



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA RODRIGUES DA COSTA

**GEOESTATÍSTICA APLICADA À ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CHUVAS
INTENSAS NO ESTADO DO CEARÁ**

CRATEÚS

2022

GABRIELA RODRIGUES DA COSTA

GEOESTATÍSTICA APLICADA À ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CHUVAS
INTENSAS NO ESTADO DO CEARÁ

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

Orientador: Prof. Ma. Tatiane Lima Batista.

CRATEÚS

2022

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

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

- C872g Costa, Gabriela Rodrigues da.
Geoestatística aplicada à análise da distribuição de chuvas intensas no estado do Ceará / Gabriela Rodrigues da Costa. – 2022.
88 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Profa. Ma. Tatiane Lima Batista.
1. Chuvas intensas. 2. Geoestatística. 3. Ceará. I. Título.

CDD 620

GABRIELA RODRIGUES DA COSTA

GEOESTATÍSTICA APLICADA À ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CHUVAS
INTENSAS NO ESTADO DO CEARÁ

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

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Ma. Aline Moreira Damasceno
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC – MINAS)

Aos meus pais, Antônio e Francisca.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas infinitas bênçãos em minha vida.

Aos meus pais Antônio e Francisca e meus irmãos Rogilson, Regilania e Rildson, por serem minha base em todos os momentos e por fazerem o possível e impossível para oferecerem o apoio que eu preciso em todos os momentos.

À minha querida orientadora Prof^a. Ma. Tatiane Lima Batista, pela excelente orientação, paciência e por ter acreditado em mim.

Aos membros participantes da banca examinadora Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre e Ma. Aline Moreira Damasceno pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos amigos Felipe, Amanda e Nargila pela relação de confiança e extrema irmandade construída ao longo dos anos de graduação, não haveriam pessoas melhores para compartilhar essa jornada comigo.

Às minhas amigas Laiane e Karol, pela paciência e companheirismo ao longo dos anos em que morávamos juntas, e pela amizade que compartilhamos até hoje. Ao amigo Jailson pela amizade construída durante as nossas fases mais desafiadoras, por todos os conselhos e palavras de apoio e carinho. Ao amigo Jean pelo companheirismo nas pesquisas que realizamos durante a graduação.

Aos professores que contribuíram na minha formação, em especial ao Prof. Me. Luís Felipe Cândido por todos os ensinamentos durante a graduação.

E por fim, a todos que direta e indiretamente contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal ao longo dos anos e que tornaram o sonho de me tornar Engenheira Civil possível.

“São as nossas escolhas [...] que revelam o que realmente somos, muito mais do que as nossas qualidades.”

(ROWLING, J. K., 1998)

RESUMO

As precipitações intensas podem causar diversos impactos na estrutura socioeconômica, como: inundações, deslizamento de encostas, danos materiais e a perda de vidas humanas. Logo, é essencial o desenvolvimento de pesquisas que promovam o conhecimento da distribuição espacial e temporal das chuvas, visando o planejamento do uso do solo e auxiliando em obras hidráulicas, essenciais na gestão hídrica do semiárido. Em vista disso, na caracterização de eventos de chuvas extremas são utilizadas as curvas ou equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) que estabelecem a magnitude das chuvas para um período de recorrência, duração e local específico. Para o Ceará, não foram encontrados trabalhos que analisem a variabilidade espacial das chuvas intensas, lacuna explorada nesta pesquisa. Desse modo, o objetivo desse trabalho consistiu em analisar a distribuição espacial das chuvas intensas no estado do Ceará aplicando técnicas geoestatísticas. Para tanto, foram calculadas as intensidades por meio das equações IDF desenvolvidas por Batista (2018) utilizando o método das isozonas e, posteriormente, foi conduzido um estudo geoestatístico utilizando o *software* R, com o pacote *gstat* e o *software* QGIS. Foi realizada uma análise exploratória seguida de uma análise variográfica, modelando o semivariograma experimental e ajustando os modelos esférico, exponencial e gaussiano. O modelo que apresentou o melhor ajuste, pela validação cruzada, foi aplicado ao processo de mapeamento por krigagem ordinária ou krigagem universal. Foi constatado um bom desempenho das técnicas geoestatísticas no mapeamento das chuvas intensas no estado do Ceará, com destaque para o modelo de semivariograma teórico exponencial que se sobressaiu na maioria dos eventos analisados. Verificou-se que as regiões do Cariri, Centro Sul, sul do Vale Jaguaribe e do Sertão Central apresentaram as maiores intensidades nas chuvas intensas de curta duração (5 minutos), enquanto as regiões do litoral, em especial a Grande Fortaleza, Litoral Leste e Litoral Norte se destacaram para as chuvas de durações mais longas (240 minutos). Já as regiões do Sertão de Canindé, sul do Maciço de Baturité, norte do Sertão Central e em especial o Vale do Curu/Litoral Oeste, apresentaram as menores intensidades nas análises realizadas. Portanto, foi possível apresentar uma perspectiva ampla sobre a distribuição espacial dos eventos de chuvas intensas, verificar a existência de dependência espacial e identificar áreas críticas com relação a sua ocorrência.

Palavras-chave: Chuvas Intensas. Geoestatística. Ceará.

ABSTRACT

Intense precipitation can cause several impacts on the socio-economic structure, such as: floods, landslides, material damage and loss of human lives. Therefore, it's essential to develop research that promotes knowledge of the spatial and temporal distribution of rainfall, aiming at land use planning and assisting in hydraulic works, essential in water management in the semi-arid region. In view of this, in the characterization of extreme rainfall events, the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves or equations are used, which establish the magnitude of rainfall for a specific recurrence period, duration and location. For Ceará, no studies were found that analyze the spatial variability of intense rainfall, a gap explored in this research. Thus, the objective of this work was to analyze the spatial distribution of heavy rainfall in the state of Ceará by applying geostatistical techniques. For that, intensities were calculated by means of the IDF equations developed by Batista (2018) using the isozone method and, subsequently, a geostatistical study was conducted using the R software, with the gstat package and the QGIS software. An exploratory analysis was performed followed by a variational analysis, modeling the experimental semivariogram and fitting the spherical, exponential, and gaussian models. The model that presented the best fit, by cross-validation, was applied to the mapping process by ordinary kriging or universal kriging. It was found a good performance of the geostatistical techniques in the mapping of heavy rainfall in the state of Ceará, with emphasis on the exponential theoretical semivariogram model that stood out in most of the events analyzed. It was found that the regions of Cariri, Centro Sul, south Vale do Jaguaribe and Sertão Central presented the highest intensities in the short duration intense rains (5 minutes), while the regions of the coast, especially Grande Fortaleza, Litoral Leste and Litoral Norte stood out for the rains of longer durations (240 minutes). The regions of the Sertão de Canindé, south of the Maciço de Baturité, north of the Sertão Central and especially the Vale do Curu/Litoral Oeste, presented the lowest intensities in the analyses performed. Therefore, it was possible to present a broad perspective on the spatial distribution of heavy rainfall events, verify the existence of spatial dependence and identify critical areas with respect to their occurrence.

Keywords: Intense rainfall. Geostatistics. Ceará.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Propriedades de um semivariograma com patamar	25
Figura 2 - Modelos teóricos de semivariograma	27
Figura 3 - Tipos de anisotropia, a) geométrica, b) zonal, c) mista	28
Figura 4 - Variograma experimental com tendência	29
Figura 5 - Localização do estado do Ceará e regiões de planejamento	34
Figura 6 - Precipitação acumulada mensal entre os anos de 1981 a 2010 para os municípios de Guaramiranga, Fortaleza e Quixeramobim	36
Figura 7 - Unidades Geoambientais no Estado do Ceará	38
Figura 8 - Mapa hipsométrico do Estado do Ceará	40
Figura 9 - Delineamento da análise geoestatística.....	41
Figura 10 - Localização dos postos pluviométricos	42
Figura 11 - Diagramas <i>box plot</i> com as intensidades (mm/h) para os TR de 10, 50 e 100 anos e duração de 5, 30 e 240 minutos	50
Figura 12 - Histograma com as intensidades (mm/h) para os TR de 10, 50 e 100 anos e duração de 5, 30 e 240 minutos.....	53
Figura 13 - Semivariogramas teóricos ajustados para as durações de 5, 30 e 240 minutos associados aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos	55
Figura 14 - Mapas de chuvas intensas para a duração de 5 minutos associada aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.....	59
Figura 15 - Mapas de chuvas intensas para a duração de 30 minutos associada aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.....	60
Figura 16 - Mapas de chuvas intensas para a duração de 240 minutos associada aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.....	61
Figura 17 - Isozonas de Torricco (1974) para o estado do Ceará	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equação matemática dos modelos teóricos de semivariogramas	26
Tabela 2 - Média das precipitações diárias máximas para as regiões do Ceará	37
Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis analisadas.....	52
Tabela 4 - Parâmetros dos modelos de semivariograma (C_0 (efeito pepita), C (contribuição), a (alcance)), t é a duração da chuva em minutos, análise do viés estatístico (BIAS), Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), Erro Quadrático Médio (RMSE) e Grau de dependência espacial (GD).....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IDF	Intensidade – Duração – Frequência
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
VCAS	Vórtices Ciclônicos de Ar Superior
FF	Frentes Frias
LI	Linhas de Instabilidade
OL	Ondas de Leste

LISTA DE SÍMBOLOS

TR	Tempo de retorno
p	Probabilidade de ocorrência de um evento de chuva
I	Intensidade de um evento de chuva
t	Duração da precipitação
A	Parâmetro característico da equação IDF para cada local
b	Parâmetro característico da equação IDF para cada local
c	Parâmetro característico da equação IDF para cada local
d	Parâmetro característico da equação IDF para cada local
γ	Semivariância estimada
h	Distância entre pares de pontos
m	Número de pares de pontos
Z	Valor da variável regionalizada
C	Contribuição
C_o	Efeito pepita
a	Alcance
\hat{Z}	Valor estimado pela krigagem
λ	Peso da estimativa por krigagem
N	Número de dados amostrados na vizinhança
Q_1	Primeiro quartil
Q_3	Terceiro quartil
AIQ	Amplitude interquartis
D_n	Estatística de teste de Lilliefors
$RMSE$	Erro Quadrático Médio
$BIAS$	Viés estatístico percentual
EMPA	Erro Médio Percentual Absoluto
GD	Grau de Dependência Espacial
C_v	Coefficiente de variação
C_a	Coefficiente de assimetria
\bar{x}	Média
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Problemática e questão de pesquisa.....	17
1.3	Objetivos.....	18
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>18</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
1.4	Justificativa	18
1.5	Delimitação do estudo	19
1.6	Roteiro temático.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Chuvas intensas	20
<i>2.1.1</i>	<i>Métodos de mensuração das chuvas intensas</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Estudos sobre chuvas intensas no estado do Ceará</i>	<i>22</i>
2.2	Geoestatística	23
<i>2.2.1</i>	<i>O semivariograma</i>	<i>24</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Efeitos direcionais</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2.1</i>	<i>Anisotropias.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2.2</i>	<i>Tendências</i>	<i>28</i>
<i>2.2.3</i>	<i>A krigagem.....</i>	<i>29</i>
2.3	Aplicações da geoestatística em estudos sobre precipitações.....	31
3	MÉTODO DE PESQUISA	33
3.1	Área de estudo.....	33
<i>3.1.1</i>	<i>Caracterização física do estado do Ceará.....</i>	<i>35</i>
3.2	Delineamento de pesquisa.....	41
<i>3.2.1</i>	<i>Seleção de dados</i>	<i>42</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Análise exploratória dos dados</i>	<i>43</i>
<i>3.2.2.1</i>	<i>Diagrama box plot</i>	<i>43</i>
<i>3.2.2.2</i>	<i>Histograma e o teste de normalidade de Lilliefors</i>	<i>44</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Análise geoestatística.....</i>	<i>45</i>
<i>3.2.3.1</i>	<i>Efeitos direcionais</i>	<i>45</i>
<i>3.2.3.2</i>	<i>Modelagem do semivariograma experimental</i>	<i>46</i>

3.2.3.3	Ajuste do semivariograma teórico.....	46
3.2.3.4	Validação cruzada.....	47
3.2.3.4.1	Erro Quadrático Médio (<i>Root Mean Square Error</i> , RMSE).....	47
3.2.3.4.2	Viés estatístico (<i>BIAS</i>).....	47
3.2.3.4.3	Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA).....	48
3.2.3.4.4	Grau de Dependência Espacial (GD).....	48
3.2.3.5	Interpolação por krigagem ordinária e krigagem universal.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	Análise exploratória dos dados.....	50
4.2	Análise geoestatística.....	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE A – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS.....	71
	APÊNDICE B – INTENSIDADES EM MM/H CALCULADAS PELAS EQUAÇÕES IDF DE BATISTA (2018).....	74
	APÊNDICE C – <i>SCRIPT</i> UTILIZADO.....	79
	ANEXO A – EQUAÇÕES IDF DE BATISTA (2018).....	82
	ANEXO B – QUANTIS PARA TESTE DE LILLIEFORS.....	87
	ANEXO C – COEFICIENTES DE DESAGREGAÇÃO DAS CHUVAS INTENSAS ASSOCIADAS ÀS ISOZONAS DE TORRICO (1974).....	88

1 INTRODUÇÃO

Na seção introdução são apresentadas a contextualização, a problemática, as questões de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos, justificava, delimitação do estudo e por fim o roteiro temático.

1.1 Contextualização

As precipitações intensas podem causar diversos impactos na estrutura socioeconômica, como: inundações, deslizamento de encostas, danos materiais e a perda de vidas humanas. Recentemente, no final do ano de 2021 e primeiros meses de 2022, fenômenos de precipitações extremas atingiram os estados brasileiros de Minas Gerais (CAETANO, 2022), São Paulo (G1 SP, 2022), Bahia (BBC NEWS BRASIL, 2021) e Rio de Janeiro (BARRETO; RESENDE, 2022) e provocaram danos econômicos e sociais com a perda de dezenas de vidas.

Dessa maneira, a compreensão e caracterização de eventos de precipitações intensas são de grande importância no gerenciamento de recursos hídricos (BATISTA; ALVES; TAVARES, 2018), planejamento e gestão de riscos em áreas urbanas (WANDERLEY *et al.*, 2021), projetos de estruturas de controle de erosão (BACK, 2020), dentre outros. Na hidrologia, as chuvas intensas podem ser entendidas como precipitações de elevada magnitude utilizadas como um valor crítico em projetos de drenagem (BASSO; ALLASIA; TASSI, 2019). Desse modo, na caracterização desses eventos são utilizadas as curvas ou equações de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) que estabelecem a magnitude das chuvas para um período de recorrência, duração e local específico (OUALI; CANNON, 2018).

No entanto, para a determinação das equações IDF é necessária uma grande base de dados pluviográficos que, geralmente, não estão disponíveis em razão da inexistência de um monitoramento contínuo, ou de informações insuficientes (FECHINE SOBRINHO *et al.*, 2014). Alternativamente, métodos que desagregam dados pluviométricos diários em chuvas de menores durações são utilizados para minimizar a escassez de informações (BATISTA, 2018; FECHINE SOBRINHO *et al.*, 2014). Além disso, outra alternativa consiste na utilização de técnicas com base no Sistema de Informações Geográficas (SIG) para a interpolação espacial de dados de precipitação (MELLO; VIOLA, 2013).

Nesse contexto, é comum a espacialização tanto dos parâmetros que compõem as equações IDF (BRAGA *et al.*, 2017; MELLO *et al.*, 2003) como a criação de mapas

interpolados com as grandezas de precipitações (XAVIER *et al.*, 2020), sejam as precipitações prováveis (ÁVILA; MELO; VIOLA, 2009), ou estimativas de chuvas intensas para uma determinada região ou estado (MELLO; VIOLA, 2013; SILVA NETO *et al.*, 2020).

Dentre os métodos mais utilizados para tais estudos estão a interpolação pelo inverso do quadrado da distância (MELLO *et al.*, 2003), curvatura mínima (CARVALHO; ASSAD, 2005) e o interpolador geostatístico da krigagem que se destaca dos demais por levar em consideração a variabilidade espacial entre os dados interpolados (LANDIM, 2006).

1.2 Problemática e questão de pesquisa

O estado do Ceará possui aproximadamente 93% do seu território localizado na região de clima semiárido (IPECE, 2022) com regime de precipitação bastante irregular (ROCHA *et al.*, 2021). Devido à alta variabilidade, a região é acometida por eventos tanto de secas e estiagens como também com a ocorrência de eventos extremos de precipitação, ocasionando enxurradas, inundações e alagamentos (LIMA; LIRA, 2021).

Nesse contexto, é essencial o desenvolvimento de pesquisas que subsidiem o conhecimento da distribuição espacial e temporal das chuvas, visando o planejamento do uso do solo e auxiliando em obras hidráulicas, como barragens, essenciais na gestão hídrica do semiárido.

Em trabalhos realizados para os estados do Tocantins (SILVA NETO *et al.*, 2020) e Minas Gerais (MELLO; VIOLA, 2013) os autores construíram mapas de chuvas intensas por meio da interpolação por krigagem, que permitiram conhecer de forma ampla a distribuição espacial e o comportamento das chuvas intensas nessas regiões, reconhecendo áreas críticas para a ocorrência das chuvas e subsidiando estudos relacionados a erosão. Entretanto, não foram identificados na literatura trabalhos que analisem a variabilidade espacial das chuvas intensas no estado do Ceará ou nas regiões de clima semiárido, lacuna explorada na presente pesquisa.

Dessa forma, este trabalho busca responder os seguintes questionamentos:

- Como ocorre a variação espacial das chuvas intensas no estado do Ceará?
- Quais as áreas críticas com relação a ocorrência de chuvas intensas no estado do Ceará?

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo geral*

Analisar a distribuição espacial das chuvas intensas no estado do Ceará aplicando técnicas geoestatísticas.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Para atingir o objetivo geral são traçados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma análise exploratória dos eventos de chuvas intensas;
- Modelar semivariogramas experimentais;
- Identificar o modelo de semivariograma teórico que apresenta o melhor ajuste aos eventos de chuvas analisados;
- Gerar mapas com as estimativas de distribuição das chuvas intensas no estado do Ceará;
- Identificar áreas críticas com relação à ocorrência de chuvas intensas no estado do Ceará.

1.4 Justificativa

De acordo com Martins e Theophilo (2007), um estudo pode ser justificado pela sua originalidade e relevância. Com relação a originalidade, este estudo busca contribuir para os estudos sobre chuvas intensas no estado do Ceará, em especial sobre a sua variabilidade espacial.

Com relação a relevância, Silva Neto *et al.* (2020) comentam que o mapeamento de grandezas climáticas é importante tanto na busca por melhorias de aspectos metodológicos quanto na geração de mapas de uso e aplicação prática para o planejamento do meio físico, manejo de bacias hidrográficas e projetos de obras hidráulicas.

As chuvas são de fundamental importância para a vida humana, e em regiões como o Nordeste brasileiro, em que a sua ocorrência apresenta sazonalidade, com períodos de secas severas, estudos relacionados a precipitação e planejamento de recursos hídricos são de grande relevância (LUNDGREN; SOUZA; LUNDGREN, 2017).

Silva Neto *et al.* (2020) citam ainda que para um planejamento integrado da gestão de recursos hídricos e do uso do solo é fundamental compreender a dinâmica espaço-temporal das chuvas intensas sob uma perspectiva ampla. Isso subsidia o dimensionamento de projetos de conservação do solo e de obras hidráulicas, além de identificar áreas de risco para a ocupação humana.

Assim, este estudo contribui para apresentação de uma perspectiva ampla sobre as chuvas intensas no estado do Ceará à medida que utiliza um interpolador que leva em consideração a dependência espacial, permitindo obter dados sobre como o fenômeno das chuvas intensas estão relacionadas no estado e também fornecendo dados para áreas não amostradas.

1.5 Delimitação do estudo

O presente estudo restringe-se a aplicação da interpolação por krigagem, ferramenta da geoestatística, para a criação mapas de chuvas intensas para o estado do Ceará considerando as intensidades referentes aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos e durações de 5, 30 e 240 minutos.

1.6 Roteiro temático

Este trabalho está organizado em cinco seções. Na seção introdução é apresentada a contextualização, a problemática que impulsionou o desenvolvimento do trabalho, os objetivos, a justificativa, delimitação do estudo e o roteiro temático. Na segunda seção, correspondente ao referencial teórico, são abordados os conceitos sobre chuvas intensas e geoestatística.

Na terceira seção é caracterizada a área de estudo e o método de pesquisa empregado para a construção dos mapas de chuvas intensas do estado do Ceará. Na quarta seção, são apresentados os resultados e as discussões pertinentes. Na quinta e última seção são realizadas as considerações finais sobre o estudo, a retomada do objetivo geral e a proposição de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico está organizado em três seções principais. A primeira trata sobre chuvas intensas, sendo abordados estudos sobre o tema no estado do Ceará, e alguns conceitos necessários. A segunda, sobre geoestatística, trata sobre o semivariograma, e a krigagem. Por fim, a terceira seção aborda as aplicações da geoestatística em estudos sobre precipitações.

2.1 Chuvas intensas

Toda água da atmosfera que atinge a superfície na forma de granizo, neve, neblina ou chuva é denominada precipitação (TUCCI, 2004). Dentre essas formas, a chuva é a principal causa dos processos hidrológicos de interesse para engenharia e apresenta grande aleatoriedade no espaço e no tempo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Uma chuva pode ser caracterizada pelas seguintes variáveis: altura pluviométrica, intensidade, duração e frequência de excedência (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Tucci (2004) explica essas variáveis como a seguir: altura pluviométrica é a espessura média da lâmina de água que cobriria uma região atingida se esta fosse plana e impermeável. A unidade de medida da altura de chuva é o milímetro de chuva. A duração é o período de tempo durante o qual o evento de chuva ocorre, geralmente é medido em minutos ou horas. Já a intensidade é a altura precipitada dividida pela duração da chuva e é expressa normalmente em $mm.hora^{-1}$. A frequência é a quantidade de ocorrência de eventos iguais ou superiores ao evento de chuva em consideração. Normalmente, chuvas mais intensas ocorrem raramente, por isso, possuem menos frequência, enquanto chuvas menos intensas são mais comuns.

Ainda de acordo com Tucci (2004) outra variável de grande importância é o Tempo de Retorno (TR). Ele expressa em anos uma estimativa do tempo em que um evento de chuva é igualado ou superado. Essa variável também pode ser definida como o inverso da probabilidade de excedência de um determinado evento em um ano qualquer. Sendo TR o período de retorno em anos, e p a probabilidade de um evento ser igualado ou superado em um ano qualquer, tem-se a Equação 1 a seguir:

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

Assim, uma chuva com intensidade equivalente a um tempo de retorno de 100 anos, possui uma probabilidade de ser igualada ou superada de 1%. Uma chuva com tal TR pode ocorrer uma vez a cada 100 anos, em média. Contudo, pode eventualmente ocorrer mais de uma chuva de TR de 100 anos ou pode não ser registrado um evento de precipitação de tal magnitude dentro desse período.

Batista (2018) pontua que analisando as relações entre a intensidade, duração e frequência de uma chuva verifica-se que quanto menor for a sua duração e maior o tempo de retorno, maior será a sua intensidade.

De acordo com Sabino *et al.* (2019) chuvas que geram elevado volume de água em curto intervalo de tempo são importantes variáveis meteorológicas para estudos climáticos. Essas chuvas, conhecidas como chuvas intensas, são causadoras de cheias e grandes prejuízos, inclusive à saúde pública (COLLISHONN; DORNELLES, 2013).

2.1.1 Métodos de mensuração das chuvas intensas

A nível nacional, tendo em vista a importância das chuvas intensas para estudos hidrológicos, estudos foram conduzidos visando o desenvolvimento de equações IDF para alguns estados, destaca-se: Pernambuco (LIMA NETO; TAVARES; BATISTA, 2021), Alagoas (BACK; CADORIN; GALATTO, 2020), Paraíba, (CAMPOS *et al.*, 2017), Rio Grande do Sul (DAMÉ *et al.*, 2014), Santa Catarina (BACK; HENN; OLIVEIRA, 2011), dentre outros.

Nesse contexto, uma das ferramentas mais utilizadas para auxiliar no conhecimento sobre chuvas intensas são as curvas Intensidade – Duração – Frequência (IDF). As relações IDF representam de forma simples, a máxima intensidade de chuva que poderá ocorrer com certa duração e frequência, associada a uma discretização temporal de poucos minutos (BASSO; ALLASIA; TASSI, 2019). Além da forma gráfica, a relação IDF também pode ser expressa por uma equação, como a Equação 2 (TUCCI, 2004):

$$I = \frac{A * TR^b}{(t + c)^d} \quad (2)$$

Em que I é a intensidade da chuva em $mm.hora^{-1}$; TR é o tempo de retorno em anos e t é a duração da precipitação em minutos e A, b, c e d são parâmetros característicos da IDF de cada local. Assim, as equações e curvas IDF são diferentes para cada local.

Em decorrência da dificuldade na obtenção de dados pluviográficos (FECHINE SOBRINHO *et al.*, 2014), a utilização de dados pluviométricos diários aplicando metodologias de desagregação de chuvas para a determinação dos parâmetros de equações IDF é constantemente empregada (COUTINHO *et al.*, 2019). Tal solução ganhou notoriedade a partir de estudos como o de Torrico (1974).

Em seu estudo, o autor relaciona os totais precipitados em um dia com os totais precipitados em períodos mais curtos através de zonas com a mesma relação pluviométrica (FECHINE SOBRINHO *et al.*, 2014). Dessa forma, o método das isozonas consiste na desagregação de precipitação máxima diária em uma chuva de 24 horas e considerando os coeficientes de desagregação das isozonas, em chuvas de 1h e de 6 minutos. Assim, as isozonas relacionam chuvas de 1h/24 h e 6 min/24 h.

