

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Gustavo Duque Thomaz Mourão Elias

**ESTIMAÇÃO DE RELAÇÕES PARA TRANSFORMAÇÃO DA CHUVA PONTUAL
EM MÉDIA SOBRE UMA ÁREA PARA O MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**

Belo Horizonte
2026

Gustavo Duque Thomaz Mourão Elias

**ESTIMAÇÃO DE RELAÇÕES PARA TRANSFORMAÇÃO DA CHUVA PONTUAL
EM MÉDIA SOBRE UMA ÁREA PARA O MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de processos hidrológicos

Orientador: Francisco Eustáquio Oliveira e Silva

Belo Horizonte
2026

E42e

Elias, Gustavo Duque Thomaz Mourão.

Estimação das relações para transformação da chuva pontual em média sobre uma área para o município de Belo Horizonte [recurso eletrônico] / Gustavo Duque Thomaz Mourão. - 2026. 1 recurso online (111 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Francisco Eustáquio Oliveira e Silva.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui Bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Sanitária – Teses. 2. - Tempestades -Teses.
3. Precipitação (Meteorologia) – Variabilidade – Teses. 4. Hidrologia – Teses. I. Silva, Francisco Eustáquio Oliveira e.
- II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
- III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Estimação de relações para transformação da chuva pontual em média sobre uma área para o município de Belo Horizonte"

GUSTAVO DUQUE THOMAZ MOURÃO ELIAS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. FRANCISCO EUSTÁQUIO OLIVEIRA E SILVA

Profa PRISCILLA MACEDO MOURA

Prof. VANDOIR BOURSCHIEDT

Versão Final aprovada por:

Coordenação do PPG-SMARH

Francisco Eustáquio Oliveira e Silva
Orientador

Belo Horizonte, 25 de fevereiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Eustaquio Oliveira e Silva, Professor do Magistério Superior**, em 02/03/2026, às 14:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Professora do Magistério Superior**, em 23/03/2026, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vandoir Bouyscheidt, Usuário Externo**, em 24/03/2026, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 25/03/2026, às 18:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4956828** e o código CRC **26FC5246**.

Referência: Processo nº 23072.207944/2026-13

SEI nº 4956828

Ao meu avô Renato, que sonhou com a formação acadêmica, mas nunca conseguiu alcançar. Deu tudo de si em vida para ver suas duas filhas crescerem e formarem, e agora é a vez de seus netos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Renata e Cláudio, por serem as minhas âncoras da minha vida e terem me dado apoio incondicional em tudo que fiz. Nada disso seria possível sem vocês.

Aos meus avós, Arivalnita e José Pedro, por terem me acolhido no primeiro ano mudando para Belo Horizonte e também sendo uma grande força de apoio durante meu desenvolvimento.

Aos meus irmãos, Pedro e Luíza, por serem as pessoas com quem cresci junto e serem meus escudeiros nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos, Daniel e Arthur, com os quais pude crescer desde o maternal até a faculdade e basicamente virarem minha família estendida.

Ao meu orientador, Francisco, por fazer parte deste processo profissionalizante e ajudar a me construir como pesquisador, pensador livre e pessoa; e aos meus pares de estudo Gustavo Côrrea, Vinícius, Thales, Ana Clara, Luísa e Camila por também fazerem parte desta caminhada.

A Priscilla e a todo mundo da SUDECAP por terem disponibilizado os dados e ainda ajudarem na construção do estudo.

A todos os professores do EHR por terem feito parte desta construção e aos meus colegas por fazerem parte desta experiência coletiva.

À CAPES, CNPq e especialmente à FAPEMIG que, além de ter dado apoio financeiro ao meu mestrado, também concedeu apoio a minha Iniciação Científica na graduação e me guiou para esta direção.

Fica difícil de colocar em uma página todo mundo a quem me sinto grato. Ciência é um esforço colaborativo afinal, mas não são apenas os revisores, editores, agências de fomento, professores e colegas de departamento que fazem parte dela, e sim todo mundo a seu redor que me dá apoio para a seguir, então também agradeço a todo mundo que fez parte da minha vida, mas não pude mencionar aqui.

“É tentador viver neste momento, enquanto todas as possibilidades ainda existem. Mas a não ser que elas sejam colapsadas por um observador, elas nunca serão nada além de possibilidades”
Kelsey Beachum

RESUMO

A chuva é uma variável primordial em uma série de estudos concernentes à Engenharia de Recursos Hídricos. As dimensões e condições de funcionamento de estruturas hidráulicas são calculadas a partir das características estipuladas para a chuva de projeto. Dentro de tais característica, deve-se considerar a distribuição da intensidade sobre a área da bacia. Para tais fins, destaca-se a transformação de medidas pontuais em intensidade média sobre uma área para a modelagem da sua variação espacial. Esta transformação usualmente é realizada através de Fatores de Redução de Área (ARF). No caso de Belo Horizonte, um estudo desenvolvido no âmbito do SMARH (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais), há cerca de 25 anos, propôs uma relação ARF para a região metropolitana.

Dado o contexto dos eventos extremos que afligiram a região nos últimos anos e a necessidade de caracterizá-los para fins de planejamento urbano, o objetivo do presente estudo é revisitar o anterior não apenas sob a perspectiva de o atualizar, mas sobretudo de avaliar técnicas não exploradas. Através das informações de 36 postos pluviográficos da Prefeitura de Belo Horizonte, foram utilizadas duas técnicas empíricas para o cálculo dos fatores: área-fixa (ou geograficamente-centrados), a qual avalia a razão entre os máximos pontuais e por área de mesma frequência relativa, cuja análise estatística foi feita através do emprego de distribuições metaestatísticas; e centro de evento de tempestade, que se baseia na análise individual do decaimento da intensidade de tormentas significativas, na qual foram avaliadas diferentes formas para definição espacial dos eventos de chuva.

Os resultados obtidos por meio da área-fixa demonstraram concordância com alguns dos fatores do estudo anterior, mas para as durações sub-horárias, os ARF calculados foram significativamente inferiores aos obtidos anteriormente.

Já a aplicação da técnica por centro de evento, em que foram analisadas 16 tempestades com tempo de retorno superior a 10 anos, os fatores obtidos indicaram que ambas as relações anteriores poderiam ser demasiadamente conservadoras. As diferentes geometrias empregadas na análise espacial, não revelaram diferenças substanciais.

Os resultados obtidos ratificam as conclusões de estudos recentes e demonstram os benefícios e dificuldades de suas aplicações: ainda que a técnica de área-fixa seja computacionalmente mais intensiva e possa resultar em relações distorcidas e, por vezes, conservadoras de campos de chuva reais, a técnica do centro de evento requer uma maior rede de monitoramento para o alcance de resultados críveis.

Palavras-chave: Fator de Redução de Área. Área-fixa. Centro de evento de tempestade. Distribuições Metaestatísticas. Chuva de Projeto.

ABSTRACT

Rainfall is a key variable in a number of studies concerning Water Resources Engineering. The dimensions and operating conditions of hydraulic structures are calculated based on the characteristics stipulated for the design storm. Within such characteristics, the distribution of the intensity over the basin area must be considered. For this purpose, the transformation of point measurements into average intensity over an area stands out for modeling its spatial variation. This transformation is usually done through the use of Area Reduction Factors (ARF). In the case of Belo Horizonte, a study developed at SMARH (Graduate program in Sanitation, Environment and Water Resources from the Federal University of Minas Gerais) about 25 years ago, established ARFs values for the metropolitan region.

Given the context of the extreme weather events that afflicted the region in recent years and the need to characterize such events for the purposes of urban planning, the objective of this study is to revisit the previous one with the intent to, not only to update its results, but also evaluate other methods that weren't deployed at the time. With the data of 36 recording rain gauges from the Belo Horizonte Municipal Government, two empirical techniques were used for the factor's computation: fixed-area method (or geographically centered), which evaluates the ratio of point estimates and areal average estimates with same exceedance probability, with its frequency analysis conducted with the use of Metastatistical Extreme Value Distributions; and storm-centered approach, based on the individual analysis of the intensity decay of significant storms, in which different geometric shapes were used for the definition of the storm events.

The results obtained by the fixed-area approach showed some agreement with the factors from the previous research, but for the sub-hourly durations, the computed ARFs were significantly smaller than those previously established.

For the storm centered approach, 16 storms with return period over 10 years were analyzed, with its factors indicating that the previous mentioned values could be extremely conservative. Between the different shapes used for spatial analysis, no significant differences were observed for the areas analyzed.

The collected results ratify the previous conclusions from recent studies and demonstrate the pros and cons for application of both of these techniques: despite the calculation for the fixed-area method being more computationally intensive and resulting in distorted representations of real rainfall fields which could produce overtly conservative ARFs, the storm centered approach requires a significantly larger network for its use and to produce credible results.

Keywords: Areal Reduction Factor. Fixed-Area. Storm-Centered. Metastatistical Distributions. Design Storms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de campos de chuva simulados	23
Figura 2: Exemplificação da extração dos máximos pontuais e por área.....	26
Figura 3: Relações de ARF obtidas para o Nordeste dos EUA na Parte 4 do TP-29	27
Figura 4: Valores de ARF calculados por Bell diminuindo com tempo de retorno.....	29
Figura 5: Exemplo de isoietas de tempestade.....	36
Figura 6: Relação entre porcentagem da precipitação estimada de 6 h de PMP e área dentro (sólido) e fora (tracejado) da área da tormenta de projeto.	38
Figura 7: Exemplo de análise espacial usando uma forma regular (quadrado) sobreposta ao.....	39
Figura 8: Elipses ótimas encontradas para uma tempestade.....	40
Figura 9: Aplicação de “centro-fixo” (a) e “centro-móvel” (b).....	41
Figura 10: ARF de sistemas frontais (b) contra ARF de sistemas convectivos (c)	42
Figura 11: Curva de ARF da expressão do DNIT (preto) e valores do TP-29 (vermelho)	45
Figura 12: Rede utilizada na dissertação de Santos (2002).....	47
Figura 13: Mapa da área de estudo e estações da PBH.....	51
Figura 14: Gráfico entre valor da potência da interpolação e RMSE calculado.....	53
Figura 15: Correlograma espacial das leituras não-nulas (pontos pretos) e número médio de estações circunscritas por círculos de raios equivalentes às distâncias entre estações (pontos vermelhos)	54
Figura 16: Áreas de referência para cálculo da precipitação média por área.....	56
Figura 17: Série de autocorrelação com o valor de ruído (linha vermelha) e intervalo mínimo de separação (linha tracejada azul).....	58
Figura 18: Mapa isoietal das precipitações médias anuais de Pinheiro, Naghettini (1998) para Belo Horizonte	61
Figura 19: <i>Raster</i> interpolado das precipitações médias anuais para cada ponto do grid da rede analisada.....	62
Figura 20: Mapa da rede incluindo estações do CEMADEN	66
Figura 21: Exemplo de aplicação das geometrias.....	68
Figura 22: ARFs de área-fixa calculados.....	72
Figura 23: ARFs de centro de evento para 30 min, 1 h e 2 h.....	77

Figura 24: ARFs dos eventos singulares de 3 h e 8 h.....	77
Figura 25: Área de referência do centro-móvel (9 km ²) sendo atraída por efeito de borda da interpolação.....	79
Figura 26: Deslocamento das áreas de 49 km ² (verde) e 225 km ² (vermelho) do centro original (área amarela de 9 km ²)	80
Figura 27: Comparação dos fatores de área-fixa e outros estudos para 10 min, 30 min e 1 h.	82
Figura 28: Comparação dos fatores de área-fixa e outros estudos para 2 h, 3 h e 4 h	82
Figura 29: Comparação dos fatores de área-fixa e outros estudos para 8 h, 14 h e 24 h.	83
Figura 30: Gráfico entre os comprimentos de correlação espacial obtidos e a duração	84
Figura 31: Comparação entre os fatores de área-fixa e centro de evento de tempestade para 30 min, 1 h e 2 h.....	85
Figura 32: Comparação entre os fatores de área-fixa e centro de evento de tempestade para os dois eventos singulares de 28/01/2020 e 07/02/2021	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Informações da rede.....	52
Quadro 2: Estações do CEMADEN utilizadas	65
Quadro 3: Eventos identificados e usados para análise.....	75
Quadro 4: Dados dos eventos analisados.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantis adimensionais regionais para tempo de retorno de 10 anos.....	60
Tabela 2: Área das elipses encontradas para o evento de 18/11/2020.....	68
Tabela 3: Média de eventos ordinários identificados para cada duração.....	69
Tabela 4: Média de eventos ordinários identificados para cada ano hidrológico.....	69
Tabela 5: Intervalo mínimo de separação médio calculado para cada duração.....	69
Tabela 6: Intervalo mínimo de separação médio calculado para cada ano hidrológico	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARF – Fator de Redução de Área

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

DAD – Altura-Área-Duração

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestres

LOOCV – Validação cruzada por *leave-one-out*

HMR - Relatório Hidrometeorológico da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos da América

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

IDFA – Intensidade-Duração-Frequência-Área

IDW – Ponderação pelo Inverso da Distância

MEVD – Distribuição Metaestatística de Valores Extremos

NOAA - Administração Oceânica e Atmosférica Nacional

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte

PMP – Precipitação Máxima Provável

POT – Picos sobre limiar

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

RMSE – Erro quadrático médio

TP-29 – Diretriz Técnica N° 29 do Escritório de Clima dos Estados Unidos da América

USWB – Escritório de Clima dos Estados Unidos

ZCAS – Zonas de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1	Variação espacial da intensidade da precipitação e o fator de redução de área	22
3.2	Métodos de área-fixa	26
3.2.1	Histórico e incorporação da estimativa da probabilidade de excedência de alturas precipitadas	26
3.2.2	Distribuições Metaestatísticas de Valores Extremos (MEVDs) e aplicações na hidrologia	30
3.3	Método do centro de evento de tempestade	35
3.3.1	Histórico de estudos e dificuldade de aplicação	35
3.3.2	Relação dos fatores com natureza da tormenta e área-fixa	41
3.4	Relações e estudos de ARF nacionais	43
3.4.1	Fatores empregados na engenharia no Brasil	43
3.4.2	Estudos nacionais sobre o ARF	46
4	MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1	Área de estudo e espacialização da chuva	50
4.2	Cálculo por área-fixa	55
4.2.1	Cálculo da precipitação média por área e precipitação representativa	55
4.2.2	Inferência das MEVDs	57
4.3	Cálculo por centro de evento de tempestade	59
4.3.1	Identificação de eventos e dados adicionais	59
4.3.2	Geometrias de referência para análise espacial	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	Fatores de área-fixa	69
5.2	Fatores de centro de evento	74
5.2.1	Eventos identificados	74
5.2.2	Comparação entre fatores obtidos para diferentes geometrias de referência	76
5.3	Comparação entre resultados	81
5.3.1	Comparações da área-fixa com estudo anterior e fatores usados pelo DNIT	81
5.3.2	Inter comparação entre métodos analisados	85

6	CONCLUSÕES	90
7	RECOMENDAÇÕES.....	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A – Fatores de área-fixa.....	104
	APÊNDICE B – Fatores do centro de evento de tempestade	107
	ANEXO A – Relações de ARFs estabelecidas pelo DNIT (2005) e Santos (2002) .	109

1 INTRODUÇÃO

Nas aplicações práticas de engenharia, é comum que o cômputo das dimensões e a avaliação do funcionamento de estruturas de drenagem e controle de inundação exija a estimativa de uma chuva de projeto. Sua concepção requer, além da avaliação de características como intensidades e durações, a análise da distribuição espacial do campo de chuva e sua extensão sobre a bacia analisada.

Para o estudo dos campos de chuvas observados no local de interesse, é necessária uma rede de monitoramento com boa cobertura espacial e série histórica suficientemente extensa para construção de uma amostra de eventos extremos. Contudo, redes com tais características são incomuns, especialmente no contexto brasileiro. Por consequência, uma alternativa empregada para estimação da variação espacial da chuva de projeto para bacias não monitoradas é transformar uma estimativa pontual em uma precipitação uniforme sobre a área de interesse por meio da aplicação de um coeficiente de abatimento. Tal coeficiente é denominado Fator de Redução de Área (sigla ARF, do inglês *Areal Reduction Factor*).

Contudo, por causa dos requisitos de rede hidrométrica necessária para o desenvolvimento de fatores locais, é comum a transposição de ARFs desenvolvidos em outros estudos, com destaque às curvas descritas no *Technical Paper N° 29* (TP-29, em português, Diretriz Técnica N° 29), do Escritório de Clima dos Estados Unidos da América (United States Weather Bureau, USWB, 1957).

A transposição de ARFs, contudo, incorre em grandes riscos de projeto: fatores que sejam demasiadamente conservadores (ARFs com valores maiores que os reais valores para um dado local) levariam ao superdimensionamento de obras hidráulicas e maiores gastos na execução do projeto; fatores menores que os valores reais de um local levariam a maiores chances de falhas das estruturas hidráulicas concebidas as utilizando. Logo, a construção de ARFs regionais seria uma tarefa importante para aplicação da engenharia hidráulica. Por causa deste fato, adjunto à expansão de redes de monitoramento climatológicas ao redor do globo e advento de produtos de radar, houve o ressurgimento de estudos do tema na última década (Bennett *et al.*, 2016; Breinl; Müller-Thomy; Blöschl, 2020; Kao *et al.*, 2020; Le *et al.*, 2018; Rodríguez *et al.*, 2013; Sidek *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2023).

Em termos gerais, o ARF trata-se de uma razão entre a precipitação média de uma certa duração sobre uma área de determinada dimensão e uma estimativa pontual de referência, sendo que vários métodos surgiram durante o último século. Svensson e Jones (2010) realizaram uma revisão da literatura acerca do tema e, além de analisar a relação do fator com outras variáveis (como a duração, área, tempo de retorno da tormenta e aspectos da bacia), classificaram os métodos existentes em duas abordagens metodológicas distintas: analíticas e empíricas. Abordagens analíticas expressam o seu cálculo por meio de relações paramétricas, construídas através do estabelecimento de preceitos sobre o comportamento espacial e temporal da chuva. Nessa abordagem, destacam-se os métodos baseados em conceitos de estrutura de correlação espacial (Rodríguez- Iturbe; Mejía, 1974) ou invariância temporal (Mélèse; Blanchet; Creutin, 2019). Métodos empíricos, em contrapartida, propõem uma série de diretrizes práticas para as estimativas de chuva sobre área, sem fazer pressupostos sobre as estruturas temporais e espaciais do campo de chuva (Kim *et al.*, 2019, p. 416), contudo, eles tendem a ser computacionalmente intensivos (Mineo *et al.*, 2018, p. 412). Dentro desta classificação, destacam-se dois métodos que se tornaram os mais avaliados em publicações científicas e recomendados por manuais técnicos: os de área-fixa e de centro de evento de tempestade.

