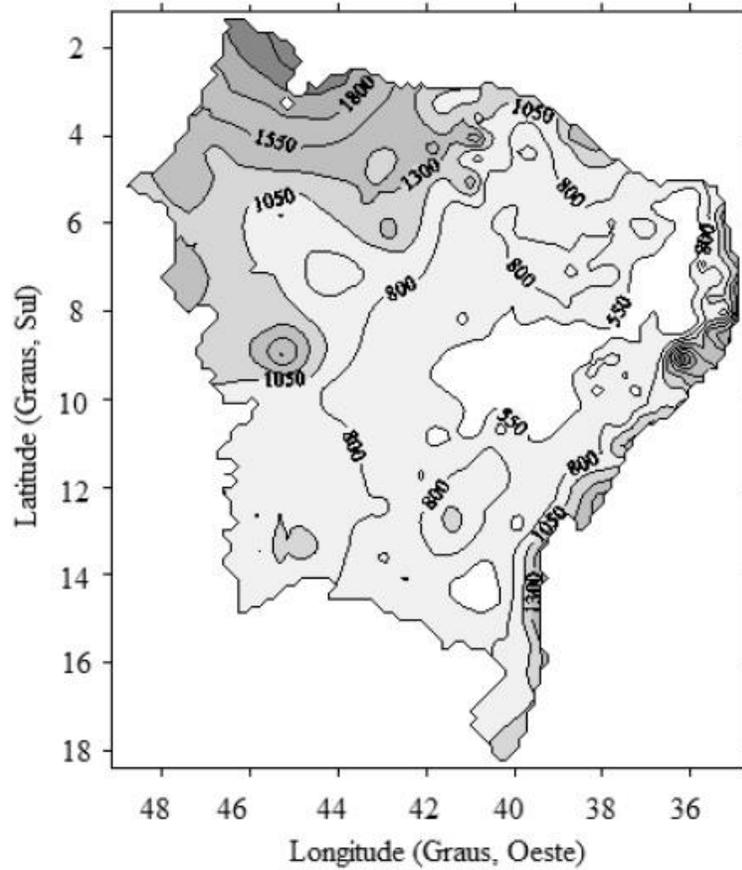
Parâmetro	GD	Classificação
k	28,10%	Moderado
a	12,73%	Fraco
b	13,67%	Fraco
c	11,83%	Fraco

Os parâmetros das relações IDF de chuvas intensas têm a sua importância pelo produto que são capazes de gerar, ou seja, a chuva intensa fornecida pela equação compostas por estes parâmetros. A análise isolada dos parâmetros não apresenta nenhum significado físico além da possibilidade de decisão de uso de valores regionais ou locais na estimativa de intensidade de chuvas (MELLO et al, 2003a). Contudo a análise isolada possibilita algumas observações, sendo assim, a seguir, são apresentados os mapas temáticos dos parâmetros das relações IDF.

As figuras dos mapas possibilitam melhor visualização da distribuição espacial dos valores dos parâmetros. Os maiores valores do parâmetro “*k*” coincidem com maiores valores da precipitação média anual como pode ser visto na Figura 24. Pode-se, também, estabelecer uma relação entre os parâmetros “*k*” e “*a*” (Figuras 25 e 26) com o período de retorno, pois seus valores permitem estabelecer um vínculo com as intensidades de precipitação, ou seja, fenômenos climáticos característicos de chuvas intensas e escassez ocorrem em regiões de

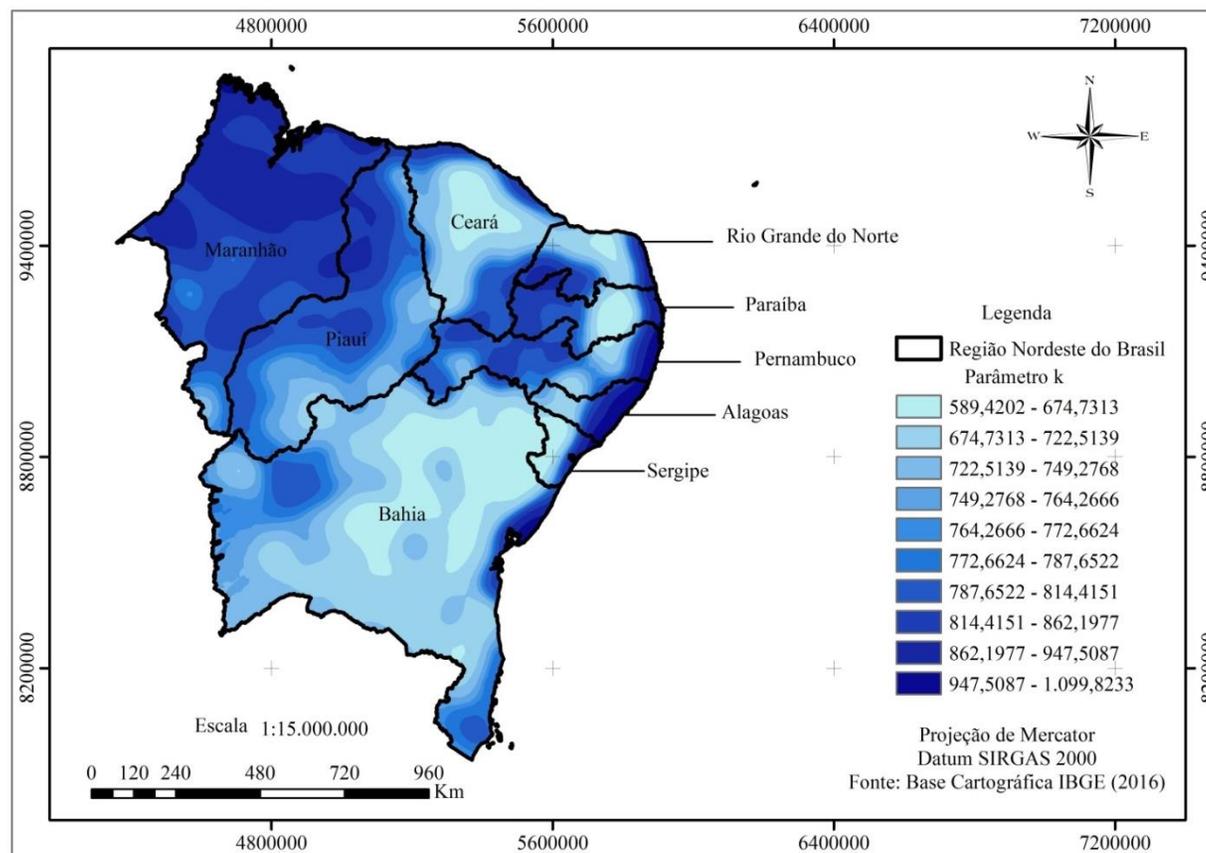
maiores e menores valores de ambos os parâmetros. Notam-se, ainda, coincidências com as características da classificação climática de Köppen.