Além do método de Torrico (1974), podem ser utilizados também o método de Bell (1969), método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB, 1979), dentre outros (TUCCI, 2004).

2.1.2 Estudos sobre chuvas intensas no estado do Ceará

No Ceará, alguns estudos envolvendo o uso de equações de chuvas intensas com dados pluviométricos diários foram desenvolvidos, com destaque para o de Fachine Sobrinho *et al.* (2014), que desenvolveu equações para a região do Cariri e Batista (2018) que desenvolveu equações IDF utilizando o método das isozonas para os 184 municípios do estado a partir de dados de pluviômetros.

Batista (2018) escolheu os postos pluviométricos com maior quantidade de anos de observação para cada cidade do Ceará e a partir desses dados gerou as séries anuais de precipitações diárias máximas. Para realizar as análises e os cálculos necessários, a autora desenvolveu um programa computacional em linguagem *Java*.

Na análise de frequência das precipitações a autora utilizou as seguintes distribuições de probabilidade: Gamma com dois parâmetros, Log Normal com dois parâmetros, Gumbel, Gamma com três parâmetros e Log Normal com três parâmetros. Já para o ajuste das séries anuais a uma distribuição de probabilidade a autora utilizou os testes de aderência do Qui-Quadrado, de Lilliefors e análise do coeficiente de determinação.

Após o ajuste das distribuições de probabilidade, a autora aplicou o método das isozonas desenvolvido por Torrico (1974). Por fim, foram obtidos os parâmetros das equações

de chuvas intensas e feita a validação das equações IDF encontradas. Essas equações serão utilizadas neste trabalho para realizar a interpolação de dados de chuvas intensas no estado.

2.2 Geoestatística

A geoestatística pode ser considerada uma subárea da estatística que trata sobre variáveis regionalizadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Os primeiros estudos a respeito de variáveis regionalizadas surgiram por volta dos anos 60 sob a autoria do professor Georges Matheron inspirado por trabalhos de H.J de Wijs e Daniel G. Krige.

De acordo com Matheron (1971), se uma função $f(x)$ expressa o valor no ponto x de uma determinada característica f desse fenômeno, então $f(x)$ é uma variável regionalizada. Do ponto de vista matemático, o autor ainda explica que uma variável regionalizada é uma função $f(x)$ para um ponto x , que apresenta dois aspectos contraditórios ou complementares: um aspecto aleatório com irregularidade acentuada e variações imprevisíveis de um ponto a outro; e um aspecto estruturado que apresenta relação com outros pontos no espaço motivado pelas suas características de formação.

Para Matheron (1971), a Teoria das Variáveis Regionalizadas tem dois objetivos centrais: teoricamente, descrever a correlação espacial; na prática, resolver o problema de estimativas de uma variável regionalizada com base em uma amostra.

Yamamoto e Landim (2013) comentam que qualquer variável dependente do espaço que apresente além do caráter aleatório, um caráter estrutural, pode ser tratada como variável regionalizada e ser analisada segundo o formalismo geoestatístico. De acordo com os mesmos autores a geoestatística objetiva a caracterização espacial de uma determinada variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas associadas.

Para atingir tal objetivo os métodos geoestatísticos utilizam semivariogramas como ferramenta central para avaliar se os dados apresentam dependência espacial e quantificar essa dependência (RODRIGUES *et al.*, 2020). Baseada na estruturação do modelo de semivariograma, o interpolador geoestatístico da krigagem permite estimativas não enviesadas e com mínima variância (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Inicialmente, a geoestatística era aplicada apenas para depósitos minerais (MATHERON, 1971) mas a partir da década de 80 notou-se aplicação também na agricultura

de precisão, análise espacial de crimes, cartografia, geologia do petróleo, climatologia, hidrogeologia, dentre outros (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

2.2.1 O semivariograma

Assumindo que cada ponto no espaço está relacionado a um vizinho de algum modo, então é razoável supor que quanto menor a distância, maior a influência das características de um ponto sobre o outro (LANDIM, 2006). Na geoestatística, o comportamento de uma variável ao longo de uma área de estudo é descrito pela modelagem de um semivariograma ou variograma.

O prefixo semi é oriundo da divisão da média das diferenças ao quadrado por dois. Assim, o variograma é definido como $2\gamma(h)$ e $\frac{1}{2}\gamma(h)$ é chamado de semivariograma (MELLO, 2004).

A modelagem do semivariograma pode ocorrer por diversos métodos, sendo que o Método dos Momentos (MoM), de Matheron, calcula o chamado semivariograma experimental em passos e depois ajusta um modelo matemático (OLIVER; WEBSTER, 2014).

A função semivariograma é definida na Equação 3 (WEBSTER, OLIVER, 2007):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

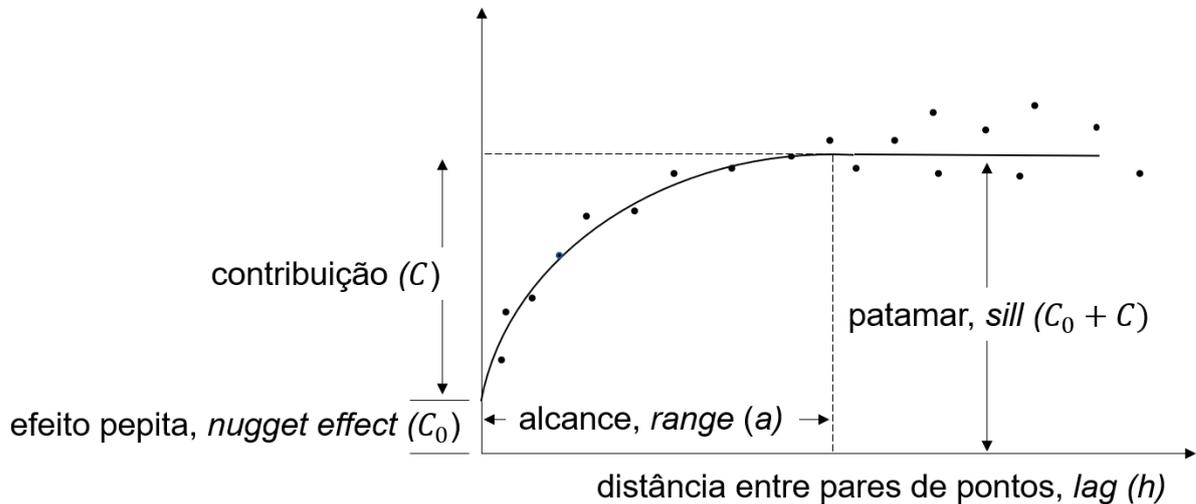
Em que, $\gamma(h)$ é a semivariância estimada de todos os pares de pontos, separados por uma distância h , $m(h)$ é o número de pares de pontos separados por uma distância h , $Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i e $Z(x_i + h)$ é o valor no ponto $x_i + h$.

A função semivariograma é calculada e representada em um modelo gráfico em que no eixo das abscissas são plotadas as distâncias entre os pares de pontos amostrados e no eixo das ordenadas o valor médio do quadrado da diferença entre os pontos amostrados a uma distância h (MATHERON, 1963).

No semivariograma, à medida que aumenta a distância, os valores dos pontos tornam-se mais diferentes, conseqüentemente existe um aumento da variância. Em muitos casos, a variância se estabiliza em torno de uma variância máxima a partir de uma determinada distância, quando isso acontece é definido o chamado patamar (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Na Figura 1 a seguir é apresentado um modelo gráfico de semivariograma e suas propriedades:

Figura 1- Propriedades de um semivariograma com patamar



Fonte: adaptado de Yamamoto e Landim (2013, p. 41).

Os pontos representam o semivariograma experimental, e a linha contínua um modelo teórico ajustado. A distância na qual $\gamma(h)$ atinge certo nível denominado patamar, soleira ou *sill* igual à variância, *a priori* dos dados é chamado alcance ou *range*. Ou seja, a partir dessa distância entre pontos pode-se entender que a dependência espacial é insignificante. O patamar pode ser representado por $C_0 + C$, e o alcance por a . O efeito pepita, *nugget effect* (C_0) é causado pela variância aleatória e a contribuição (C), diferença entre o patamar e o efeito pepita, é denominada variância espacial (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

De acordo com Landim (2006) os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada e mostram o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, assim qualquer amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual ao alcance (a), fornece alguma informação sobre o ponto.

Observando a origem do semivariograma, quando $\gamma(h) = 0$, sendo h um valor de distância muito pequeno, por exemplo, $h = 0,00000001$ ocorre o chamado efeito pepita. Esse fenômeno pode ser ocasionado pela variabilidade do fenômeno espacial estudado ou pela escala de amostragem (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Ou seja, uma variabilidade não mensurada em curta escala.

Em alguns casos ocorre o efeito pepita puro, quando só existe patamar no semivariograma. Yamamoto e Landim (2013) sugerem que esse ainda é um fenômeno não

totalmente compreendido, mas que não necessariamente representa um conjunto de dados sem variabilidade espacial.

Em outros casos, ocorre a existência de semivariogramas sem patamar. De acordo com Yamamoto e Landim (2013), isso ocorre quando a amostragem de dados é insuficiente, incompleta ou até mesmo devido a tendência no conjunto de dados. Já de acordo com Camargo, Fucks e Câmara (2004) os semivariogramas sem patamar podem ser utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão.

Com o semivariograma experimental é possível obter apenas uma estimativa pontual, não contínua, representada pelos pontos no modelo da Figura 1. Para realizar a krigagem é necessário que sejam definidos os parâmetros do semivariograma, “efeito pepita”, “alcance” e “patamar” (LANDIM, 2006). Dessa forma, é necessário o ajuste de uma curva teórica ao semivariograma experimental.

A seguir, na Tabela 1, são apresentadas as equações matemáticas e o modelo teórico representado. Para todas as equações, $C_0 + C$ é o patamar (*sill*), a é o alcance (*range*), C_0 é o efeito pepita (*nugget effect*), C é a contribuição e h é a distância entre os pares de pontos.

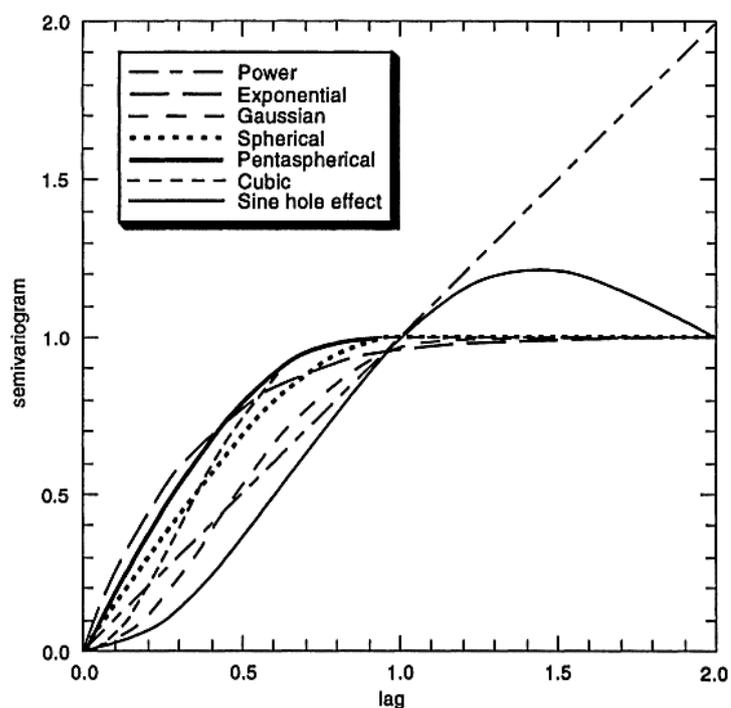
Tabela 1 – Equação matemática dos modelos teóricos de semivariogramas

Modelo	Equação
Esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h < a \\ C_0 + C, & h \geq a \end{cases}$
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right)$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right]$
Cúbico	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[7 \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{35}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^5 - \frac{3}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^7 \right], & 0 \leq h < a \\ C_0 + C, & h \geq a \end{cases}$
Pentaesférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{15h}{8a} - \frac{5}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^3 + \frac{3}{8} \left(\frac{h}{a} \right)^5 \right], & 0 \leq h < a \\ C_0 + C, & h \geq a \end{cases}$
Efeito furo	$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - \frac{\sin \sin \left(\pi \frac{h}{a} \right)}{\pi \frac{h}{a}} \right)$
Potência	$\gamma(h) = \alpha h^\beta, 0 < \beta < 2$

Fonte: Olea (1999, p. 76 a 79) e Yamamoto e Landim (2013, p. 42).

A Figura 2 a seguir apresenta o modelos dos semivariogramas apresentados na Tabela 1.

Figura 2 - Modelos teóricos de semivariograma



Fonte: Olea (1999, p. 78).

Dentre os modelos teóricos de semivariograma mais conhecidos estão o esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, pentaesférico, efeito furo e de potência, este último sem patamar. De acordo com Yamamoto e Landim (2013) os três primeiros modelos conseguem explicar a maioria dos fenômenos espaciais e são também os mais utilizados em estudos com abordagem sobre recursos hídricos (ÁVILA; MELLO; VIOLA, 2009; MELLO; VIOLA, 2013; SILVA NETO *et al.*, 2020).

2.2.2 Efeitos direcionais

2.2.2.1 Anisotropias

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989) um semivariograma é anisotrópico quando sua forma se altera conforme a direção, ou seja, quando o valor do semivariograma

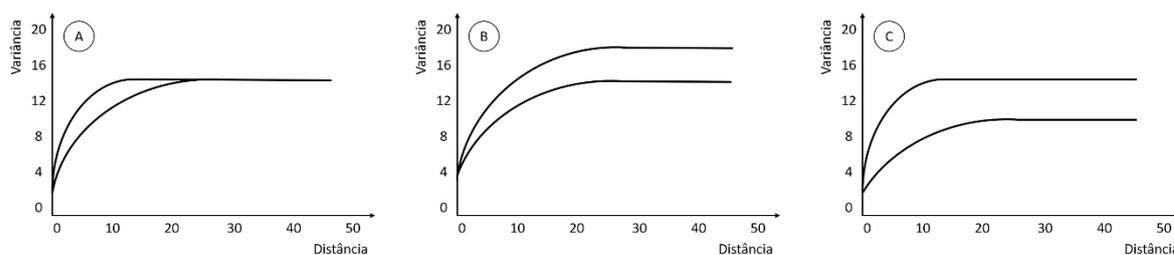
depende apenas da distância (h) tem-se um semivariograma isotrópico, mas quando o semivariograma depende também da direção, o semivariograma é anisotrópico.

Os tipos mais comuns de anisotropia encontrados na natureza são: a geométrica, zonal e o caso em que existe uma combinação do caso zonal e geométrico, chamada de mista (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

De acordo com Yamamoto e Landim (2013), a anisotropia geométrica corresponde à situação em que existe um único patamar com amplitudes diferentes conforme à mudança de direção. Já anisotropia zonal, ocorre quando, para certa direção o semivariograma apresenta o mesmo alcance e patamares diferentes. Outro caso citado pelos autores é a anisotropia mista, em que tanto a amplitude como o patamar mudam conforme a direção.

A Figura 3 a seguir apresenta cada tipo de anisotropia.

Figura 3 - Tipos de anisotropia, a) geométrica, b) zonal, c) mista



Fonte: adaptado de Yamamoto e Landim (2013, p. 44).

A anisotropia pode ser detectada com a modelagem de semivariogramas direcionais, ou com a construção de mapas variográficos. Geralmente, são utilizados semivariogramas para os ângulos de 0° , 45° , 90° e 135° (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). No caso da detecção de anisotropia, esta deve ser modelada com o ajuste de um modelo teórico de semivariograma e corrigida para fins de simulação (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

2.2.2.2 Tendências

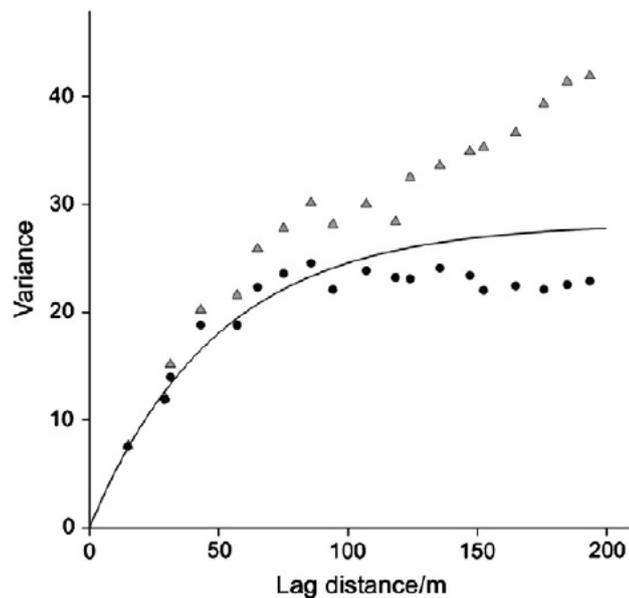
De acordo com Oliver e Webster (2014), a tendência, sob a ótica da geoestatística, é a variação gradual no espaço e seu efeito pode ser observado em mapas ou no variograma experimental. Caso o mapa apresente uma mudança contínua gradual em vez de uma distribuição irregular então pode existir uma tendência.

No variograma experimental, a tendência pode ser constatada quando ocorre um aumento gradual na semivariância à medida que a distância aumenta no semivariograma

empírico. Oliveira (2020) cita que devido a isso o alcance real da variável é mascarado. Nesse caso, a autora cita que a consideração da média constante não é mais válida e sim varia de acordo com as coordenadas.

A Figura 4 mostra o comportamento de um semivariograma quando existe a presença de tendência, em que as formas triangulares representam a tendência não modelada, os pontos representam o variograma experimental de resíduos, e a linha contínua representa o variograma estimado.

Figura 4 - Variograma experimental com tendência



Fonte: Oliver e Webster (2014, p. 64).

Desse modo, quando a tendência é detectada, é modelado um semivariograma utilizando os resíduos e a interpolação deve ser realizada pela krigagem universal (OLIVER; WEBSTER, 2014) para modelar a tendência a partir das coordenadas.

2.2.3 A krigagem

O termo krigagem – tradução do francês *krigeage* e do inglês *kriging* – é uma homenagem a Daniel G. krige, engenheiro de minas pioneiro na aplicação das técnicas de geoestatística na avaliação de minérios (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

De acordo Yamamoto e Landim (2013, p. 54) “a krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no tempo e/ou espaço, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica.”

Para os autores, o processo de krigagem é similar aos métodos tradicionais de estimativas por médias ponderadas ou médias móveis, mas apresenta uma diferença fundamental, apenas a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado.

Camargo, Fucks e Câmara (2004) explicam que a diferença entre os valores estimados e observados para um mesmo ponto deve ser nula, e a variância mínima significa que os estimadores possuem a menor variância entre todos os estimadores não tendenciosos.

Em estimadores geométricos, como o inverso do quadrado da distância, o peso entre amostras diminui à medida que a distância entre as amostras aumenta, considerando apenas uma distância euclidiana. Na krigagem, as distâncias são baseadas em uma análise variográfica que levam em consideração tanto a distância entre amostras como o seu agrupamento (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Assim, a krigagem utiliza as informações obtidas com o semivariograma para encontrar pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, área ou bloco (LANDIM, 2006).

Essencialmente, o termo krigagem abrange alguns estimadores, dentre eles, a krigagem simples, krigagem da média, krigagem universal e a krigagem ordinária (LANDIM, 2006).

A krigagem ordinária é o método mais utilizado pela simplicidades dos resultados proporcionados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Nela, prevalece a hipótese de que a média do fenômeno é constante e desconhecido na região de estudo, não havendo variação significativa na larga escala (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2004).

Dessa forma, uma representação formal da estimativa da krigagem ordinária pode ser dada pela Equação 4 (OLIVER; WEBSTER, 2014):

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(\mathbf{x}_i) \quad (4)$$

Em que, $\hat{Z}(\mathbf{x}_o)$ corresponde ao valor estimado na localização \mathbf{x}_o , onde existem N dados amostrados $Z(\mathbf{x}_i)$, $i = 1, \dots, N$ na vizinhança de \mathbf{x}_o e λ_i corresponde aos pesos adicionados na estimativa de forma a minimizar a previsão de erro.

Já a krigagem universal é o método de interpolação utilizado quando o processo apresenta uma tendência (OLIVER, WEBSTER, 2014). Tal tipo de krigagem utiliza as coordenadas geográficas como variáveis auxiliares.

As estimativas tanto da krigagem ordinária como a universal e as demais são compostas por um complexo sistemas de equações que podem ser verificadas em sua totalidade em Yamamoto e Landim (2013), Webster e Oliver (2007), dentre outros.

2.3 Aplicações da geoestatística em estudos sobre precipitações

Silva Neto *et al.* (2020) realizaram um estudo concentrado no mapeamento das chuvas intensas no estado do Tocantins aplicando a metodologia da desagregação de chuvas e técnicas geoestatísticas. Os autores utilizaram 95 estações pluviométricas, sendo 61 no Tocantins e 34 na área de entorno do estado, com aproximadamente 30 anos de dados históricos.

Para o cálculo das chuvas intensas, foi utilizado o método de desagregação da CETESB (1980). Foram realizadas 12 análises, para as chuvas intensas com durações de 1440, 720, 30 e 10 minutos, associadas aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Os autores analisaram os modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano com ajuste por meio dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e a escolha do melhor modelo ocorreu por meio da validação cruzada, sendo quantificado também o Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), e o viés estatístico (BIAS).

Além da interpolação para dados de chuvas intensas os autores também realizaram a krigagem ordinária para a precipitação máxima diária anual. Para a precipitação máxima diária anual, o modelo de semivariograma teórico foi o esférico, com elevado grau de dependência espacial (GD) e o menor EMPA nos casos verificados. Já para as chuvas intensas calculadas pela metodologia de desagregação de chuvas, houve um melhor desempenho do modelo gaussiano. Além disso, analisando o alcance entre 349 e 456 Km para o modelo gaussiano ficou evidente a abrangência estrutural da dependência espacial.

Ainda observando o mapeamento gerado por meio da krigagem ordinária, os autores concluíram que as chuvas intensas de diferentes durações, apresentam altas intensidades no estado do Tocantins, em contraste com outras regiões brasileiras. Sendo as regiões a norte e a noroeste do estado as regiões mais críticas.

Mello e Viola (2013) realizaram um mapeamento de chuvas intensas para o estado de Minas Gerais com base na geoestatística multivariada, visando produzir informações sobre

áreas de vulnerabilidade erosiva. Os autores usaram dados de 177 localidades provenientes essencialmente de pluviogramas.

Nesse estudo, além da variável primária, foi utilizada também uma variável secundária, a altitude das estações meteorológicas, sendo produzido um “semivariograma cruzado”. A modelagem foi realizada no *software* ArcMAP, sendo o semivariograma exponencial ajustado com base no método dos mínimos quadrados.

Os resultados utilizando o modelo de semivariograma exponencial foram satisfatórios, e os autores recomendaram o seu uso para estudos sobre chuvas intensas no estado de Minas Gerais. Com a abordagem multivariada foi possível associar as características geomorfológicas e a interação sobre o regime pluvial do estado, melhorando a qualidade final do mapa em relação a outros interpoladores.

Ávilla, Mello e Viola (2009) com o objetivo de desenvolver o mapeamento da precipitação mínima provável mensal e quinzenal ao longo do período chuvoso na região sul de Minas Gerais utilizaram o interpolador geoestatístico da krigagem

Os autores utilizaram os modelos de semivariogramas exponencial e esférico, ajustados pelos métodos de ajuste da Máxima Verossimilhança (MV) e de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). Para a escolha do modelo de semivariograma que melhor se ajustou aos dados, foram usados dois critérios: o grau de dependência espacial (GD) e a validação cruzada por meio do erro médio reduzido e o desvio padrão dos erros reduzidos.

Para a análise exploratória inicial dos dados e para a construção, ajuste e escolha do semivariograma os autores utilizaram o *software* R e para a criação de mapas o *software* ArcGIS 9.2. Na maioria dos casos analisados (55%), o modelo exponencial ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) apresentou um melhor ajuste e um melhor grau de dependência espacial (GD).