Métodos de área-fixa se contentam em descrever as relações de estimativas de chuva média por área sobre um local fixo e as pontuais de mesma duração e frequência, a partir de uma série histórica comum (Pietersen *et al.*, 2023, p. 3). Por causa da sua simplicidade e aplicação direta, eles se tornaram a forma mais comum de cálculo do fator, sendo uma variação da área-fixa o método de cálculo empregado no TP-29. O método original usado no manual levava em conta apenas a área e a duração da tempestade como variáveis de entrada, mas Bell (1976), em uma reanálise dos fatores utilizados no Reino Unido, adaptou o cálculo para incluir o tempo de retorno, relacionando estimativas de média por área e pontuais de mesma frequência e observando que ele tende a decrescer com tempos de retorno mais elevados.

Apesar do estudo por Bell (1976) ter feito a análise estatística por meio de uma abordagem de picos sobre limiar, estudos posteriores optaram pelo uso de uma análise de máximos por bloco, usualmente a partir da inferência de uma distribuição Generalizada de Valores Extremos (Generalized Extreme Values Distribution - GEV)

(Overeem *et al.*, 2010; Panthou *et al.*, 2014; Pavlovic *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2019; Breinl *et al.*, 2020). Contudo, o emprego dessa distribuição requer a utilização de séries históricas longas, visto a ocorrência de problemas relacionados à inferência do parâmetro de forma, como a distorção da real natureza de seu valor (Papalexiou; Koutsoyiannis, 2013, p. 200) ou a indefinição de momentos quando o seu ν é inferior a -1 (Hosking *et al.* 1985, p. 252-253), fato mais recorrente em menores amostras. Para redes de monitoramento recém-instaladas (de 5 a 20 anos), o uso dessa variação do método seria inviável, ou não recomendável, para a caracterização da frequência.

Apesar disso, a necessidade de avaliação estatística de séries temporais curtas se tornou de grande interesse para a hidrologia como um todo. Uma alternativa recente à hidrologia foi a introdução de penúltimas aproximações da Teoria de Valores Extremos, as quais ficaram conhecidas como Distribuições Metastatísticas de Valores Extremos (MEVD, *Metastatistical Extreme Value Distributions*). Seu uso na hidrologia ganhou força após publicações de trabalhos como os de Marani e Ignacollo (2015), originalmente usada para análise de chuva diária, mas que recentemente foi adaptada para uso em ARFs por Lutz *et al.* (2024).

O centro de evento, em contrapartida, calcula o fator para cada tempestade, dividindo a precipitação por área observada pela maior observação pontual acumulada daquele evento (Wright; Smith; Baeck, 2014, p. 769). Seu uso era relativamente mais restrito que as alternativas de área-fixa por uma série de fatores, dentre os quais se destacam: (i) fato dele não poder relacionar uma frequência aos fatores calculados, sendo mais ligado a estudo de Precipitação Máxima Provável (PMP) (Svensson; Jones, 2010, p. 7); e (ii) a dificuldades de aplicação devido a multiplicidade do centro da tempestade (Asquith; Famiglietti, 2000, p. 56). Ainda assim, ele apresenta um grande ganho em relação à área-fixa: como hipótese implícita do cálculo por área-fixa, admite-se que os extremos de precipitação por área e a precipitação pontual representativas podem não ser oriundas do mesmo evento (Le *et al.*, 2018, p. 1). Neste sentido, pode-se considerar os fatores desenvolvidos via centro de evento como interpretações “reais” dos campos de chuva observados.

No que tange ao cálculo do fator pelo centro de evento, a precipitação média por área era calculada por meio da interpolação das isoietas da tempestade (Sivapalan; Blosch,

1998, p. 156), entretanto, com o advento de produtos de radar e de grid, foi adotado o uso de formas geométricas regulares (como quadrados ou círculos) concêntricos ao redor do núcleo da tempestade para a análise do decaimento do campo de chuva (Martins; Girnius; Pinto, 2014; Thorndahl; Nielsen; Rasmussen, 2019). Contudo, o uso destas geometrias de referência para análise espacial pode incorrer em alguns problemas: elas seriam incapazes de representar a forma mais alongada de formações frontais (Kang *et al.*, 2019, p. 3) ou a já mencionada multiplicidade de centros, por exemplo.

Diante desse cenário e a necessidade de produção de ARFs locais para projetos hidráulicos, o presente estudo foi desenvolvido com vista a determinação de relações de ARF para o município Belo Horizonte, utilizando os dois métodos empíricos destacados, avaliando o emprego de distribuições metaestatísticas para análise de frequência na área-fixa e diferentes geometrias de referência no centro de eventos de tempestade. Os resultados serão avaliados à luz do estudo desenvolvido por Santos (2002), que utilizou outra rede de monitoramento e metodologia (estrutura de correlação espacial), e os delimitados pela expressão recomendada do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do estudo é a estimação e análise de fatores para transformação da chuva pontual em média sobre área (ARFs) para o município de Belo Horizonte.

2.2 Objetivos Específicos

- Atribuir frequência aos ARFs calculados pelo método de área-fixa por meio do ajuste de distribuições metaestatísticas;
- Analisar a influência que diferentes geometrias de referência causam na estimativa do ARF pelo método de centro de evento de tempestade;
- Avaliar as diferenças entre os ARF gerados pelos métodos de cálculo de área-fixa e centro de evento de tempestade.

3 REVISÃO DA LITERATURA

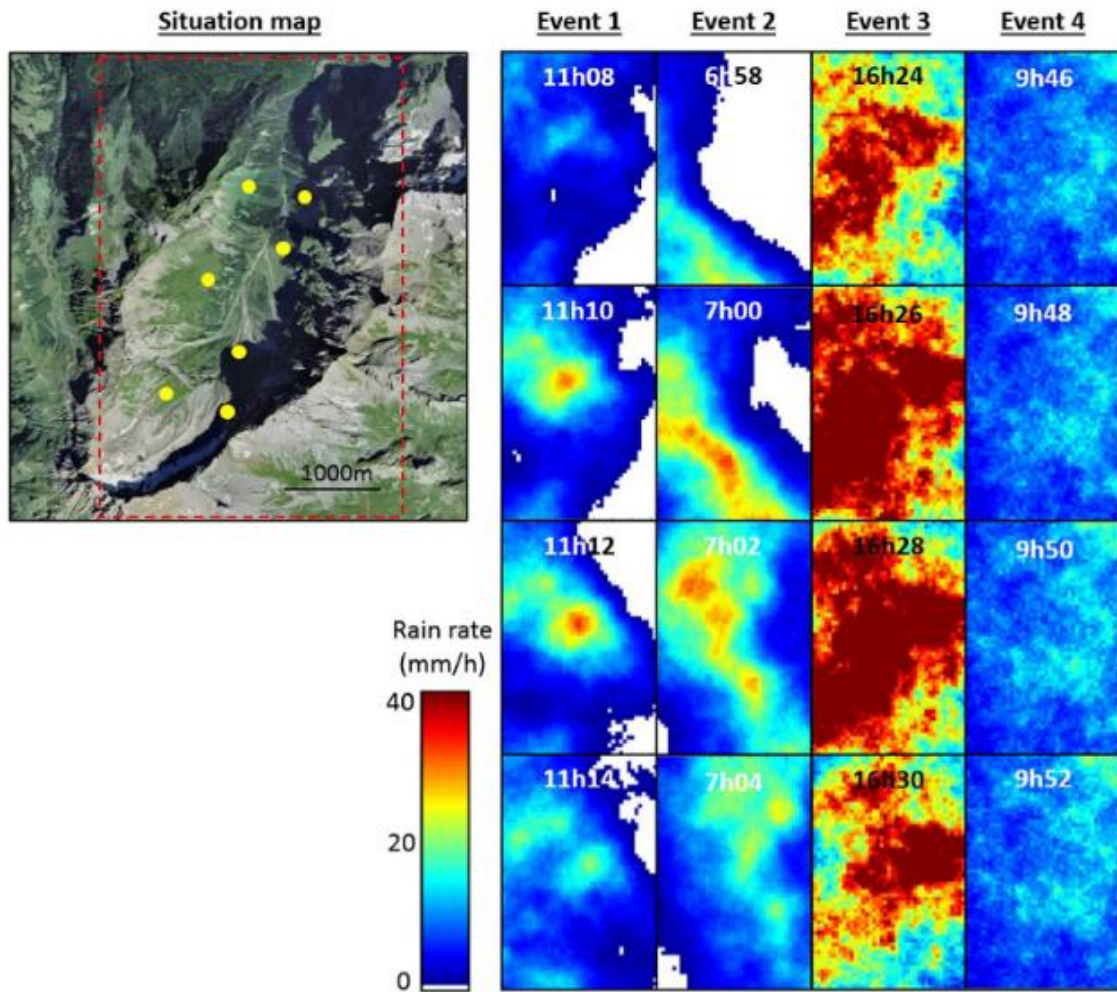
3.1 Variação espacial da intensidade da precipitação e o fator de redução de área

Na modelagem de escoamento para bacias de pequeno porte é comum assumir que a chuva se distribua de maneira uniforme pela área da bacia analisada, como no caso do Método Racional (Hayes; Young, 2006). Contudo, para bacias de médio e grande porte, é necessário contabilizar a variação espaçotemporal da intensidade nos cálculos de vazão de projetos de Engenharia de Recursos Hídricos. Não avaliar tais efeitos pode implicar em erros grosseiros de dimensionamento de estruturas hidráulicas e de contenção.

Svensson e Jones (2010, p. 1) discorrem que há duas maneiras “filosoficamente” distintas para se considerar a distribuição espacial da intensidade em uma chuva de projeto: transpor eventos observados e/ou fazer simulações de campos de chuva com base em tais eventos, utilizando modelos estocásticos que reproduzam tais observações; ou uma abordagem simplificada, considerando que uma distribuição temporal observada (ou sintética) de chuva seja combinada com uma distribuição espacial uniforme sobre a bacia analisada. Aliada a estas chuvas uniformes, para chuvas de projeto utilizando Precipitação Máxima Provável (PMP), podem-se considerar distribuições espaciais sintéticas, como círculos ou elipses sobrepostas ao centro da bacia (Girnius, 2016, p. 35), com cada contorno apresentando precipitação uniforme contida em seu interior.

As simulações tendem a ser as ferramentas preferidas para casos que é necessário replicar eventos de chuva com acurácia e realismo, pelo fato de que elas conseguem reproduzir diversos comportamentos estatísticos observados (Benoit; Allard; Mariethoz, 2018, p. 4108). A Figura (1) mostra um exemplo de aplicação de tal método.

Figura 1: Exemplo de campos de chuva simulados



Fonte: Benoit; Allard; Mariethoz, 2018

Apesar de elas serem as alternativas mais robustas para a concepção de chuvas de projeto, elas são inviáveis para aplicação em grande parte do globo, especialmente para países emergentes em que a rede hidrométrica ainda está em desenvolvimento. Peleg *et al.* (2017, p. 1570) notam que, para o caso da simulação estocástica, a sua adoção não é aceita dentro dos meios de engenharia por quatro principais motivos, dentre os quais dois se sobressaem: a necessidade de um conjunto de dados de chuva com alta resolução espaçotemporal e o alto custo computacional que seria proibitivo para aplicações comuns. Por conseguinte, sua aplicação no contexto nacional é praticamente inviável.

Assim sendo, o método mais empregado em aplicações práticas são as chuvas uniformemente distribuídas sobre a área da bacia, sejam elas determinadas a partir do emprego conjunto de ARFs, e de curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

(Panthou *et al.*, 2014, p. 5093) ou as estimadas a partir de relações Altura-Área-Duração (*Depth-Area-Duration*, DAD). Tal a popularidade desta alternativa que ela costuma ser o método de referência para uso em diretrizes de projeto como TP-29 (USWB, 1957) e o Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagens (DNIT, 2005).

O ARF pode ser considerado uma simplificação do comportamento médio de campos de chuvas observados e não uma representação real sua. Para todos os métodos de cálculo, o valor final do fator é obtido através da análise de inúmeros registros de precipitação diferentes, com formações meteorológicas e origens distintas. Logo, assumam-se que o valor final do produto seria uma “média” representativa do decaimento da chuva por área encontrada em tempestades reais.

Normalmente, o valor do ARF está compreendido entre 0 e 1 e ele tende a apresentar uma relação inversamente proporcional com a área, diretamente proporcional com a duração da tormenta e inversamente proporcional ao tempo de retorno, mas com alguns autores discordando com tal relação (Pietersen; Gericke; Smithers, 2023, p. 3), fato que será discutido em maiores detalhes nas seções posteriores. Em alguns casos específicos, ele pode vir a tomar valores maiores que 1, mas costuma ser sobre circunstâncias específicas à região e normalmente associados à longas durações, como demonstrado por Mélése, Blanchet e Creutin (2019), em que os autores explicaram que os ARFs maiores que 1 em seu estudo foram devido ao efeito de orografia, visto que parte de sua área de estudo, a cidade de Alés, na França, localiza-se à base de um acidente geográfico, o Maciço Central, e a precipitação se acumulava majoritariamente na face do obstáculo, levando as estimativas pontuais na cidade a serem menores que as estimativas por área nas regiões vizinhas localizadas na face do obstáculo.

As metodologias de cálculo de ARF seguem dois ramos metodológicos distintos, consistindo em métodos analíticos e métodos empíricos. Métodos analíticos tem como preceito central o “...desenvolvimento de relações teóricas entre a chuva pontual e chuva por área baseada em uma estrutura matemática sobre um conjunto de hipóteses...” (Kim *et al.*, 2019, p. 1). As expressões de cálculo dos fatores por este são estritamente derivadas sobre tais hipóteses feitas sobre o comportamento

espaçotemporal do campo de chuva. Os métodos empíricos já não apresentam uma dependência tão forte sobre estes pressupostos, mas, em troca, costumam ser bem mais intensivos em uso de dados e computação (Svensson; Jones, 2010, p. 5).

Para exemplo de um dos métodos analíticos, os métodos de correlação espacial – como os desenvolvidos por Rodríguez-Iturbe e Mejía (1974) e Sivapalan e Blöschl (1998) – baseiam-se no preceito de que há uma estrutura de correlação espaçotemporal entre pontos dentro de uma tempestade. No caso do método original proposto por Rodríguez-Iturbe e Mejía (1974), o preceito central é que o fator pode ser expresso em função de uma “distância de correlação característica” (posteriormente denotado como “comprimento de correlação espacial” nos trabalhos de Sivapalan e Blöschl (1998)), definida como a distância média entre dois pontos escolhidos aleatoriamente dentro de uma área de referência. Para o cálculo de tal distância de correlação, assume-se que a chuva seja um processo gaussiano de média zero, com a estrutura de correlação sendo dada por uma função exponencial ou de Bessel.

O maior empecilho para este ramo metodológico é que as hipóteses estabelecidas a respeito do comportamento da chuva para desenvolver o cálculo podem não ser verdadeiras, acarretando em incertezas e erros nos resultados gerados. No caso da estrutura de correlação espacial de Rodríguez-Iturbe e Mejía (1974), assume-se a estacionariedade do campo de chuva dentro da área analisada e que tal campo seja isotrópico. Tais afirmações podem não ser válidas para diferentes cenários ao redor do globo, como Santos (2002, p. 71) aponta para o caso específico de Belo Horizonte, onde o relevo acidentado leva a deslocamento complexos de massas de ar, levando ao deslocamento de precipitações. Em troca, eles tendem a necessitar de um menor tempo de computação para obter os resultados desejados visto que eles não necessitam do cálculo de precipitação por área, apenas dos dados pontuais da precipitação (Mélèse; Blanchet; Creutin, 2019, p. 5539).

Todos os métodos descritos, todavia, só apresentaram resultados confiáveis com uma rede de dados que apresente boa cobertura espacial. Como exemplo, Svensson e Jones (2010, p. 20) citam que fatores de área-fixa podem não ser estatisticamente corretos se uma porção da bacia apresenta uma parte com baixo monitoramento. Por

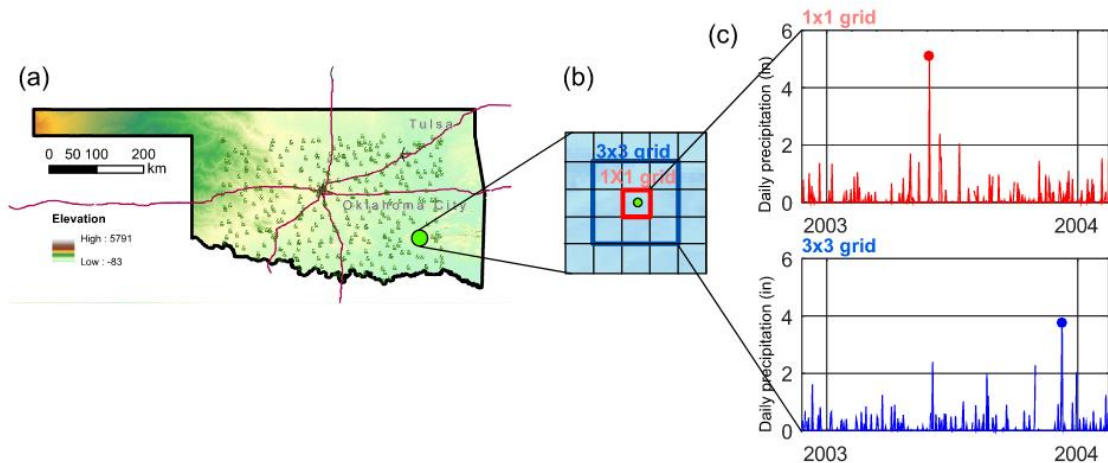
causa disso, é imperativa a presença de uma rede densa de pluviometria para produzir estimativas robustas e não-enviesadas de ARF para qualquer método analisado.

3.2 Métodos de área-fixa

3.2.1 Histórico e incorporação da estimativa da probabilidade de excedência de alturas precipitadas

Sumariamente, os métodos de área-fixa (também conhecidos como geograficamente centrados) são baseados na razão entre precipitações médias por área e a precipitação pontual em um local representativo - p. ex. o ponto central ou uma média das estimativas pontuais - com a área de análise de tais relações sendo fixa, com eventos e leituras de precipitação fora da área de interesse não sendo consideradas. A Figura (2) exemplifica parte do processo para o cálculo do ARF para área, apresentando a extração dos máximos pontual e por área em uma região de interesse. Nota-se que os dois máximos podem ocorrer em instantes distintos, sendo que tal fato terá implicações relevantes nos fatores obtidos, como discutido posteriormente.