Figura 24 - Precipitação média para a região Nordeste do Brasil.



Fonte: Silva, Pereira e Almeida (2012)

Figura 25 - Superfície interpolada do parâmetro “k”.



Na Figura 25, abrangendo o Ceará, Oeste do Rio Grande do Norte e interior da Paraíba e Pernambuco, observa-se uma região central de cor azul mais escura indicando maiores valores de precipitações que podem estar relacionados com a atuação da ZCIT, bem como no Estado do Maranhão. Quando ocorre o bloqueio da atividade ciclônica no hemisfério Norte, o anticiclone dos Açores se intensifica e movimenta a ZCIT para o Sul, provocando chuvas na região (NAMIAS, 1972). Contudo valores mais altos de precipitação, no Ceará, podem estar associados, também, à atuação de sistemas frontais (KOUSKY, 1979).

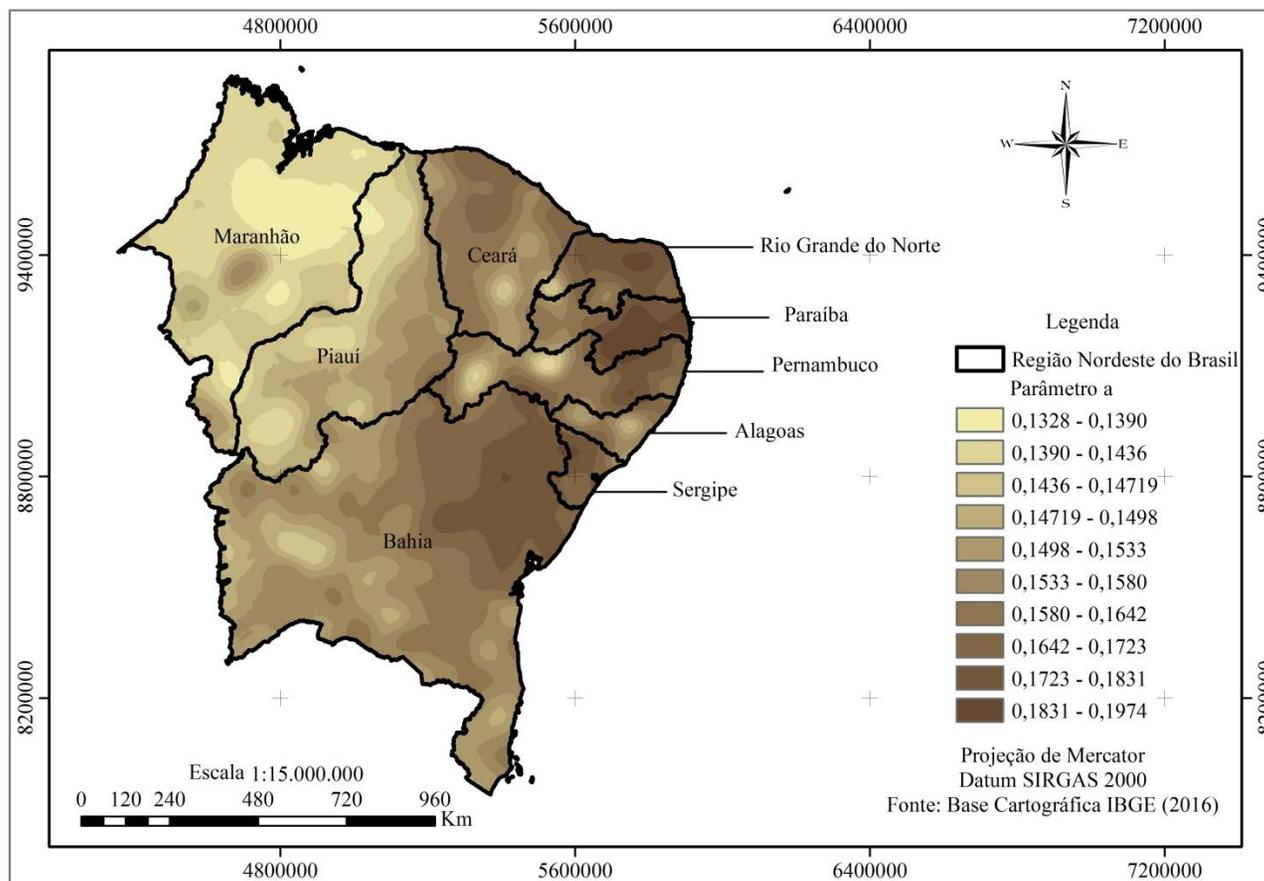
Os maiores valores do parâmetro “*k*”, observados na faixa litorânea do Piauí, Ceará e do Nordeste do Rio Grande do Norte ao Norte da Bahia, podem ser relacionados com os climas de Monção (Am) e Tropical Úmido (Af) encontrados na região, bem como à atuação dos Distúrbios de Leste.