3 MÉTODO DE PESQUISA

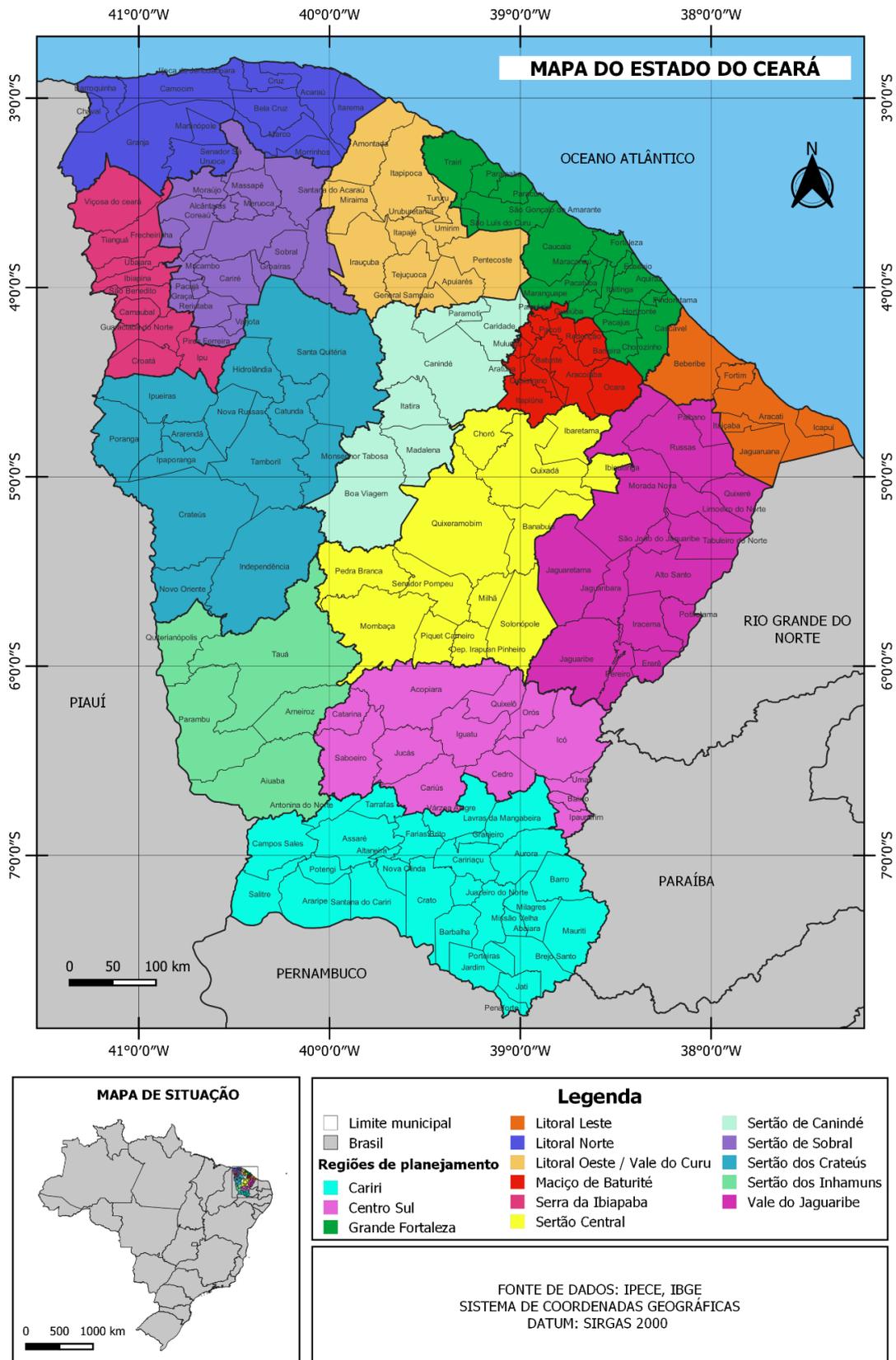
Essa seção apresenta uma caracterização do estado do Ceará e o delineamento da pesquisa.

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o estado do Ceará localizado no Nordeste brasileiro. O estado limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com o estado de Pernambuco, a oeste com o Piauí e ao Rio Grande do Norte e Paraíba.

O Ceará está localizado entre as latitudes 2° 47'00" e 7°51'30" ao sul e longitudes 37°15'11" e 41°26'10" ao oeste (IPECE, 2022). Ocupa uma área de 148 894,4 km² (IBGE, 2021) equivalente a 9,58% da região Nordeste e 1,75% da área do Brasil (IPECE, 2022). Atualmente, o estado é composto por 184 municípios e 14 regiões de planejamento apresentadas a seguir na Figura 5.

Figura 5 - Localização do estado do Ceará e regiões de planejamento



Fonte: elaborada pela autora (2022).

3.1.1 Caracterização física do estado do Ceará

O estado do Ceará possui aproximadamente 93% de seu território inserido na região do semiárido nordestino, essa região é caracterizada pela escassez pluviométrica em um determinado período do ano, com temperaturas sempre elevadas e alta taxas de evaporação/evapotranspiração (IPECE, 2022; BRANDÃO; FREITAS, 2014).

Além da vulnerabilidade devido à escassez pluviométrica, o estado do Ceará é suscetível ao problema ambiental da desertificação (SILVA *et al.*, 2021). A desertificação pode ser conceituada como um conjunto de processos físicos naturais e/ou artificiais que acarretam em uma perda irreversível da cobertura vegetal dos terrenos, sendo agravados pela atividade humana, como o desmatamento e técnicas inadequadas de agricultura (BRANDÃO; FREITAS, 2014).

Em relação as chuvas, observa-se um período chuvoso entre os meses de fevereiro a maio, com chuvas da pré-estação entre os meses de dezembro e janeiro e com pouca ou nenhuma precipitação nos outros meses do ano (BATISTA, 2018).

Essa sazonalidade do regime hídrico está associada ao fato dos sistemas que produzem chuvas no Ceará atuarem por poucos meses promovendo estiagens prologadas que podem variar de sete a dez meses (BRANDÃO; FREITAS, 2014).

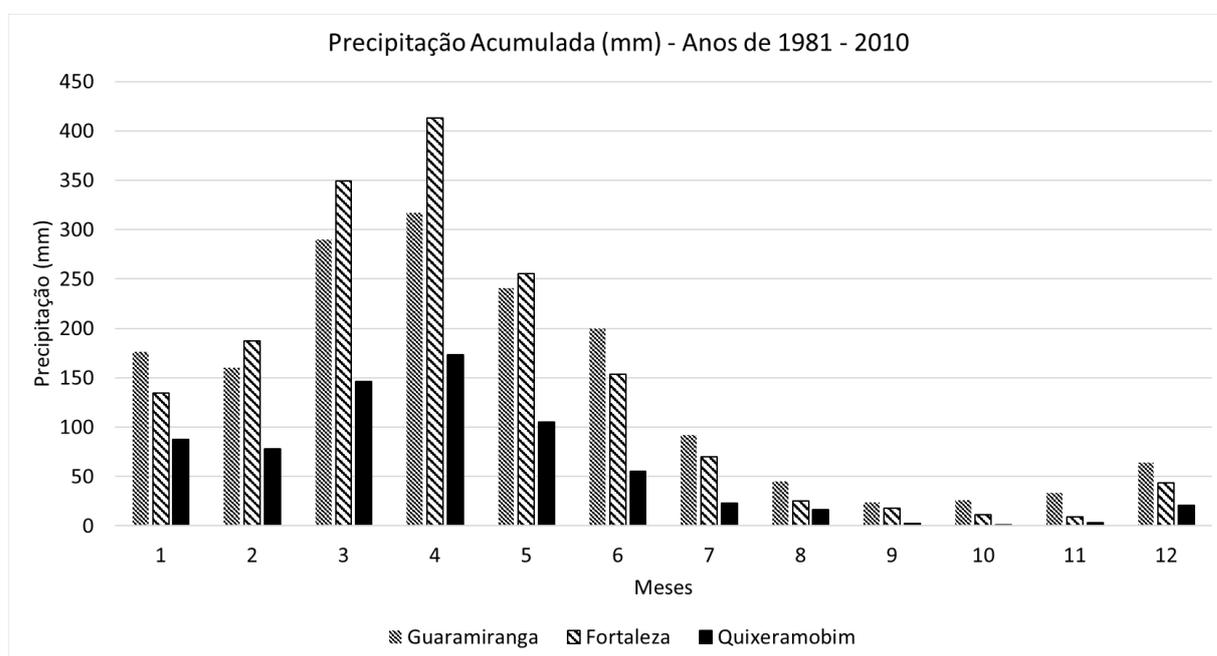
A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema meteorológico causador de chuvas na região do Norte e Nordeste brasileiro (CAVALCANTI *et al.*, 2009). A ZCIT atinge o Sertão do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte apenas durante o máximo de sua oscilação no hemisfério sul, entre os meses de fevereiro a abril (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Além da variabilidade pluviométrica ao longo do ano, o Nordeste também sofre com as variações entre os anos, e que estão fortemente associadas aos fenômenos El Niño (LIMA; LIRA, 2021). Tanto o El Niño como a La Niña, quando associados com a ZCIT tem seus efeitos particularmente notáveis no setor Norte do Nordeste brasileiro, cujas anomalias negativas de precipitação estão associadas a episódios de El Niño e anomalias positivas de precipitação estão associadas a episódios de La Niña (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Dentre outros fenômenos meteorológicos associados que atuam contribuindo ou inibindo as chuvas é relevante citar os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS), as Frentes Frias (FF), as Linhas de Instabilidade (LI), as Ondas de Lestes (OL) (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Alguns dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022) sobre a precipitação acumulada para alguns municípios do estado do Ceará estão apresentadas na Figura 6 a seguir. São apresentadas as precipitações acumuladas mensal calculadas utilizando dados entre os anos de 1981 a 2010 para os municípios de Guaramiranga, Quixeramobim e a capital Fortaleza. Esses três municípios representam respectivamente as regiões da serra (Maciço de Baturité), sertão (Sertão Central) e litoral (Grande Fortaleza).

Figura 6 - Precipitação acumulada mensal entre os anos de 1981 a 2010 para os municípios de Guaramiranga, Fortaleza e Quixeramobim



Fonte: INMET (2022).

Pelo gráfico da Figura 6 fica nítida a sazonalidade do período chuvoso no estado concentrado entre os meses de janeiro a junho. Além disso, é observada uma diferença da precipitação máxima entre a região litorânea e o sertão. Fortaleza apresenta uma precipitação máxima variando entre 400 a 450 mm, enquanto no sertão a máxima precipitação acumulada é em torno de 150 a 200 mm. Além disso, no período fora da estação chuvosa, as precipitações em Guaramiranga, região de serra é sempre superior a precipitação no litoral.

A Tabela 2 a seguir apresenta as médias das precipitações máximas para cada região do estado do Ceará.

Tabela 2 - Média das precipitações diárias máximas para as regiões do Ceará

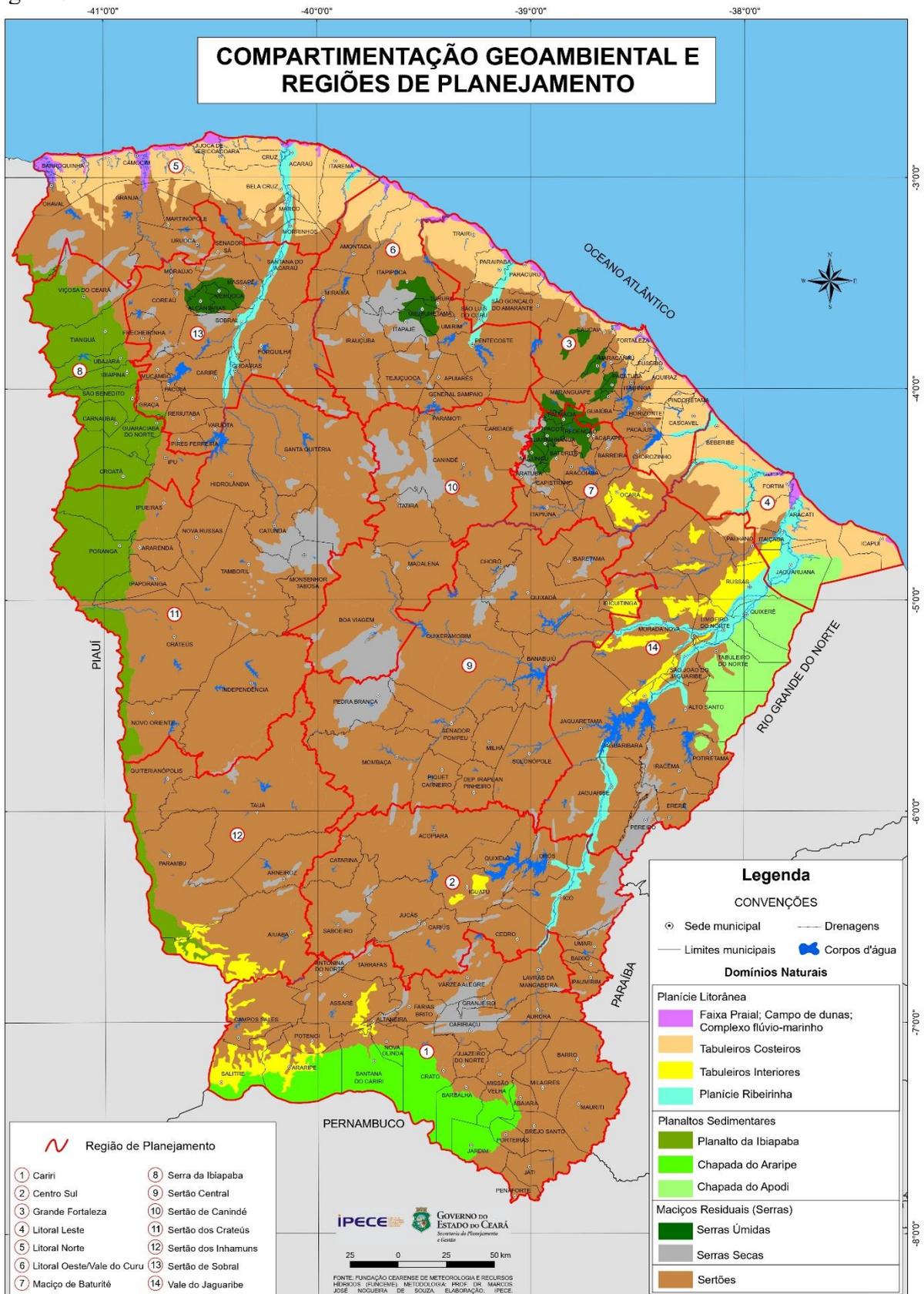
Região	Qtd. De municípios	\bar{x} (mm)	σ(mm)	C_v (%)
Grande Fortaleza	19	88	10,9	12
Litoral Leste	6	86	12,6	15
Litoral Norte	13	85	9,0	11
Centro Sul	13	83	8,2	10
Cariri	29	83	10,0	12
Serra da Ibiapaba	9	80	10,7	13
Sertão de Sobral	18	77	7,6	10
Vale do Jaguaribe	15	76	7,1	9
Sertão Central	13	75	6,6	9
Sertão dos Inhamuns	5	74	6,3	9
Sertão dos Crateús	13	73	4,7	6
Maciço de Baturité	13	73	7,5	10
Litoral Oeste/Vale do Curu	12	67	6,4	10
Sertão de Canindé	6	65	6,0	9

Fonte: elaborada pela autora (2022).

Destaca-se na Tabela 2, que as menores médias das precipitações diárias máximas ocorrem para as regiões dos Sertões de Canindé (65 mm) e para o Litoral Oeste/Vale do Curu (67 mm). Já as máximas ocorrem para as regiões litorâneas da Grande Fortaleza (88 mm), Litoral Leste (86 mm), Litoral Norte (85 mm) e para as regiões do Cariri (83 mm) e Centro Sul (83 mm).

Com relação as Unidades Geoambientais, no estado do Ceará é subdividido em: Tabuleiros Interiores; Planície Flúvio-Marinha; Chapada do Apodi; Chapada do Araripe; Glacis de Acumulação; Planalto da Ibiapaba; Planície Litorânea; Planície Ribeirinha; Serras Secas; Serras Úmidas; Sertão Ocidental Ibiapaba; Sertão Centro Ocidental; Sertão Pré-Litorâneo e Sertão Sul Ocidental (IPECE, 2022), conforme é possível visualizar na Figura 7.

Figura 7 - Unidades Geoambientais no Estado do Ceará

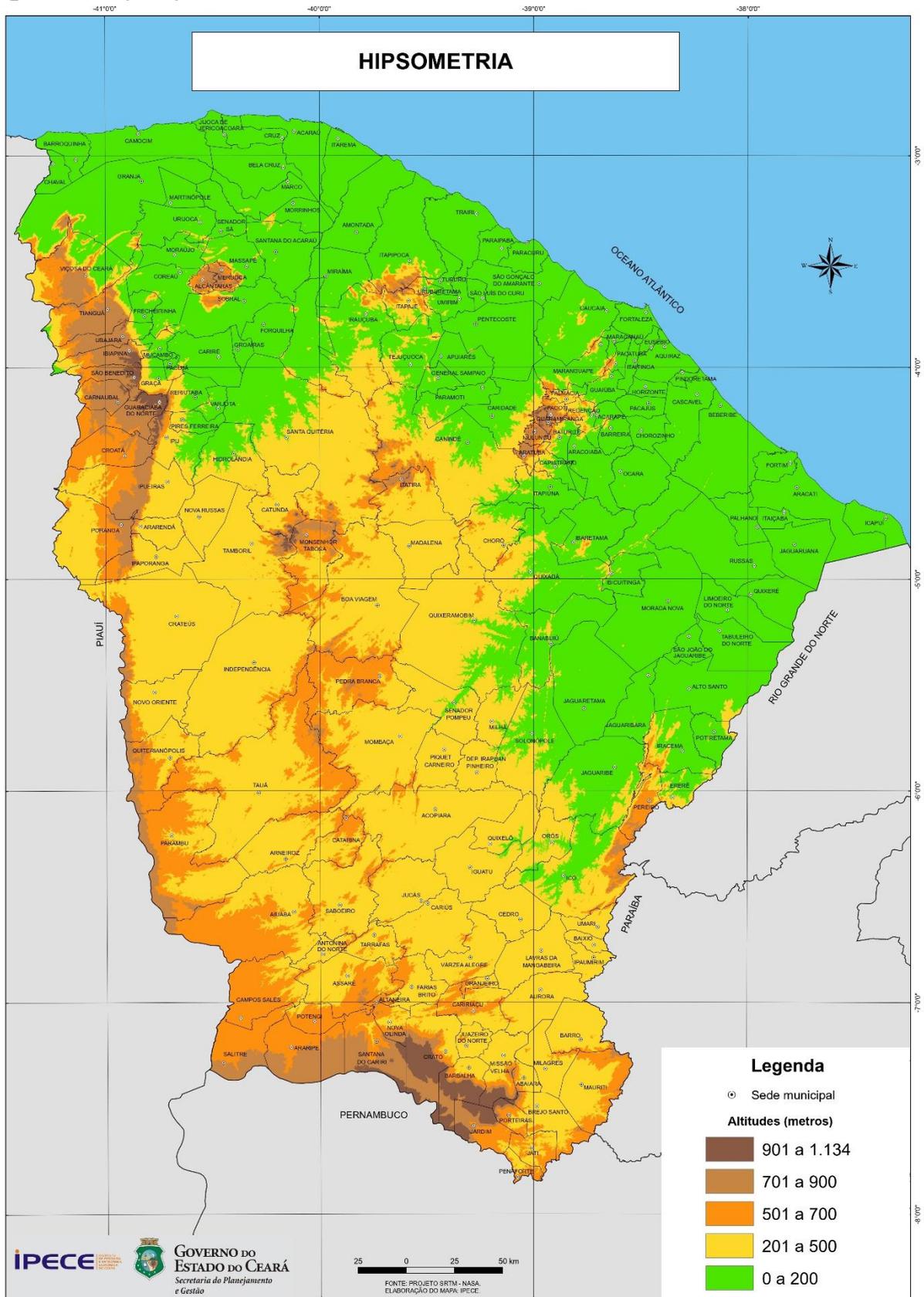


Fonte: IPECE (2022).

Conforme Figura 7 é notória a predominância do domínio natural do Sertão, essa região está submetida a climas semiáridos secos ou subúmido, com o solo recoberto pela Caatinga (IPECE, 2022). Algumas áreas de exceção, retratadas como enclaves úmidos e semiúmidos de topografia acidentada são originárias do efeito orográfico, que proporciona uma pluviosidade diferenciada em torno de maciços montanhoso e chapadas. De acordo com Brandão e Freitas (2014) essas áreas apresentam melhores condições para o desenvolvimento da agricultura.

No que diz respeito ao relevo, a paisagem do Ceará apresenta variabilidade altimétrica, com regiões de baixa, média e elevada altitude. O ponto de maior altitude fica localizado no Pico da Serra Branca com 1154 metros, localizado na região do Sertão dos Crateús no município de Catunda, seguido do Pico Alto de Guaramiranga, com 1112 metros, na região do Maciço de Baturité, Pico Alto de Santa Quitéria 1085 metros na região do Sertão dos Crateús, Morro do Coquinho de Itapajé na região do Litoral Oeste/ Vale do Curu com 1081 metros e Morro do Coquinho de Meruoca com 1020 metros na região do Sertão de Sobral (IPECE, 2022). Tais informações podem ser visualizadas a seguir, na Figura 8, que apresenta o mapa hipsométrico do estado do Ceará.

Figura 8 - Mapa hipsométrico do Estado do Ceará



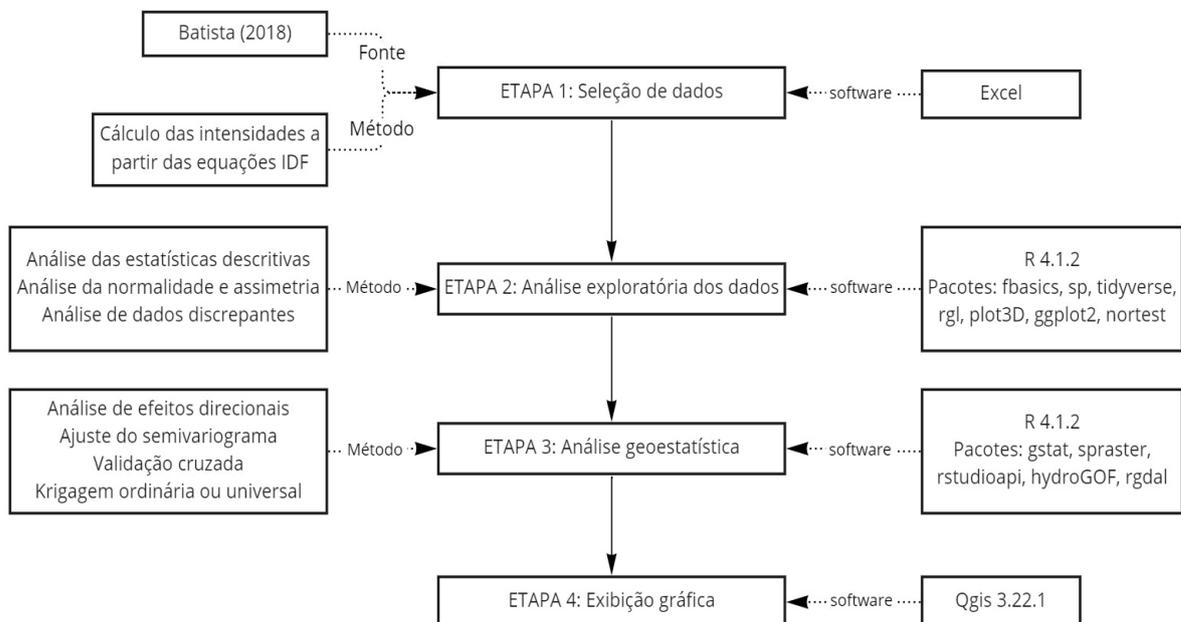
Fonte: IPECE (2022).

3.2 Delineamento de pesquisa

Todas as análises desse estudo foram realizadas utilizando linguagem *R* versão 4.1.2 por meio do ambiente de desenvolvimento *RStudio*. Como complemento, foi utilizado para a plotagem de mapas o *software* QGis 3.22.1. A linguagem *R* é um ambiente computacional de *software* livre voltado para a análise de dados estatísticos e gráficos.

Os *scripts* utilizados nesse estudo estão disponíveis no Apêndice C. Tais *scripts* foram construídos com base em referências¹ disponíveis em aulas, artigos e tutorias. A Figura 9 apresenta o delineamento da análise geoestatística realizada.

Figura 9 - Delineamento da análise geoestatística



Fonte: elaborada pela autora (2022).

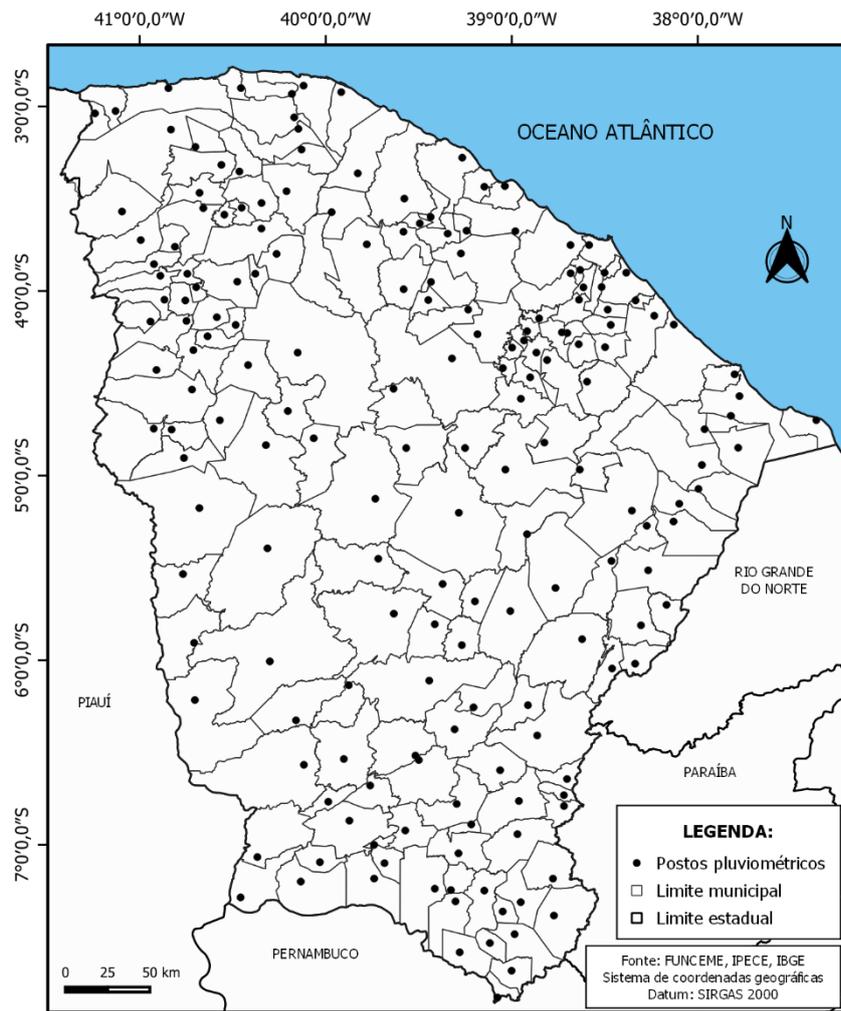
No que tange ao enquadramento metodológico, essa pesquisa pode ser classificada quanto a natureza como qualitativa-quantitativa, quanto a estratégia de pesquisa, trata-se de um estudo de caso, e com relação ao seu propósito pode ser classificada como exploratória (GIL, 2021).