Figura 2: Exemplificação da extração dos máximos pontuais e por área



Fonte: Pavlovic *et al.*, 2016

Uma das primeiras aplicações (e, possivelmente, a mais notável) são as relações estabelecidas no TP-29 (USWB, 1957). O documento foi separado em cinco partes, lançadas entre 1957 e 1960, mapeando relações de intensidade de precipitação, frequência e chuva por área para diferentes regiões dos Estados Unidos. Na primeira parte – publicada para a região do Vale do Rio Ohio – o processo de construção da curva é detalhado e usado como referência para a construção de curvas de ARF para

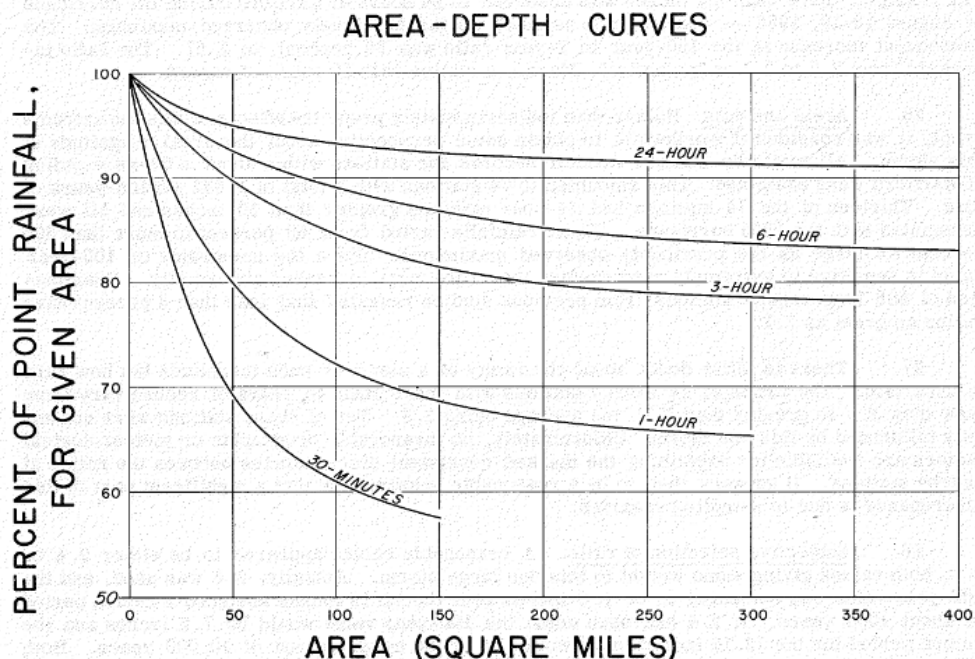
os trabalhos seguintes. A fórmula utilizada para a computação dos valores é definida pela Equação (1) como (USWB, 1957, p. 11):

$$ARF = \frac{n \sum_{i=1}^r A_j}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n P_{ij}} \quad (1)$$

em que n é o número de estações na rede analisada; r é o número de anos na série histórica comum; A_j é a precipitação por área máxima observada em um ano j para uma dada duração; e P_{ij} é a precipitação máxima pontual observada em uma estação i em um ano j de mesma duração. O denominador seria a precipitação “representativa” da bacia, sendo a média das estimativas pontuais naquele dado local. Omolayo (1993, p. 193) a descreve como sendo um ponto hipotético da bacia, e não um local específico dela.

O documento apresenta o método de cálculo para estimativa de relações locais e ele descreve as curvas obtidas para macrorregiões analisadas, como descrito na Figura (3):

Figura 3: Relações de ARF obtidas para o Nordeste dos EUA na Parte 4 do TP-29



Fonte: USWB, 1959

O relatório esclarece que, para as áreas analisadas de até 400 milhas quadradas (aproximadamente 1034 km²), a frequência da tempestade não foi considerada como

entrada para as curvas construídas, visto que as séries analisadas eram demasiadamente curtas para a análise de frequência dos máximos pontuais e por área.

As curvas construídas para as cinco regiões analisadas se tornaram praxe para uso no cotidiano da engenharia naquele país e, posteriormente, para outros locais no mundo. No Brasil, o Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem, do DNIT (2005) recomenda o emprego de relações derivadas do TP-29.

Nos anos seguintes, o Reino Unido também estabeleceu relações de ARF em um estudo conduzido pelo Instituto de Hidrologia (incorporado ao atual Conselho de Pesquisa do Meio Ambiente do Reino Unido) e publicado no Relatório de Estudos sobre Enchentes, de 1975. As relações estabelecidas no documento também não consideravam a frequência como variável de entrada, semelhante ao estabelecido pelo TP-29. Contudo, Bell (1976), em um relatório publicado pelo Instituto de Hidrologia e com base nos dados utilizados no documento anterior, reanalisou as relações calculadas de ARF com a inclusão da frequência das estimativas de precipitações pontuais/médias por área.

Para o cálculo da revisão dos fatores de ARF, as precipitações pontuais e médias por área (calculadas a partir de uma média ponderada a partir de Polígonos de Thiessen) foram analisadas a partir de uma abordagem de Picos sobre Limiar (*Peaks Over Threshold*, POT), com a distribuição parental da chuva sendo uma função exponencial. A razão entre máximos pontuais e por área é feita entre estimativas de mesma frequência relativa e duração. Parte dos resultados do autor estão apresentados na Figura (4):

Figura 4: Valores de ARF calculados por Bell diminuindo com tempo de retorno

SAMPLE AREA	2-YEAR R.P.		5-YEAR R.P.		10-YEAR R.P.		20-YEAR R.P.	
	ARF	S.E.	ARF	S.E.	ARF	S.E.	ARF	S.E.
1	.95	.04	.93	.06	.92	.08	.91	.10
2	.95	.04	.92	.05	.90	.07	.89	.10
3	.89	.04	.89	.06	.89	.08	.89	.09
4	.90	.06	.90	.08	.90	.10	.90	.13
5	.95	.05	.88	.05	.86	.07	.82	.09
6	.90	.04	.88	.07	.86	.09	.85	.11
7	.93	.04	.87	.06	.86	.08	.82	.10
8	.86	.04	.85	.06	.84	.08	.84	.11
9	.89	.04	.84	.05	.81	.05	.80	.05
MEAN	.91	*.04	.88	*.06	.87	*.08	.86	*.10

Fonte: Bell, 1976

Na conclusão do relatório, o autor esclarece que ARFs de área-fixa são mais um conceito estatístico do que físico, já que representam uma relação entre estimativas pontuais e por área de mesmo período de retorno. O autor também nota que os valores de fatores calculados apresentam dependência em relação ao período de retorno e que o fator tende a decrescer com o seu aumento, sendo que desconsiderar tal efeito conduziria a fatores conservadores para tempos de retorno de 10 a 100 anos, comumente usados na engenharia. Ele ainda destaca as incertezas associadas aos resultados obtidos impostas pela reduzida extensão da série histórica analisada.

Trabalhos posteriores a Bell (1976) utilizando o método de área-fixa passaram a descrever os resultados em função da probabilidade de excedência das alturas precipitadas. Dentro do próprio EUA, Myers e Zehr (1980), em um relatório para a Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (*National Oceanic Atmospheric Administration* – NOAA), reanalisaram os fatores produzidos pelos relatórios do TP-29 e remodelaram o cálculo do fator com a relação da frequência, mas utilizando uma abordagem por máximos por bloco e inferindo uma distribuição de Gumbel (distribuição de valores extremos Tipo I) aos máximos anuais. Posteriormente, a maioria dos trabalhos realizados usando esse método também adotariam o uso da teoria de valores extremos e a inferência de uma Distribuição Generalizada de Valores Extremos (*Generalized Extreme Value Distribution*, GEV) (Overeem *et al.*, 2010; Jordan *et al.*, 2011; Plessis; Loots, 2019; Kao *et al.*, 2020; Breinl; Müller-Thomy;

Blöschl, 2020; Pietersen; Gericke; Smithers, 2023). Todavia, ainda há outros trabalhos que optam por outras abordagens de análise de frequência dos máximos de precipitação (Zhao *et al.*, 2023).

A inferência da GEV apresenta problemas quando aplicada a séries históricas curtas. Papalexiou e Kousoyiannis (2013, p. 200) notam que a inferência do parâmetro de forma da distribuição está relacionada a extensão da série analisada e que apenas amostras longas poderiam revelar a sua real natureza. Além das incertezas introduzidas pela análise de séries históricas curtas, há também o fato de que a própria inferência a partir dessa distribuição poderia ser impossibilitada, visto que, caso o parâmetro de forma calculado fosse inferior a -1, os momentos da distribuição inferida não existiriam (Hosking; Wallis; Wood, 1985, p. 252), o que impossibilitaria a inferência dos parâmetros de escala e posição. Apesar de algumas técnicas de inferência minimizarem os problemas associados a séries históricas curtas, como a inferência por Momentos-L (Hosking, 1990), trabalhar com a GEV nesses cenários pode ser contra produtivo, haja visto as incertezas associadas à inferência nessas condições (Miniussi; Marani; Villarini, 2020, p. 13), que seria o caso para muitas redes recém-instaladas de monitoramento urbano no país, incluindo Belo Horizonte.

Alguns autores questionam a possível relação original de decaimento do ARF com tempo de retorno encontrada originalmente por Bell (1976). Apesar de outros estudos terem reproduzido essa relação a partir da aplicação de diferentes métodos (Breinl; Müller-Thomy; Blöschl, 2020; Myers; Zehr, 1980; Overeem *et al.*, 2010), há estudos em que não se observou o decaimento dos fatores com o aumento tempo de retorno (Kang *et al.*, 2019; Pietersen; Gericke; Smithers, 2023). Há pesquisadores que argumentam que a dependência entre o fator e o tempo de retorno não sucede de uma interpretação física do fenômeno, mas, sim, de um artefato de cálculo (Wright; Smith; Baeck, 2014, p. 770)

3.2.2 *Distribuições Metaestatísticas de Valores Extremos (MEVDs) e aplicações na hidrologia*

As dificuldades citadas associadas a aplicação de distribuições de valores extremos motivaram hidrólogos na busca por técnicas de inferência e análise estatística mais adequadas a modelagem de séries históricas de menor extensão, como a já citada

inferência por Momentos-L (Hosking, 1990) e o emprego da estatística Bayesiana (Coles; Pericchi; Sisson, 2003).

Um desenvolvimento relativamente recente neste campo é o emprego de Distribuições Metaestatísticas de Valores Extremos (*Metastatistical Extreme Value Distributions*, MEVD), introduzida na área por Marani e Ignacollo (2015). Anteriormente, essa distribuição foi aplicada em outras áreas das ciências naturais, como na meteorologia para a análise da velocidade máxima dos ventos (Cook; Harris, 2004).

O seu maior diferencial teórico é relaxar a presunção de assintoticidade assumida na Teoria de Valores Extremos. Em síntese, ela permite a incorporação de múltiplos eventos máximos (em uma janela temporal fixa; similar ao POT) em um mesmo ano, o que estende expressivamente o tamanho da amostra utilizada na inferência, uma vez que, usualmente, ela é constituída somente dos máximos anuais. Na teoria clássica, para uma variável aleatória X com domínio nos números reais positivos, a distribuição dos valores máximos observados em n observações também é uma variável aleatória, denotada por Y_n . Considerando que as n observações de X sejam independentes entre si, a distribuição de probabilidade acumulada de Y_n , $H_n(y)$, pode ser descrita como na Equação (2) (Marani; Ignacollo, 2015, p. 122):

$$H_n(y) = [F(y)]^n \quad (2)$$

A partir deste preceito e considerando um número “grande o suficiente” de realizações e renormalizando Y_n como $S_n = (Y_n - b_n)/a_n$, com a_n e b_n sendo constantes de normalização maiores que zero, obtém-se a Equação (3) (Marani; Ignacollo, 2015, p. 122), a qual dará base para o desenvolvimento da GEV e seus três casos específicos de distribuições de valores extremos:

$$P(S_n < s) = H_n(s) = [F(a_n * s + b_n)]^n, \quad a_n, b_n > 0 \quad (3)$$

Contudo, é possível obter uma aproximação para casos em que não se considera n tendendo ao infinito, considerando o maior valor esperado de X em n realizações: U_n , com a Equação (4) sendo a expressão para sua distribuição de probabilidade de excedência, $\Psi(U_n)$ (Marani; Ignacollo, 2015, p. 122):

$$\Psi(U_n) = \frac{1}{n} \quad (4)$$

Com este resultado, é possível reescrever $H_n(y)$ em função $\Psi(U_n)$ e $\Psi(y)$, a probabilidade de excedência dos máximos, como disposto na Equação (5) (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 122) é:

$$H_n(y) = [1 - \Psi(y)]^n = \left[1 - \frac{\Psi(y)}{n\Psi(U_n)}\right]^n \quad (5)$$

Para casos em que $y > U_n$ (valores extremos maiores que o valor máximo esperado do bloco), o termo $\Psi(y)/\Psi(U_n)$ é menor que 1, podendo ser utilizada a Aproximação de Cauchy (Cook; Harris, 2004, p. 394) dada na Equação (6):

$$(1 - z)^n \cong 1 - z \times n \cong \exp(-n \times z) \quad (6)$$

Considerando tal aproximação, a expressão para a probabilidade acumulada para o máximo em n observações de um dado bloco é expressa como denotado na Equação (7), que pode ser denominada como a “penúltima aproximação”, sendo a Equação (3) a “última aproximação” (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 122).

$$H_n(y) = \exp\left[-\frac{\Psi(y)}{\Psi(U_n)}\right] \quad (7)$$

Para a modelagem da precipitação, padronizou-se o uso da distribuição de Weibull como a distribuição parental das variáveis de interesse (Marra; Borga; Morin, 2020; Schellander; Lieb; Hell, 2019; Vidrio-Sahagún; He; Pietroniro, 2023). Isso se deve ao fato de que a precipitação diária (e outras variáveis hidrológicas) apresentam uma cauda “pesada” (Wilson; Toumi, 2005, p. 4), com decaimento lento e maior chance de ocorrer eventos extremos, sendo que a Weibull pode apresentar tal comportamento dependendo do parâmetro de forma (Zorzetto; Botter; Marani, 2016, p. 8081). Entretanto, ainda é possível utilizar outras distribuições para a modelagem da distribuição parental do processo, como a Log-Normal e a Gama (Mushtaq *et al.*, 2022). A distribuição de probabilidade de não excedência de uma variável tipo Weibull é dada pela Equação (8) (Lutz *et al.*, 2024, p. 5):

$$F(x; \lambda, \kappa) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\kappa\right] \quad (8)$$

em que λ e κ são o parâmetro de escala e forma, respectivamente, ambos maiores que zero.

Para o caso de variáveis tipo Weibull, a penúltima aproximação toma a forma demonstrada na Equação (9) (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 122):

$$H_n(y) = \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{y}{\lambda}\right)^\kappa\right) \right]^n \cong \exp\left[-\exp\left(-\frac{y^\kappa}{\lambda^\kappa} + \ln n\right)\right] \quad (9)$$

A probabilidade cumulativa dos máximos $H_n(y)$ dependeria do número de observações n e os parâmetros $\bar{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ da distribuição parental x , podendo ser escrita como $H_n(y; n, \bar{\theta})$. Considerando n e $\bar{\theta}$ como variáveis aleatórias, a probabilidade do máximo anual Y ser menor que y será o valor esperado de $H_n(y; n, \bar{\theta})$, $\zeta(y)$, dada pela Equação (10) (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 123):

$$\zeta(y) = \sum_n \int_{\bar{\theta}} d\bar{\theta} f(n, \bar{\theta}) H_n(y; n, \bar{\theta}) \quad (10)$$

Por fim, para uma análise considerando a série como estacionária e que as realizações feitas são representativas de realizações passadas e futuras, o cálculo da probabilidade acumulada será em função do número de anos T da série, resultando na Equação (11) (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 123):

$$\zeta(y) \cong \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T H_{n_j}(y, n_j, \bar{\theta}_j) \quad (11)$$

Como citado, a primeira publicação em hidrologia foi a de Marani e Ignaccolo (2015), na qual os autores dedicam uma seção à introdução e desenvolvimento do conceito e comparam o desempenho das estimativas geradas pelas MEVDs e distribuições de valores extremos (GEV e Gumbel, em específico) por meio da análise de séries sintéticas de chuva modeladas a partir dos dados da série temporal de Padova – série de observações diárias de precipitação de uma estação localizada na Itália com mais de 100 anos registrados em quatro intervalos ininterruptos. Os autores notam que a abordagem utilizada apresentou boa concordância entre os quantis estimados e os extremos “observados” e não apresentou viés significativo para as séries sintéticas de 50 anos.

Após essa publicação, o interesse no uso de tal abordagem aumentou consideravelmente, e estudos foram conduzidos sob a argumentação da vantagem

mencionada e com vista ao desenvolvimento de novas técnicas. Zorzetto, Botter e Marani (2016) analisaram o desempenho da abordagem MEV frente a GEV utilizando dados de observações diárias de 37 estações centenárias espalhadas ao redor do globo, utilizando séries sintéticas variando entre 10 e 80 anos. Os autores notam que as MEVDs apresentaram melhor desempenho em estimar quantis com tempo de retorno superiores ao tamanho da série quando comparado a GEV.

Além das aplicações para chuva diária, o seu uso também foi observado para modelagem de outras variáveis hidrológicas (Milojevic; Blanchet; Lehning, 2023; Miniussi; Marani; Villarini, 2020). Contudo, em observância ao propósito do presente estudo, destaca-se a adaptação desenvolvida para análise de precipitações horárias por Marra *et al.* (2018). Os autores trabalharam com dados de 160 pluviógrafos espalhados nos Estados Unidos e dividiram o estudo em duas partes: comparação entre estimativas de MEV baseado em estações de 60 anos de dados pluviográficos totais contra estimativas de POT e GEV, utilizando reamostramento para obter séries sintéticas de 5, 10 e 20 anos; e análise dos efeitos que diferentes modelos de erro comumente presentes em dados de sensoriamento remoto apresentariam nas estimativas dos quantis pelas três abordagens.

Para separar as observações de um dado bloco anual (os denominados “eventos ordinários”), os autores utilizam uma estrutura que usa o valor de autocorrelação da série temporal de um dado ano para identificar o intervalo de tempo mínimo que garanta a independência entre os máximos anuais registrados.