O fato da superfície terrestre se resfriar mais rapidamente que a superfície oceânica, ao entardecer, leva ao registro de maiores temperaturas sobre os mares, gerando mecanismos de circulação ascendente da brisa noturna da terra sobre o oceano, formando nuvens de chuva próximas à orla marítima de todo o litoral nordestino, contribuindo, também, para os grandes volumes precipitados nessa região (MOLION; BERNARDO, 2002).

Com relação aos baixos valores do parâmetro “*k*” observados no interior dos Estados de Alagoas, Ceará, Bahia, Pernambuco e Sergipe, devem-se à atuação do clima Desértico (BWh) na região.

Os maiores valores do parâmetro “*a*” (FIGURA 26), no Estado da Bahia, podem ser explicados pela atuação dos sistemas frontais que têm uma frequência grande no Sul e Sudeste do Brasil, entretanto parte deles consegue penetrar na região Nordeste provocando chuvas (ARAÚJO et al., 2008).

Figura 26 - Superfície interpolada do parâmetro “a”.



A presença de ilhas com características secas e entorno de valores maiores, em algumas regiões dos Estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí, na Figura 26, podem ser relacionadas com o clima Semiárido (BSH), atuante na região, bem como explicada pela atuação dos VCAS que apresentam tais características (ARAÚJO et al., 2008).

Com relação aos parâmetros “*b*” e “*c*” (Figuras 27 e 28 respectivamente), pode-se observar que apresentam uma homogeneidade na distribuição espacial que reflete a baixa variação já verificada pelo CV e o baixo grau de dependência espacial constatado pelo GD.

Lorenzoni et al. (2014) encontraram valores constantes dos parâmetros *b* e *c* para duas estações nas cidades de Guaporema e Cidade Gaúcha no Estado do Paraná. Almeida et al. (2013) encontraram valores menos variáveis de ambos os parâmetros para os Municípios de Viçosa e Palmeira dos Índios no Estado de Alagoas. Souza et al. (2012) verificaram que os parâmetros “*b*” e “*c*” apresentaram baixa variação com valores próximos da média. Aragão et al. (2013) testaram algumas metodologias para estimação de chuvas no Estado de Sergipe, fixando os valores dos parâmetros “*b*” e “*c*” e utilizando valores individuais com baixa variação, obtendo um erro de 5% entre os valores de intensidade, para as diferentes metodologias, considerando-o desprezível e inferindo que os parâmetros “*b*” e “*c*” podem ser regionalizados sem perda da qualidade dos resultados da estimação.

Apesar da pouca variação nos valores dos parâmetros “*b*” e “*c*”, a presença da classe mais elevada representada no Estado da Paraíba, pode corresponder às altitudes mais elevadas da Serra da Borborema, podendo, dessa forma, relacionar com os valores obtidos em “*k*”, na região litorânea, entendendo que, ao lado Leste da Serra, estão as áreas mais úmidas (Zona-da-Mata), já, ao Oeste, encontram-se áreas mais secas, tendo, no planalto da Borborema, um obstáculo natural para a chegada de chuvas no sertão.

Figura 27 - Superfície interpolada do parâmetro “b”