¹ Para consultar as referências de scripts utilizadas acesse os seguintes endereços: análise geoestatística: <https://bit.ly/3GWpYOa>, <https://bit.ly/3fUbyCb>, <https://bit.ly/3fSrntn>, <https://bit.ly/3ICmgJU>, <https://bit.ly/3rNI9QU>; Para análise exploratória de dados: <https://bit.ly/3H5YwO3>, <https://bit.ly/3nX1ahM>.

3.2.1 Seleção de dados

A seguir, na Figura 10, é apresentada a localização dos postos pluviométricos estudados, e no Apêndice A está a tabela com as coordenadas e as estações escolhidas. Os dados estão disponíveis no Portal Hidrológico na página da FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). Os 184 postos pluviométricos selecionados apresentavam no mínimo 25 anos de observação.

Figura 10 - Localização dos postos pluviométricos



Fonte: elaborada pela autora (2022).

De acordo com Yamamoto e Landim (2013, p. 20) a amostragem é um subconjunto de valores extraído de uma população de interesse e quando representativa, deve reproduzir a distribuição e a variabilidade espacial de um domínio a ser estudado.

Nesse trabalho, foi utilizada uma amostragem do tipo aleatória estratificada, em que a região de estudo é subdividida em células, no caso, os municípios, e dentro da célula um ponto foi escolhido, ou seja, o posto pluviométrico com maior quantidade de anos de observação.

A partir das equações IDF para os municípios do estado do Ceará (Anexo A) foram calculadas as intensidades para as durações de 5, 30 e 240 minutos associadas aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos. Foram escolhidos esses valores de tempo de retorno e duração para as análises por estarem dentro dos limites de validação das equações IDF e por serem usuais para obras de microdrenagem e macrodrenagem (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). As intensidades calculadas estão presentes no Apêndice B.

3.2.2 *Análise exploratória dos dados*

Após a obtenção das intensidades foi realizada uma análise exploratória dos dados, calculando as estatísticas descritivas, verificando a existência de valores discrepantes e a normalidade dos dados, que poderiam interferir na construção do semivariograma.

Para essa análise foram utilizados os pacotes *fbasics*, *sp*, *tidyverse*, *rgl*, *plot3D*, *ggplot2*, *ggthemes* e *nortest*.

3.2.2.1 *Diagrama box plot*

De acordo com Naghettini e Pinto (2007) os diagramas *box plot* permitem uma visão geral do valor central, da dispersão, assimetria, caudas e eventuais pontos discrepantes de uma amostra.

Esse diagrama consiste em uma forma retangular definida pelo primeiro e pelo terceiro quartil, com o valor central representado pela mediana. A partir do lado superior do retângulo é traçada uma linha até um ponto que não exceda $Q_3 + 1,5 * AIQ$, sendo AIQ a amplitude interquartis ($Q_3 - Q_1$), Q_3 o terceiro quartil e Q_1 o primeiro quartil. De modo análogo, é traçada uma linha a partir do lado inferior do retângulo até o limite de $Q_3 - 1,5 * AIQ$. Os valores que excederem esse limite são considerados possíveis *outliers* (dados discrepantes).

Para a construção do diagrama *box plot* foi utilizado o pacote *ggplot2* com as funções *geom_boxplot* e uma série de funções complemento para aprimorar a exibição gráfica, assim como o pacote *ggthemes*.

Tais diagramas permitiram a identificação de possíveis *outliers* que comprometeriam a análise variográfica.

3.2.2.2 Histograma e o teste de normalidade de Lilliefors

O histograma permite verificar o comportamento da amostra de dados, ter uma noção da assimetria, e a variação de valores quanto ao valor central, permitindo ter uma noção da normalidade dos dados. Naghettini e Pinto (2007) comentam que o histograma, no entanto, é sensível ao número de classes (nc), e recomendam que esse número pode ser adotado como assim $nc = \sqrt{n}$, sendo N o número de dados. Para este estudo, nc calculado foi de 14.

Na análise no R, foram utilizados os pacotes *ggplot2* com a função *geom_histogram*.

A verificação da assimetria foi realizada com a função *skewness* do pacote *moments* e para verificar a normalidade do conjunto de dados, foi realizado o teste de Lilliefors. Nesse teste, os dados originais passam por uma padronização conforme Equação 5.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Em que, z_i é o dado padronizado, X_i é o dado original, \bar{x} é a média, σ é o desvio padrão da amostra.

Serão testadas duas hipóteses:

H_0 : Os dados seguem a distribuição normal;

H_1 : Os dados não seguem a distribuição normal.

Com a estatística de teste dada pela Equação 6.

$$D_n = \max |F_0(x_i) - F_N(x_i)| \quad (6)$$

Em que, $F_0(x_i)$ é a distribuição de probabilidade acumuladas observadas padronizada e $F_N(x_i)$ é a distribuição acumulada teórica (distribuição de z).

Logo, a decisão de não rejeitar a hipótese nula a um determinado nível de significância ocorre quando a estatística de teste é igual ou inferior ao valor do ponto crítico. O ponto crítico foi definido consultando a tabela do Anexo B.

Nesse trabalho, o teste foi realizado com a função *lillie.test* do pacote *nortest* com um nível de significância de 5%.

3.2.3 *Análise geoestatística*

Após a análise exploratória seguiu-se para a análise geoestatística, iniciando com a avaliação da presença de tendência e anisotropia no conjunto de dados, a construção do semivariograma experimental, ajuste do semivariograma teórico, validação cruzada e, por fim, a krigagem e exibição gráfica.

A análise variográfica foi realizada com os pacotes *gstat*, *sp*, *raster* *rstudiosapi*, *hydroGOF* e *rgdal*.

3.2.3.1 *Efeitos direcionais*

O primeiro passo na análise geoestatística consistiu na detecção de tendência no conjunto de dados. Para isso, foram analisados o mapa variográfico e o semivariograma experimental, conforme Oliver e Webster (2014).

No caso em que foi identificada a presença de tendência nos dados, o atributo intensidade de chuva foi modelado usando um polinômio de primeira ordem em função de suas coordenadas (no R com o pacote *gstat*, seja z as intensidades em mm/h em estudo, e x e y as suas coordenadas, $z \sim x + y$), gerando assim um semivariograma de resíduos (PEBESMA, 2004) que posteriormente seria utilizado na realização da krigagem universal.

O segundo efeito direcional considerado foi a anisotropia, para tal, foram construídos mapas variográficos com a função *variogram* e o argumento *map* do pacote *gstat*. O mapa foi construído para uma detecção prévia da ocorrência de uma direção preferencial dos dados. Caso o fenômeno fosse considerado isotrópico o próximo passo seria a construção do semivariograma experimental omnidirecional da seção 3.2.3.2.

Já se o fenômeno fosse considerado anisotrópico, foram modelados os semivariogramas direcionais para as direções de (0°, 45°, 90° e 135°). Foram analisadas as direções de máxima continuidade e seu ângulo perpendicular. Para a construção dos

semivariogramas direcionais foram consideradas as mesmas condições de *cutoff* e *width* do semivariograma experimental da seção 3.2.3.2 e considerando uma tolerância angular de 22,5°.

Em seguida, foi ajustado o modelo teórico para as direções de anisotropia consideradas, buscando a detecção do tipo de anisotropia presente: geométrica, zonal ou mista. De acordo com o manual do pacote *gstat* (PEBESMA, 2014), é fornecido apoio para as modelagens de anisotropia geométrica e zonal, dessa forma, ao realizar a análise de anisotropia, se ela fosse considerada mista não seria realizado o processo de modelagem.

3.2.3.2 Modelagem do semivariograma experimental

Após a análise exploratória dos dados e as correções necessárias foi calculado o semivariograma experimental. Para tal, foi utilizado o pacote *gstat* com a função *variogram*.

Dada a amostragem irregular, foram testadas diferentes distâncias para o *width*, que é a largura dos intervalos de distância subsequentes nos quais os pares de pontos de dados são agrupados para estimativas da semivariância. O limite máximo, ou *cutoff*, foi considerado em aproximadamente metade da máxima distância entre pares de pontos. Para essas determinações, foi levada em consideração a mínima distância entre pontos amostrais, a máxima distância entre pontos amostrais e o número de pares de pontos utilizados na modelagem dos semivariogramas.

3.2.3.3 Ajuste do semivariograma teórico

Após a modelagem do semivariograma experimental, foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano. Foi utilizada a função *fit.variogram* do pacote *gstat* que permite um ajuste automático. Segundo Pebesma (2004) essa função usa o método de ajuste dos *Ordinary Least-Squares* (OLS, Mínimos Quadrados Ordinários).

Foram fornecidos os parâmetros iniciais de efeito pepita, contribuição e alcance. Esses valores iniciais foram estimados a partir de um ajuste um inicial da função *fit.variogram* para os modelos.

3.2.3.4 Validação cruzada

A validação cruzada é uma técnica que possibilita escolher possíveis modelos de semivariogramas (OLIVER; WEBSTER, 2014). Landim (2006) explica que nessa análise após a obtenção do modelo semivariográfico, cada um dos valores original é removido do domínio espacial, e utilizando os demais vizinhos, um novo valor é simulado para este ponto.

A validação cruzada para os modelos de semivariograma teórico foi realizada utilizando a função *krige.cv* do pacote *gstat*. Os parâmetros para essa função são: o atributo modelado e o modelo do semivariograma teórico.

Como critério de escolha do melhor modelo, foi avaliado o Erro Quadrático Médio (RMSE), o viés estatístico (BIAS), e o Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA).

3.2.3.4.1 Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error*, RMSE)

O Erro Quadrático Médio (RMSE) fornece o desvio padrão do erro de previsão do modelo (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2020). Como resultado, é apresentado um valor nas mesmas unidades dos valores simulados e observados, conforme Equação 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (7)$$

Em que, *RMSE* é o Erro Quadrático Médio, S_i é o valor simulado para intensidade de chuva pelo modelo considerado, O_i é o valor observado de intensidade de chuva e n é o número de postos pluviométricos analisados. Assim, um valor menor de RMSE indica um melhor desempenho do modelo.

Tal parâmetro foi utilizado por Xavier *et al.* (2020) em estudos sobre precipitação para o estado da Paraíba.

No R, foi utilizado o pacote *hydroGOF* e a função *rmse*.

3.2.3.4.2 Viés estatístico (*BIAS*)

O viés estatístico percentual (BIAS) avalia a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os valores observados e pode ser obtido conforme Equação 8 (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2020).

$$BIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

Em que, $BIAS$ é o viés estatístico percentual, O_i é o valor observado das intensidades de chuva, S_i é o valor estimado obtido por krigagem de acordo com o modelo de semivariograma ajustado e n é o número de postos pluviométricos analisados.

O valor ideal de Bias é 0, com valores de baixa magnitude indicando simulação precisa do modelo. Os valores positivos de indicam um viés de superestimação, enquanto valores negativos indicam viés de subestimação do modelo.

Tal parâmetro foi utilizado por Silva Neto *et al.* (2020) para estudos sobre chuvas intensas no Tocantins.

No R, foi utilizado o pacote *hydroGOF* e a função *pbias*.

3.2.3.4.3 Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA)

Esse cálculo possibilita a identificação da dimensão médio do erro, expresso como uma porcentagem do valor observado e pode ser calculado como a média de todos os erros absolutos percentuais, conforme Equação 9.

$$EMPA = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \quad (9)$$

Em que, $EMPA$ é o erro médio percentual absoluto em %, O_i é o valor observado das intensidades de chuva, S_i é o valor estimado obtido por krigagem de acordo com o modelo de semivariograma ajustado, e n é o número de observações.

Cálculo similar foi utilizado no estudo de Silva Neto *et al.* (2020).

3.2.3.4.4 Grau de Dependência Espacial (GD)

Foi avaliado também o grau de dependência espacial (GD), calculado de acordo com a Equação 10 de Mello e Viola (2013), adaptação de Cambardella *et al.* (1994).

$$GD = \left(\frac{c}{c+c_0} \right) * 100 \quad (10)$$

Em que, C é a contribuição ou variância estruturada (variância explicada pela componente espacial), C_0 o efeito pepita (representa a variação aleatória do fenômeno estudado), e $C_0 + C$ o patamar (variação total do fenômeno avaliado). Nessa análise, $\leq 25\%$ indica fraca dependência espacial, entre 25 e 75% moderada dependência espacial e $> 75\%$ forte dependência espacial.

Esse índice expressa a variância estruturada como uma porcentagem da semivariância total, permitindo uma comparação do tamanho relativo da variância estruturada nos dados analisados.

Tal índice foi utilizado em estudos como o de Silva Neto *et. al.* (2020), Xavier *et. al.* (2020), Ávila, Mello e Viola (2009) dentre outros.

3.2.3.5 Interpolação por krigagem ordinária e krigagem universal

Após a escolha do melhor modelo pela validação cruzada, foi realizado processo de interpolação de dados por krigagem por meio da função *krige* do pacote *gstat*. Quando os dados não apresentavam tendência foi utilizada a krigagem ordinária (no R com o pacote *gstat*, seja z as intensidades em mm/h em estudo, $z \sim I$), já quando havia a presença de tendência foi realizada a interpolação por krigagem universal (no R com o pacote *gstat*, seja z as intensidades em mm/h em estudo, e x e y as suas coordenadas, $z \sim x+y$) (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

O processo de interpolação por krigagem resultou em mapas que foram convertidos para o formato *raster* e manipulados no QGis 3.22.1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

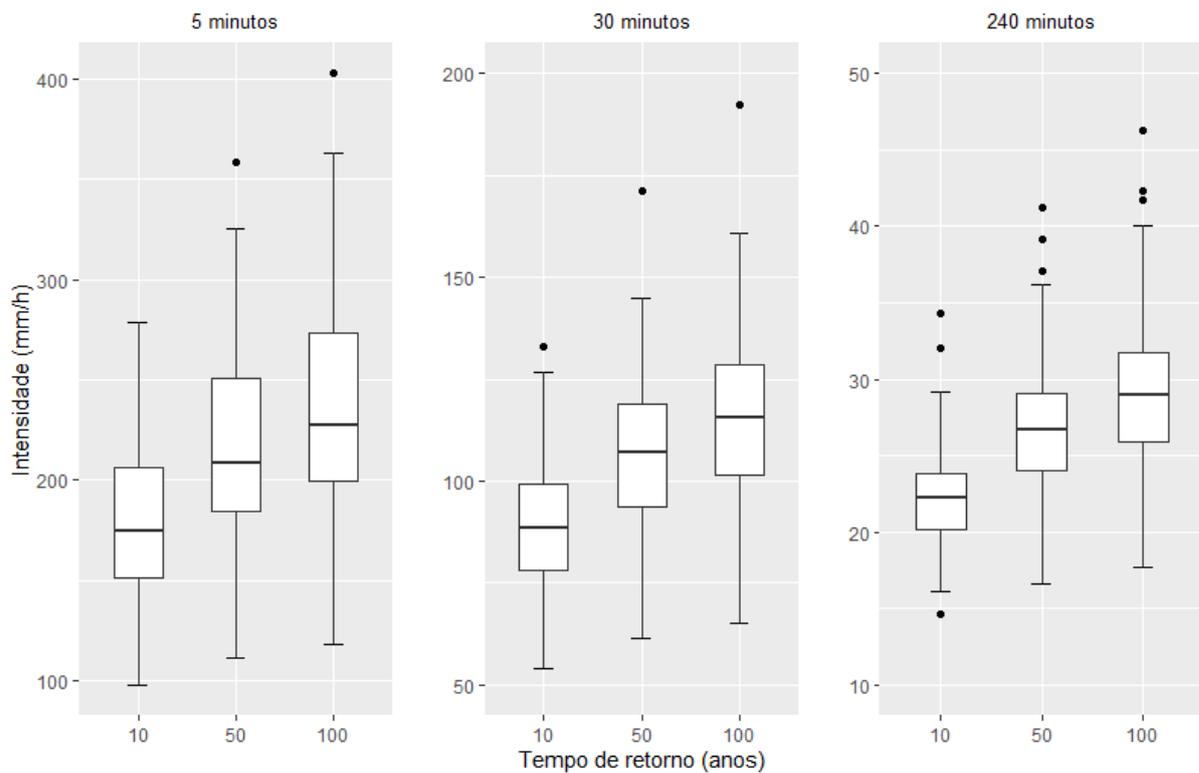
A seguir são apresentados os resultados obtidos e as discussões pertinentes para a análise exploratória dos dados, as análises geoestatísticas e por fim os mapas de chuvas intensas gerados.

4.1 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória dos dados teve por objetivo compreender o comportamento das variáveis analisadas, em especial em relação a presença de assimetria e dados discrepantes.

Em uma análise inicial das estatísticas descritivas dos dados, foi possível notar em alguns casos que existia assimetria positiva acima de 0,60 (para o caso de TR de 100 anos e duração de 240 minutos). Além disso, pelo diagrama *box plot* da Figura 11 é possível identificar alguns dados atípicos.

Figura 11 - Diagramas *box plot* com as intensidades (mm/h) para os TR de 10, 50 e 100 anos e duração de 5, 30 e 240 minutos



Fonte: elaborada pela autora (2022).

De acordo com o diagrama *box plot* da Figura 11, para os eventos de chuva com duração de 5 minutos, o TR de 10 anos não apresentou dados discrepantes. Já para o TR de 50 e 100 anos, as intensidades obtidas para o município de Brejo Santo foram consideradas discrepantes, sendo elas 358,5 mm/h e 402,7 mm/h, respectivamente.

Em eventos de chuva com duração de 30 minutos, o município de Brejo Santo apresentou intensidades atípicas para os três tempos de retorno analisados, sendo eles: 133 mm/h (10 anos), 171,3 mm/h (50 anos) e 192,4 mm/h (100 anos).

Para a duração de 240 minutos foram apresentados três dados atípicos para cada tempo de retorno. TR de 10 anos: Brejo Santo (34,3 mm/h), Bela Cruz (32, 0 mm/h) e Itapajé (14,6 mm/h); TR de 50 anos: Brejo Santo (41,2 mm/h), Bela Cruz (39,2 mm/h) e Paraipaba (37,1 mm/h); TR de 100 anos: Brejo Santo (46, 3 mm/h), Bela Cruz (41,7 mm/h) e Paraipaba (42,3 mm/h).

Além desses identificados, em uma segunda análise do diagrama *box plot*, para a duração de 240 minutos e TR de 50 e 100 anos, o município de Eusébio também apresentou intensidades que poderiam se caracterizar como discrepante (36,2 mm/h e 40 mm/h, respectivamente).

Dessa forma, tendo em vista Oliver e Webster (2014) que citam que a presença de *outliers* e de assimetria positiva distorce o cálculo do variograma, todos os dados discrepantes foram removidos a fim de que o estudo variográfico não fosse comprometido.

Na Tabela 3 a seguir são apresentadas as principais estatísticas sobre o conjunto de dados já com os dados atípicos removidos.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis analisadas

t (min)	n°	Min.	Máx.	Q ₁	Q ₃	Mediana	\bar{x}	σ	C _a	C _v (%)	D _n
TR = 10 anos											
5	184	97,90	278,40	151,20	206,30	174,80	179,60	36,32	0,32	20,22	0,07
30	183	53,90	126,60	78,17	99,05	88,20	88,78	13,18	0,07	14,85	0,05
240	181	16,10	29,20	20,20	23,80	22,20	22,15	2,77	0,18	12,49	0,05
TR = 50 anos											
5	183	111,50	325,30	184,10	249,50	208,30	215,30	42,50	0,27	19,74	0,07
30	183	61,40	144,70	93,65	118,75	106,70	106,79	15,97	0,05	14,95	0,05
240	180	16,60	35,10	23,80	28,70	26,55	26,51	3,42	0,03	12,89	0,04
TR = 100 anos											
5	183	118,30	362,70	199,30	273,40	226,50	234,50	47,02	0,32	20,05	0,08
30	183	65,10	160,90	101,50	128,10	115,20	116,40	18,06	0,14	15,51	0,06
240	180	17,10	39,10	25,85	31,32	28,85	28,88	3,93	0,14	13,61	0,04

Fonte: elaborada pela autora (2022).

Notas: t = duração da chuva em minutos, Q₁ = primeiro quartil, Q₃ = terceiro quartil, \bar{x} = média, σ = desvio padrão, C_a = coeficiente de assimetria e C_v = coeficiente de variação em %, D_n = estatística de teste de Lilliefors.

Nota-se que o desvio padrão cresce com o aumento da intensidade da chuva, por exemplo, as intensidades para o tempo de duração de 5 minutos e um TR de 100 anos são as mais elevadas e também apresentam o maior desvio padrão de 47,02 mm/h. Já as intensidades para um TR de 10 anos e uma duração de 240 minutos apresentam um desvio padrão de apenas 2,77 mm/h.

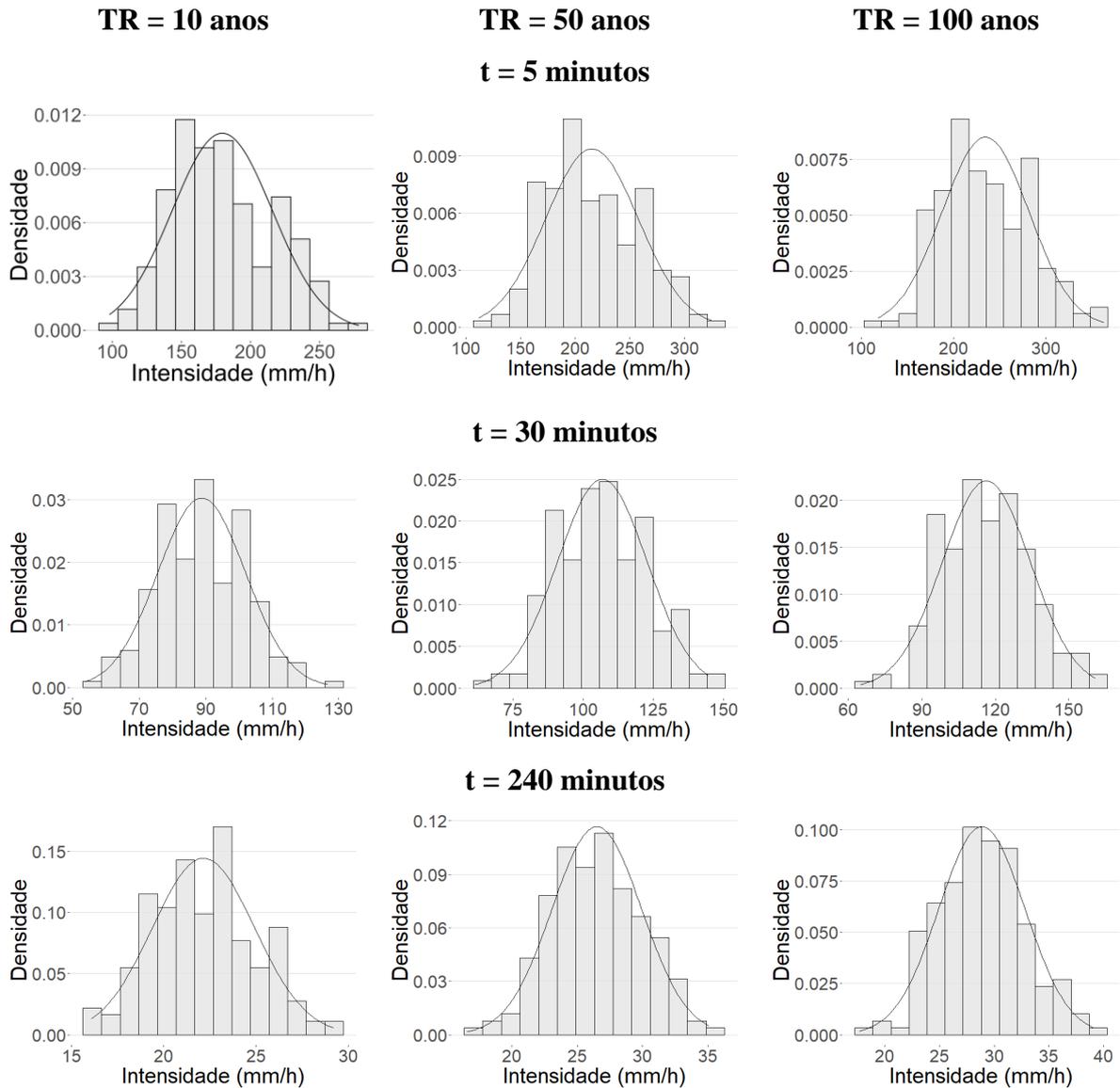
Com relação ao coeficiente de assimetria, a retirada dos dados discrepantes minimizou esse coeficiente, e todos estão abaixo de 0,50 considerada uma condição de assimetria que não precisa de transformação de dados de acordo com Oliver e Webster (2014).

O ponto crítico do teste de Lilliefors a uma significância de 5% é de 0,0653, assim para os dados que apresentaram um valor superior a esse, a hipótese nula foi rejeitada e foi considerado que os dados não apresentavam normalidade. Nota-se que as intensidades correspondentes a duração de 5 minutos para os três tempos de retornos analisados apresentou um comportamento não normal pelo teste de Lilliefors.

Com relação a normalidade dos dados, Landim (2006) comenta que a estimativa por krigagem não exige que os dados tenham uma distribuição normal, mas a presença de distribuição assimétrica, com muitos valores anômalos deve ser considerada. Cressie (1991) complementa que a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas alongadas.

Analisando os histogramas de frequência da Figura 12 é possível perceber que os dados apresentam boa assimetria, e que não existe a presença de caudas alongadas, que poderiam aumentar as variâncias ou distorcer o semivariograma (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Figura 12 - Histograma com as intensidades (mm/h) para os TR de 10, 50 e 100 anos e duração de 5, 30 e 240 minutos



Fonte: elaborada pela autora (2022).