Os autores observaram que, apesar das MEVDs subestimarem os quantis de tempo de retorno de 100 anos, elas ainda apresentavam menores incertezas que as outras abordagens e se mostraram mais resilientes aos modelos de erro testados. Adicionalmente, eles reforçam a ideia que MEVDs seriam alternativas viáveis para análise de frequência para série histórica curtas.

No que tange aos estudos desenvolvidos para determinação de ARFs, o primeiro a utilizá-la foi Lutz *et al.* (2024). Nesse artigo, os autores avaliam a possibilidade de usar três produtos de grid diferente para o cálculo de ARFs para a Noruega. Dois desses produtos, o *seNorge* e *NORA3*, apresentam uma série histórica com mais de 40 anos de observações diárias e horárias, respectivamente, e a análise do fator por área-fixa

foi conduzida utilizando a GEV. Além deles, os autores se propuseram a analisar o produto *SURFdat*, um produto de alta resolução espacial (250 m) e temporal (10 min) desenvolvido a partir de dados de radar com incorporação de observações de solo e delimitado a região do Fiorde de Oslo.

Como a série histórica limitava-se aos anos compreendidos entre 2015 e 2019, a análise de frequência por meio do emprego da GEV era inviável. Sob esta observação, os autores decidiram analisar os máximos pontuais e por área para o local utilizando as MEVDs. Ao comparar os resultados produzidos para a região com um dos produtos anteriores (o *NORA3*), observou-se que os fatores apresentados pelo *SURFdat* eram menores em geral, com a maior diferença sendo observada para a duração de 24 horas. Os autores, entretanto, refutam que a diferença entre fatores encontrados tenha vindo dos dados usados, visto que a tendência de subestimação para quantis elevados em séries com 5 anos é coerente com o encontrado por Marra *et al.* (2018), sendo, então, um viés introduzido pelas MEVDs.

3.3 Método do centro de evento de tempestade

3.3.1 Histórico de estudos e dificuldade de aplicação

O centro de evento de tempestade apresenta uma proposição de cálculo baseado na análise individual de eventos de chuva ao invés de observar os máximos pontuais e por área separadamente. Os fatores finais computados por esta abordagem costumam ser representados através de médias de ARFs obtidos para várias tempestades de mesma duração (Kang *et al.*, 2019, p. 5).

Uma característica peculiar a este tipo de abordagem é que a maior parte de suas derivações não levam em consideração o tempo de retorno da tormenta. Por causa disso, o seu uso costuma estar relacionado a estudos de PMP e Inundações Máximas Prováveis, enquanto os fatores de área-fixa são usualmente associados à concepção de estruturas de drenagem (Sivapalan; Blöschl, 1998, p. 51).

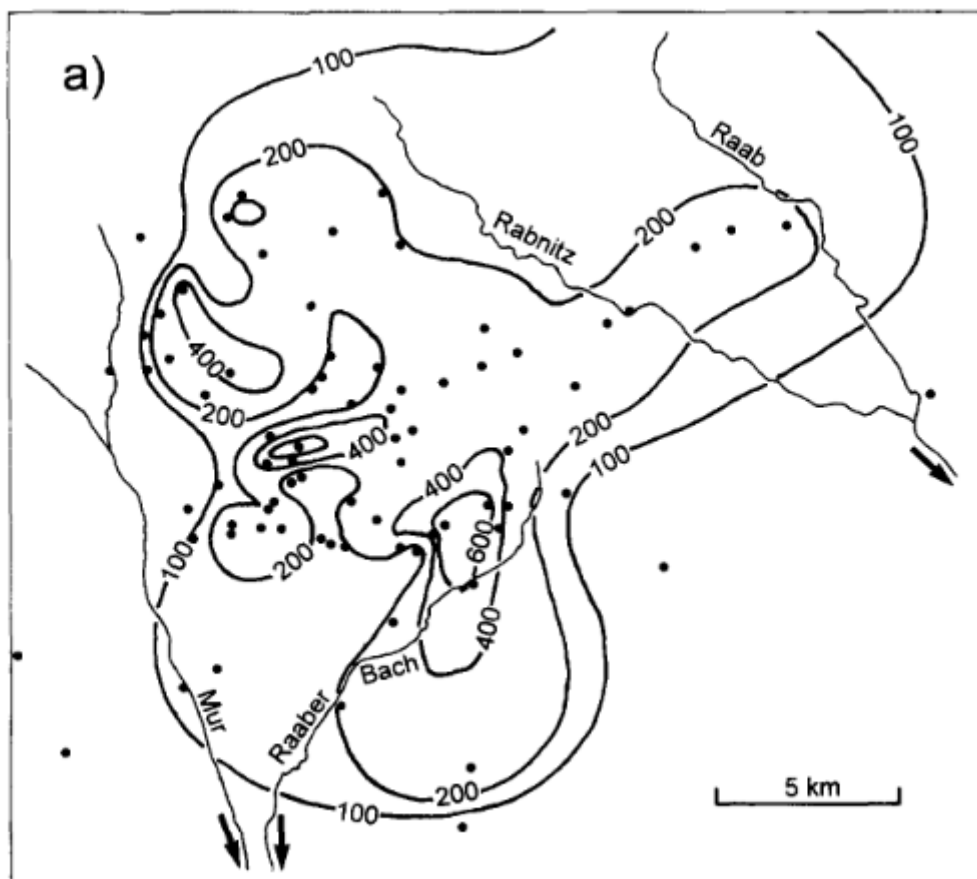
Antes do advento de programas que permitissem o cálculo de estimativas de chuva por procedimentos como a krigagem ou a interpolação por ponderação pelo inverso da distância (*Inverse Distance Weighting*, IDW), a forma adotada para o cálculo das estimativas por chuva por área era realizada por meio de interpolação de isoietas de

tempestade, como demonstrada na Figura (5). Por essa razão, a área de análise para o decaimento não era “fechada”, sendo ela definida para cada evento, de acordo com as áreas entre isoietas (Omolayo, 1993, p. 192). A formulação básica desse método é dada na Equação (12) (Omolayo, 1993, p. 192):

$$ARF = \frac{R}{P} \quad (12)$$

Em que R é o valor de precipitação da isoietas fechada, P é a precipitação no centro da tempestade e o ARF é o valor do fator para a área A da isoietas fechada da tempestade avaliada.

Figura 5: Exemplo de isoietas de tempestade



Fonte: Sivapalan; Bloschl, 1998

A história de aplicação e estudo deste método é consideravelmente mais difícil de rastrear que a história da área-fixa, a princípio, pelo fato de ser menos utilizado do que o método anterior. Asquith e Famiglietti (2000, p. 56) destacam que, possivelmente,

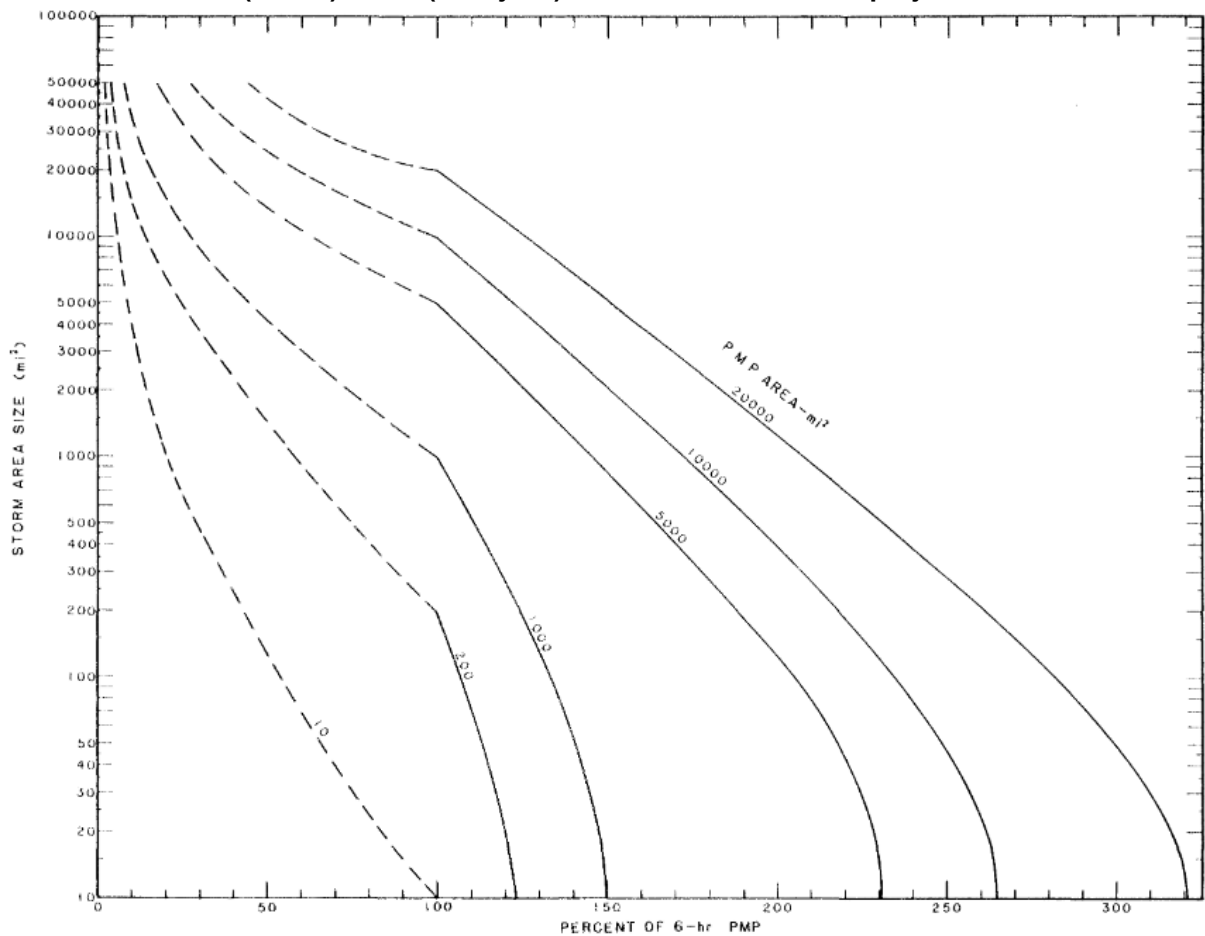
ele caiu em desuso em relação a outros métodos por causa da sua dificuldade de implementação representada, por exemplo, pela existência de tempestades com múltiplos centros. Kim *et al.* (2019) reforçam que esse método necessita de um produto de radar ou a existência de uma rede de estações com uma densidade extremamente alta para reproduzir a grande variedade espacial de tempestades, o que tornaria seu uso algo impraticável em diversas situações.

De fato, o número de estudos que registraram o emprego dessa técnica é bastante inferior àqueles em que outros métodos analíticos e de área-fixa foram utilizados. Alguns dos estudos antigos mencionados chegam a citar o seu uso como alternativa ao cálculo (USWB, 1957, p. 8), sem mencionar justificativas específicas por não o terem utilizado. Contudo, observando-se os objetivos delineados, é válido mencionar aplicações e análises espaciais que empregaram essa técnica.

O exemplo mais notável de utilização do método do centro de evento é o *Hydrometeorological Report N° 52* (Relatório Hidrometeorológico N° 52 da NOAA – HMR 52) em que os padrões isoietais para PMPs desenvolvidos no NOAA e suas curvas DAD, desenvolvido por Hansen, Schreiner e Miller (1982) foram analisados. O relatório busca descrever o comportamento espaçotemporal das estimativas de PMP apresentadas no trabalho anterior (HMR 51), com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento de projetos que necessitavam de maior detalhamento das tormentas para sua execução.

Para a construção das curvas DAD para PMPs ao leste do Meridiano 105°, os autores reanalisaram 29 dos 53 eventos estudados do relatório anterior e calcularam a altura acumulada média para as áreas analisadas de cada tempestade, como pode ser visto na Figura (6). Tal abordagem é remanescente dos atuais métodos de centro de evento, que também utilizam um valor médio de ARF para a representação final do fator.

Figura 6: Relação entre porcentagem da precipitação estimada de 6 h de PMP e área dentro (sólido) e fora (tracejado) da área da tormenta de projeto.



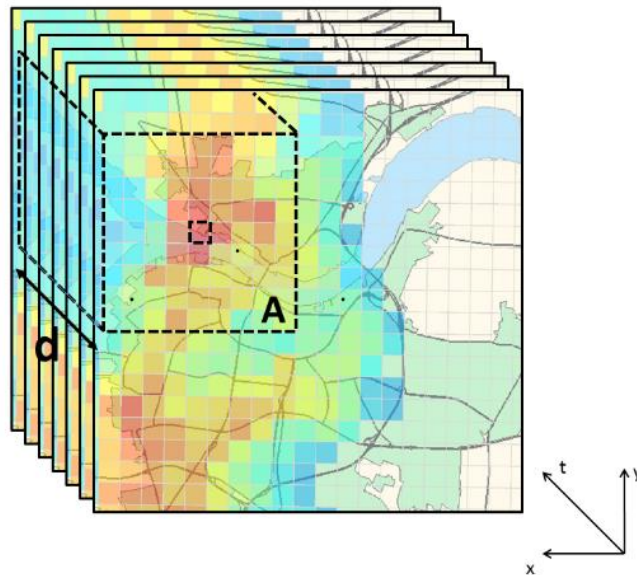
Fonte: Hansen; Schreiner; Miller, 1982.

No início do milênio houve uma pequena ressurgência de estudos que utilizaram essa técnica, possivelmente ocasionado pela expansão de redes hidrométricas ao redor do globo e a maior disponibilização de produtos de sensoriamento remoto (especificamente, radares), o que permitiu uma descrição mais fidedigna dos campos de chuva. Adicionalmente, a extensão do poder computacional permitiu o emprego de técnicas mais sofisticadas para interpolação de valores pontuais de chuva, o que também possibilitou a produção de *grids* de campos de chuvas observados. Por conseguinte, os estudos mais recentes de ARF apoiados na aplicação desse método optaram por investigar novas maneiras de definir a área de análise da chuva (que não apenas as representadas pelas isoietas).

Uma das primeiras alternativas para área de referência de análise da tempestade foi o uso de formas regulares sobrepostas ao centro de evento, como disposta na Figura (7). Um dos primeiros estudos a utilizar tal abordagem foi de Bacchi e Ranzi (1996),

no qual os autores constroem o ARF por meio da modelagem estocástica de eventos de chuvas intensas.

Figura 7: Exemplo de análise espacial usando uma forma regular (quadrado) sobreposta ao centro da tormenta

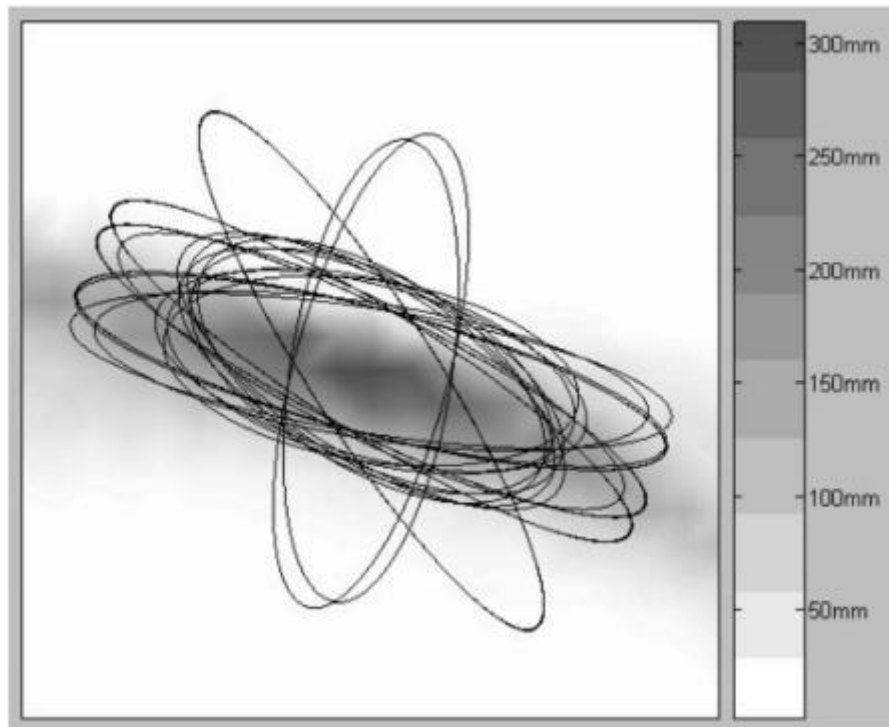


Fonte: Thorndahl; Nielsen; Rasmussen, 2019

Para a modelagem do domínio espacial do campo de chuva, os autores o consideraram como um quadrado. Outros artigos posteriores que optaram por uma análise semelhante de utilizar uma geometria regular como área de referência para análise da precipitação por área incluem: Rodríguez *et al.* (2013) (círculos); Martins, Girnius e Pinto (2014) (círculos); e Thorndahl, Nielsen e Rasmussen (2019) (quadrados).

Algumas outras alternativas surgiram nas duas últimas décadas para a análise espacial do evento. Outra proposta é a análise por formas elípticas, originalmente usada por Olivera *et al.* (2008), no qual os autores examinam as relações de ARF para o Texas usando dados da rede de radar americana, como representado na Figura (8). A determinação da forma da elipse é feita a partir da maximização dos índices de precipitação em seu interior.

Figura 8: Elipses ótimas encontradas para uma tempestade



Fonte: Olivera *et al.*, 2008

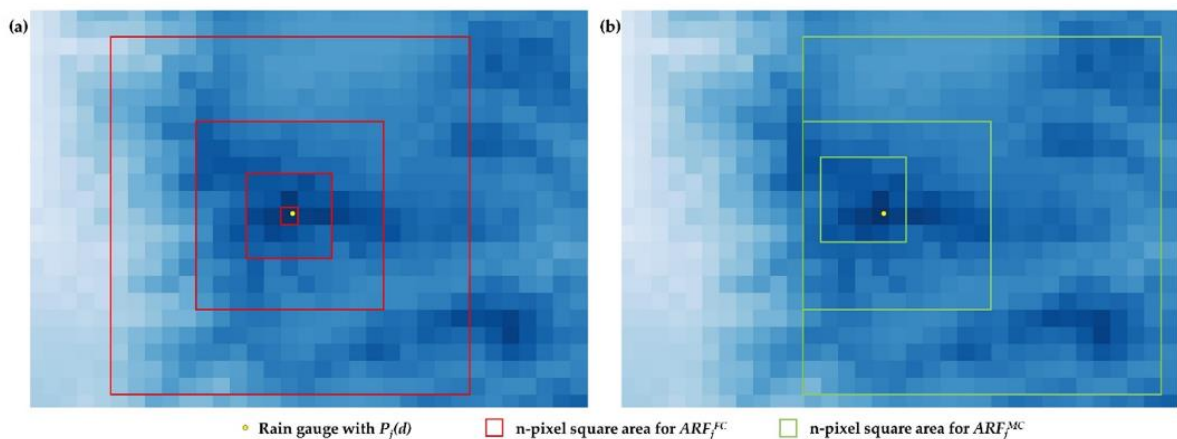
Os autores demonstraram que as tempestades frontais produzidas durante o inverno na região tendiam a ter formas mais alongadas e orientação paralela a costa do estado, enquanto células convectivas apresentariam formas mais “arredondadas”. Posteriormente, tal abordagem foi reproduzida nos estudos de Kang *et al.* (2019) e Kim *et al.* (2019). Nesse último os autores argumentam que elas seriam ideais para análise de sistemas frontais visto os resultados descritos na publicação de 2008. Em um estudo de construção de curvas IDFA (Intensidade-Duração-Frequência-Área) para uma região de Israel, Rosin, Morin e Marra (2024) utilizaram as elipses para identificar os máximos por área em um dado ponto analisado, argumentando que as elipses também conseguem capturar os “traços pluviométricos” que tempestades deixam ao se movimentarem.