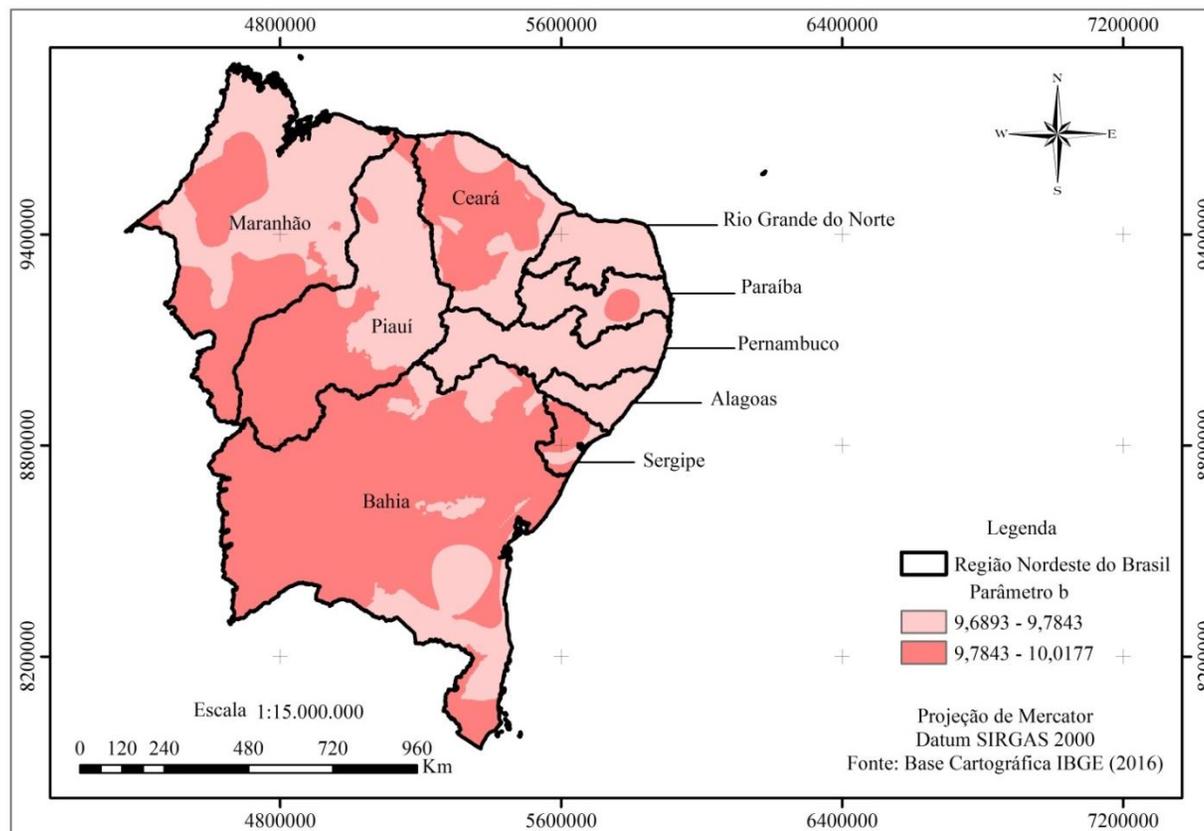
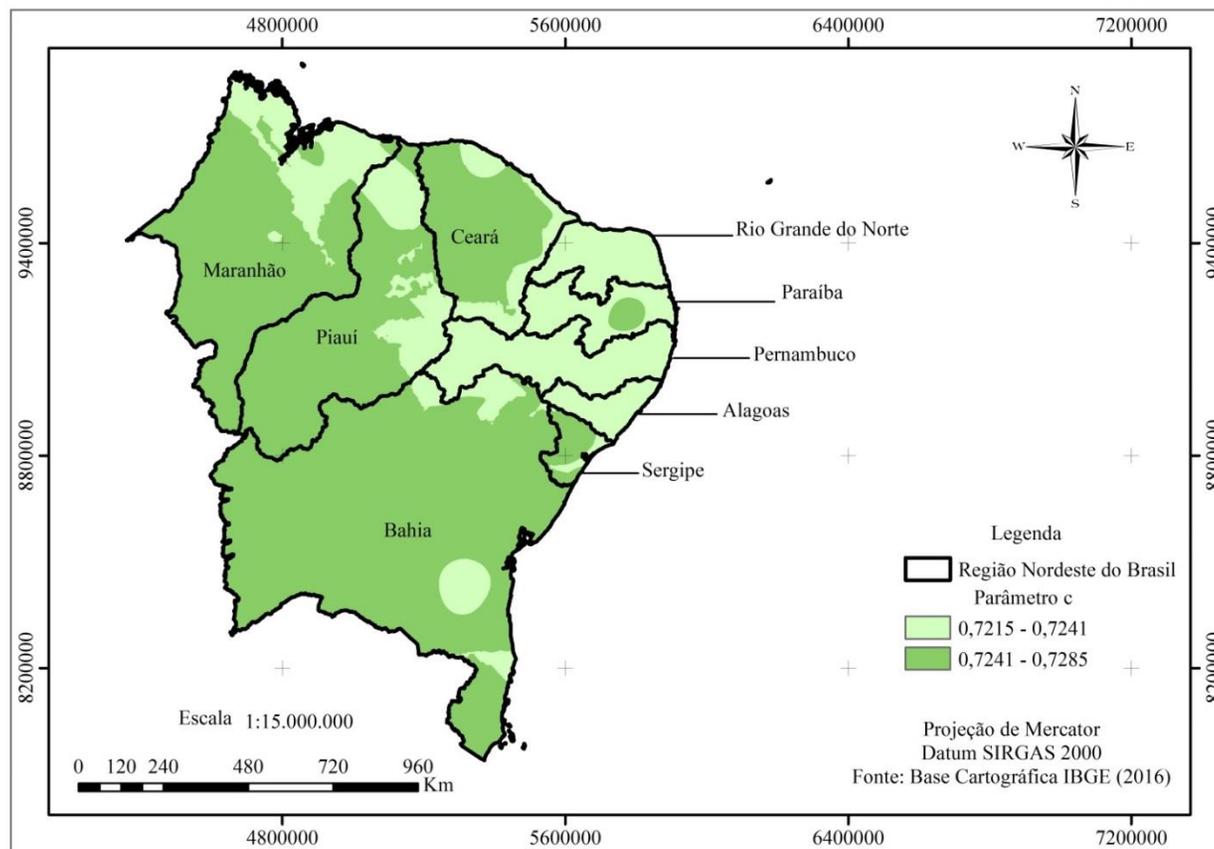


Figura 28 - Superfície interpolada do parâmetro “c”.



Da mesma forma, ocorre, no Sul da Bahia, área de maior valor dos parâmetros “*b*” e “*c*” corresponde a maiores elevações da Chapada Diamantina.

Nota-se que há uma grande complexidade na atuação dos fatores que definem a precipitação, em cada região, podendo o mesmo sistema atmosférico causar grandes chuvas e grandes secas, em um mesmo local, porém, em épocas diferentes. Definindo, para cada local um comportamento distinto de precipitação, ressalta-se a importância da obtenção de relações IDF locais.

Em um estudo realizado por Bernardo (1999), na cidade de Maceió, comparando as normais climatológicas do período de 1931-1960 com as do período de 1961-1990, foi percebido um aumento de 31%, no total anual da precipitação pluviométrica. A distribuição dos totais mensais deixou de ter seu auge no mês de maio e passou a apresentar um topo abrangendo os quatro meses mais chuvosos (abril, maio, junho e julho), mostrando que o clima está em constante alteração, sendo de extrema importância seu monitoramento contínuo e a atualização dos dados relativos a precipitações para a obtenção de planejamentos ambientais adequados.

Com o intuito de verificar a qualidade dos valores preditos pela interpolação gerada pelo método da Krigagem ordinária e ajuste do semivariograma pelo modelo teórico gaussiano, a seguir, são apresentados os resultados obtidos pela validação cruzada.

As Figuras 29, 30, 31 e 32 ilustram a comparação dos valores medidos com os valores preditos da interpolação dos parâmetros “*k*”, “*a*”, “*b*” e “*c*”, respectivamente. Os valores obtidos devem se espalhar ao redor da reta 1:1 (em vermelho), a linha de tendência (em preto) é ajustada pela dispersão dos pontos, indicando a posição da maior tendência de valores. Para que o modelo de Krigagem seja considerado bom é necessário que a linha de tendência esteja próxima da reta 1:1. Quando a linha de tendência está na horizontal, indica que os dados são independentes, que não há uma dependência espacial

(ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2014). Os parâmetros “*b*” e “*c*” apresentam uma suave inclinação, na sua linha de tendência, constatando a fraca dependência espacial existente relativa a esses parâmetros.