Desse modo, analisando os valores obtidos para o teste de normalidade, coeficiente de assimetria e a forma do histograma de frequência calculado, é possível admitir que mesmo em alguns casos, os dados não passando no teste de normalidade de Lilliefors, a distribuição dos dados foi considerada suficientemente simétrica para o estudo geoestatístico.

Lundgren, Souza e Lundgren (2017) trabalharam com dados que não apresentavam normalidade e com forte assimetria positiva sem realizar transformações e obtiveram estimativas confiáveis para a construção de mapas pluviométricos do estado do Sergipe.

4.2 Análise geoestatística

A análise dos semivariogramas experimentais e dos gráficos de tendência em relação a latitude e a longitude mostraram que os dados referentes as durações de 5 e 30 minutos para todos os tempos de retorno analisados apresentaram tendência, sendo mais evidente à medida que o TR aumentava e a duração diminuía. Desse modo, para esses dados foi construído um semivariograma de resíduos.

Para a análise da anisotropia foram modelados os mapas variográficos e os semivariogramas direcionais. Pelos mapas variográficos não ficou evidente a direção preferencial dos dados. Com a modelagem dos semivariogramas direcionais foi perceptível que os dados mudam conforme a direção. Em seguida, com o ajuste dos modelos teóricos, foi perceptível uma variação tanto no patamar como no alcance, se caracterizando como uma possível anisotropia mista.

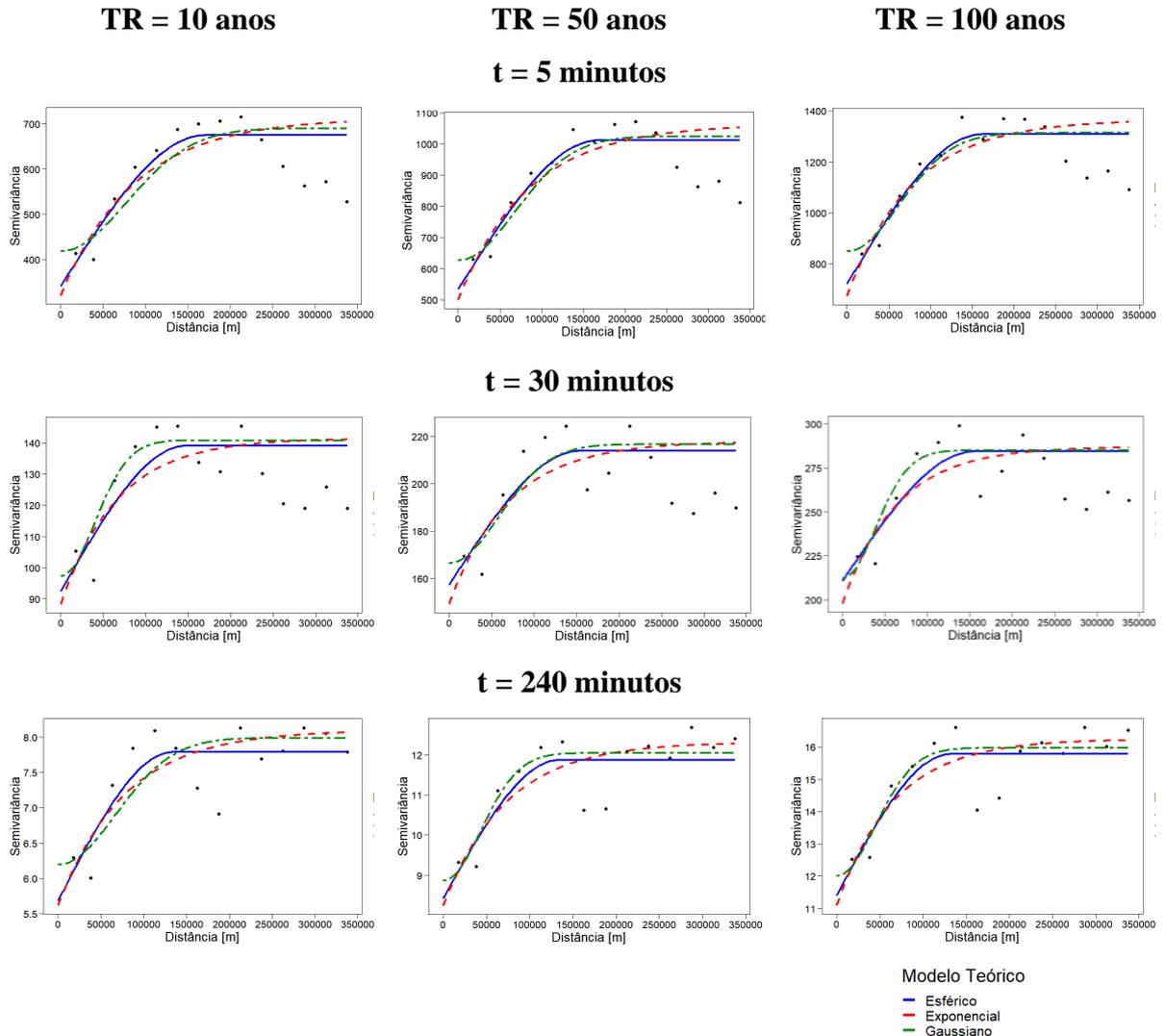
Contundo, em decorrência da complexidade da modelagem e da indisponibilidade de solução fornecida pelo *software*, que fornece soluções para anisotropia zonal e geométrica (PEBESMA, 2014) e a deficiência de artigos que tratavam da correção mista utilizando o R, a modelagem da anisotropia não foi realizada.

De acordo com Webster, Oliver, e Lark, (2016), muitas vezes, os efeitos direcionais são desconsiderados por pesquisadores devido à dificuldade em abordá-los. Em alguns estudos, como o de Betzek *et al.* (2019), o efeito da anisotropia foi desconsiderado e mesmo assim encontraram-se bons resultados no ajuste de parâmetros semivariográficos através do MoM (Método dos Momentos). Dessa forma, a consideração da anisotropia foi uma limitação desse estudo, sendo modelados semivariogramas experimentais omnidirecionais.

Para o cálculo dos semivariogramas experimentais omnidirecionais foi considerada uma distância máxima de 350 km, e um *width* de 25 km. Como os dados não apresentam uma distribuição regular, a definição do valor de 25 km para o cálculo ocorreu após sucessivas análises considerando diferentes intervalos de distância. Buscou-se uma distância que proporcionasse um bom ajuste do modelo teórico, mas que o número de pares fosse representativo do ponto de vista estatístico, de acordo com Yamamoto e Landim (2013).

A Figura 13 a seguir, apresenta os modelos esférico, exponencial e gaussiano ajustados aos semivariogramas experimentais modelados para as durações de 5, 30 e 240 minutos associados aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Figura 13 - Semivariogramas teóricos ajustados para as durações de 5, 30 e 240 minutos associados aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos



Fonte: elaborada pela autora (2022).

Analisando os semivariogramas, é possível observar que as chuvas relacionadas as durações de 5, 30 e 240 e TR de 10, 50 e 100 anos apresentaram-se estruturadas espacialmente, com uma semivariância de comportamento capaz de ser modelado, com boa aderência dos modelos teóricos ajustados e com destaque para o modelo exponencial que apresentou os melhores ajustes em 6 análises (67% dos casos).

Mello e Viola (2013), realizando o mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais, também encontraram uma superioridade no ajuste do modelo exponencial. Ávila, Mello e Viola (2009) também encontraram um melhor ajuste do modelo exponencial ao analisar a precipitação mínima provável no Sul do estado de Minas Gerais.

Observa-se que a duração de 5 minutos para todos os tempos de retorno analisados, apresentou um melhor ajuste, com um patamar elevado, garantindo boa dependência espacial, mas com efeito pepita também elevado.

A Tabela 4 a seguir apresenta os parâmetros dos modelos de semivariogramas e os resultados da validação cruzada.

Tabela 4 - Parâmetros dos modelos de semivariograma (C_0 (efeito pepita), C (contribuição), a (alcance)), t é a duração da chuva em minutos, análise do viés estatístico (BIAS), Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), Erro Quadrático Médio (RMSE) e Grau de dependência espacial (GD)

t	Modelo	C_0	C	a (km)	BIAS (%)	GD(%)	EMPA(%)	RMSE
TR = 10 anos								
5	Esférico	341,62	333,47	169,85	0,03	49,40	8,70	19,82
	Exponencial*	321,04	391,94	87,18	0,04	54,97	8,67	19,74
	Gaussiano	418,74	271,74	109,26	0,01	39,36	8,98	20,41
30	Esférico	92,41	46,69	147,23	-0,01	33,57	8,45	9,56
	Exponencial	88,40	53,08	66,55	0,01	37,51	8,50	9,57
	Gaussiano*	97,32	43,52	56,54	-0,01	30,90	8,39	9,49
240	Esférico*	5,68	2,11	133,95	0,00	27,04	8,25	2,29
	Exponencial	5,62	2,48	77,59	0,00	30,61	8,35	2,31
	Gaussiano	6,19	1,80	94,72	-0,02	22,47	8,44	2,34
TR = 50 anos								
5	Esférico	534,58	476,42	168,13	-0,01	47,12	9,55	25,79
	Exponencial*	500,93	561,09	84,02	-0,01	52,83	9,46	25,61
	Gaussiano	627,54	396,28	96,87	-0,03	38,71	9,75	26,11
30	Esférico	156,24	56,57	153,16	-0,03	26,46	9,69	12,79
	Exponencial*	149,27	68,58	70,50	-0,03	31,48	9,65	12,74
	Gaussiano	166,49	50,10	82,93	-0,04	23,13	9,73	12,85
240	Esférico*	8,42	3,45	133,96	-0,03	29,06	9,36	3,02
	Exponencial	8,25	4,07	72,48	-0,03	33,07	9,39	3,03
	Gaussiano	8,87	3,18	61,69	-0,04	26,40	9,39	3,03
TR = 100 anos								
5	Esférico	721,25	586,70	161,06	-0,03	44,86	10,41	30,66
	Exponencial*	675,12	690,13	78,38	-0,02	50,55	10,31	30,45
	Gaussiano	849,44	464,04	88,37	-0,04	35,33	10,57	30,93
30	Esférico	210,75	73,71	155,12	-0,04	25,91	10,50	15,14
	Exponencial*	197,96	89,18	64,23	-0,04	31,06	10,44	15,07

t	Modelo	C₀	C	a (km)	BIAS (%)	GD(%)	EMPA(%)	RMSE
	Gaussiano	212,32	72,75	55,34	-0,05	25,52	10,44	15,09
	Esférico	11,40	4,38	131,60	-0,04	27,73	10,18	3,61
240	Exponencial*	11,10	5,14	66,74	-0,04	31,66	10,17	3,61
	Gaussiano	12,01	3,96	63,38	-0,04	24,82	10,21	3,62

Fonte: elaborada pela autora (2022).

Nota: (*) é o modelo considerado de melhor ajuste

Verificando o grau de dependência espacial (GD), ou seja, a relação entre a variância estruturada e o patamar, a duração de 5 minutos associada aos três tempos de retorno analisados apresentaram a melhor estruturação espacial.

Percebe-se também que os melhores GD, considerando os três modelos, sempre estão associados ao modelo exponencial, e os menores associados ao modelo gaussiano. Para todos os modelos considerados de melhor ajuste, o grau de dependência espacial variou entre 27,04% (modelo esférico, para um evento com duração de 240 minutos e TR de 10 anos) e 54,97% (modelo exponencial para um evento com duração de 5 minutos e TR de 10 anos), entendido como “moderado”.

Esse resultado está em consonância com Silva Neto *et al.*, (2020) que também encontrou um grau de dependência espacial “moderado” analisando chuvas intensas com durações de 10, 30, 720 e 1440 minutos associadas aos TR de 10, 50 e 100 anos no Tocantins. Mello e Viola (2013) analisando as chuvas intensas com durações de 30, 360, 720 e 1440 minutos associadas aos TR de 10, 50 e 100 anos, também encontraram um GD classificado como “moderado”. Dessa forma, isso salienta que o fenômeno das chuvas intensas se apresenta estruturado espacialmente.

É observado também a presença de um efeito pepita elevado, isso significa que existe variabilidade entre os valores separados por distâncias menores que a usada no intervalo de amostragem (distância entre as estações pluviométricas). No mapa da Figura 10, é perceptível uma maior dispersão entre as estações pluviométricas analisadas nas regiões do Sertão dos Crateús, Sertão do Inhamuns e Sertão Central.

É possível que os elevados efeitos pepita associados a menor variabilidade das chuvas com durações de 240 minutos tenha ocasionado os menores graus de dependência espacial observados para essas durações.

Considerando o mesmo tempo de retorno percebe-se pouca variação no EMPA (Erro Médio Percentual Absoluto), apenas nas casas decimais. Para o RMSE (Erro Quadrático Médio), percebe-se que ele acompanha a escala dos dados. Para todas as análises o BIAS (Viés Estatístico) sempre apresentou uma porcentagem bem próxima de zero, apresentando resultados

melhores que o de Silva Neto *et al.* (2020) que encontrou BIAS (Viés Estatístico) entre 0,95% e 1,63%.

Analisando o alcance dos modelos de melhor ajuste, os maiores estão em torno de 133,95 km (chuva de 240 minutos associada ao TR de 10 anos considerando o modelo esférico) e 133,96 km (chuva de 240 minutos associada ao TR de 50 anos considerando o modelo esférico). Enquanto o menor alcance foi de 56,54 km (chuva de 30 minutos associada ao TR de 10 anos considerando o modelo gaussiano). Os demais variaram entre 64 e 87 km.

De acordo com Mello e Viola (2013) o alcance do semivariograma está associado à existência de dependência e autocorrelação espacial. Assim, para a realização da interpolação por krigagem somente amostras dentro do raio estabelecido pelo alcance são consideradas.

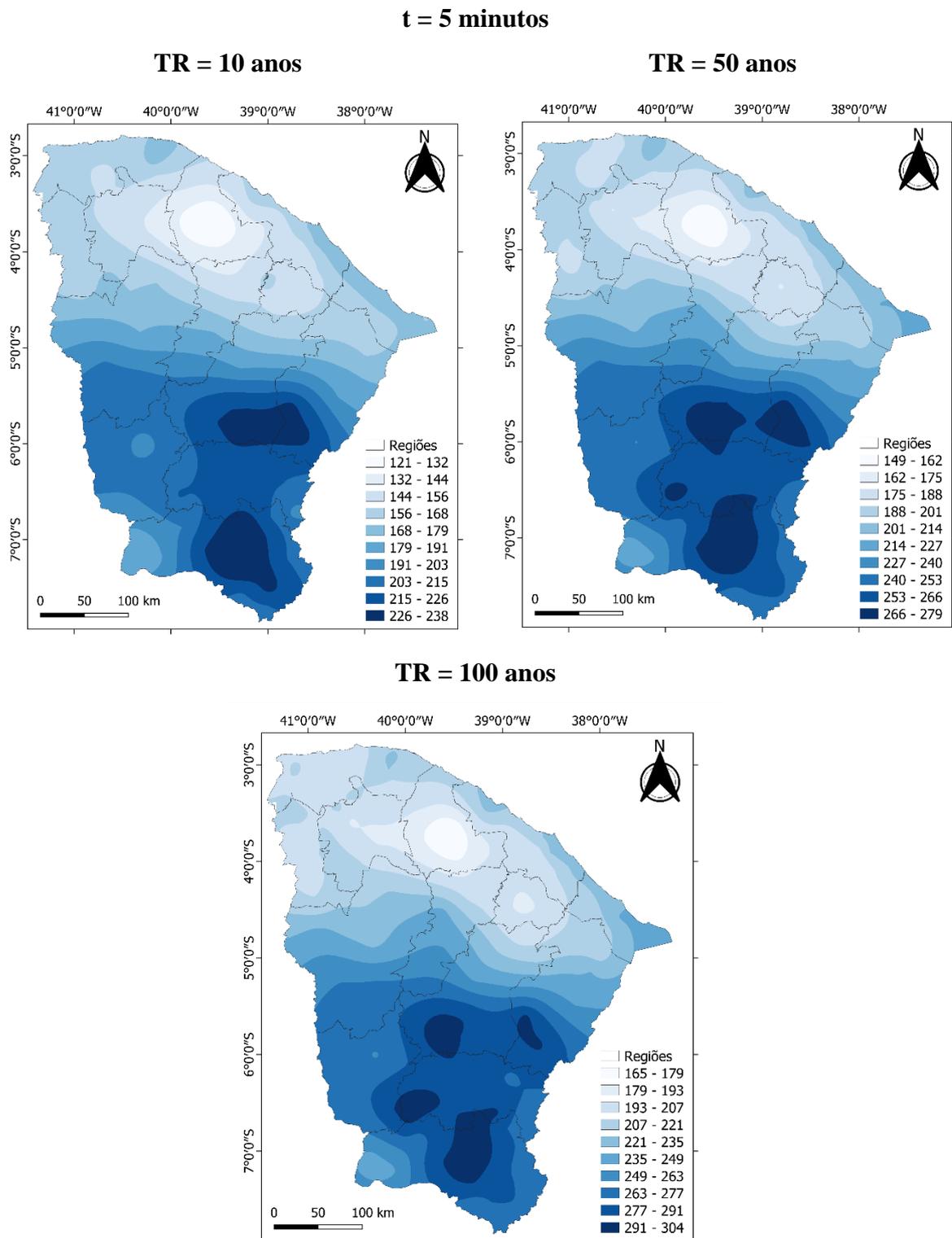
No estudo de Mello e Viola (2013) os autores comentam que os maiores graus de dependência espacial estão associados a eventos de chuva com maior duração em decorrência da origem em sistemas atmosféricos que afetam grandes áreas, como as Frente Frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul, geradoras de chuvas frontais. Os dois fenômenos formadores de chuvas geram maior dependência e menor variabilidade dos valores, enquanto chuvas com menores durações são mais localizadas, oriundas de chuvas convectivas, com menor continuidade espacial e maior variabilidades dos dados entre as estações.

Em regiões Equatoriais, o caso do estado do Ceará, as chuvas são geralmente convectivas, ou seja, de grandes intensidades e de pequena duração, restrita a áreas pequenas (TUCCI, 2004), existindo a atuação principalmente da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Assim, é esperado que o GD e os alcances obtidos para o estado do Ceará sejam menores, que para locais com eventos de chuvas frontais, como Minas Gerais.

Por fim, foi possível criar os mapas com as estimativas de chuvas intensas para o estado do Ceará. Aqueles para as durações de 5 e 30 minutos associadas aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos foram obtidos por krigagem universal por apresentarem tendência (OLIVER; WEBSTER, 2014), já os mapas para a duração de 240 minutos associadas aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos foram obtidos por krigagem ordinária.

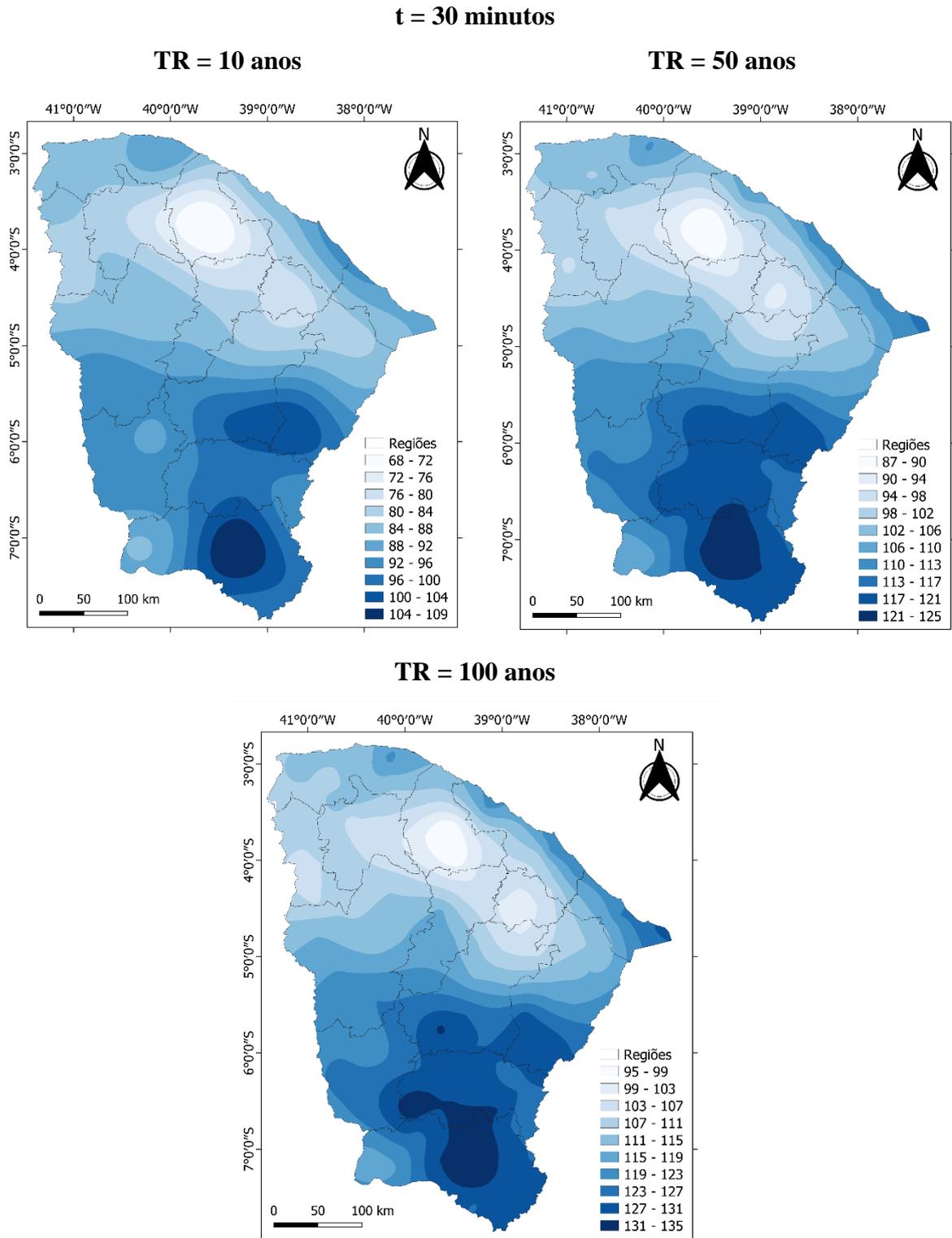
Nas Figuras 14 a 16 são apresentados os nove mapas obtidos. Eles encontram-se no datum SIRGAS 2000, sistema de coordenadas geográficas e as intensidades estão apresentadas em mm/h.

Figura 14 - Mapas de chuvas intensas para a duração de 5 minutos associada aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos



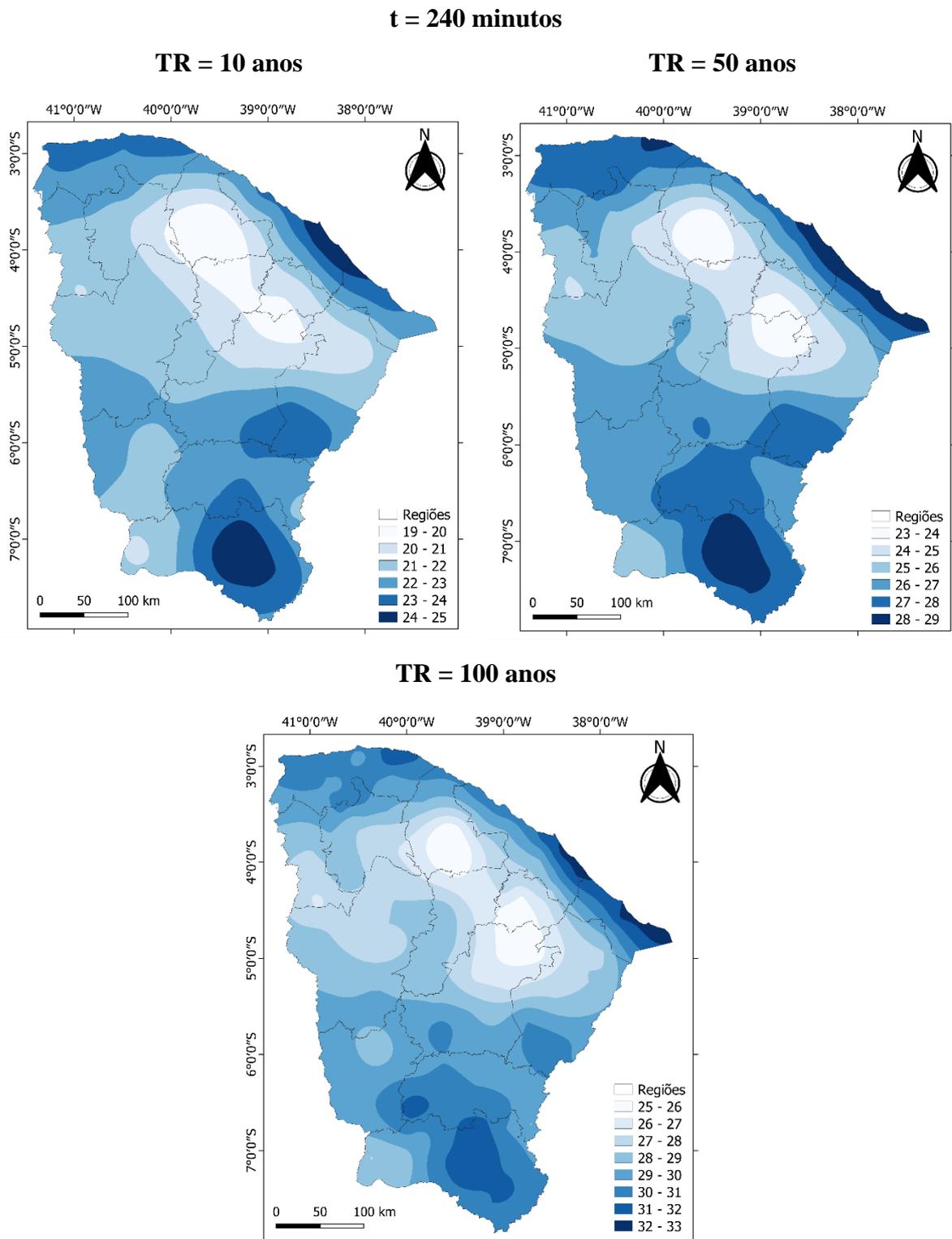
Fonte: elaborada pela autora (2022).