Wright, Smith e Baeck (2014) optaram por uma abordagem que descarta o uso de geometria regulares para tal propósito: para caracterizar a área com maior precipitação registrada durante a tormenta, os autores escolhem o pixel adjacente ao centro com maior intensidade, fazendo-se a média entre os dois píxeis acumulados e o dividindo pela estimativa pontual máxima para obter o ARF de 2 km². Repete-se o processo com os próximos pontos com maior intensidade registrada até a área limite

delimitada (1.036 km² em seu estudo). Os autores apontam que uma consequência desta abordagem é que o fator computado para um evento pode não ser monotônico, visto que pontos com elevada altura pluviométrica acumulada podem estar separados por outros com menores registros.

Em relação a multiplicidade de centros (uma das dificuldades clássicas do método), Biondi, Greco e De Luca (2021) sugeriram a adoção de um “centro-móvel”. Em vez de considerar um quadrado de $n \times n$ píxeis sobreposto ao centro da tormenta, o centro-móvel se trata de uma janela móvel quadrada que procura pelos maiores índices de precipitação em uma dada cena, como demonstrado na Figura (9). Em seu estudo, o domínio completo da região da Calábria era de 15.000 km², com a janela a se mover livremente sobre as áreas não costeiras para análise dos eventos.

Figura 9: Aplicação de “centro-fixo” (a) e “centro-móvel” (b)



Fonte: Biondi; Greco; De Luca, 2021

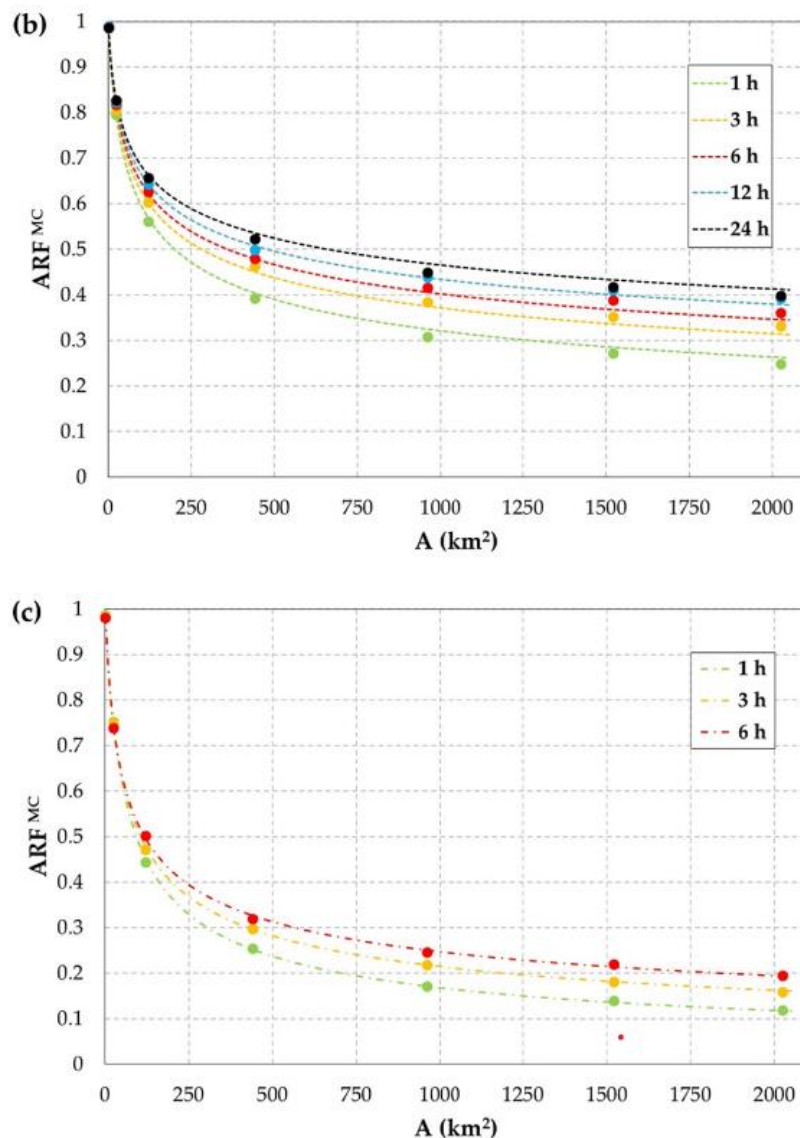
3.3.2 Relação dos fatores com natureza da tormenta e área-fixa

Por causa da natureza deste método, ele está invariavelmente ligado ao processo de formação das tormentas analisadas. Wright, Smith e Baeck (2014, p. 775) argumentam que o valor do fator pode variar muito, e que o tipo de tormenta é responsável por grande parte dessa variação. Por isso, ao interpretar os resultados produzidos por tal abordagem, deve-se levar em conta a natureza dos eventos estudados para analisar os fatores produzidos.

A exemplo, ao considerar células convectivas, espera-se que o decaimento do fator seja bem mais rápido em relação a área que sistemas frontais (Kim *et al.*, 2019, p. 422). Como eventos convectivos costumam apresentar uma duração mais curta que

sistemas frontais, ARFs de curta duração produzidos por este método seriam predominantemente dominados por análises de tais tipos de tempestade, com longas durações sendo mais representativas de sistemas frontais e orográficos. A Figura (10) apresenta gráficos de ARFs para eventos convectivos e sistemas frontais analisados por Biondi, Greco e De Luca (2021, p. 14).

Figura 10: ARF de sistemas frontais (b) contra ARF de sistemas convectivos (c)



Fonte: Biondi; Greco; De Luca, 2021

Como mencionado brevemente na introdução, os fatores por área-fixa tendem a ser consideravelmente mais conservadores que seus análogos por centro de evento (Svensson; Jones, 2010, p. 7). A explicação, de acordo com Wright, Smith e Baek (2014, p. 770), seria pelo fato de que, como o método não distingue o instante em que

ocorreram os máximos pontuais e por área, há um risco grande de associar tempestades de natureza diferentes que ocorreram em instantes distintos, p. ex.: os máximos pontuais seriam produzidos por células convectivas, entretanto os máximos por área seriam oriundos de formações frontais.

Como não é usual associar-se a natureza do evento ao cômputo da ARF por área-fixa, alguns dos autores desses estudos recentes sugerem o emprego do método do centro de evento e dos ARFs produzidos por ele como o padrão para uso em estudos de engenharia (Biondi; Greco; De Luca, 2021; Kim *et al.*, 2019; Wright; Smith; Baeck, 2014). Esses autores argumentam que os fatores demasiadamente conservadores obtidos a partir do método da área-fixa conduziriam ao superdimensionamento de estruturas de contenção e drenagem urbana. Ainda assim, observa-se que os estudos por área-fixa são largamente citados em publicações, tanto de cunho acadêmico quanto técnico.

Uma tentativa de contabilizar a natureza do evento em fatores de área-fixa foi realizada no estudo de Breinl, Müller-Thomy e Blöschl (2020). Nele os autores analisam duas redes diferentes na Áustria: uma localizada em Voralberg, próxima aos Alpes; e outra na Estíria. A primeira região apresenta maior prevalência de fenômenos orográficos por fazer fronteira com os Alpes, enquanto a segunda apresenta verões chuvosos dominados por células convectivas. Os autores obtiveram ARFs com decaimento mais “rápido” na região “convectiva”. Contudo, apesar do estudo demonstrar uma clara distinção de fatores entre regiões diferentes e ligar isso aos mecanismos geradores de tormenta prevalente nelas, a base do método de identificar os máximos anuais, sem distinção dos instantes em que ocorreram, continua a mesma, com os fatores produzidos ainda semelhantes a outros estudos de área-fixa analisados.

3.4 Relações e estudos de ARF nacionais

3.4.1 Fatores empregados na engenharia no Brasil

No contexto nacional, poucos estudos foram conduzidos para o desenvolvimento dessas relações, sendo comum a adoção de ARFs desenvolvidos em estudos no exterior, em específico: o TP-29. O principal exemplo é o Manual de Projeto para

Drenagem Urbana da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (1986). No capítulo II, subitem 4, o documento destaca que, para áreas de até 25 km², pode-se considerar as estimativas pontuais para o cálculo da tormenta de projeto. Acima disso, deve-se transformar a chuva utilizando-se o ábaco de fatores produzido pelo USWB (1957).

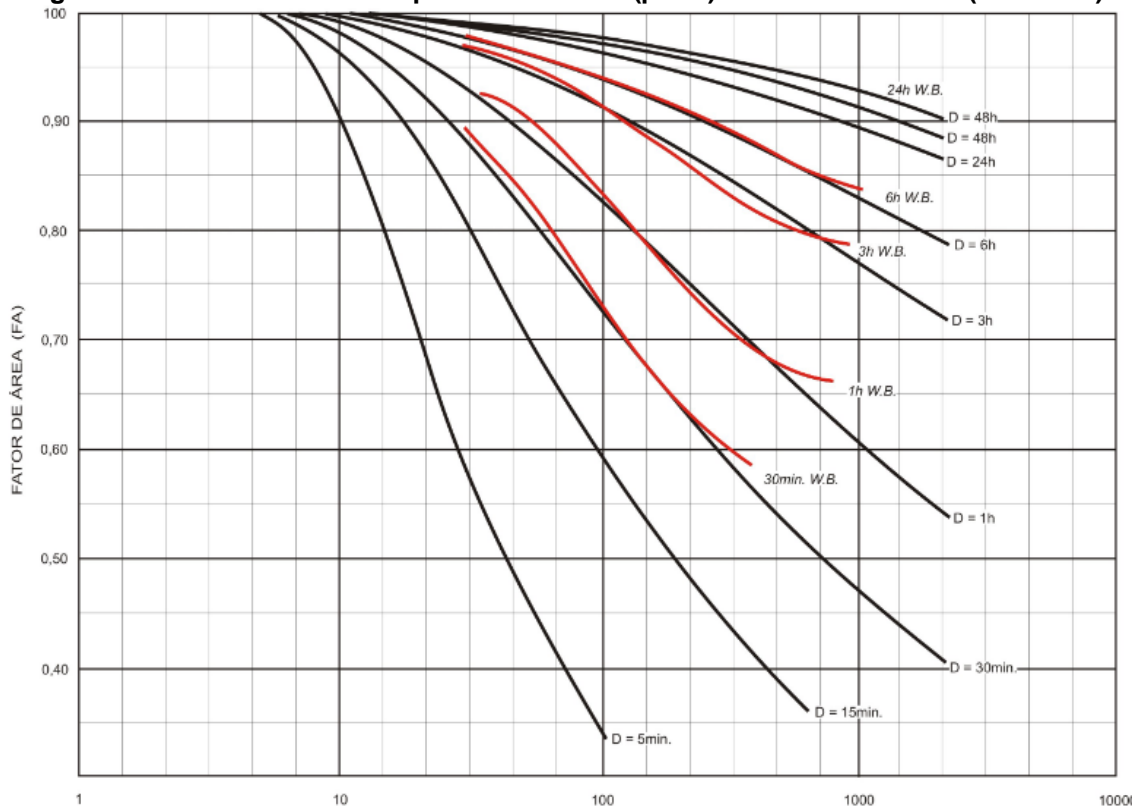
Dentre os exemplos mais recentes de documento técnico que sugere o emprego de fatores oriundos de estudos conduzidos em outros países é o Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005). Na seção 6.3.3, o manual estabelece uma fórmula adaptando os valores obtidos no TP-29, conforme as Equações (13) e (14) (DNIT, 2005, p. 67):

$$y = 35 \log(0.7D + 1) \quad (13)$$

$$ARF = \frac{y}{y + \log^2\left(\frac{AR^2}{5}\right)} \quad (14)$$

em que D é a duração do evento em horas e AR é a área considerada em km². A expressão pode ser utilizada para áreas de 5 km² a 5.000 km². Uma comparação entre valores obtidos pela expressão e as curvas de ARF do TP-29 podem ser vistas na Figura (11):

Figura 11: Curva de ARF da expressão do DNIT (preto) e valores do TP-29 (vermelho)



Fonte: DNIT, 2005

A expressão apresenta o ganho de poder relacionar o ARF para qualquer duração desejada ao invés de interpolar manualmente os valores entre duas durações. Contudo, além de não apresentar a frequência como dado de entrada – justamente por ser uma adaptação dos valores do TP-29 – os fatores são transposições diretas dos encontrados no relatório original (com exceção das chuvas diárias, que são menores que as apresentadas pelo TP-29).

Observando-se a extensão continental do país e sua variabilidade hidroclimatológica, admite-se que o emprego de valores oriundos dos estudos citados, cujos fatores são aplicados de maneira uniforme em praticamente todo o território nacional, suscita incertezas quanto ao real risco associado aos projetos de engenharia que se valerem dessas relações. Nesse sentido, é imperativo o desenvolvimento de estudos nacionais sobre distribuição espacial da chuva, com vistas ao dimensionamento e avaliação de segurança de estruturas de controle de inundação e drenagem urbana.

Todavia, a transposição desses fatores é prática comum na engenharia do país, sobretudo pelo fato de que a caracterização espacial da precipitação requerer uma

rede hidrométrica densa e capaz de realizar registros subsidiários. De fato, há poucos centros urbanos no país com uma rede hidrométrica adequada ao desenvolvimento desses estudos.

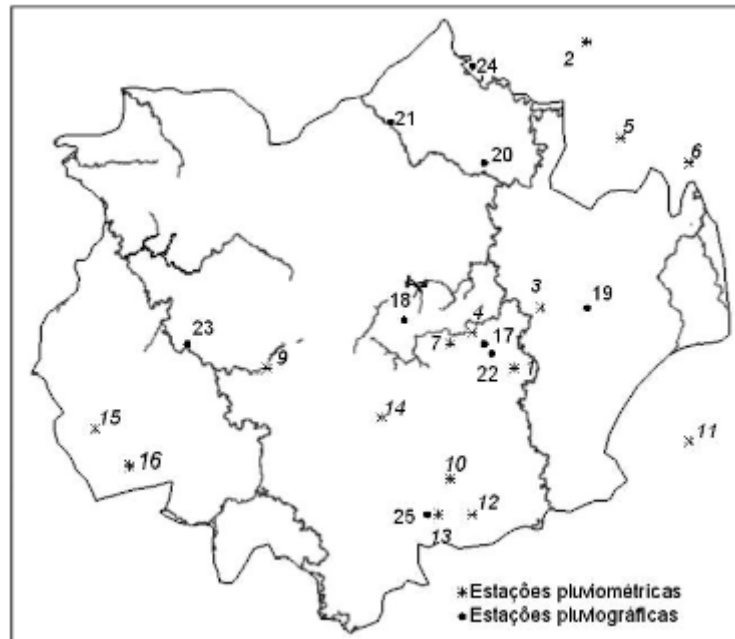
3.4.2 *Estudos nacionais sobre o ARF*

A pesquisa empreendida identificou seis estudos sobre derivação e análise de ARFs no contexto nacional, sendo eles: as dissertações de mestrado de Santos (2002), Medeiros (2002) e Girnius (2016); os artigos de Silveira (2001) e Barbalho e Formiga (2013); e a publicação de Martins, Girnius e Pinto (2014) para a Sexta Conferência Internacional sobre Gestão de Cheias, realizada em São Paulo.

Dá-se destaque ao estudo de Santos (2002) por ter sido um dos primeiros e ser o estudo local para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). A autora se propôs a calcular tais relações utilizando o método de correlação espacial desenvolvido por Sivapalan e Blöschl (1998) para a RMBH. Trata-se de um método derivado do trabalho de Rodriguez-Iturbe e Meija (1974). Diferentemente do modelo anterior, a distribuição-mãe do processo gerador de chuva seria uma função exponencial e, considerando que a precipitação média sobre área seria a soma ponderada de precipitações pontuais, levaria a uma distribuição Gama para a distribuição mãe da precipitação média por área, a qual teria seus valores extremos distribuídos conforme uma distribuição de Gumbel. A partir destes preceitos, é possível construir uma curva IDFA parametrizada.

Os dados utilizados foram produzidos por 25 estações pluviométricas – 9 pluviógrafos e 16 convencionais – dispostas ao redor da RMBH. A intenção original era obter as relações de ARF para chuvas diárias, mas os objetivos foram estendidos para o alcance de relações subsidiárias. O mapa das estações encontra-se apresentado na Figura (12). As estações localizadas em Belo Horizonte seriam as 1, 4, 7, 17 e 22.

Figura 12: Rede utilizada na dissertação de Santos (2002)



Fontes: Santos, 2002

Em seus resultados, a autora obteve uma boa correspondência entre os fatores calculados e outros valores de ARF, especificamente o TP-29 e os descritos no estudo desenvolvido por Asquith; Famiglietti (2000) e Silveira (2001). Entretanto, a autora afirma que essa avaliação não revela muito sobre a natureza do fator já que eles foram desenvolvidos com dados exógenos à área analisada.