Figura 29 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro “*k*”

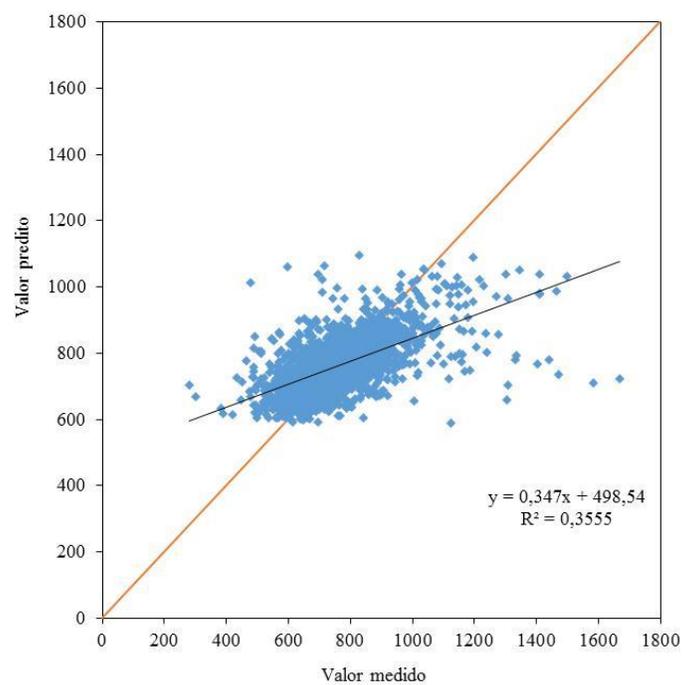


Figura 30 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro “a”

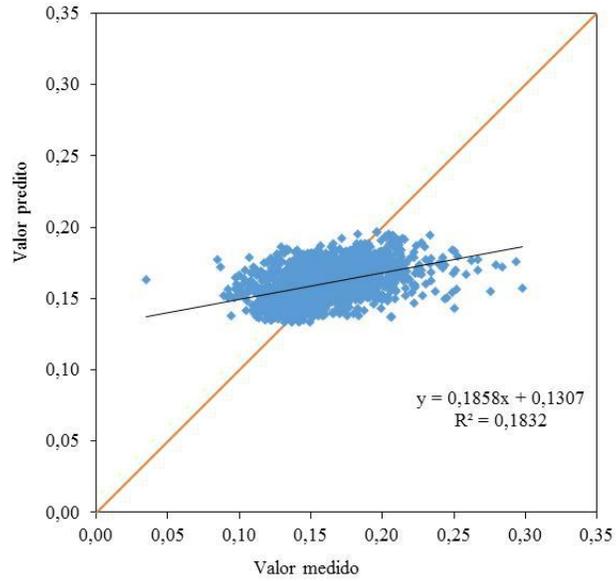


Figura 31 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro “b”

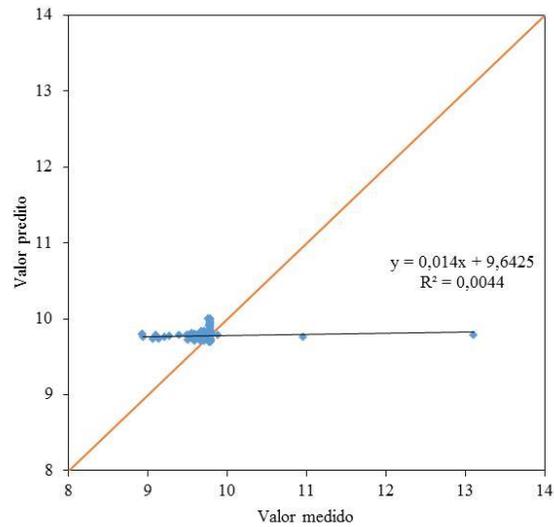
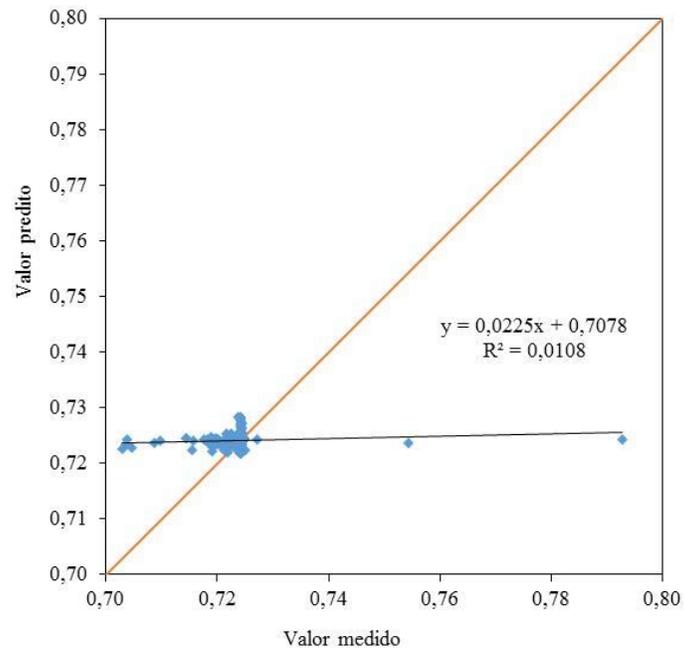


Figura 32 - Comparação dos valores medidos com os valores preditos por meio da técnica de validação cruzada para o parâmetro “c”



As Figuras 33, 34, 35 e 36 apresentam os erros de predição obtidos pela validação cruzada. Para um resultado de predição confiante, é necessário que os valores estejam, aproximadamente, ao longo da linha da distribuição normal (em preto) (ESRI, 2014). Apesar dos parâmetros “b” e “c” apresentarem apenas suave inclinação, indicando a baixa dependência espacial, os valores de erros de ambos seguem uma distribuição normal, mostrando que a Krigagem está predizendo, com qualidade, os valores regionalizados dos parâmetros das relações IDF.

Figura 33 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e da distribuição normal para o parâmetro “ k ”.