Figura 15 - Mapas de chuvas intensas para a duração de 30 minutos associada aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos



Fonte: elaborada pela autora (2022).

Figura 16 - Mapas de chuvas intensas para a duração de 240 minutos associada aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos



Fonte: elaborada pela autora (2022).

No que se refere a distribuição espacial das chuvas intensas de curta duração (5 minutos), é possível identificar que as regiões com maior magnitude estão concentradas no sul, sudeste e leste do estado, na região central do Cariri, Centro Sul, sul das regiões do Vale do Jaguaribe e do Sertão Central. Já as regiões de mínimas magnitudes estão situadas ao norte do estado, na região central do Vale do Curu.

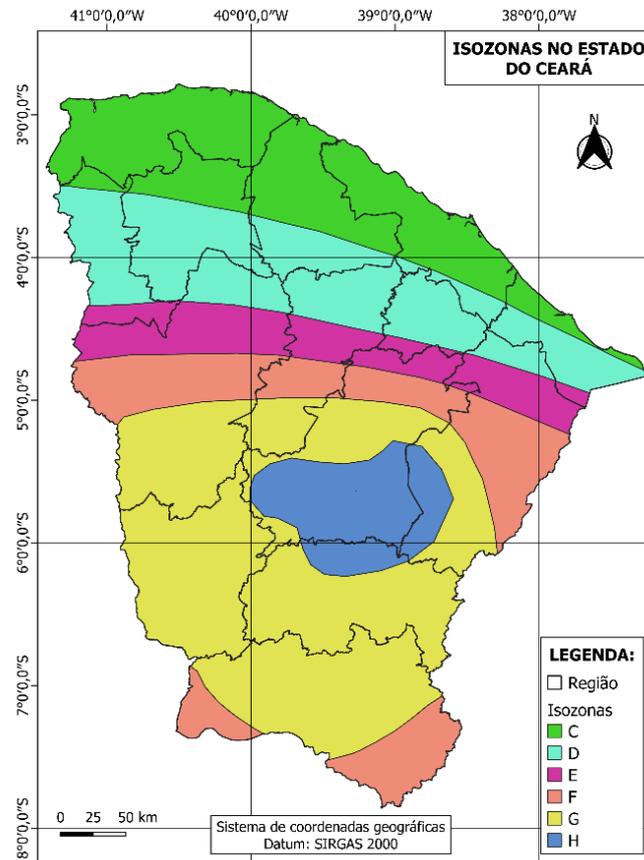
Para a duração considerada intermediária nos eventos analisados (30 minutos), observam-se altas intensidades principalmente na região sudeste do estado, com destaque para a região central do Cariri e pequena porção sul da região Centro Sul. Enquanto as mínimas magnitudes são novamente evidentes da região do Vale do Curu.

Para as chuvas intensas consideradas de longa duração nesse estudo (240 minutos), é possível identificar que mínimas magnitudes estão localizadas na região central do Vale do Curu, e em partes do Sertão de Canindé, sul do Maciço de Baturité e norte do Sertão Central. Já as máximas magnitude estão localizadas principalmente na região litorânea do Litoral Leste, Grande Fortaleza, em pequena porção do Litoral Norte e também na região do Cariri, nesse último correndo apenas para as recorrências de 10 e 50 anos.

Percebe-se que à medida que a duração da chuva aumenta, as intensidades dos municípios do Litoral se destacam como as maiores intensidades do estado, o que não acontece para pequenas durações. Isso pode revelar uma característica da região de possuir chuvas com durações mais longas.

Entende-se também que os mapas com as estimativas de chuvas intensas obtidos apresentam influência tanto dos totais precipitados como dos coeficientes de desagregação das isozonas de Torrico (1974). A Figura 17 a seguir, apresenta o mapa das isozonas para o estado do Ceará, e a tabela com os coeficientes estão presentes no Anexo C.

Figura 17 - Isozonas de Torrico (1974) para o Ceará



Fonte: elaborada pela autora (2022).

Comparando a Figura 17 com as Figuras 14, 15 e 16, é perceptível a influência das isozonas principalmente em regiões de transição, como as regiões do Sertão de Crateús, Vale do Jaguaribe, Sertão de Canindé e Sertão Central, em que o aumento da intensidade acompanha o aumento dos coeficientes das isozonas.

As regiões do Vale do Curu e Sertão de Canindé, que apresentam as menores médias das precipitações diárias máximas, também se destacam com menores intensidades nas regiões de isozonas C e D, caracterizada por baixos coeficientes de desagregação. Enquanto as regiões da Grande Fortaleza, Litoral Leste e Litoral Norte, que apresentam as maiores médias das precipitações diárias máximas, se destacam nas intensidades para chuvas de longa duração (240 minutos) e todos os períodos de retorno. Tais regiões também estão situadas nas isozonas C e D.

Já a região do Cariri e Centro Sul, que se destacam pelas elevadas intensidades, também apresentam consideráveis médias nas precipitações diárias máximas e estão localizadas nas isozonas G, e o norte da região Centro Sul na isozonas H, com coeficientes de desagregação muito elevados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a distribuição espacial das chuvas intensas no estado do Ceará aplicando técnicas geoestatística. Para atingir tal objetivo foi conduzido um estudo geoestatístico utilizando como base de dados as intensidade calculadas pelas equações IDF de Batista (2018).

Desta forma, o primeiro objetivo específico de realizar uma análise exploratória dos eventos de chuvas intensas foi atingido. Foi possível analisar o comportamento dos eventos, em especial em relação a assimetria e normalidade, condições relevantes para a aplicação de uma análise geoestatística. Os eventos de chuva com menor duração, ou seja, 5 minutos, para todos os tempos de retorno analisados, não apresentaram normalidade. No entanto, todos os eventos analisados apresentavam simetria, justificando a aplicação do estudo geoestatístico sem a necessidade da utilização de técnicas de transformação de dados.

Com relação ao segundo e terceiro objetivo específico, foi possível modelar os semivariogramas experimentais e ajustar os modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano, com destaque para o melhor ajuste do modelo exponencial que se sobressaiu em 67% dos eventos estudados. Vale ressaltar que o grau de dependência espacial (GD) foi considerado como “moderado” em concordância com outros estudos sobre chuvas intensas, como o de Silva Neto *et al.* (2020) e Mello e Viola (2013), salientando a existência de uma dependência espacial estruturada para esse fenômeno.

No que se refere ao quarto objetivo específico de gerar mapas com as estimativas da distribuição das chuvas intensas no estado, foi possível criar os mapas por meio da interpolação por krigagem ordinária e krigagem universal. Foram gerados os nove mapas considerando as durações de 5, 30 e 240 minutos associadas com as recorrências de 10, 50 e 100 anos.

O quinto e último objetivo específico de identificar as áreas críticas com relação à ocorrência de chuvas intensas no estado do Ceará também foi atingido. Pelo mapas gerados, observou-se que as chuvas de curta duração (5 minutos), caracterizadas pela elevada intensidade ocorrem com maior severidade nas regiões do Cariri, Centro Sul, e sul do Vale do Jaguaribe e do Sertão Central. Já para os eventos com durações mais longas (240 minutos), as máximas magnitudes ocorrem nas regiões litorâneas do Litoral Leste, Grande Fortaleza e também na região do cariri para as recorrências de 10 e 50 anos, destacando as características

dessas regiões de apresentarem chuvas mais longas quando comparadas com outras regiões do estado.

Portanto, o trabalho atingiu o objetivo geral à medida que foi realizada uma análise da distribuição espacial das chuvas intensas no estado do Ceará. Foi observada uma dependência espacial dos eventos de chuvas intensas e a identificação das áreas em que as chuvas ocorrem com maior e menor severidade, sendo possível contribuir para apresentar uma perspectiva ampla da distribuição espacial dos eventos de chuvas intensas. Vale salientar que foi observada uma influência do método das isozonas nos resultados apresentados, o que poderia ser analisado de forma mais aprofundada em estudo futuros.

Destacam-se como limitações desse estudo a análise e modelagem da anisotropia. Com relação a análise, a principal dificuldade foi associada com a experiência do pesquisador na análise dos mapas variográficos para encontrar o ângulos, e na identificação dos tipos de anisotropia, para realizar a correta modelagem. Com relação a modelagem, destaca-se a deficiência de estudos e a complexidade exigida.

Nesse contexto, surge como oportunidade de pesquisa que esse estudo seja replicado considerando a anisotropia e verificando sua interferência no resultado. Dentre as inúmeras aplicações da geoestatística, seria oportuno também verificar a influência do relevo cearense nos fenômenos de precipitação, utilizando a altitude como variável secundária da cokrigagem, já que o estado apresenta planaltos como a Chapada do Araripe, Chapada do Apodi, Planalto da Ibiapaba e Maciço de Baturité.

REFERÊNCIAS

- ÁVILA, L.F.; MELLO, C.D.; VIOLA, M.R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, (Suplemento), p. 906-915, 2009.
- BACK, A. J. Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e. 2, 2020.
- BACK, A. J.; CADORIN, S. B.; GALATTO, S. L. Extreme rainfall and IDF equations for Alagoas State, Brazil. **Revista Ambiente & Água**. Taubaté, v. 15, n.6, e2544. 2020.
- BACK, A. J.; HENN, A.; OLIVEIRA, J. L. R. Heavy rainfall equations for Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2127-2134, 2011.
- BARRETO, E.; RESENDE, I. *Após chuvas, quatro cidades do Rio de Janeiro já decretam estado de emergência*. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/apos-chuvas-quatro-cidades-do-rio-de-janeiro-ja-decretam-estado-de-emergencia/>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- BASSO, R. E.; ALLASIA, D. G.; TASSI, R. Vazão de projeto na microdrenagem em locais sem dados de precipitação: estudo para o Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 233-247, jul./set. 2019.
- BATISTA, T. L. **Geração de equações IDF dos municípios cearenses pelo método de desagregação por isozona implementado em um programa computacional**. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BATISTA, T. L.; ALVES, F. DE M.; TAVARES, P. R.L. Utilização de dados pluviométricos para o desenvolvimento de equações IDF da região metropolitana de Fortaleza-CE, Brasil. **Revista DAE**, v. 66, n. 211, p. 118-129, 2018.
- BBC NEWS BRASIL (Brasil). *Chuvas na Bahia: os fenômenos extremos que causam a tragédia no Estado*. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-59804297>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- BELL, F. C. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 95, n. HY1, p. 311-327, 1969.
- BETZEK, N. M. *et al.* Computational routines for the automatic selection of the best parameters used by interpolation methods to create thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 49-62, 1 fev. 2019.
- BRAGA, R. N. DE S.; HORA, M. DE A. G. M. DA; LYRA, G. B.; NASCENTES, A. L. Determinação e interpolação dos coeficientes das equações de chuvas intensas para cidade do Rio de Janeiro. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 13 n.1, e. 2076, 2018.

BRANDÃO, R. L.; FREITAS, L. C. B. **Geodiversidade do Estado do Ceará - Programa Geologia do Brasil, Levantamento da Geodiversidade**. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil, 2014.

CAETANO, C. *Chuva em Minas Gerais: veja a situação das cidades atingidas nas últimas horas*. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/10/chuva-em-minas-gerais-veja-a-situacao-das-cidades-atingidas-nas-ultimas-horas.ghtml>. Acesso em: 25 abr. 2022.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (ed.). *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 1-200. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 15 out. 2021.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KERLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 47:1501-1511, 1994.

CAMPOS, A. R.; SILVA, J. B. L. DA; SANTOS, G. G.; RATKE, R. F.; AQUINO, I. O. DE; Estimate of intense rainfall equation parameters for rainfall stations of the Paraíba State, Brazil. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v.47, n.1, p. 15-21, 2017.

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

CAVALCANTI, I. F. DE A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. DA S.; SILVA, M. G. A. J. DA. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009, 463 p.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336 p.

COUTINHO, A. P.; ALCÂNTARA, L. R. P.; COSTA, I. R. DE A.; BARROS, V. H. DE O.; COSTA, L. F.; RIBAS, L. V. DA S. The effect of the method of disaggregation of rain in the hydrograph project for a rural hydrographic basin in the northeastern semi-arid region. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v.4, n.2. p. 146-156. 2019

Cressie, N. **Statistics for spatial data**. John Wiley & Sons, New York, 1991.

DAEE-CETESB. Departamento de Água e Energia Elétrica - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental 1979. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo: DAEE-CETESB. 466 p.

DAMÉ, R. DE C. F.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; VILLELA, F. A.; SANTOS, J. P. DOS; WINKLER, A. S. Analysis of the relationship intensity, duration, frequency of disaggregated daily rainfall in southern Rio Grande do Sul, Brazil. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.34, n.4, p.660-670, jul./ago. 2014.

FECHINE SOBRINHO, V. RODRIGUES, J. O.; MENDONÇA, L. A. R.; de ANDRADE, E. M.; TAVARES, P. R. L. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração- Frequência sem

dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 7, p. 727-734, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>.

G1 SP (São Paulo). **Chuva forte provoca alagamentos e deixa carros submersos na Zona Leste de SP nesta segunda-feira**. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/03/14/chuva-forte-provoca-alagamentos-e-deixa-carros-submersos-na-zona-leste-de-sp-nesta-segunda-feira.ghtml>. Acesso em: 25 abr. 2022.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. Ed. [4. Reimpr.]. São Paulo: Atlas, 2021.

IBGE. **Cidades e Estados**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>. Acesso em: 08 mar. 2022.

INMET. Disponível em: < https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual > . Acesso em 12 jan. 2022

IPECE. **Ceará em Mapas**. 2022. Disponível em:
<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12.htm>. Acesso em: 15 jan. 2022.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 600p.

LANDIM P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, Campinas, v. 2, n.1, p. 19 – 33, 2006.

LIMA NETO, V. DE S.; TAVARES, P. R. L.; BATISTA, T. L. Ajuste e Validação de Equações IDF a Partir de Dados Pluviométricos para Cidades do Estado de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 713-721, 2021.

LIMA, M. A. DA S.; LIRA, M. A. T. A Variabilidade Climática e os Desastres Naturais no Estado do Ceará (1991-2019). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 (Suplemento), 603 - 614, 2021.

LUNDGREN, W. J. C.; SOUZA, I. F. de; LUNDGREN, G. A. Kriging in the construction of pluviometric map of the State of Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 13-22, 2017. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20170002>.

MARTINS, G. de A.; THEÓPHILO, C. R. **Metodologia da investigação científica para ciências sociais aplicadas**. São Paulo: Atlas, 2007.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246 – 1266, 1963.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris School of Mines Publications, p. 211, 1971.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 27. 10.1590/S0100-06832003000500017. 2003.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 37-44, 2013.

MELLO, J. M. DE. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Recursos florestais, Silvicultura e Manejo Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and Earth scientist**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. 303 p.

OLIVEIRA, A. L.G.; LIMA, J. P.; BRASCO, T. L.; AMARAL, L. R. The importance of modeling the effects of trend and anisotropy on soil fertility maps. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 196, p. 106877, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2022.106877>.

OLIVEIRA, A. L. G. **Influência do rigor geoestatístico na qualidade do mapeamento em agricultura de precisão**. 2020. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2020.

OLIVER, M.A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging, **CATENA**, v. 113, p. 56-69, 2014.

OUALI, D.; CANNON, A. J. Estimation of rainfall intensity-duration-frequency curves at ungauged locations using quantile regression methods. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, p. 2821–2836, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1564-7>

PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, n.7, p. 683-691. 2004.

PEBESMA, E. J. **Gstat user's manual**. 2. ed. Utrecht, NL: Utrecht University, 2014. 108 p. Disponível em: <http://www.gstat.org/gstat.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2021.

ROCHA, T.B. C.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. das C.; SILVEIRA, C. da S.; MARTINS, E. S. P. R.; GONÇALVES, S. T. N.; SILVA, E. M. da; ALVES, J. M. B.; SAKAMOTO, M. S. Indicadores de Veranicos e de Distribuição de Chuva no Ceará e os Impactos na Agricultura de Sequeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 579-589, set. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630041>.

RODRIGUES, M. S.; CASTRIGNANÒ, A.; BELMONTE, A.; SILVA, K. A. DA; LESSA, B. F. DA T. Geostatistics and its potential in Agriculture 4.0. **Revista Ciência Agrônômica**. Fortaleza, v. 51, Special Agriculture 4.0, 2020

SABINO, M.; SOUZA, A. P. DE; ULIANA, E. M.; LISBOA, L.; ALMEIDA, F. T. DE; ZOLIN, C. A. Intensity-duration-frequency of maximum rainfall in Mato Grosso State. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 15, n. 1, e2373. 2020.

SILVA NETO, V. L.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ALVES, M. V. G.; SILVA, D. D.; PEREIRA, S. B. Mapeamento de chuvas intensas para o Estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 1-11, 2020.

SILVA, E. M. DA; CARVALHO, H. C. M.; SILVA, L. L. DA; BARBOSA, W. A. Registros de Queimadas em Vegetação (Incêndios) e a Climatologia da Chuvas no Estado do Ceará: Estudo de Caso no Período de 2015 a 2019. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 (Suplemento), 571 - 577, 2021

TORRICO, J. J. T. **Práticas hidrológicas**. Rio de Janeiro, TRANSCON, 1974.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

WANDERLEY, L. S. de A.; NÓBREGA, R. S.; DUARTE, C. C.; MOREIRA, A. B.; ANJOS, R. S. Tipos de Tempo Associados a Eventos Diários de Chuva Intensa na Cidade de Recife – PE, Brasil. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 33, 2021. DOI: 10.14393/SN-v33-2021-60520. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/view/60520>. Acesso em: 7 mar. 2022.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2007.

WEBSTER, R., OLIVER, M.A., LARK, R.M., 2016. Editorial: statistics in the journal. **Eur. J. Soil Sci.** 67 (2), 133–134.

XAVIER, S. F. A.; JALE, J. DA S.; STOSIC, T.; SANTOS, C. A. C. DOS; SINGH, V. P.; Precipitation Trends Analysis by Mann-Kendall Test: A Case Study of Paraíba, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 187-196, 2020.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos. 2013. 216 p.

ZAMBRANO – BIGIARINI, M. (2020). **HydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series**. R package version 0.4-0. Disponível em: < <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/hydroGOF.pdf>>. Acesso em: 3 dezembro 2021.

APÊNDICE A – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS

ID	Município	Long. (°)	Lat. (°)	ID	Município	Long. (°)	Lat. (°)
1	Abaiara	-39,0477	-7,362	38	Caucaia	-38,6833	-3,75
353	Acarape	-38,7006	-4,227	39	Cedro	-39,0615	-6,5963
2	Acaraú	-40,1184	-2,8859	40	Chaval	-41,2399	-3,0363
3	Acopiara	-39,4427	-6,1108	613	Choró	-39,25	-4,85
4	Aiuaba	-40,1167	-6,567	204	Chorozinho	-38,4973	-4,3033
5	Alcantaras	-40,5442	-3,5854	41	Coreaú	-40,6575	-3,5501
6	Altaneira	-39,7392	-7,0008	42	Crateús	-40,6786	-5,1754
7	Alto Santo	-38,2654	-5,5129	43	Crato	-39,4128	-7,2383
8	Amontada	-39,8269	-3,3611	550	Croatá	-40,9093	-4,4269
9	Antonina do Norte	-39,9856	-6,7672	44	Cruz	-40,1811	-2,9305
10	Apuiarés	-39,4333	-3,95	349	Dep. Irapuan Pinheiro	-39,2673	-5,9184
11	Aquiraz	-38,3833	-3,9	344	Ererê	-38,3356	-6,019
12	Aracati	-37,7747	-4,5685	552	Eusébio	-38,5	-3,9
13	Aracoiaba	-38,809	-4,3733	45	Farias Brito	-39,5716	-6,9231
602	Ararendá	-40,8279	-4,7501	46	Forquilha	-40,2634	-3,798
14	Araripe	-40,1333	-7,2	363	Fortaleza	-38,5833	-3,75
15	Aratuba	-39,0471	-4,4169	157	Fortim	-37,8009	-4,4504
16	Arneiroz	-40,159	-6,3258	48	Frecheirinhas	-40,8101	-3,759
17	Assaré	-39,8719	-6,8696	49	General Sampaio	-39,448	-4,048
18	Aurora	-38,9684	-6,9426	277	Graça	-40,754	-4,0503
19	Baixio	-38,7187	-6,7316	50	Granja	-40,8315	-3,1241
212	Banabuiú	-38,9167	-5,317	51	Granjeiro	-39,2168	-6,89
20	Barbalha	-39,3016	-7,3072	52	Groaíras	-40,3777	-3,9054
354	Barreira	-38,6393	-4,2875	207	Guaiúba	-38,6374	-4,0465
21	Barro	-38,7774	-7,1839	53	Guaraciaba do Norte	-40,7482	-4,1611
244	Barroquinha	-41,1293	-3,0238	54	Guaramiranga	-38,9333	-4,267
22	Baturité	-38,8667	-4,333	55	Hidrolândia	-40,4167	-4,4004
23	Beberibe	-38,1278	-4,1812	205	Horizonte	-38,4833	-4,1
24	Bela Cruz	-40,1686	-3,058	544	Ibaretama	-38,8236	-4,8206
25	Boa Viagem	-39,7325	-5,1249	56	Ibiapina	-40,8884	-3,9166
26	Brejo Santo	-38,9838	-7,4851	202	Ibicuitinga	-38,6333	-4,967
27	Camocim	-40,845	-2,9	57	Icapuí	-37,3616	-4,699
28	Campo Sales	-40,3667	-7,067	58	Icó	-38,8621	-6,4079
29	Canindé	-39,3203	-4,3644	59	Iguatu	-39,3064	-6,3747
30	Capistrano	-38,9	-4,467	60	Independência	-40,3124	-5,3938
31	Caridade	-39,1833	-4,233	356	Ipaporanga	-40,7616	-4,9039
32	Cariré	-40,4749	-3,9485	61	Ipaumirim	-38,7182	-6,7903
33	Caririaçu	-39,2854	-7,0466	62	Ipu	-40,7108	-4,3195
34	Cariús	-39,4989	-6,5412	63	Ipueiras	-40,7184	-4,533
35	Carnaubal	-40,9416	-4,1646	64	Iracema	-38,3043	-5,8109
36	Cascavel	-38,2329	-4,1332	65	Irauçuba	-39,7785	-3,746
37	Catarina	-39,8756	-6,1357	66	Itaíçaba	-37,8208	-4,6754
287	Catunda	-40,2029	-4,6496	211	Itaitinga	-38,5158	-3,9775

ID	Município	Long. (°)	Lat. (°)	ID	Município	Long. (°)	Lat. (°)
67	Itapajé	-39,5814	-3,6778	106	Pacujá	-40,6954	-3,9784
68	Itapipoca	-39,5766	-3,4983	107	Palhano	-37,9623	-4,748
69	Itapiúna	-38,95	-4,583	108	Palmácia	-38,8518	-4,1472
70	Itarema	-39,9161	-2,9211	109	Paracuru	-39,036	-3,4302
71	Itatira	-39,6347	-4,5286	110	Paraipaba	-39,1463	-3,4339
72	Jaguaretama	-38,764	-5,6086	111	Parambu	-40,7028	-6,2159
73	Jaguaribara	-38,4629	-5,4621	112	Paramoti	-39,2333	-4,0997
74	Jaguaribe	-38,6207	-5,8861	113	Pedra Branca	-39,7167	-5,45
75	Jaguaruana	-37,7816	-4,8486	114	Penaforte	-39,0761	-7,8275
76	Jardim	-39,2789	-7,583	115	Pentecostes	-39,2723	-3,7957
77	Jati	-39	-7,683	116	Pereiro	-38,4597	-6,0449
247	Jijoca de Jericoacoara	-40,4549	-2,899	176	Pindoretama	-38,3333	-4,05
78	Juazeiro do Norte	-39,326	-7,246	117	Piquet Carneiro	-39,4129	-5,8052
79	Jucás	-39,5169	-6,517	252	Pires Ferreira	-40,6345	-4,2445
80	Lavras da Mangabeira	-38,9606	-6,7629	118	Poranga	-40,9239	-4,7449
81	Limoeiro do Norte	-38,0984	-5,1519	119	Porteiras	-39,1167	-7,533
220	Madalena	-39,5667	-4,85	120	Potengi	-40,0305	-7,0947
82	Maracanaú	-38,6313	-3,8849	184	Potiretama	-38,1667	-5,7
83	Maranguape	-38,6826	-3,9031	358	Quitetianópolis	-40,7067	-5,9058
84	Marco	-40,1463	-3,1202	121	Quixadá	-39,0333	-4,967
85	Martinópolis	-40,6998	-3,2179	122	Quixelô	-39,2044	-6,2556
86	Massapê	-40,3444	-3,5221	123	Quixeramobim	-39,2837	-5,2008
87	Mauriti	-38,7722	-7,3839	124	Quixerê	-37,9952	-5,0714
88	Meruoca	-40,4512	-3,5476	125	Redenção	-38,7295	-4,2232
89	Milagres	-38,9508	-7,3115	126	Reriutaba	-40,5846	-4,1413
90	Milhã	-39,1969	-5,6812	127	Russas	-37,9767	-4,9419
261	Miraíma	-39,9676	-3,5717	128	Saboeiro	-39,902	-6,5352
91	Missão Velha	-39,1466	-7,2488	307	Salitre	-40,4569	-7,2856
92	Mombaça	-39,6331	-5,7478	129	Santa Quitéria	-40,15	-4,333
93	Monsenho Tabosa	-40,0636	-4,7971	130	Santana do Acaraú	-40,21	-3,4581
94	Morada Nova	-38,3531	-5,1894	131	Santana do Cariri	-39,7389	-7,1835
95	Moraújo	-40,6779	-3,4669	132	São Benedito	-40,8666	-4,0463
96	Morrinhos	-40,1292	-3,2323	133	São Gonçalo do Amarante	-38,9797	-3,6747
97	Mucambo	-40,7433	-3,9057	134	São João do Jaguaribe	-38,2732	-5,2715
98	Mulungu	-38,9972	-4,3057	135	São Luis do Curu	-39,2422	-3,6723
99	Nova Olinda	-39,6833	-7,1	136	Senador Pompeu	-39,3707	-5,587
100	Nova Russas	-40,5685	-4,6995	137	Senador Sá	-40,4634	-3,3514
101	Novo Oriente	-40,7667	-5,533	138	Sobral	-40,3449	-3,6606
361	Ocara	-38,5943	-4,4905	139	Solonópole	-39,0069	-5,7337
102	Orós	-38,9121	-6,2438	140	Tabuleiro do Norte	-38,1293	-5,2484
103	Pacajus	-38,4667	-4,183	141	Tamboril	-40,3206	-4,8344
104	Pacatuba	-38,6136	-3,9792	359	Tarrafas	-39,7604	-6,6791
105	Pacoti	-38,9167	-4,217	142	Tauá	-40,2997	-6,0064