Antes de Santos (2002), Silveira (2001) já havia conduzido estudos sobre o fator no Brasil em seus estudos de mestrado e doutorado, desenvolvidos em 1993 e 1996 respectivamente, publicados em francês pela Universidade de Montpellier. Em uma publicação de 2001 o autor apresenta os fatores para a bacia do Dilúvio, no Rio Grande do Sul, por dois métodos analíticos: o de Rodriguez-Iturbe e Meija (1974); e um outro desenvolvido por Lebel e Laborde (1988), o qual se assemelha ao anterior, mas utiliza um semivariograma para expressar a relação espacial entre chuvas pontuais em uma dada área ao invés de um correlograma. Para os tempos de retorno analisados (1 a 5 anos) não houve alterações significativas entre os fatores calculados. Em comparação aos valores publicados pelo USWB (1957), houve boa concordância com os fatores para 30 min, mas os de 1 h do USWB se mostraram significativamente mais conservadores que os apresentados pelo artigo.

Em terceiro, há a dissertação de Medeiros (2002) em que há a comparação dos fatores obtidos por três métodos: os do TP-29; uma variação da área-fixa; e o modelo de correlação estrutural desenvolvido por Rodriguez-Iturbe e Meíja (1974). Os fatores foram calculados para chuvas de longa duração (superior a 1 dia) a partir de dados da bacia do rio Paraitinga, em São Paulo.

O autor observou que os coeficientes do USWB eram os mais conservadores, seguidos pelos desenvolvidos pelo método Rodriguez-Iturbe e Meíja (1974) e, por fim, os obtidos pela metodologia de área-fixa. Ademais, ele registra que as diferenças entre os métodos eram mais acentuadas para a chuva de um dia. É válido destacar que, apesar dos valores do TP-29 terem apresentado boa correspondência com os obtidos a partir do método proposto por Rodriguez-Iturbe e Meíja (1974), o autor não recomenda o uso dos valores do USWB justamente por eles não levarem em consideração as características regionais. Ele também enfatiza a necessidade do desenvolvimento de estudos locais em contraposição à transposição de fatores.

Em relação a desenvolvimento de novos métodos, Barbalho e Formiga (2013) apresentam um estudo piloto sobre um método empírico, montando uma rede de monitoramento específica para o estudo na bacia do Córrego Botafogo, em Goiânia, com 32 km². A técnica é semelhante ao método da área-fixa, estabelecendo relações entre os máximos pontuais e por área em um dado ponto (definido em uma área circular no caso deste estudo). O ARF foi computado para cada posto sendo o resultado final uma equação obtida a partir da regressão dos fatores individuais. Os autores encontraram valores menos conservadores aos estabelecidos pelo DNIT/ TP-29, mas não recomendam o emprego dos resultados devido ao curto período analisado (1 ano).

Martins, Girnius e Pinto (2014) apresentaram um estudo também inédito à temática no país ao incorporar dados de radar da Bacia do Alto Tietê (São Paulo) para análise do fator. A abordagem escolhida foi o centro de evento, sendo identificado oito eventos extremos, oriundos de sistemas frontais, para análise de subintervalos de 0.5 h, 1 h, 2 h, 6 h e 24 h. Além da construção das curvas para bacia, os autores tentaram observar a relação do fator por centro de evento com o tempo de retorno médio dos intervalos analisados e o valor do ARF e, apesar de terem identificado uma pequena

relação entre as duas variáveis, eles concluem que não havia evidências suficientes para demonstrar a dependência entre elas. Assim como nos outros trabalhos nacionais, os autores destacam a necessidade de desenvolvimento de relações locais.

Por fim, a dissertação de Girnius (2016) apresenta uma comparação do impacto que adoção de abordagens distintas de distribuição espaçotemporal de chuvas de projeto teriam na vazão em alguns pontos na Bacia do Alto Tietê por meio da modelagem chuva-vazão. Para a variação espacial, a autora considerou duas abordagens distintas: a utilização de campos observados de chuva com base nos dados de produtos de radar coletados sobre 7 eventos, os quais seriam “maximizados”, com a precipitação máxima pontual transformada para o tempo de retorno de 100 anos; e o uso de distribuições espaciais sintéticas, em padrões circulares e elípticos. Para as duas abordagens, a chuva média por área foi calculada através de relações de ARF, sendo considerado duas alternativas – os fatores do TP-29 e os desenvolvidos especificamente para a bacia anteriormente em Martins, Girnius e Pinto (2014)

Em relação às distribuições espaciais e o uso dos dois grupos de ARFs, a autora observou que o uso dos fatores transpostos gerou vazões, em média, 69% maiores que o uso dos fatores locais, mesmo com os fatores do TP-29 sendo “apenas” 49% maiores. Em suas conclusões (e semelhante aos outros trabalhos nacionais) ela destaca a importância do desenvolvimento de relações regionais para uso em bacias de grande porte, visto que o uso de valores transpostos levaria a soluções antieconômicas.

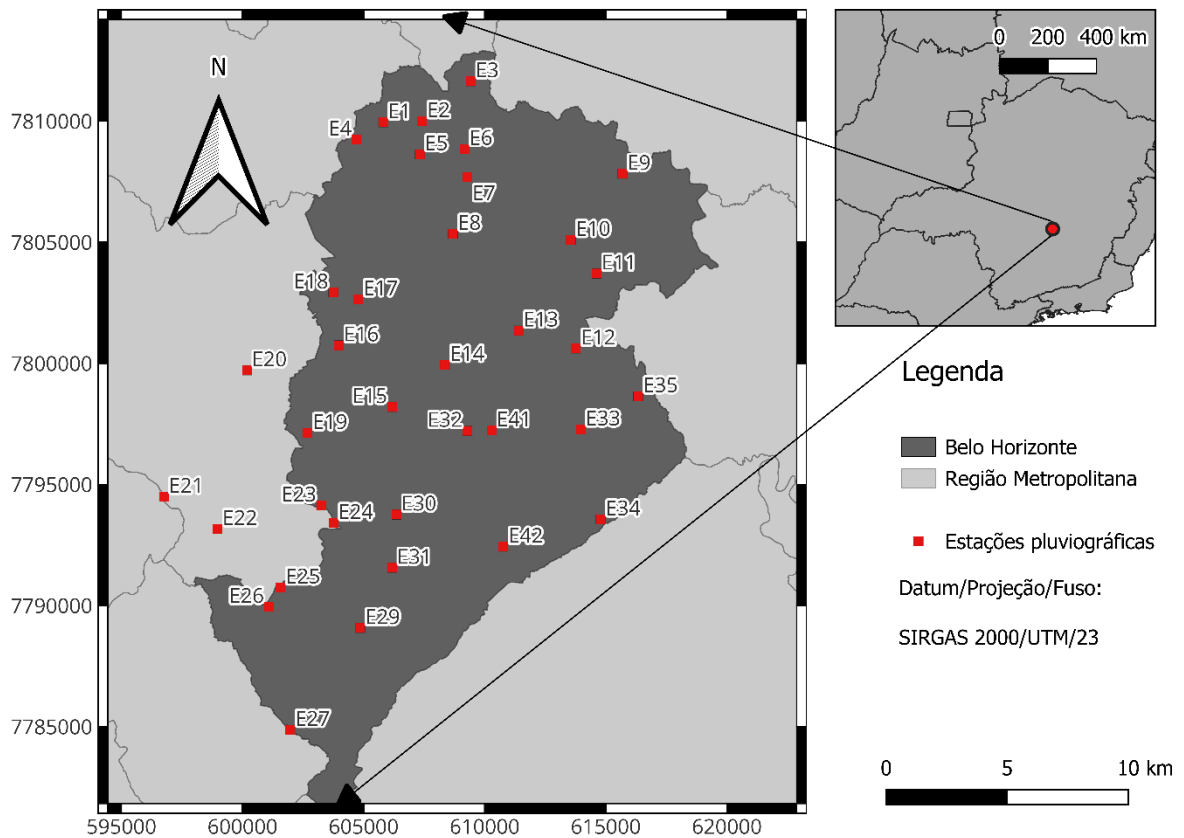
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo e espacialização da chuva

Belo Horizonte é a capital de Minas Gerais e o centro econômico do estado. De acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2023, p. 38) a cidade é composta por 2,3 milhões de habitantes e apresenta uma área de 331 km². Em relação a sua hidrografia, ela é composta por 4 bacias hidrográficas, com as duas principais sendo as Bacias do Ribeirão Arrudas e a do Ribeirão das Onças (Caputo; Siqueira, 2020, p. 2). Na última década, a capital foi sujeita a vários fenômenos meteorológicos extremos, indo das secas multianuais de 2014-2015 a chuva deca milenar de 28 de janeiro de 2020. Esses fatos motivaram a retomada de estudos locais para caracterização de tais eventos extremos e a reavaliação das diretrizes de projetos hidráulicos da cidade (Costa *et al.*, 2024, p. 3981)

Além do interesse na reanálise dos padrões de chuva locais, a escolha dela como área de estudo foi feita também pelas características da rede de monitoramento hidrométrico existente. Ela é composta por 36 pluviógrafos de balança e é gerida pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH). O início de operação da rede data de novembro de 2011 e o fim dos dados registrados considerados foi novembro de 2024. Os instrumentos cobrem a área da capital, sendo que três localizam-se em Contagem, a Oeste. As suas localizações podem ser vistas na Figura (13):

Figura 13: Mapa da área de estudo e estações da PBH



Fonte: Autoria Própria

Como apontado anteriormente, para caracterização de variação espacial de chuva, é necessário possuir uma rede de monitoramento densa o suficiente para tal propósito. A Organização Mundial de Meteorologia (2008) destaca que, para áreas urbanas, a recomendação densidade para estações automáticas deve ser de uma estação a cada 10 km² a 20 km², requisitos os quais a rede da PBH cumpre (aproximadamente 1 estação a cada 12 km²).

A série final utilizada para análise foi composta por 8 anos hidrológicos e 10 anos civis, como demonstrado no Quadro (1). Os anos de 2014 e 2019 não apresentaram dados suficientes para conduzir a análise estatística.

Quadro 1: Informações da rede

Informações da Rede	
Órgão responsável	PBH
N° de Instrumentos	36
Discretização temporal (min)	10
Início da série	01/2012
Fim da série	11/2024
Anos hidrológicos na série final	8
Anos civis na série final	10

Fonte: Autoria própria

Devido a curta extensão da base de dados utilizada, aplicações de técnicas convencionais de tratamento – como a utilização de testes de hipótese para aleatoriedade e tendência ou diagramas de dupla massa – são dificultadas ou impossibilitadas. Por isso, analisou-se as séries de precipitações diárias para capturar erros grosseiros de registros ou falhas durante o período considerado.

Para o cômputo dos fatores, é necessário espacializar as alturas de chuvas pontuais sobre a área de interesse. Para esse fim, realizou-se a interpolação por IDW. Nela as estimativas em locais não amostrados são obtidas a partir da média ponderada entre os valores registrados na vizinhança (Lu; Wong, 2008 *apud* Chen; Liu, 2012). O cálculo nos pontos não-amostrados é realizado pelo sistema descrito por meio das Equações (15) e (16):

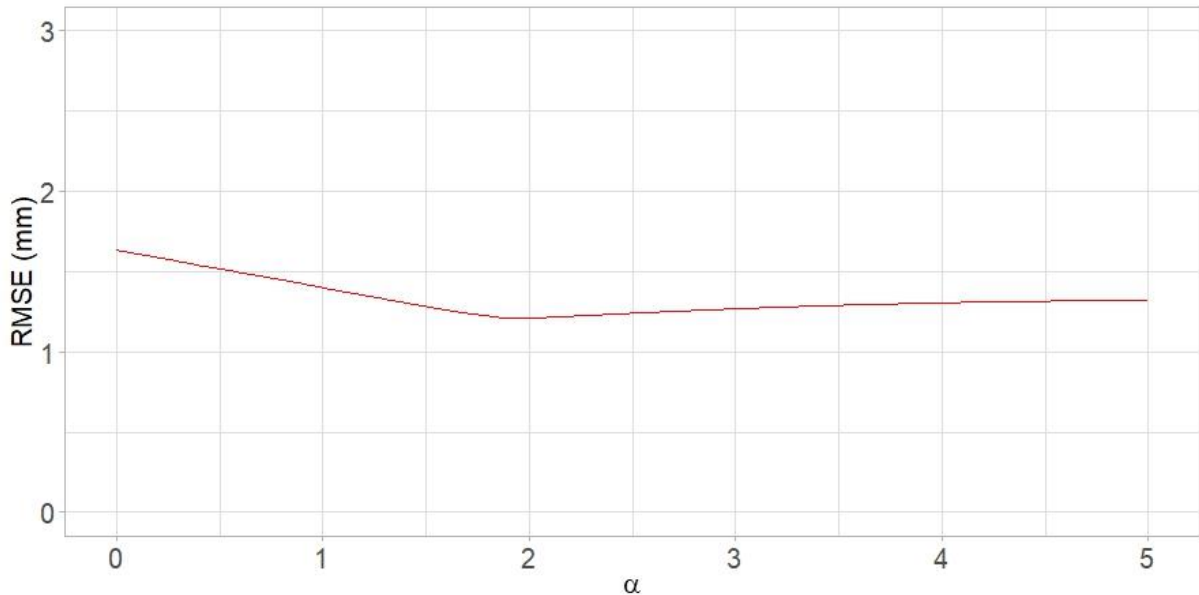
$$\widehat{R}_p = \sum_{i=1}^n w_i R_i \quad (15)$$

$$w_i = \frac{d_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\alpha}} \quad (16)$$

em que R_p é o valor desconhecido de chuva (mm); w_i e R_i são o peso e valor medido de chuva (mm) de um determinado ponto i amostrado; d_i , a distância entre o ponto i e o valor desconhecido; e α , o valor da potência, um parâmetro de controle. O valor de α foi determinado para cada intervalo de tempo com pelo menos uma estação registrando precipitação não-nula. O cálculo foi realizado por meio de um procedimento de validação cruzada (*Leave One Out Cross-Validation*, LOOCV), em

que se retira um ponto amostrado e calcula-se o valor previsto de precipitação em seu local. Repete-se o procedimento para todos os pontos e se utiliza o valor de potência que minimiza o erro da predição. Na Figura (14), em que a relação entre os valores de potência e o Erro Médio Quadrático (RMSE, *Root Mean Squared Error*) é descrita. A potência foi calculada dentro de uma faixa de 0 a 5, como em Chen e Liu (2012).

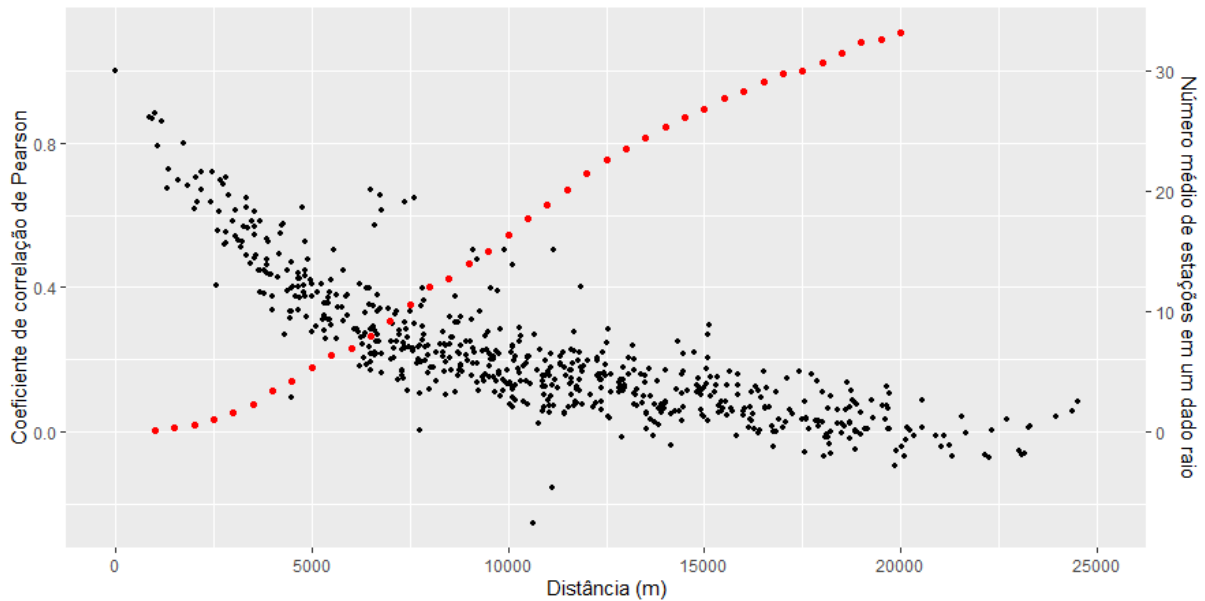
Figura 14: Gráfico entre valor da potência da interpolação e RMSE calculado



Fonte: Autoria Própria

Além da potência, é recomendável estabelecer uma distância máxima aceitável entre um ponto com valor observado e outro não-amostrado, a fim de evitar que observações distantes e com baixa correlação sejam utilizadas no cálculo. Para determinar essa distância, construiu-se um correlograma espacial, relacionando-se a correlação das leituras de precipitação não-nulas de 10 min entre cada par de estação e distância entre elas para o ano hidrológico de 15-16. Este cálculo foi feito para cada combinação possível entre pares das estações da rede. Além do correlograma, também foi calculado o número médio de estações em um raio de determinado comprimento, começando com 2 km e indo até 20 km. O resultado de tal análise pode ser visto na Figura (15).

Figura 15: Correlograma espacial das leituras não-nulas (pontos pretos) e número médio de estações circunscritas por círculos de raios equivalentes às distâncias entre estações (pontos vermelhos)



Fonte: Autoria própria

A partir de 10 km, observa-se que a correlação linear entre os registros das estações é de cerca de 0,2, o que sugere que eles sejam “aproximadamente” independentes. Essa distância foi considerada como a máxima admissível para interpolação, o que resulta em um número médio de estações para a interpolação em um ponto igual a 15 (número médio de estações em um raio de 10 km de cada estação). O número mínimo de estações operantes em um dado momento para realizar a interpolação foi definido como 12. A resolução espacial adotada para o grid gerado foi 1 km² (1 km x 1 km). Este valor é igual ao utilizado em outros estudos com objetivos similares (Biondi; Greco; De Luca, 2021, p. 6; Kim *et al.*, 2019, p. 417; Mineo *et al.*, 2018, p. 477).