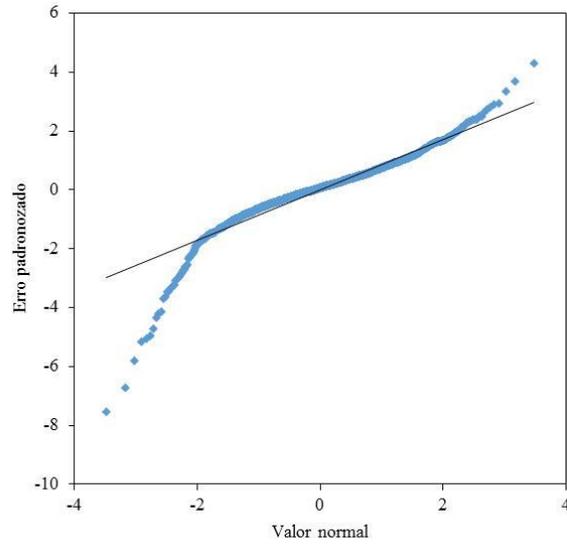


Figura 34 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e da distribuição normal para o parâmetro “ a ”.

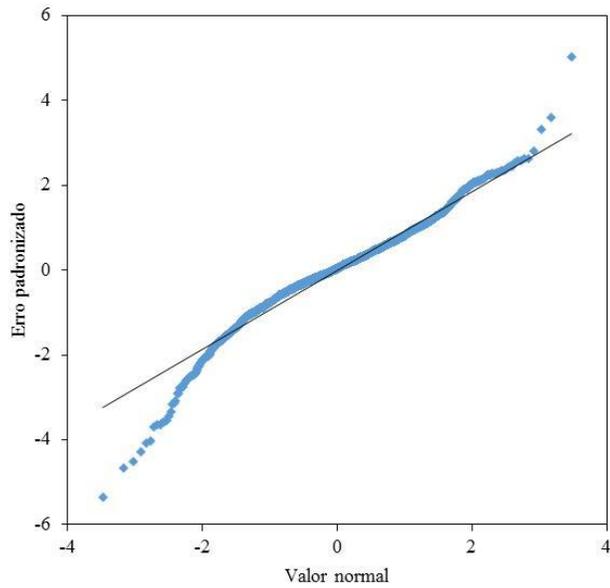


Figura 35 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e da distribuição normal para o parâmetro “ b ”

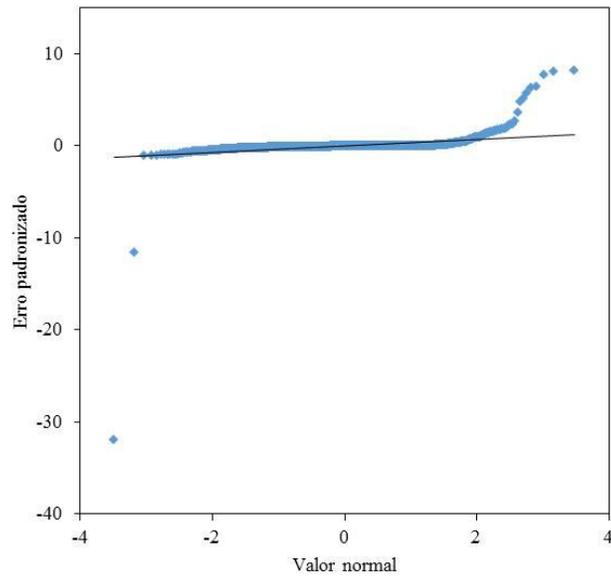
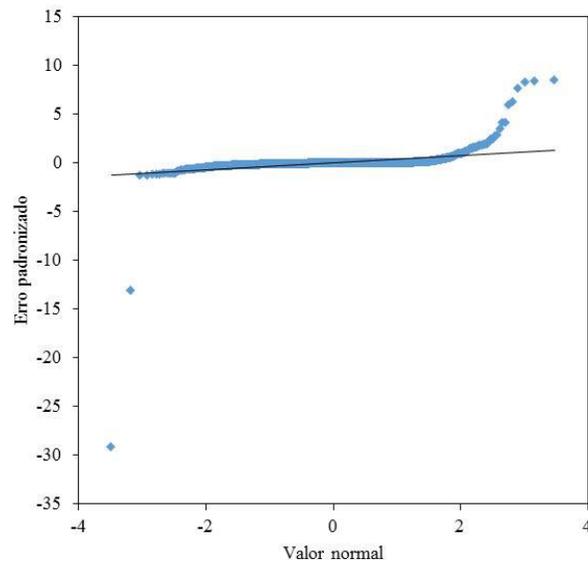


Figura 36 - Comparação dos erros de predição obtidos por meio da técnica de validação cruzada e da distribuição normal para o parâmetro “ c ”



5 CONCLUSÃO

- A distribuição de frequências estimada pelo método dos momentos da distribuição de Gumbel aderiu às frequências observadas pelo teste do Qui- quadrado, permitindo estimar intensidades de chuva associadas a um período de retorno e tempo de duração.
- Os modelos IDF foram ajustados para as 2042 estações da região Nordeste, utilizadas neste estudo, apresentando desempenho ótimo avaliado pelo coeficiente de determinação r^2 e de Willmott.
- Os parâmetros das relações IDF apresentaram dependência espacial, ainda que baixa, possibilitando o uso da krigagem como método de interpolação.
- A maior dependência espacial foi encontrada no parâmetro “ k ” ainda que a classificação seja de um grau dependência moderado.
- O modelo que melhor ajustou o semivariograma foi o Gaussiano, pois apresentou os valores mais adequados na análise de erros. Exceto para o parâmetro “ a ” que foi o único que não apresentou nenhum valor apropriado para este modelo.
- Foi possível gerar informações, para localidades desprovidas de monitoramento, na região Nordeste.

REFERÊNCIAS

ADAMOWSKI, K. ; ALILA, T. ; PILON, P. J. Regional rainfall distribution for Canada. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 42, p. 75-88, 1996.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Operação e modernização da rede hidrometeorológica nacional, coordenada pela ANA, para atendimento das salas de situação da ANA e dos Estados**. Brasília, DF, 2013. 76 p.