ID	Município	Long. (°)	Lat. (°)	ID	Município	Long. (°)	Lat. (°)
186	Tejuçuoca	-39,5803	-3,9894	147	Umirim	-39,3435	-3,6881
143	Tianguá	-40,9937	-3,7231	148	Uruburetama	-39,4934	-3,6327
144	Trairi	-39,2651	-3,2764	149	Uruoca	-40,5603	-3,3154
360	Tururu	-39,4349	-3,5979	150	Varjota	-40,4833	-4,183
145	Ubajara	-40,9226	-3,8534	151	Várzea Alegre	-39,2952	-6,779
146	Umari	-38,7019	-6,6438	152	Viçosa do Ceará	-41,0946	-3,5682

APÊNDICE B – INTENSIDADES EM MM/H CALCULADAS PELAS EQUAÇÕES

IDF DE BATISTA (2018)

Município	TR = 10 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240
Abaiara	224,0	102,3	23,8	259,2	118,4	27,6	277,3	126,7	29,5
Acarape	158,5	82,8	21,5	192,9	100,7	26,1	211,1	110,2	28,6
Acaraú	178,3	98,2	26,6	214,9	118,3	32,1	234,2	128,9	35,0
Acopiara	228,5	101,4	22,9	274,3	121,7	27,5	298,4	132,4	29,9
Aiuaba	217,0	99,1	23,1	272,6	124,4	29,0	302,8	138,2	32,2
Alcantaras	110,6	60,9	16,5	128,0	70,5	19,1	136,9	75,4	20,4
Altaneira	224,1	102,3	23,8	260,7	119,0	27,7	279,6	127,6	29,7
Alto Santo	179,3	85,7	20,6	216,7	103,6	24,9	236,3	113,0	27,2
Amontada	146,0	80,4	21,8	187,8	103,4	28,0	210,8	116,1	31,5
Antonina do Norte	211,2	96,4	22,4	289,9	132,3	30,8	335,5	153,1	35,6
Apuiarés	141,3	73,8	19,1	159,0	83,0	21,5	167,9	87,7	22,7
Aquiraz	195,7	107,7	29,2	235,2	129,5	35,1	256,0	140,9	38,2
Aracati	195,9	102,2	26,5	255,6	133,3	34,6	288,9	150,7	39,1
Aracoiaba	120,1	62,7	16,2	137,0	71,5	18,5	145,6	75,9	19,7
Ararendá	184,3	88,2	21,2	226,4	108,4	26,1	249,0	119,2	28,7
Araripe	169,2	80,9	19,5	200,9	96,0	23,1	217,5	104,0	25,0
Aratuba	148,6	77,5	20,1	171,7	89,5	23,2	183,5	95,7	24,8
Arneiroz	215,3	98,3	22,9	260,5	118,9	27,7	284,5	129,9	30,2
Assaré	179,4	81,8	19,0	205,1	93,5	21,8	218,2	99,5	23,1
Aurora	234,0	106,7	24,8	271,5	123,8	28,8	290,9	132,6	30,9
Baixio	154,9	70,7	16,4	192,5	87,8	20,4	212,8	97,1	22,6
Banabuiú	194,9	86,5	19,5	223,2	99,0	22,3	237,5	105,4	23,7
Barbalha	252,7	115,2	26,8	291,9	133,1	31,0	312,0	142,3	33,1
Barreira	154,5	80,7	20,9	199,0	103,9	26,9	223,5	116,7	30,2
Barro	197,6	94,4	22,7	224,6	107,3	25,8	238,3	113,9	27,4
Barroquinha	175,0	96,3	26,1	205,2	113,0	30,6	220,8	121,6	33,0
Baturité	145,7	76,0	19,7	175,7	91,7	23,8	191,5	99,9	25,9
Beberibe	176,8	97,3	26,4	206,1	113,4	30,8	221,2	121,8	33,0
Bela Cruz	230,0	126,6	34,3	262,9	144,7	39,2	279,5	153,9	41,7
Boa Viagem	192,1	87,6	20,4	236,0	107,6	25,0	259,5	118,3	27,5
Brejo Santo	278,4	133,0	32,0	358,5	171,3	41,2	402,7	192,4	46,3
Camocim	171,9	94,6	25,7	198,9	109,5	29,7	212,7	117,1	31,7
Campo Sales	160,0	76,5	18,4	194,0	92,7	22,3	212,1	101,3	24,4
Canindé	134,4	70,2	18,2	165,5	86,5	22,4	182,2	95,2	24,7
Capistrano	149,7	78,1	20,2	175,6	91,6	23,7	189,0	98,5	25,5
Caridade	141,8	74,0	19,2	173,3	90,5	23,4	190,0	99,2	25,7
Cariré	159,0	82,9	21,5	194,3	101,3	26,3	213,0	111,1	28,8
Caririaçu	246,4	112,4	26,1	297,5	135,7	31,6	324,5	148,0	34,4
Cariús	198,2	90,5	21,1	260,3	118,9	27,7	295,2	134,8	31,4
Carnaubal	139,1	72,6	18,8	164,2	85,7	22,2	177,3	92,5	24,0
Cascavel	185,0	101,9	27,6	224,8	123,8	33,6	245,9	135,3	36,7
Catarina	192,7	88,0	20,5	231,7	105,8	24,6	252,2	115,2	26,8
Catunda	179,3	89,1	22,2	222,9	110,8	27,6	246,4	122,5	30,5

Município	TR = 10 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240
Caucaia	163,0	89,7	24,3	190,3	104,7	28,4	204,3	112,5	30,5
Cedro	225,6	102,9	23,9	294,7	134,4	31,3	333,2	152,0	35,3
Chaval	152,1	83,8	22,7	184,3	101,5	27,5	201,3	110,8	30,0
Choró	170,0	81,4	19,6	215,7	103,3	24,8	240,7	115,2	27,7
Chorozinho	133,2	69,6	18,0	157,1	82,1	21,3	169,5	88,6	23,0
Coreaú	140,9	77,6	21,0	168,3	92,7	25,1	182,7	100,6	27,3
Crateús	217,1	99,0	23,0	254,8	116,2	27,0	274,3	125,1	29,1
Crato	255,0	116,3	27,0	295,1	134,5	31,3	315,6	143,9	33,5
Croatá	146,0	72,6	18,1	165,9	82,5	20,5	176,0	87,5	21,8
Cruz	177,8	97,9	26,5	219,2	120,7	32,7	241,4	132,9	36,0
Dep. Irapuan Pinheiro	233,6	103,6	23,4	260,5	115,5	26,1	273,9	121,5	27,4
Ererê	206,3	94,2	21,9	243,0	111,0	25,8	262,0	119,6	27,8
Eusébio	194,9	107,3	29,1	242,4	133,4	36,2	267,9	147,5	40,0
Farias Brito	222,0	101,3	23,6	258,0	117,7	27,4	276,5	126,2	29,4
Forquilha	141,0	73,7	19,1	168,6	88,1	22,8	183,0	95,6	24,8
Fortaleza	182,0	100,2	27,2	222,6	122,6	33,2	244,3	134,5	36,5
Fortim	174,0	95,8	26,0	195,5	107,6	29,2	206,3	113,6	30,8
Frecheirinhas	167,8	87,7	22,7	211,7	110,6	28,7	235,6	123,1	31,9
General Sampaio	118,8	62,0	16,1	149,9	78,3	20,3	166,8	87,1	22,6
Graça	190,8	99,6	25,8	235,9	123,2	31,9	260,0	135,8	35,2
Granja	150,3	82,7	22,4	177,9	97,9	26,5	192,2	105,8	28,7
Granjeiro	253,3	115,7	26,9	288,4	131,7	30,7	306,1	139,8	32,6
Groaíras	147,6	77,1	20,0	174,3	91,0	23,6	188,2	98,3	25,5
Guaiúba	135,9	74,8	20,3	159,3	87,7	23,8	171,4	94,4	25,6
Guaraciaba do Norte	171,4	89,4	23,2	197,5	103,0	26,7	210,8	109,9	28,5
Guaramiranga	168,2	87,7	22,7	199,5	104,1	27,0	215,9	112,6	29,2
Hidrolândia	157,2	78,1	19,5	189,9	94,3	23,5	207,1	102,8	25,7
Horizonte	141,6	78,0	21,1	169,6	93,4	25,3	184,3	101,4	27,5
Ibaretama	158,3	78,7	19,6	179,1	89,0	22,2	189,6	94,2	23,5
Ibiapina	182,8	95,4	24,7	207,6	108,3	28,1	220,1	114,9	29,8
Ibicuitinga	166,5	79,7	19,1	187,4	89,6	21,5	197,8	94,6	22,8
Icapuí	158,1	87,0	23,6	221,6	122,0	33,1	258,9	142,5	38,6
Icó	221,5	101,0	23,5	263,9	120,3	28,0	286,1	130,5	30,4
Iguatu	218,8	99,8	23,2	252,1	114,9	26,7	269,1	122,7	28,5
Independência	222,3	101,4	23,6	268,3	122,3	28,5	292,6	133,4	31,0
Ipaporanga	191,3	91,5	22,0	227,9	109,0	26,2	247,1	118,2	28,4
Ipaumirim	224,3	102,4	23,8	280,8	128,2	29,8	311,5	142,2	33,1
Ipu	179,8	89,3	22,3	210,2	104,3	26,0	225,8	112,1	28,0
Ipueiras	172,0	85,4	21,3	208,3	103,4	25,8	227,5	112,9	28,2
Iracema	203,8	97,4	23,4	245,2	117,2	28,2	267,1	127,6	30,7
Irauçuba	114,0	62,8	17,0	149,7	82,4	22,3	169,6	93,4	25,3
Itaiçaba	154,1	80,5	20,9	190,1	99,3	25,8	209,4	109,4	28,4
Itaitinga	156,6	86,2	23,4	188,1	103,6	28,1	204,7	112,7	30,5
Itapajé	97,9	53,9	14,6	111,5	61,4	16,6	118,3	65,1	17,7
Itapipoca	124,4	68,5	18,6	163,0	89,7	24,3	184,6	101,6	27,6
Itapiúna	146,3	72,6	18,1	175,7	87,2	21,8	191,3	94,9	23,7

Município	TR = 10 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240
Itarema	173,1	95,3	25,8	200,4	110,3	29,9	214,3	118,0	32,0
Itatira	165,9	82,4	20,6	240,8	119,6	29,8	285,9	142,0	35,4
Jaguaretama	267,1	118,5	26,7	325,3	144,4	32,6	356,2	158,1	35,7
Jaguaribara	200,8	91,8	21,4	231,3	105,7	24,6	246,9	112,8	26,3
Jaguaribe	243,2	110,9	25,8	287,5	131,1	30,5	310,6	141,6	32,9
Jaguaruana	168,5	87,9	22,8	208,9	109,0	28,2	230,6	120,3	31,2
Jardim	184,2	88,1	21,2	209,4	100,1	24,1	222,1	106,2	25,6
Jati	206,3	98,0	23,3	250,3	118,9	28,2	273,5	129,9	30,9
Jijoca de Jericoacoara	137,6	75,7	20,5	159,2	87,6	23,8	170,2	93,7	25,4
Juazeiro do Norte	236,5	107,8	25,1	275,2	125,5	29,2	295,1	134,6	31,3
Jucás	233,6	106,6	24,8	269,8	123,1	28,7	288,4	131,6	30,6
Lavras da Mangabeira	198,7	90,6	21,1	231,3	105,5	24,5	248,1	113,1	26,3
Limoeiro do Norte	196,8	94,0	22,6	244,3	116,7	28,1	269,9	129,0	31,0
Madalena	188,8	90,3	21,7	233,7	111,8	26,9	257,8	123,4	29,7
Maracanaú	139,8	77,0	20,9	157,4	86,6	23,5	166,2	91,5	24,8
Maranguape	157,4	86,7	23,5	189,3	104,2	28,3	206,1	113,4	30,8
Marco	136,0	74,9	20,3	159,5	87,8	23,8	171,6	94,5	25,6
Martinópole	139,4	76,7	20,8	166,4	91,6	24,8	180,6	99,4	26,9
Massapê	145,5	80,1	21,7	180,2	99,2	26,9	198,8	109,4	29,7
Mauriti	212,2	101,4	24,4	256,6	122,6	29,5	280,1	133,9	32,2
Meruoca	167,6	92,3	25,0	197,1	108,5	29,4	212,4	116,9	31,7
Milagres	229,2	109,6	26,4	269,4	128,8	31,0	290,3	138,8	33,4
Milhã	237,1	105,2	23,7	271,9	120,6	27,2	289,6	128,5	29,0
Miraíma	129,9	71,5	19,4	172,0	94,7	25,7	195,7	107,8	29,2
Missão Velha	231,5	105,5	24,6	262,0	119,4	27,8	277,4	126,5	29,4
Mombaca	244,4	108,4	24,5	320,2	142,0	32,1	362,7	160,9	36,3
Monsenho Tabosa	181,3	86,6	20,8	212,8	101,7	24,5	229,1	109,5	26,3
Morada Nova	183,3	87,6	21,1	226,9	108,4	26,1	250,4	119,6	28,8
Moraújo	167,6	92,3	25,0	217,5	119,7	32,5	245,2	135,0	36,6
Morrinhos	141,2	77,7	21,1	168,9	93,0	25,2	183,5	101,0	27,4
Mucambo	168,0	87,6	22,7	204,7	106,7	27,7	224,1	116,9	30,3
Mulungu	208,5	108,7	28,2	228,7	119,3	30,9	238,6	124,4	32,3
Nova Olinda	240,9	109,8	25,6	288,3	131,5	30,6	313,2	142,8	33,2
Nova Russas	178,5	85,3	20,5	206,7	98,8	23,8	221,3	105,7	25,4
Novo Oriente	217,6	99,2	23,1	254,3	116,0	27,0	273,3	124,6	29,0
Ocara	148,7	77,6	20,1	173,0	90,3	23,4	185,5	96,9	25,1
Orós	204,7	93,4	21,7	230,9	105,4	24,5	244,2	111,4	25,9
Pacajus	161,3	88,8	24,1	195,9	107,8	29,2	214,2	117,9	32,0
Pacatuba	139,2	76,6	20,8	164,8	90,7	24,6	178,1	98,0	26,6
Pacoti	141,1	73,6	19,1	183,8	95,8	24,8	207,6	108,3	28,1
Pacujá	152,1	79,4	20,6	187,7	98,0	25,4	206,8	108,0	28,0
Palhano	147,6	77,1	20,0	181,7	94,8	24,6	199,9	104,3	27,1
Palmácia	154,8	80,8	21,0	179,7	93,8	24,3	192,4	100,4	26,0
Paracuru	176,9	97,4	26,4	210,6	115,9	31,4	228,1	125,6	34,0
Paraipaba	187,0	102,9	27,9	248,7	136,9	37,1	283,5	156,1	42,3
Parambu	218,5	99,7	23,2	268,4	122,5	28,5	295,1	134,7	31,3

Município	TR = 10 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240
Paramoti	149,1	77,9	20,2	194,0	101,3	26,3	219,0	114,4	29,7
Pedra Branca	211,4	93,8	21,2	255,6	113,4	25,6	279,0	123,8	27,9
Penaforte	195,9	93,7	22,6	247,8	118,6	28,5	276,2	132,1	31,8
Pentecostes	126,4	69,6	18,9	155,8	85,8	23,3	171,6	94,5	25,6
Pereiro	245,3	111,9	26,1	295,2	134,7	31,4	321,5	146,7	34,1
Pindoretama	178,3	98,1	26,6	202,4	111,4	30,2	214,6	118,1	32,0
Piquet Carneiro	224,5	99,6	22,5	259,3	115,0	26,0	277,1	122,9	27,8
Pires Ferreira	173,1	90,4	23,4	203,8	106,4	27,6	219,8	114,8	29,7
Poranga	185,9	88,9	21,4	232,7	111,2	26,8	258,0	123,4	29,7
Porteiras	217,5	104,0	25,0	263,0	125,8	30,3	287,1	137,3	33,0
Potengi	196,5	89,6	20,8	230,3	105,0	24,4	247,8	113,0	26,3
Potiretama	190,5	91,1	21,9	234,7	112,3	27,0	258,4	123,6	29,7
Quitetianópolis	223,6	102,1	23,7	255,5	116,7	27,1	271,8	124,1	28,9
Quixadá	170,0	81,2	19,5	200,1	95,6	23,0	215,8	103,1	24,8
Quixelô	216,4	98,8	23,0	257,9	117,8	27,4	279,6	127,7	29,7
Quixeramobim	174,6	79,6	18,5	203,5	92,8	21,6	218,4	99,6	23,2
Quixerê	151,3	75,2	18,7	185,7	92,2	23,0	204,1	101,3	25,3
Redenção	168,6	88,0	22,8	192,8	100,6	26,1	205,1	107,0	27,8
Reritaba	165,1	86,1	22,3	196,7	102,6	26,6	213,2	111,2	28,8
Russas	153,8	76,4	19,0	176,6	87,7	21,9	188,3	93,5	23,3
Saboeiro	233,4	106,5	24,8	308,8	141,0	32,8	351,4	160,4	37,3
Salitre	184,5	88,4	21,3	228,1	109,2	26,3	251,4	120,4	29,0
Santa Quitéria	182,7	90,7	22,6	218,2	108,3	27,0	236,9	117,6	29,3
Santana do Acaraú	148,5	81,8	22,2	186,4	102,6	27,8	206,9	113,9	30,9
Santana do Cariri	221,5	101,1	23,5	267,1	121,9	28,4	291,1	132,9	30,9
São Benedito	128,6	67,0	17,4	156,3	81,5	21,1	171,1	89,2	23,1
São Gonçalo do Amarante	119,7	65,9	17,9	156,0	85,9	23,3	176,2	97,0	26,3
São João do Jaguaribe	179,3	85,7	20,6	216,2	103,3	24,8	235,6	112,6	27,1
São Luis do Curu	150,7	83,0	22,5	195,8	107,8	29,2	220,9	121,6	33,0
Senador Pompeu	239,0	106,0	23,9	285,1	126,4	28,6	309,2	137,2	31,0
Senador Sá	164,1	90,3	24,5	199,6	109,9	29,8	218,4	120,2	32,6
Sobral	140,9	73,5	19,0	165,4	86,3	22,4	178,1	92,9	24,1
Solonópole	230,8	102,4	23,1	263,2	116,7	26,4	279,6	124,0	28,0
Tabuleiro do Norte	176,8	84,5	20,3	211,9	101,3	24,4	230,3	110,1	26,5
Tamboril	163,6	78,2	18,8	186,7	89,3	21,5	198,5	94,9	22,8
Tarrafas	198,9	90,8	21,1	243,4	111,1	25,8	267,1	122,0	28,4
Tauá	173,8	79,3	18,4	208,3	95,0	22,1	226,5	103,3	24,0
Tejuçuoca	137,9	72,0	18,6	162,0	84,6	21,9	174,6	91,2	23,6
Tianguá	155,7	81,2	21,0	181,4	94,6	24,5	194,7	101,5	26,3
Trairi	153,0	84,2	22,8	201,4	110,9	30,1	228,6	125,8	34,1
Tururu	128,8	70,9	19,2	156,8	86,3	23,4	171,6	94,4	25,6
Ubajara	146,4	76,3	19,8	171,7	89,5	23,2	184,8	96,4	25,0
Umari	201,7	92,1	21,5	242,1	110,6	25,8	263,4	120,3	28,0
Umirim	125,1	68,9	18,7	152,7	84,1	22,8	167,3	92,1	25,0
Uruburetama	112,3	61,8	16,8	142,5	78,5	21,3	159,1	87,6	23,7
Uruoca	161,9	89,1	24,2	203,4	112,0	30,4	225,9	124,4	33,7

Município	TR = 10 anos			TR = 50 anos			TR = 100 anos		
	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240	t = 5	t = 30	t = 240
Varjota	168,0	87,8	22,8	198,9	104,0	27,0	215,1	112,4	29,1
Várzea Alegre	235,6	107,4	25,0	277,1	126,3	29,4	298,5	136,1	31,7
Viçoca do Ceará	171,8	89,6	23,2	199,7	104,1	27,0	214,0	111,6	28,9

Notas: t é a duração em minutos.

APÊNDICE C – SCRIPT UTILIZADO

Leitura dos dados

```
# ----- Seleção do diretório de trabalho -----
setwd("../")

# ----- Leitura dos dados -----

dados = read.csv(file = "dados.csv", header = TRUE, sep = ";", dec = ",")
names(dados) <- c("ID", "Município", "X", "Y", "Z")
summary(dados$Z)
sd(dados$Z)
```

Identificação dos outliers

```
# ----- Identificação de outliers -----
x = intensidade$Z
q1 = quantile(intensidade$Z, 0.25)
q3 = quantile(intensidade$Z, 0.75)
iq = q3 - q1
lim_inf = q1 - 1.5*iq
lim_sup = q3 + 1.5*iq

# ----- Remoção de outliers espacializados -----
intensidade.ID <- 2
intensidade.atr <- 5
intensidade.nome <- "Z"
intensidade.seleção <- c(intensidade.ID, intensidade.atr)

# ----- ID dos outliers -----
box.out <- boxplot(dados[,intensidade.atr], main = paste(intensidade.nome))$out
dados[dados[,intensidade.nome]
      %in% box.out, intensidade.seleção]
```

Teste de normalidade, histograma e box plot

```
# ----- Teste de normalidade -----
lillie.test(dados$Z)
ET = lillie.test(dados$Z)$statistic
PC = 0.886/sqrt(184)
if( ET <= PC) {cat("Normal")} else {cat("Não Normal")}

skewness(dados$Z)

# ----- Histograma -----
ggplot(dados)+
  aes(x=Z) +
  geom_histogram( fill = "grey90", col = "black", alpha = .8, bins = 14, aes(y=..density..))+
  stat_function(fun = dnorm, args = list(mean = mean(dados$Z), sd =sd(dados$Z)))+
  theme_hc(base_size = 30)+
  labs(x = "Intensidade (mm/h)", y = "Densidade")

# ----- Box plot -----
ggplot(data = dados, aes(y = Z, x= ""))+
  geom_errorbar(stat = "boxplot", width = 0.2)+
  geom_boxplot(width = 0.5, fill = "grey90", outlier.color = "black")+
  labs(y = "Intensidade(mm/h)", axis = 1)+
  theme_hc(30)
```

Identificação das coordenadas

```
dados <- dados[,c(3,4,5)]
names(dados) <- c("x", "y", "z")
sp::coordinates(dados) <- ~x+y
```

Análise de tendência

```
summary(lm(dados$z ~ dados$x))
summary(lm(dados$z ~ dados$y))

# Leste
ggplot(dados2,aes(x,z)) +
  geom_smooth(method = "lm", formula= y~x,se=F,size=1.2, aes(colour="Linear")) +
  scale_color_manual(name = "Tipo de Regressão", values = c(Linear = "red"))+
  labs(x="Leste [m]",y="Intensidade [mm/h]", title = "Scatterplot",
       subtitle="Intensidade vs x") + geom_point() +
  theme(plot.title = element_text( face = "bold",size = 20,hjust =0.5,
                                   color = "black")) +
  theme(axis.text = element_text(colour = "black", size =10, face = "bold")) +
  theme(plot.subtitle=element_text(size=12, hjust=0.5, face="italic",
                                   color="black"))

# Norte
ggplot(dados2,aes(y,z)) +
  geom_smooth(method = "lm", formula= y ~ x,se=F,size=1.2, aes(colour="Linear")) +
  scale_color_manual(name = "Tipo de Regressão", values = c(Linear = "red"))+
  labs(x="Norte [m]",y="Intensidade [mm/h]", title = "Scatterplot",
       subtitle="Intensidade vs y") + geom_point() +
  theme(plot.title = element_text(face = "bold",
                                   size = 20,hjust =0.5, color = "black")) +
  theme(axis.text = element_text(colour = "black", size =10, face = "bold")) +
  theme(plot.subtitle=element_text(size=12, hjust=0.5, face="italic",
                                   color="black"))
```