Por fim, para as estimativas de chuva por área das durações a serem analisadas, foi necessário agregar as leituras para as durações de interesse por meio de uma janela móvel. Em síntese, para a duração de 1h em um dia, a primeira leitura em um dado ponto do grid interpolado seria a soma das leituras de 0:10 a 1:00; a segunda seria de 0:20 às 1:10 e assim por diante. Inicialmente, para os dois métodos do cálculo do fator, foram escolhidas as durações de 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4h, 8 h, 14 h e 24 h, as quais são equivalentes às utilizadas na relação Intensidade-Duração-Frequência desenvolvida por Pinheiro e Naghettini (1998) e também analisada por Santos (2002). Os *grids* anuais foram construídos tanto para os anos hidrológicos – usados para

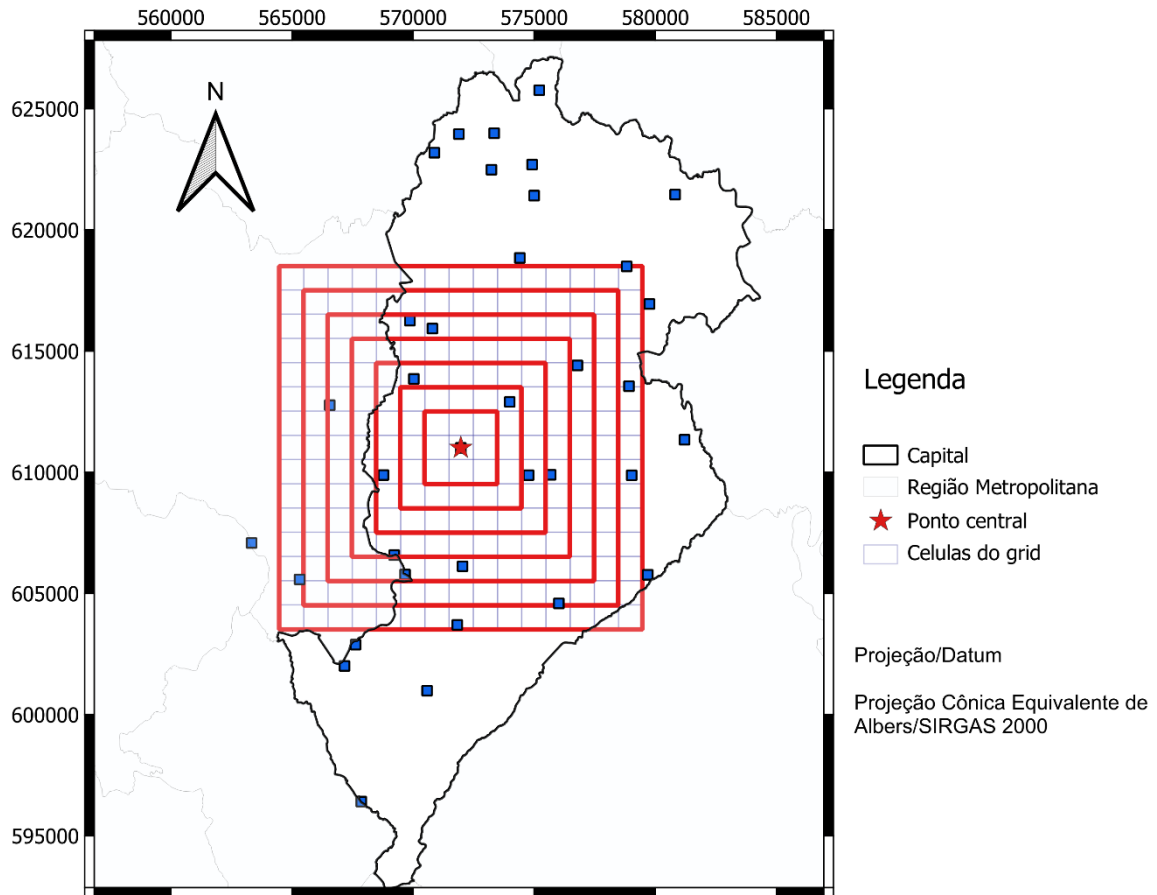
análise estatística na área-fixa – quanto para os anos civis – usados para identificação de tormentas no centro de evento de tempestade.

4.2 Cálculo por área-fixa

4.2.1 Cálculo da precipitação média por área e precipitação representativa

O passo inicial para a análise dos fatores via área-fixa consiste em estabelecer a área de referência para análise das precipitações médias por área e a precipitação pontual representativa da bacia. Primeiramente, as precipitações médias por área foram calculadas para áreas quadradas ao redor do ponto central da rede, considerada como o posto E15. Tal local foi escolhido para minimizar erros de interpolação por efeito de borda. A Figura (16) mostra a disposição das áreas de referência em relação à rede. Visto que o trabalho necessita da descrição de precipitação por área, as posições das estações e áreas foram reprojctadas para a Projeção Cônica Equivalente de Albers, indicada para cálculos de área acima de 50 km² (Diretoria de Geociências, 2019, p. 40). Nessa projeção, as distâncias entre pontos podem ser distorcidas, mas as áreas se mantêm inalteradas em relação a sua representação do globo, ideal para análise espacial de tais extensões.

Figura 16: Áreas de referência para cálculo da precipitação média por área



Fonte: Autoria própria

A precipitação por área em si é dada como a média simples entre as estimativas pontuais capturadas dentro da área analisada em um dado instante avaliado.

Para a precipitação representativa, ela será considerada como a média das estimativas pontuais das células individuais contidas na área analisada. Formalmente, ela poderá ser definida como mostrado na Equação (17) (Bennett *et al.*, 2016, p. 3):

$$\bar{R}_F^{pt} = \frac{1}{A} \int_{\Omega} R_F(x, t) dx \quad (17)$$

em que \bar{R}_F^{pt} é a precipitação representativa para uma dada frequência, A é a dimensão da área do domínio espacial Ω para qual a precipitação representativa está sendo analisada (km^2); e R_F é a estimativa pontual em um ponto x dentro do domínio Ω e duração t . Essa abordagem foi utilizada pois seu uso é indicado para locais onde a

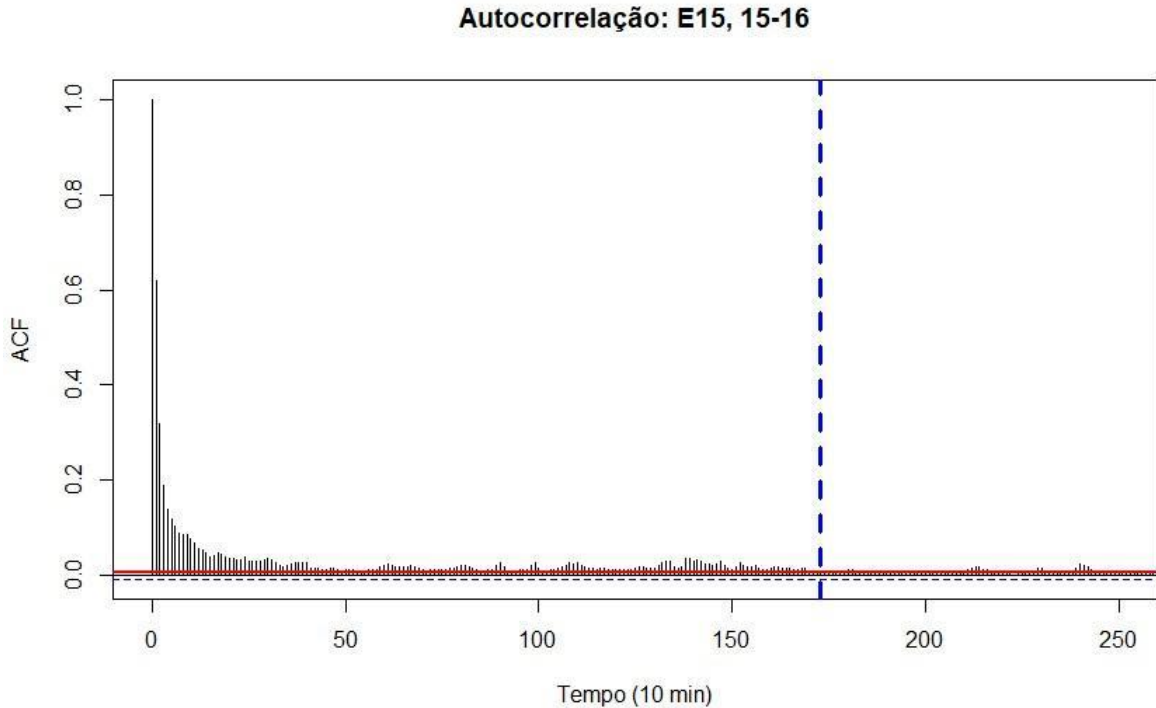
chuva apresenta uma forte tendência espacial, como em casos de forte gradiente de elevação (Bennett *et al.*, 2016, p. 3), que seria o caso para Belo Horizonte. Exemplificando, a precipitação representativa para a área de 9 km², 1 hora e tempo de retorno de 2 anos seria a média das estimativas de mesma duração e frequência relativa das 9 células do *grid* que compõem a área analisada.

4.2.2 Inferência das MEVDs

A inferência das MEVDs necessita, primeiramente, da separação de eventos ordinários para a modelagem das distribuições anuais. Eventos ordinários são designados como “valores de precipitação máximos não-nulos observados e estatisticamente independentes em períodos chuvosos” (Marra *et al.*, 2018, p. 28). Para precipitação diária, eles eram contabilizados como dias chuvosos (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 123) mas o uso de uma série temporal com menor discretização temporal necessita de outro método para identificação de tais eventos. A esse fim, foi empregado a técnica descrita por Marra *et al.* (2018), inicialmente usada para dados horários. Como explicado anteriormente, esta estrutura tem como preceito principal identificar o intervalo de tempo mínimo entre instantes da série temporal que garanta a independência das observações.

A separação segue sete etapas distintas: (i) para o ponto/área analisada, a série temporal de valores de precipitação para um dado ano é construída e a autocorrelação dela é calculada para até 15 dias de *lag*; (ii) o valor de autocorrelação de ruído é definido como o terceiro quartil da autocorrelação observada; (iii) o primeiro valor de *lag* cuja autocorrelação seja menor ou igual ao valor de ruído é definido como tempo mínimo entre eventos (o intervalo também deve ser igual ou um múltiplo da duração analisada); (iv) extrai-se os maiores valores de precipitação observados no ano, excluindo todas as outras observações dentro do intervalo de separação mínimo estabelecido; (v) repete-se tal procedimento até que não haja mais eventos maiores que 0.5 mm (adaptação sugerida por Lutz *et al.* (2024)); (vi), no caso de anos consecutivos, verifica-se se o primeiro evento do ano subsequente não esteja dentro do intervalo de tempo mínimo especificado do último evento do ano anterior. A Figura (17) mostra uma exemplificação gráfica de como obter o intervalo mínimo de separação.

Figura 17: Série de autocorrelação com o valor de ruído (linha vermelha) e intervalo mínimo de separação (linha tracejada azul)



Fonte: Autoria própria

Para a modelagem dos eventos ordinários anuais, foi adotada a distribuição de Weibull. A inferência dos parâmetros de escala e posição da distribuição, λ e κ , respectivamente, foi feita através de Máxima Verossimilhança.

Por fim, o cálculo das probabilidades de não-excedência para a distribuição MEVD de uma variável do tipo Weibull pode ser obtida através da Equação (18) (Marani; Ignaccolo, 2015, p. 123):

$$\zeta_{MEV}(y) \cong \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \exp \left[-\exp \left(\frac{y^{\kappa_j}}{\lambda_j^{\kappa_j}} \right) + \ln n_j \right] \quad (18)$$

As estimativas de precipitação foram calculadas para os intervalos de recorrência de 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos, os quais também foram analisados em Santos (2002). O processo de análise metaestística é repetido para todos os 225 pontos dentro da área de referência máxima e para as precipitações média por área calculadas para as 7 áreas de referência analisadas.

Por fim, o cálculo final do fator para área-fixa é realizado através da Equação (19):

$$ARF(A, F, d) = \frac{C_F(A, d)}{\bar{R}_F^{pt}(d)} \quad (19)$$

em que ARF é o fator para duração d , área A e frequência de não-excedência F e C_F é a estimativa de chuva média por área de mesma frequência, área e duração analisados.

4.3 Cálculo por centro de evento de tempestade

4.3.1 Identificação de eventos e dados adicionais

A primeira etapa para o desenvolvimento do cálculo é identificar as tormentas a serem analisadas. Visto que o interesse na aplicação do fator é em eventos extremos e concepção de chuvas de projeto, deve-se estabelecer critérios para a identificação de tempestades significativas que afetaram a área analisada. Optou-se pela identificação de tempestades com tempo de retorno superior a 10 anos em um dado intervalo, similar ao critério adotado por Kim *et al.* (2019, p. 417). A esse fim, foi empregada a equação IDF por Pinheiro e Naghettini (1998). Apesar de ela ter sido desenvolvida por um estudo com quase 30 anos e que o regime de chuva poderia ter sido afetado por fatos como a mudança climática, seu uso neste trabalho é apenas para identificação dos eventos extremos, sendo que ela não terá influência direta nos resultados de ARF produzidos pelo centro de evento.

Diferentemente das formas tradicionais das curvas utilizadas no Brasil, a curva IDF de Pinheiro e Naghettini (1998) é de caráter regional ao invés de local, desenvolvida para a RMBH. Ela está condicionada a precipitação média anual de um dado ponto na região. Assim, não existe uma estimativa única de intensidade para 30 min e tempo de retorno de 10 anos para a região inteira, por exemplo. A fórmula da curva IDF da região é dada na Equação (20) (Pinheiro; Naghettini, 1998, p. 84):

$$\hat{I}_{T,j,d} = 0.76542d^{-0.7059} P_j^{0.5360} \mu_{T,d} \quad (20)$$

em que $\hat{I}_{T,j,d}$ é a intensidade de precipitação média com tempo de retorno T , no local j (mm/min ou mm/h); d é a duração da precipitação (em min ou h); P_j é a precipitação média anual do local (mm/ano) e $\mu_{T,d}$ é o quantil adimensional regional para a dada duração e tempo de retorno utilizados. Os quantis são tabelados e já definidos no trabalho de Pinheiro e Naghettini (1998), e, para o tempo de retorno de 10 anos e durações analisadas, apresentam os valores mostrados na Tabela (1).

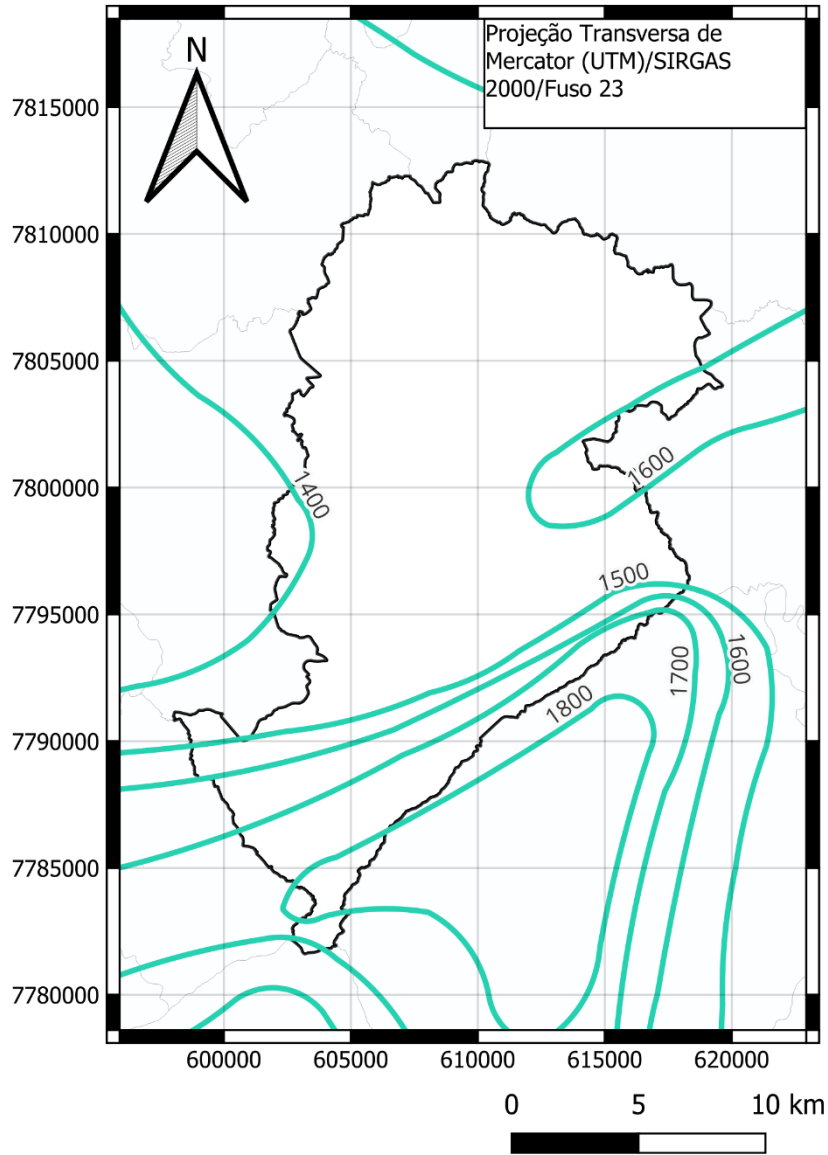
Tabela 1: Quantis adimensionais regionais para tempo de retorno de 10 anos

Duração	$\mu_{T,d}$
10 min	1.428
30 min	1.406
1 h	1.445
2 h	1.439
3 h	1.445
4 h	1.432
8 h	1.451
14 h	1.503
24 h	1.505

Fonte: Pinheiro; Naghettini (1998)

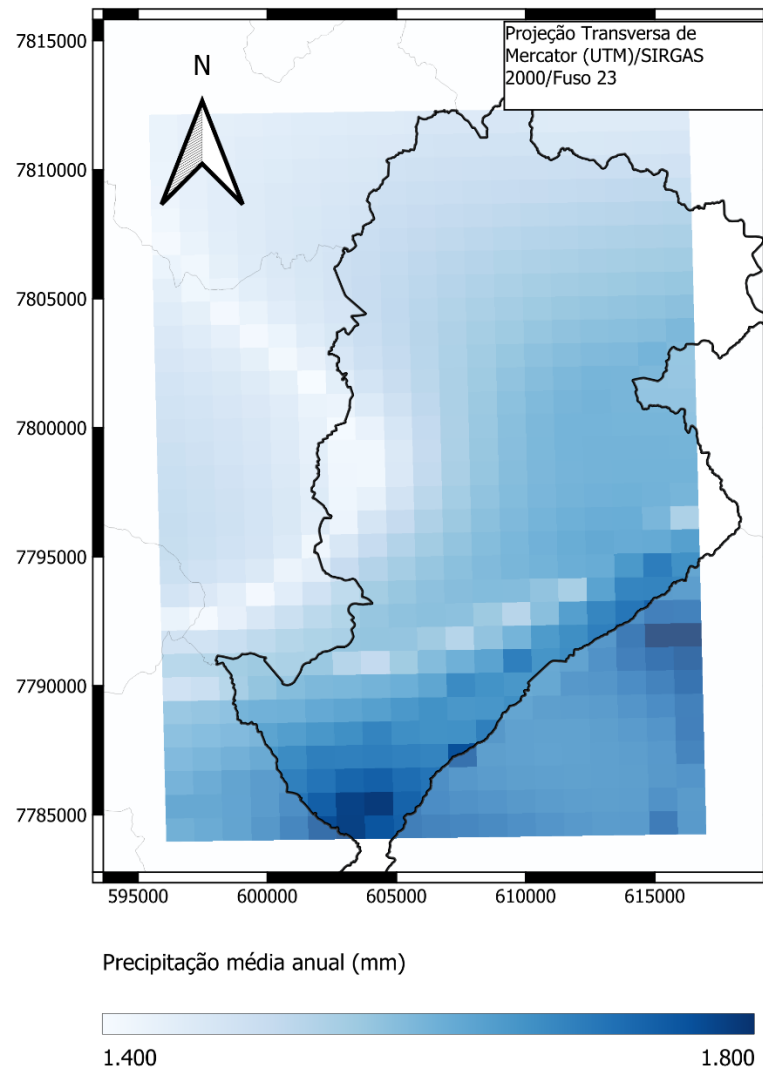
Visto que a precipitação média anual é uma das variáveis da fórmula, é necessário estimá-la para o cálculo dos limiars de intensidade para identificação. A esse fim, o mapa isoietal publicado no estudo original foi digitalizado e convertido para *raster* por meio de interpolação linear. A Figura (18) e (19) mostram as isoietas digitalizadas para a cidade de Belo Horizonte e o *raster* produzido pela interpolação, respectivamente.