ALMEIDA, K. N. S. et al. Parâmetros da equação de chuvas intensas nos municípios de Viçosa e Palmeira dos Índios - AL. In: CONGRESSO NORDESTINO DE ENGENHARIA FLORESTA, 4.; SEMANA DE ENGENHARIA FLORESTAL, 3., 2013, Vitória da Conquista. **Anais...** Vitória da Conquista, 2013. p. 925-929.

ARAGÃO, R. et al. Chuvas intensas para o Estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 243-252, 2013.

ARAÚJO, L. E. et al. Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.

BACK, A. J. Seleção de distribuição de probabilidade para chuvas diárias extremas do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 16, n. 2, p. 211-222, 2001.

BEIJO, L. A. et al. Estudo da precipitação máxima em Jabotical (SP) pela distribuição de Gumbel utilizando dois métodos de estimação dos parâmetros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 141-147, 2003.

BEIJO, L. A.; MUNIZ, J. A.; CASTRO NETO, P. Tempo de retorno das precipitações máximas em lavras (MG) pela distribuição de valores extremos do tipo I. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 557-667, maio/jun. 2005.

BERNARDO, S. O. **Clima e suas anomalias para a cidade de Maceió**. 1999. 122 p. Monografia (Graduação em Física)-Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 1999.

BERTONI, J. C. Elementos de hidrometeorologia. In: TUCCI, C. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 53-78.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 177-235.

BRASIL. **Lei 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 28 maio 2015.

BRASIL. **Lei nº 9.984**, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9984.htm>. Acesso em: 28 maio 2015.

CALDEIRA, T. L. et al. Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 197-203, 2015.

CALVETTI, L.; BENETTI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. Integração do radar meteorológico doppler do Simepar e uma rede de pluviômetros para a estimativa da precipitação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1137-1144.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, São José dos Campos, v. 5, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. (Ed.). **Geoprocessamento em projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. p. 5-36.

CAMBARDELLA, C. A. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 2, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, A. R. et al. Equações de Intensidade-Duração-Frequência de chuvas para o Estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 3, p. 488-498, 2014.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 377-384, 2005.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA/CNPQ; Brasília, DF: EMBRAPA/SPI, 1994. 640 p.

CASTRO, A. L. P. de; SILVA, C. N. P.; SILVEIRA, A. Curvas intensidade-duração frequência das precipitações extremas para o município de Cuiabá (MT). **Ambiência: Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 7, n. 2, p. 305-315, 2011.

CECÍLIO, R. A. et al. Avaliação de interpoladores para os parâmetros das equações de chuvas intensas no Espírito Santo. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 82-92, 2009.

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**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 501-504, 2003.

CHEN, C. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 109, n. 12, p. 1603-1621, 1983.

COUTINHO, A. P. et al. Determinação de equações de chuvas intensas para municípios das mesorregiões do Estado de Pernambuco com dados pluviométricos. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2010. p. 1-14.

DAMÉ, R. C. F. et al. Análise de frequência hidrológica dos dados de precipitação pluvial de algumas estações agroclimatológicas da região sul do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 351-355, 1996.

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S. Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para Pelotas, RS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 245-255, 2008.

DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. **Estudo de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro**. 2. ed. Brasília: CPRM, 2000. 50 p.

DENARDIN, J. E. et al. Características fundamentais da chuva no Brasil: I., Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, n. 4, p. 419-421, abr. 1980.

DENARDIN, J. E.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, n. 10, p. 1409-1416, out. 1982.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS desktop**. Version 10.2. Redlands, 2014.

FALAGUASTA, L. N.; GENOVEZ, A. M. Equações de chuvas intensas generalizadas para os Estados de São Paulo e Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 169-176, 2003.

FECHINE SOBRINHO, V. **Aplicação do método das isozonas na obtenção das Equações IDF de chuvas intensas dos municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato, CE**. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2011.

FECHINE SOBRINHO, V. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 7, p. 727-734, 2014.

FENDRICH, R. **Chuvas intensas para obras de drenagem no Estado do Paraná**. Curitiba: Champagnat, 1998. 99 p.

FERNANDES, M. M. et al. Chuvas intensas no Estado do RJ: estimativa dos parâmetros da equação intensidade duração frequência. In: CALDEIRA, M. V. W. et al. (Ed.). **Tecnologia, ciência e extensão: como otimizar a produção florestal no Brasil?** Alegre: CAUFES, 2015. p. 202-209.

FORGIARINI, F. R.; VENDRUSCOLO, D. S.; RIZZI, E. S. Análise de chuvas orográficas no centro do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 13, n. 9, p. 107-119, 2014.

FRANCO, C. S. et al. Distribuição de probabilidades para precipitação máxima diária na bacia hidrográfica do Rio Verde, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 7, p. 735-741, 2014.

FREITAS, A. J. et al. **Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa, MG: Ed. UFV, 2001. 65 p.

GARCIA, S. S. et al. Determinação da equação intensidade-duração-frequência para três estações meteorológicas do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 575-581, 2011.

GONÇALVES, L. S. **Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos de Saneamento Ambiental)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HERNANDEZ, V. Ainda as equações de chuvas intensas: pode-se generalizar? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9.; SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS, 5., 1991, Rio de Janeiro. **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1991. p. 193-203.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 15., 2006, Caxambu. **Anais...** Caxambu: ABEP, 2006. p. 2-22.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. 2006. 400 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KANEGA JÚNIOR, H. et al. Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 859-866, 2007.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 107, n. 103, p. 1140-1153, 1979.

KÜCHLER, O. A. et al. Sistema para aquisição de dados pluviométricos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 10., 2010, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2010. p. 1-14.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LORENZONI, M. Z. et al. Curvas intensidade-duração-frequência de chuvas intensas de Cidade Gaúcha e Guaporema, PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 43., 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2014. p. 1-4.

LUCAS, T. P. B. et al. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 13, n. 9, p. 7-21, 2014.