Mapa variográfico e semivariogramas

```
g = gstat(id="z", formula = z ~ 1, data = dados)

# ----- mapa variográfico -----
var_map = gstat::variogram(g, cutoff =550000, width = 25000, map = T)
plot(var_map, ylab = "N - S", xlab = "L - O", map = T, np = F)

# ----- Semivariograma experimental omnidirecional -----
var_exp = gstat::variogram(g, cutoff = 350000, width = 25000)
plot(var_exp, cex = 1, col = "Blue", pch = 20, xlab = "Distância (m)", ylab = "Semivariância")

# ----- Semivariograma direcional -----
var_dir = gstat::variogram(g, alpha = c(0, 45, 90, 135), tol.hor = 22.5, cutoff = 350000, width = 25000)
plot(var_dir, cex = 1, col = "Black", pch = 20)
```

Ajuste do semivariograma teórico

```
# ----- Semivariograma teórico -----
# Modelo esférico
fit.sph = fit.variogram(var_exp, vgm(psill = 333.4, model = "sph", range = 169738.1 , nugget = 341.6))
plot(var_exp, fit.sph, cex = 1, lwd = 2, col = "black", pch = 20,
     xlab = "Distância (m)", ylab = "Semivariância")
fit.sph

#modelo exponencial
fit.exp = fit.variogram(var_exp, vgm(psill = 391.8 , model = "Exp", range = 87016.02, nugget = 320.9))
plot(var_exp, fit.exp, cex = 1, lwd = 2, col = "black", pch = 20,
     xlab = "Distância (m)", ylab = "Semivariância")
fit.exp

#modelo gaussiano
fit.gau = fit.variogram(var_exp, vgm(psill = 276.6, model = "Gau", range = 97151, nugget = 412.3))
plot(var_exp, fit.gau, cex = 1, lwd = 2, col = "black", pch = 20,
     xlab = "Distância (m)", ylab = "Semivariância")
fit.gau
```

Validação cruzada

```
# ----- Validação Cruzada -----
qtd_rows <- dim(dados)[1]
# ----- Validação cruzada do modelo esférico -----

xvalid.sph = krige.cv(z ~ 1, locations = dados, model = fit.sph)
plot(xvalid.sph$var1.pred ~ xvalid.sph$observed,
     cex = 1.2, lwd = 2, pch = 16, ylab = "Predição", xlab = "Observado")
abline(0,1, col = "blue", lwd = 2)
lm_sph = lm(xvalid.sph$var1.pred ~ xvalid.sph$observed)
abline(lm_sph, col = "red", lwd = 2)

rmse_sph = hydroGOF::rmse(xvalid.sph$var1.pred, xvalid.sph$observed)
r2_sph = hydroGOF::br2(xvalid.sph$var1.pred, xvalid.sph$observed)
BIAS_sph = hydroGOF::pbias(xvalid.sph$var1.pred, xvalid.sph$observed)
EMPA_sph = ((sum(abs((xvalid.sph$residual/xvalid.sph$observed)))/qtd_rows)*100)
```

Krigagem

```
#----- criando o mapa de krigagem -----
contorno <- shapefile("contorno.shp")
crs(contorno) <- crs('+proj=utm +zone=24 +south +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs')
plot(contorno)
r = raster(contorno, res = 200)
rp = rasterize(contorno, r, 0)
grid <- as(rp, "SpatialPixelsDataFrame")
sp::plot(grid)
sp::proj4string(dados) = sp::proj4string(contorno)

# ----- interpolação por krigagem -----
mapa <- gstat::krige(z ~ 1, dados, grid, model = fit.exp) #KU = z~x+y
plot(mapa)

# ----- convertendo em raster -----
maparaster <- raster(mapa)
plot(maparaster)
proj4string(maparaster) <- proj4string(contorno)

writeRaster(maparaster,
            filename = 'krigagem.tif',
            format = 'GTiff',
            overwrite = T)
```

ANEXO A – EQUAÇÕES IDF DE BATISTA (2018)

Município	Equação	Município	Equação
A baiara	$i = \frac{24,799 * (Tr - 2,1)^{0,1}}{(t + 9,859)^{0,794}}$	Aurora	$i = \frac{25,673 * (Tr - 2,170)^{0,102}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Acarape	$i = \frac{18,014 * (Tr - 2,06)^{0,134}}{(t + 13,8)^{0,768}}$	Baixio	$i = \frac{15,130 * (Tr - 2,130)^{0,149}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Acaraú	$i = \frac{21,799 * (Tr - 2,11)^{0,128}}{(t + 15,95)^{0,760}}$	Banabuiú	$i = \frac{22,244 * (Tr - 2,210)^{0,093}}{(t + 9,423)^{0,808}}$
Acopiara	$i = \frac{23,880 * (Tr - 2,070)^{0,125}}{(t + 9,353)^{0,806}}$	Barbalha	$i = \frac{27,950 * (Tr - 2,160)^{0,099}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Aiuaba	$i = \frac{20,870 * (Tr - 2,080)^{0,156}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Barreira	$i = \frac{15,996 * (Tr - 2,060)^{0,173}}{(t + 13,830)^{0,769}}$
Alcantaras	$i = \frac{14,507 * (Tr - 2,100)^{0,1}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Barro	$i = \frac{23,509 * (Tr - 2,190)^{0,088}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Altaneira	$i = \frac{24,513 * (Tr - 2,160)^{0,104}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Barroquinha	$i = \frac{22,438 * (Tr - 2,100)^{0,109}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Alto Santo	$i = \frac{19,303 * (Tr - 2,01)^{0,129}}{(t + 11,080)^{0,787}}$	Baturité	$i = \frac{16,781 * (Tr - 2,060)^{0,128}}{(t + 13,770)^{0,768}}$
Amontada	$i = \frac{16,008 * (Tr - 2,040)^{0,172}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Beberibe	$i = \frac{22,894 * (Tr - 2,100)^{0,105}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Antonina do Norte	$i = \frac{17,440 * (Tr - 2,090)^{0,217}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Bela Cruz	$i = \frac{30,874 * (Tr - 1,940)^{0,091}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Apuiarés	$i = \frac{18,310 * (Tr - 2,180)^{0,081}}{(t + 13,800)^{0,768}}$	Boa viagem	$i = \frac{19,141 * (Tr - 2,100)^{0,141}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Aquiraz	$i = \frac{24,048 * (Tr - 2,110)^{0,126}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Brejo Santo	$i = \frac{26,819 * (Tr - 2,070)^{0,173}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Aracati	$i = \frac{19,700 * (Tr - 2,090)^{0,182}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Camocim	$i = \frac{22,534 * (Tr - 2,140)^{0,100}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Aracoiaba	$i = \frac{15,193 * (Tr - 2,060)^{0,090}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Campos Sales	$i = \frac{17,072 * (Tr - 2,080)^{0,132}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Ararendá	$i = \frac{19,374 * (Tr - 2,090)^{0,141}}{(t + 11,170)^{0,788}}$	Canindé	$i = \frac{14,919 * (Tr - 2,140)^{0,143}}{(t + 13,800)^{0,768}}$
Araripe	$i = \frac{18,694 * (Tr - 2,150)^{0,118}}{(t + 11,090)^{0,787}}$	Capistrano	$i = \frac{18,061 * (Tr - 2,040)^{0,109}}{(t + 13,740)^{0,768}}$
Aratuba	$i = \frac{18,370 * (Tr - 2,120)^{0,099}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Caridade	$i = \frac{16,060 * (Tr - 2,060)^{0,137}}{(t + 13,830)^{0,769}}$
Armeiroz	$i = \frac{22,014 * (Tr - 2,160)^{0,131}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Cariré	$i = \frac{17,888 * (Tr - 2,070)^{0,137}}{(t + 13,740)^{0,768}}$
Assaré	$i = \frac{20,191 * (Tr - 2,190)^{0,092}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Caririaçu	$i = \frac{25,304 * (Tr - 2,080)^{0,129}}{(t + 9,805)^{0,794}}$

Município	Equação	Município	Equação
Cariús	$i = \frac{17,650 * (Tr - 2,130)^{0,187}}{(t + 9,859)^{0,794}}$	Forquilha	$i = \frac{16,515 * (Tr - 2,050)^{0,122}}{(t + 13,800)^{0,768}}$
Carnaubal	$i = \frac{16,578 * (Tr - 2,170)^{0,114}}{(t + 13,770)^{0,768}}$	Fortaleza	$i = \frac{21,711 * (Tr - 2,070)^{0,138}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Cascavel	$i = \frac{22,360 * (Tr - 2,040)^{0,133}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Fortim	$i = \frac{23,974 * (Tr - 2,160)^{0,080}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Catarina	$i = \frac{20,001 * (Tr - 2,080)^{0,126}}{(t + 9,859)^{0,794}}$	Frecheirinhas	$i = \frac{17,915 * (Tr - 2,090)^{0,159}}{(t + 13,800)^{0,768}}$
Catunda	$i = \frac{18,662 * (Tr - 2,090)^{0,149}}{(t + 12,100)^{0,776}}$	General Sampaio	$i = \frac{12,682 * (Tr - 2,080)^{0,159}}{(t + 13,800)^{0,768}}$
Caucaia	$i = \frac{21,052 * (Tr - 2,100)^{0,106}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Graça	$i = \frac{21,183 * (Tr - 2,050)^{0,145}}{(t + 13,830)^{0,769}}$
Cedro	$i = \frac{20,242 * (Tr - 2,120)^{0,183}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Granja	$i = \frac{18,996 * (Tr - 2,030)^{0,115}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Chaval	$i = \frac{18,477 * (Tr - 2,040)^{0,131}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Granjeiro	$i = \frac{28,807 * (Tr - 2,160)^{0,089}}{(t + 9,859)^{0,794}}$
Choró	$i = \frac{16,916 * (Tr - 2,09)^{0,163}}{(t + 11,170)^{0,788}}$	Groaíras	$i = \frac{17,618 * (Tr - 2,130)^{0,114}}{(t + 13,800)^{0,768}}$
Chorozinho	$i = \frac{16,032 * (Tr - 2,130)^{0,113}}{(t + 13,870)^{0,769}}$	Guaiúba	$i = \frac{17,421 * (Tr - 2,100)^{0,109}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Coreaú	$i = \frac{17,484 * (Tr - 2,110)^{0,122}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Guaracicaba do Norte	$i = \frac{21,296 * (Tr - 2,130)^{0,097}}{(t + 13,740)^{0,768}}$
Crateús	$i = \frac{23,355 * (Tr - 2,200)^{0,110}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Guaramiranga	$i = \frac{19,886 * (Tr - 2,060)^{0,117}}{(t + 13,740)^{0,768}}$
Crato	$i = \frac{28,144 * (Tr - 2,100)^{0,100}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Hidrolândia	$i = \frac{17,109 * (Tr - 2,070)^{0,129}}{(t + 12,040)^{0,775}}$
Croatá	$i = \frac{17,752 * (Tr - 2,240)^{0,088}}{(t + 12,130)^{0,777}}$	Horizonte	$i = \frac{17,552 * (Tr - 2,020)^{0,123}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Cruz	$i = \frac{20,962 * (Tr - 2,040)^{0,143}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Ibaretama	$i = \frac{19,392 * (Tr - 2,190)^{0,085}}{(t + 12,130)^{0,777}}$
Dep. Irapuan Pinheiro	$i = \frac{27,621 * (Tr - 2,210)^{0,075}}{(t + 9,353)^{0,806}}$	Ibiapina	$i = \frac{23,316 * (Tr - 2,120)^{0,087}}{(t + 13,770)^{0,768}}$
Ererê	$i = \frac{22,249 * (Tr - 2,060)^{0,112}}{(t + 9,877)^{0,795}}$	Ibicuitinga	$i = \frac{20,289 * (Tr - 2,140)^{0,081}}{(t + 11,140)^{0,788}}$
Eusébio	$i = \frac{22,628 * (Tr - 2,060)^{0,149}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Icapuí	$i = \frac{14,961 * (Tr - 2,080)^{0,231}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Farias Brito	$i = \frac{24,351 * (Tr - 2,100)^{0,103}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Icó	$i = \frac{23,262 * (Tr - 2,070)^{0,120}}{(t + 9,805)^{0,794}}$

Município	Equação	Município	Equação
Iguatu	$i = \frac{24,330 * (Tr - 2,110)^{0,097}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Jardim	$i = \frac{21,936 * (Tr - 2,170)^{0,088}}{(t + 11,090)^{0,787}}$
Independência	$i = \frac{22,812 * (Tr - 2,16)^{0,129}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Jati	$i = \frac{22,473 * (Tr - 2,070)^{0,132}}{(t + 11,090)^{0,794}}$
Ipaporanga	$i = \frac{21,158 * (Tr - 2,110)^{0,120}}{(t + 11,140)^{0,788}}$	Jijoca de Jericoacoara	$i = \frac{18,032 * (Tr - 2,160)^{0,100}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Ipauimirim	$i = \frac{21,670 * (Tr - 2,100)^{0,154}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Juazeiro do Norte	$i = \frac{25,832 * (Tr - 2,14)^{0,104}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Ipu	$i = \frac{20,638 * (Tr - 2,150)^{0,107}}{(t + 12,020)^{0,775}}$	Jucás	$i = \frac{25,871 * (Tr - 2,190)^{0,099}}{(t + 9,832)^{0,794}}$
Ipueiras	$i = \frac{18,603 * (Tr - 2,070)^{0,131}}{(t + 12,020)^{0,775}}$	Lavras da Mangabeira	$i = \frac{21,721 * (Tr - 2,050)^{0,104}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Iracema	$i = \frac{22,002 * (Tr - 2,140)^{0,127}}{(t + 11,070)^{0,787}}$	Limoeiro do Norte	$i = \frac{20,176 * (Tr - 2,070)^{0,148}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Irauçuba	$i = \frac{12,074 * (Tr - 2,040)^{0,186}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Madalena	$i = \frac{19,576 * (Tr - 2,090)^{0,146}}{(t + 11,140)^{0,788}}$
Itaiçaba	$i = \frac{17,061 * (Tr - 2,140)^{0,144}}{(t + 13,800)^{0,768}}$	Maracanaú	$i = \frac{19,221 * (Tr - 2,140)^{0,081}}{(t + 15,95)^{0,760}}$
Itaitinga	$i = \frac{19,315 * (Tr - 2,020)^{0,125}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Maranguape	$i = \frac{19,359 * (Tr - 2,030)^{0,126}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Itapajé	$i = \frac{13,191 * (Tr - 2,090)^{0,089}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Marco	$i = \frac{17,440 * (Tr - 2,100)^{0,109}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Itapipoca	$i = \frac{13,2 * (Tr - 2,070)^{0,185}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Martinópolis	$i = \frac{17,359 * (Tr - 2,020)^{0,121}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Itapiúna	$i = \frac{16,008 * (Tr - 2,150)^{0,126}}{(t + 12,020)^{0,775}}$	Massapê	$i = \frac{17,023 * (Tr - 2,060)^{0,146}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Itarema	$i = \frac{22,703 * (Tr - 2,090)^{0,100}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Mauriti	$i = \frac{22,759 * (Tr - 2,080)^{0,130}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Itatira	$i = \frac{13,187 * (Tr - 2,070)^{0,155}}{(t + 12,040)^{0,775}}$	Meruoca	$i = \frac{21,385 * (Tr - 2,100)^{0,111}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Jaguaretama	$i = \frac{27,360 * (Tr - 2,080)^{0,135}}{(t + 9,397)^{0,807}}$	Milagres	$i = \frac{25,776 * (Tr - 2,150)^{0,111}}{(t + 11,090)^{0,787}}$
Jaguaribara	$i = \frac{22,389 * (Tr - 2,160)^{0,097}}{(t + 9,859)^{0,794}}$	Milhã	$i = \frac{26,750 * (Tr - 2,150)^{0,094}}{(t + 9,353)^{0,806}}$
Jaguaribe	$i = \frac{25,838 * (Tr - 2,200)^{0,115}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Mirafima	$i = \frac{13,550 * (Tr - 2,050)^{0,192}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Jaguaruana	$i = \frac{18,491 * (Tr - 2,060)^{0,147}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Missão Velha	$i = \frac{26,509 * (Tr - 2,170)^{0,085}}{(t + 9,805)^{0,794}}$

Município	Equação	Município	Equação
Mombaça	$i = \frac{21,990 * (Tr - 2,090)^{0,185}}{(t + 9,353)^{0,806}}$	Paraipaba	$i = \frac{19,357 * (Tr - 2,070)^{0,195}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Monsenhor Tabosa	$i = \frac{20,415 * (Tr - 2,200)^{0,110}}{(t + 11,070)^{0,787}}$	Parambu	$i = \frac{21,804 * (Tr - 2,100)^{0,141}}{(t + 9,832)^{0,794}}$
Morada Nova	$i = \frac{18,891 * (Tr - 2,070)^{0,146}}{(t + 11,070)^{0,787}}$	Paramoti	$i = \frac{15,111 * (Tr - 2,060)^{0,180}}{(t + 13,800)^{0,768}}$
Moraújo	$i = \frac{18,110 * (Tr - 2,040)^{0,178}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Pedra Branca	$i = \frac{21,818 * (Tr - 2,080)^{0,130}}{(t + 9,353)^{0,806}}$
Morinhos	$i = \frac{17,478 * (Tr - 2,110)^{0,123}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Penaforte	$i = \frac{19,482 * (Tr - 2,070)^{0,161}}{(t + 11,110)^{0,787}}$
Mucambo	$i = \frac{18,996 * (Tr - 2,060)^{0,135}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Pentecostes	$i = \frac{14,898 * (Tr - 2,080)^{0,143}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Mulungu	$i = \frac{28,212 * (Tr - 1,99)^{0,063}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Pereiro	$i = \frac{25,339 * (Tr - 2,120)^{0,127}}{(t + 9,832)^{0,794}}$
Nova Olinda	$i = \frac{25,110 * (Tr - 2,090)^{0,123}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Pindoretama	$i = \frac{24,138 * (Tr - 2,150)^{0,087}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Nova Russas	$i = \frac{20,558 * (Tr - 2,150)^{0,101}}{(t + 11,070)^{0,787}}$	Piquet Carneiro	$i = \frac{25,007 * (Tr - 2,160)^{0,099}}{(t + 9,353)^{0,806}}$
Novo Oriente	$i = \frac{23,592 * (Tr - 2,160)^{0,107}}{(t + 9,805)^{0,794}}$	Pires Ferreira	$i = \frac{20,853 * (Tr - 2,13)^{0,112}}{(t + 13,830)^{0,769}}$
Ocara	$i = \frac{18,264 * (Tr - 2,180)^{0,104}}{(t + 13,830)^{0,769}}$	Poranga	$i = \frac{18,779 * (Tr - 2,150)^{0,154}}{(t + 11,090)^{0,787}}$
Orós	$i = \frac{23,588 * (Tr - 2,210)^{0,083}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Porteiras	$i = \frac{23,347 * (Tr - 2,070)^{0,130}}{(t + 11,090)^{0,787}}$
Pacajus	$i = \frac{19,479 * (Tr - 2,110)^{0,133}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Potengi	$i = \frac{21,197 * (Tr - 2,140)^{0,109}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Pacatuba	$i = \frac{17,600 * (Tr - 2,010)^{0,115}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Potiretama	$i = \frac{19,892 * (Tr - 2,090)^{0,143}}{(t + 11,140)^{0,788}}$
Pacoti	$i = \frac{14,218 * (Tr - 2,100)^{0,181}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Quiterianópolis	$i = \frac{25,315 * (Tr - 2,230)^{0,092}}{(t + 9,877)^{0,795}}$
Pacujá	$i = \frac{16,856 * (Tr - 2,070)^{0,144}}{(t + 13,800)^{0,768}}$	Quixadá	$i = \frac{19,054 * (Tr - 2,150)^{0,112}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Palhano	$i = \frac{16,424 * (Tr - 2,070)^{0,142}}{(t + 13,770)^{0,768}}$	Quixelô	$i = \frac{22,883 * (Tr - 2,070)^{0,120}}{(t + 9,877)^{0,795}}$
Palmácia	$i = \frac{19,022 * (Tr - 2,120)^{0,102}}{(t + 13,770)^{0,768}}$	Quixeramobim	$i = \frac{19,035 * (Tr - 2,100)^{0,105}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Paracuru	$i = \frac{22,136 * (Tr - 2,030)^{0,119}}{(t + 15,95)^{0,760}}$	Quixerê	$i = \frac{16,090 * (Tr - 2,070)^{0,140}}{(t + 12,070)^{0,776}}$

Município	Equação	Município	Equação
Redenção	$i = \frac{21,226 * (Tr - 2,180)^{0,092}}{(t + 13,770)^{0,768}}$	Tabuleiro do Norte	$i = \frac{19,242 * (Tr - 2,070)^{0,124}}{(t + 11,070)^{0,787}}$
Reriutaba	$i = \frac{19,366 * (Tr - 2,130)^{0,120}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Tamboril	$i = \frac{19,335 * (Tr - 2,180)^{0,091}}{(t + 11,090)^{0,787}}$
Russas	$i = \frac{18,188 * (Tr - 2,160)^{0,095}}{(t + 12,020)^{0,775}}$	Tarrafas	$i = \frac{20,113 * (Tr - 2,030)^{0,138}}{(t + 9,877)^{0,795}}$
Saboeiro	$i = \frac{20,504 * (Tr - 2,120)^{0,192}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Tauá	$i = \frac{18,074 * (Tr - 2,080)^{0,124}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Salitre	$i = \frac{19,206 * (Tr - 2,090)^{0,145}}{(t + 11,170)^{0,788}}$	Tejuçuoca	$i = \frac{16,643 * (Tr - 2,150)^{0,111}}{(t + 13,830)^{0,769}}$
Santa Quitéria	$i = \frac{20,195 * (Tr - 2,150)^{0,122}}{(t + 12,020)^{0,775}}$	Tianguá	$i = \frac{18,954 * (Tr - 2,130)^{0,105}}{(t + 13,74)^{0,768}}$
Santana do Acaraú	$i = \frac{16,993 * (Tr - 2,040)^{0,155}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Traini	$i = \frac{16,116 * (Tr - 2,080)^{0,188}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Santana do Cariri	$i = \frac{22,839 * (Tr - 2,080)^{0,128}}{(t + 9,832)^{0,794}}$	Tururu	$i = \frac{15,531 * (Tr - 2,040)^{0,134}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
São Benedito	$i = \frac{14,566 * (Tr - 2,100)^{0,134}}{(t + 13,74)^{0,768}}$	Ubajara	$i = \frac{17,661 * (Tr - 2,030)^{0,109}}{(t + 13,740)^{0,768}}$
São Gonçalo do Amarante	$i = \frac{12,830 * (Tr - 2,090)^{0,181}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Umari	$i = \frac{20,984 * (Tr - 2,080)^{0,125}}{(t + 9,859)^{0,794}}$
São João do Jaguaribe	$i = \frac{19,321 * (Tr - 2,080)^{0,128}}{(t + 11,070)^{0,787}}$	Umirim	$i = \frac{15,010 * (Tr - 2,040)^{0,136}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
São Luis do Curu	$i = \frac{16,241 * (Tr - 2,040)^{0,179}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Uruburetama	$i = \frac{12,592 * (Tr - 2,070)^{0,163}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Senador Pompeu	$i = \frac{25,206 * (Tr - 2,150)^{0,121}}{(t + 9,353)^{0,806}}$	Uruoca	$i = \frac{18,475 * (Tr - 2,040)^{0,156}}{(t + 15,950)^{0,760}}$
Senador Sá	$i = \frac{19,767 * (Tr - 2,110)^{0,134}}{(t + 15,950)^{0,760}}$	Varjota	$i = \frac{20,066 * (Tr - 2,130)^{0,116}}{(t + 13,870)^{0,769}}$
Sobral	$i = \frac{16,944 * (Tr - 2,130)^{0,110}}{(t + 13,740)^{0,768}}$	Várzea Alegre	$i = \frac{25,303 * (Tr - 2,090)^{0,111}}{(t + 9,805)^{0,794}}$
Solonópole	$i = \frac{26,304 * (Tr - 2,150)^{0,09}}{(t + 9,353)^{0,806}}$	Viçosa do Ceará	$i = \frac{21,031 * (Tr - 2,110)^{0,103}}{(t + 13,740)^{0,768}}$

Fonte: Batista (2018).

ANEXO B – QUANTIS PARA TESTE DE LILLIEFORS

<i>p</i> =	0.80	0.85	0.90	0.95	0.99
<i>n</i> = 4	.300	.319	.352	.381	.417
5	.285	.299	.315	.337	.405
6	.265	.277	.294	.319	.364
7	.247	.258	.276	.300	.348
8	.233	.244	.261	.285	.331
9	.223	.233	.249	.271	.311
10	.215	.224	.239	.258	.294
11	.206	.217	.230	.249	.284
12	.199	.212	.223	.242	.275
13	.190	.202	.214	.234	.268
14	.183	.194	.207	.227	.261
15	.177	.187	.201	.220	.257
16	.173	.182	.195	.213	.250
17	.169	.177	.189	.206	.245
18	.166	.173	.184	.200	.239
19	.163	.169	.179	.195	.235
20	.160	.166	.174	.190	.231
25	.142	.147	.158	.173	.200
30	.131	.136	.144	.161	.187
> 30	.736	.768	.805	.886	1.031
	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}

Fonte: tabela adaptada de Lilliefors (1967)

**ANEXO C – COEFICIENTES DE DESAGREGAÇÃO DAS CHUVAS INTENSAS
ASSOCIADAS ÀS ISOZONAS DE TORRICO (1974)**

Isozonas	1 hora/ 24 horas										6min/ 24 h	
	TR (anos)										TR (anos)	
	5	10	15	20	25	30	50	100	1000	10000	5 - 50	100
A	36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35,0	34,7	33,6	32,5	7,0	6,3
B	38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,6	35,4	34,3	8,4	7,5
C	40,1	39,7	39,5	39,3	39,2	39,1	38,8	38,4	37,2	36,0	9,8	8,8
D	42,0	41,6	41,4	41,2	41,1	41,0	40,7	40,3	39,0	37,8	11,2	10,0
E	44,0	43,6	43,3	43,2	43,0	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F	46,0	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,2	47,0	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,1	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,9	48,8	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Batista (2018).