MACHADO, P. J. O.; TORRES, F. T. P. **Introdução à hidrogeografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012. 178 p.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; MELLO, L. T. A. Uso dos métodos de Krigagem e Spline de tensão no mapeamento de chuvas na região metropolitana de Goiânia e seu entorno. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL CAMINHOS ATUAIS DA CARTOGRAFIA NA GEOGRAFIA, 2., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EDUSP, 2010. p. 128.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**: sub projeto: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI: relatório nº 1: caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos modelos globais de clima do IPCC. Brasília, DF: MMA, 2007. 185 p.

MARTINEZ JUNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. **Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE-CTH, 1999. 124 p.

MARTINEZ JUNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. **Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE-CTH, 2014. 262 p.

MELLO, C. R. et al. Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 693-698, 2001.

MELLO, C. R. et al. Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 532-539, 2008.

MELLO, C. R. et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 925-933, 2003a.

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

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 4, p. 318-334, 2005.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 68-74, 2009.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Porto Alegre, n. 13, p. 59-68, 2009.

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

NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. **Tellus**, Stockholm, v. 24, n. 4, p. 336-343, 1972.

NERILO, N. et al. **Chuvas intensas no Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: UFSC/EDIFURB, 2002. 156 p.

OLIVEIRA, L. F. C. de; ANTONINI, J. C. A.; GRIEBELER, N. P. Estimativas de chuvas intensas para o Estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 22-33, 2008.

OLIVEIRA, L. F. C. de et al. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.

OLIVEIRA, L. F. C. de et al. Estimativa das equações de chuvas intensas para algumas localidades no Estado de Goiás pelo método da desagregação de chuvas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 23-27, 2000.

OLIVEIRA, L. F. C. de et al. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Brasília, DF, v. 35, n. 1, p. 13-18, 2005.

OLIVEIRA, L. F. C. de et al. Métodos de estimativa de precipitação máxima para o Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 620-625, 2008.

OLIVEIRA, L. F. C. de et al. Modelos de predição de chuvas intensas para o Estado do Mato Grosso, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 274-290, 2011.

OLIVEIRA, N.; FOGACCIA, C. V. C.; ALMEIDA, R. M. B. Caracterização preliminar das chuvas intensas no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF, 1998. 1 CD-ROM.

OLSSON, J. Evaluation of a scaling cascade model for temporal rain- fall disaggregation. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v. 2, n. 1, p. 19-30, 1998.

PARIZZI, M. G. et al. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, p. 49-68, 2010.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil**. Brasília, DF: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 1957. 246 p.

PINTO, F. A. **Chuvas intensas no Estado de Minas Gerais: análises e modelos**. 1995. 87 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

PINTO, F. A. et al. Estimativa de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais utilizando registros diários. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 2, p. 8-21, 1996.

RAMOS, C. M. C. et al. Análise temporal de fatores climáticos em Petrolina, PE. In: CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA RURAL, 10.; CONGRESO DEL MERCOSUR, 2., 2009, Rosário. **Actas...** Rosário: Editorial de La Universidad Nacional de Rosario, 2009. p. 1036-1041.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: Ed. EESC/USP, 1998. 840 p.

RODRIGUES, J. O. et al. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 9, n. 4, p. 511-519, 2008.

SAMPAIO, M. V. **Determinação e espacialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul**. 2011. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SANTOS, A. H. et al. Ajuste de modelo teórico aplicado a parâmetros de precipitação na área de transposição do Rio São Francisco. In: CONGRESSO DOS PÓS-GRADUANDOS DA UFLA, 14., 2005, Lavras. **Anais...** Lavras: Ed. UFLA, 2005. p. 1-5.

SANTOS, G. G. et al. Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 899-905, 2009.

SANTOS, R. A.; LUCENA, P. G.; CARVALHO, R. S. Cálculo da chuva intensa pelo método das Isozonas para cidades do Estado da Paraíba. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1334-1343, 2015.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica; Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo, 1980. 466 p.

SENNA, R. S. et al. Metodologias para estimativa dos parâmetros da equação de chuvas intensas no Estado do Espírito Santo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 18, n. 6, p. 496-503, 2010.

SILVA, A. N. R. et al. **SIG: uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes: uma ferramenta 3D para análise ambiental, avaliação multicritério, redes neurais artificiais**. São Carlo: EduFScar, 2008. 227 p.

SILVA, B. M. et al. Chuvas intensas em localidades do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 135-147, 2012.

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

SILVA, D. D. et al. Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial para o Estado de Tocantins. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 11, n. 4, p. 1-8, 2003.

SILVA, D. D. et al. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 3, p. 11-21, 1999.

SILVA, K. R. et al. Interpolação espacial da precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 14, n. 4, p. 417-427, 2011.

SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas para o Estado do Espírito Santo, Brasil. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 3, p. 312-323, 2010.

SILVA, V. P. R. et al. Evaluating the urban climate of a typically tropical city of northeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 161, n. 1, p. 45-59, 2009.

SILVA, V. P. R. et al. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Oxford, v. 68, n. 7, p. 781-792, 2006.

SILVA, V. P. R.; PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 27, n. 2, p. 163-172, 2012.

SOUZA, F. A. S.; SILVA, V. P. R. Gestão e controle ambiental: análise de intensidade de chuva pela curva normalizada da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 319-323, 1998.

SOUZA, J. L. L. L. et al. Avaliação de métodos de interpolação aplicados à espacialização das chuvas no Território Identidade Portal do Sertão / Bahia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 4295-4302.

SOUZA, R. O. R. M. et al. Equações de chuvas intensas para o Estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 999-1005, 2012.

TEIXEIRA, D. B. et al. Krigagem ordinária e simulação sequencial gaussiana na interpolação da emissão de CO₂ do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 26-42, 2011.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Revista Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Recife: INMET, 2006. Versão Digital 2.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I. T. Mapeamento da chuva diária máxima provável para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 15, p. 93-98, 1991.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WOJCIECHOWSKI, J. C. et al. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional de decidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, p. 383-391, 2009.