Figura 18: Mapa isoietal das precipitações médias anuais de Pinheiro, Naghettini (1998) para Belo Horizonte



Fonte: Autoria própria

Figura 19: Raster interpolado das precipitações médias anuais para cada ponto do grid da rede analisada



Fonte: Autoria própria

Com a altura anual média estimada para todos os pontos do *grid* original, é possível obter as estimativas de intensidade para diferentes durações em cada pixel. Os *grids* interpolados das séries dos anos civis foram analisados e se identificou os instantes em que a precipitação máxima registrada fosse superior a intensidade prevista para o tempo de retorno de 10 anos no ponto analisado. Os anos civis foram utilizados ao invés dos anos hidrológicos visto que o foco principal desta análise seria o estudo de eventos individuais em vez de análise estatística, logo, o uso dos anos civis permitiria a análise de eventos que ocorreram em janeiro de 2012, por exemplo, os quais seriam

desconsiderados caso fosse utilizado o ano hidrológico de 2012-2013, cujo começo do ano seria em outubro de 2012.

Por fim, foi necessário definir a extensão temporal dos eventos identificados. Pela forma como o algoritmo de detecção foi elaborado, ele apenas identifica intervalos de tempo que a intensidade prevista ultrapassou o limiar calculado para a duração analisada, mas não identifica o início e fim exatos do evento. Como exemplo, toma-se a chuva de 28 de janeiro de 2020, com duração de 3 h e tempo de retorno estimado próximo a 10.000 anos (Caputo; Siqueira, 2020, p. 4). Nesse caso, foram 183 mm precipitados em 150 minutos, mas o algoritmo também detectou o evento para 24 horas, visto que os 183 mm nesta duração levavam a uma intensidade média superior a intensidade prevista pela IDF para 10 anos.

Para a definição dos eventos, foram adotados os critérios definidos por Biondi, Greco e De Luca (2021, p. 4): para a estação central da tormenta (a que apresentar maior precipitação acumulada no intervalo analisado), o início do evento será dado a partir do momento que a intensidade registrada superar 8 mm/10 min, com fim quando for inferior a 2.4 mm/10 min e manter-se abaixo desse limiar nas próximas 6 h. Houve uma tentativa de utilizar outros valores para limiares de precipitação para a definição da duração de tempestade, como os limiares estabelecidos para análise de distribuição temporal de chuva (Powell *et al.*, 2007), mas eles demonstraram empecilhos como eventos apresentando durações maiores que esperado. Por este motivo, decidiu-se usar os critérios apresentados por Biondi, Greco e De Luca (2021), que apresentaram o desempenho mais consistente para a definição da extensão temporal das tempestades.

Apesar da rede utilizada ser relativamente extensa em questão de monitoramento urbano para o contexto brasileiro, ela ainda se mostrava insuficiente para a descrição espacial de alguns eventos. Devido ao tamanho do perímetro do território da cidade comparado a sua área, a chance de um evento se localizar próximo à borda se mostrou relativamente alta. Para tentar auxiliar na descrição espacial dos eventos identificados, foram empregados dados das estações pluviométricas automáticas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), também com discretização temporal de 10 min. Assim como os dados da rede

principal, verificou-se a precipitação diária acumulada para capturar erros grosseiros ou intervalos não registrados durante os eventos. Como essa rede foi implantada em meados de 2014, somente eventos em anos posteriores foram analisados.

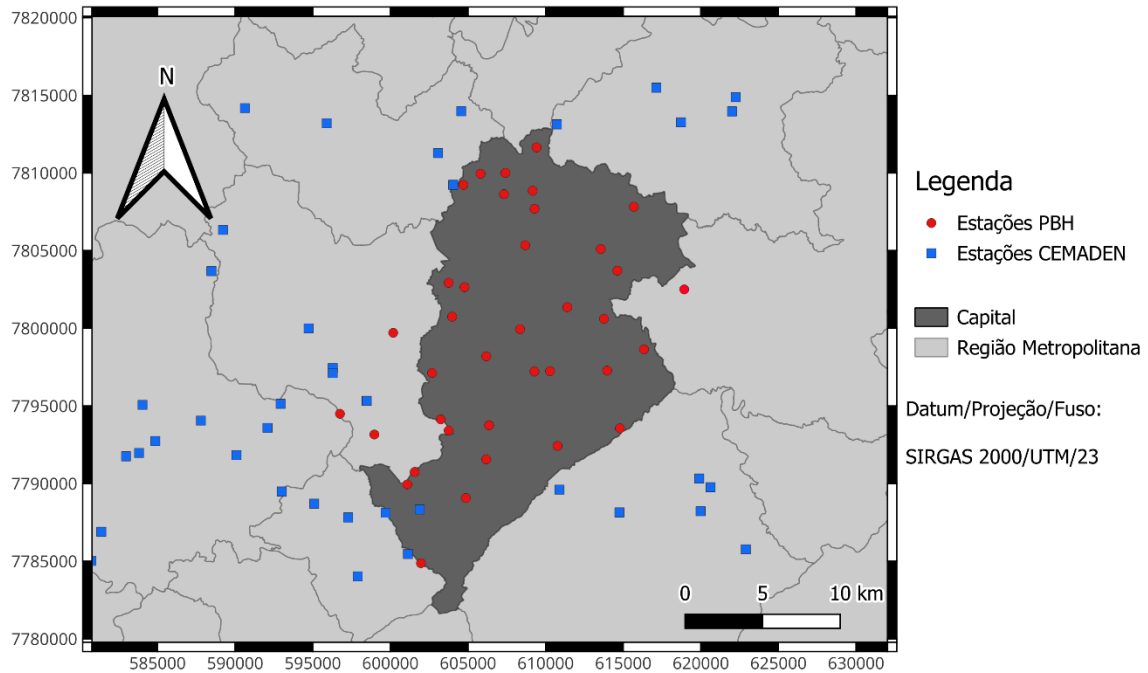
O Quadro (2) apresenta o código e nome das estações selecionadas. O mapa da rede para o centro de evento pode ser visto na Figura (20). Assim como na análise da área-fixa, para o intervalo identificado, foi refeito o mesmo cálculo de campo de chuva por IDW utilizando LOOCV para o cálculo da potência e com os mesmos parâmetros utilizados anteriormente para a análise por área-fixa (10 km de raio, 15 estações ao máximo para interpolação), mas com a adição das informações obtidas pelas estações do CEMADEN. Ainda assim, algumas tempestades identificadas não puderam ser analisadas por estarem à borda da rede ou em locais em que ela é esparsa. A área de análise para tormentas da região, contabilizando as estações adicionadas do CEMADEN, apresenta uma extensão de 1.720 km².

Quadro 2: Estações do CEMADEN utilizadas

Nome	Código	Longitude	Latitude
NOVA LIMA Vale do Sereno	314480501A	-43.94	-19.99
NOVA LIMA Centro	314480503A	-43.85	-19.98
NOVA LIMA Oswaldo Barbosa Penna II	314480505A	-43.85	-20.00
NOVA LIMA Retiro	314480506A	-43.85	-19.98
SABARA Nossa Senhora de Fátima	315670004A	-44.07	-19.87
BELO HORIZONTE Vila Pinho	310620017A	-44.03	-20.00
BETIM Centro	310670501A	-44.20	-19.97
BETIM Brasileira	310670502A	-44.21	-19.97
BETIM Petrovale	310670503A	-44.11	-19.99
BETIM Chácara	310670504A	-44.19	-19.96
BETIM Icaivera	310670505A	-44.15	-19.86
BETIM Bom Retiro	310670506A	-44.20	-19.94
BETIM Jardim Alterosas	310670507A	-44.16	-19.95
BETIM Vianópolis	310670508A	-44.27	-19.94
BETIM São Caetano	310670509A	-44.11	-19.94
BETIM Guanabara	310670511A	-44.14	-19.97
BETIM Jardim Teresópolis	310670512A	-44.12	-19.95
CONTAGEM Centro	311860101A	-44.08	-19.92
CONTAGEM Retiro	311860102A	-44.15	-19.84
CONTAGEM Bairro Praia	311860103A	-44.09	-19.89
CONTAGEM Fonte Grande	311860104A	-44.08	-19.92
CONTAGEM Eldorado	311860105A	-44.06	-19.94
IBIRITÉ Jardim das Rosas	312980602A	-44.09	-20.00
BELO HORIZONTE Rodovia MG-30	310620014A	-43.90	-20.00
NOVA LIMA Jardim Canadá	314480502A	-43.99	-20.07
NOVA LIMA Honório Bicalho	314480504A	-43.83	-20.02
BETIM Citrolândia	310670510A	-44.23	-20.03
BETIM Casa Amarela	310670513A	-44.22	-20.01
IBIRITÉ Águia Dourada	312980603A	-44.03	-20.02
IBIRITÉ Novo Horizonte	312980604A	-44.06	-20.04
IBIRITÉ Marilândia	312980605A	-44.05	-20.00
IBIRITÉ Serra Dourada	312980606A	-44.07	-20.00
RIBERÃO DAS NEVES Riberão das Neves	315460621H	-44.02	-19.79
RIBERÃO DAS NEVES Savassi	315460602A	-44.08	-19.77
RIBERÃO DAS NEVES São Jose	315460603A	-44.01	-19.81
RIBERÃO DAS NEVES Areias I	315460604A	-44.00	-19.77
RIBERÃO DAS NEVES Veneza	315460605A	-44.13	-19.77
SANTA LUZIA Santa Luzia	315780724H	-43.87	-19.77
SANTA LUZIA São Cosme	315780701A	-43.94	-19.77
SANTA LUZIA Industrial Americano	315780702A	-43.83	-19.76
SANTA LUZIA Carreira Comprida	315780703A	-43.88	-19.75
SANTA LUZIA Palmital	315780704A	-43.84	-19.77

Fonte: CEMADEN

Figura 20: Mapa da rede incluindo estações do CEMADEN



Fonte: Autoria própria

4.3.2 Geometrias de referência para análise espacial

O cálculo do fator para cada evento foi realizado através da Equação (21). Para uma dada duração, o fator final foi estimado como a média dos fatores calculados para os eventos de mesma duração.

$$ARF(A, d) = \frac{C(A, d)}{R_c(d)} \quad (21)$$

em que R_c representa a precipitação pontual máxima registrada no evento, sendo definido como o centro da tormenta.

Foram consideradas três geometrias de referências distintas descritas na literatura recente para análise espacial dos eventos identificados: formas regulares concêntricas ao centro do evento (Thorndahl *et al.* (2019)); o centro-móvel, utilizado por Biondi *et al.* (2021); e formas elípticas concêntricas ao centro da tempestade, inicialmente proposta para uso em ARF por Olivera *et al.* (2008) e recentemente usadas por Kim *et al.* (2019). As áreas analisadas das geometrias foram idênticas às empregadas no método da área-fixa.

Foram escolhidos quadrados para as formas utilizadas no primeiro método (adiante referido como centro-fixado), devido a fácil computação da forma e a fim de se manter as dimensões das áreas analisadas compatíveis com a área-fixa.

O centro-móvel, por sua vez, utiliza as mesmas formas regulares aplicadas no centro-fixado, mas, em contrapartida, tenta maximizar os índices de precipitação contidas em seu interior, podendo varrer a cena gerada para encontrar tais campos, independentemente da posição do centro da tempestade.

Por fim, as formas elípticas que, diferentemente das formas regulares, podem apresentar configurações diferentes entre o tamanho do seu eixo e ângulo para análise espacial. Para encontrar as células que pertencem ao formato analisado, as coordenadas de seus centros devem obedecer a relação exposta na Equação (22) (Kim *et al.*, 2019, p. 418):

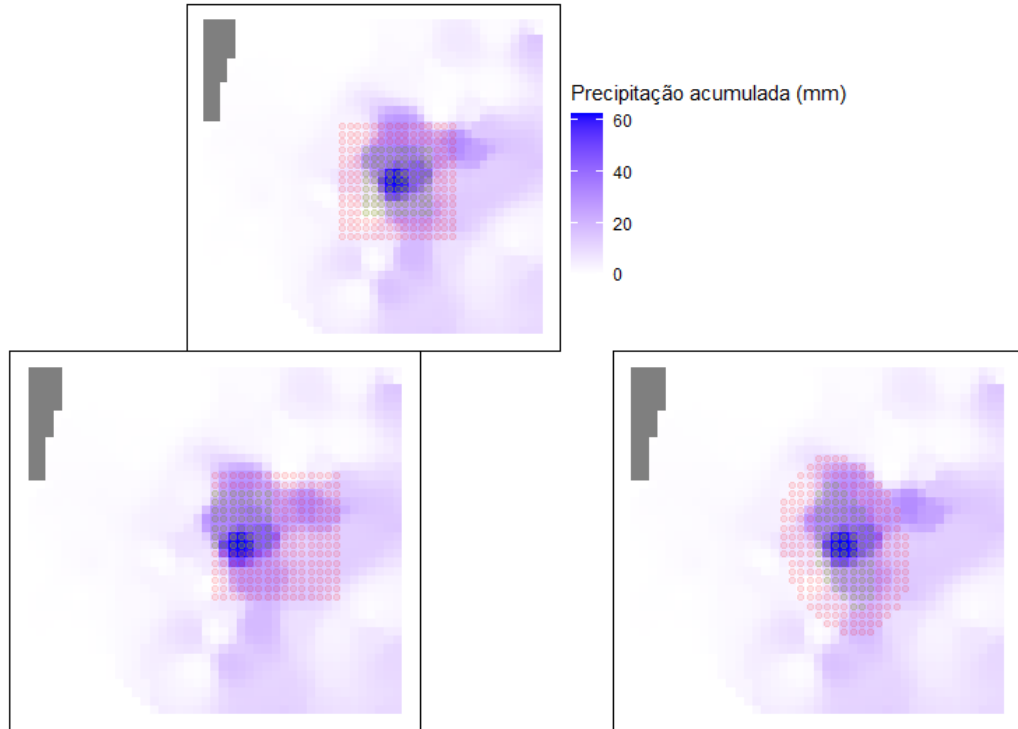
$$\frac{(x \cos \theta - y \sin \theta)^2}{r^2} + \frac{(x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{\left(\frac{A}{\pi r}\right)^2} < 1 \quad (22)$$

Em que x e y são as coordenadas do centro da célula em relação ao centro da tempestade; θ é o ângulo entre o eixo maior e menor, com r sendo a razão entre eles; e A é a área da elipse analisada.

Para a definição dos parâmetros da elipse, ela foi definida pelo conjunto que apresentasse o maior índice de precipitação contido na forma descrita. Para o cálculo da maximização, foi adotado o procedimento descrito por Kang *et al.* (2019, p. 4), em que se varia o ângulo e a razão, calculando a precipitação contida para cada permutação de pares entre os dois parâmetros e, então, escolhe-se a forma que produza a maior altura pluviométrica precipitada em seu interior. Os ângulos variam entre 0° e 360° , em passos de 10° graus; e as razões, de 1 a 15, em passos de 0,2. A Figura (21) mostra um exemplo de aplicação das três geometrias escolhidas para um evento identificado em 18/11/2020.

Figura 21: Exemplo de aplicação das geometrias

Evento - 18/11/2020 21:40 - 23:40



Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Área das elipses encontradas para o evento de 18/11/2020

Área delimitada (km ²)	Área calculada (km ²)
9	9
25	31
49	57
81	89
121	131
169	183
225	241

Fonte: Autoria própria

Um fato a ser notado é que, mesmo delimitando a área máxima permitida, a elipse ótima encontrada ainda apresentava uma dimensão superior a estipulada, como indicado na Tabela (2).

Nesse caso, para eventos de mesma duração, foi considerado o fator médio para a área média calculada. Fatores associados às áreas previamente definidas foram obtidos via interpolação linear.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fatores de área-fixa

As Tabelas (3) e (4) mostram os números médios de máximos anuais identificados para as 225 células do grid da área considerada para cada conjunto duração/célula e ano hidrológico/célula, respectivamente. As Tabelas (5) e (6) apresentam o intervalo mínimo de separação entre eles para cada duração e ano hidrológico analisados. Como o tempo mínimo deve ser igual ou maior que a duração analisada, observa-se que o número de eventos ordinários diminuiu significativamente para as durações de 8 h, 14 h e 24 h. Além disso, o pequeno aumento de número de máximos anuais identificados para as durações de 30 min a 3 h poderia ser atribuído ao limiar mínimo de 0.5 mm (Lutz *et al.*, 2024, p. 5), visto que haveria um maior número de intervalos com precipitações maiores que tal valor devido à agregação dos dados.

Tabela 3: Média de eventos ordinários identificados para cada duração

Duração (min)	10	30	1 h	2 h	3 h	4 h	8 h	14h	24 h
	min	min							
Média de eventos ordinários	80	90	91	90	87	84	68	56	48

Fonte: Autoria própria

Tabela 4: Média de eventos ordinários identificados para cada ano hidrológico

Ano hidrológico	12-13	15-16	16-17	17-18	20-21	21-22	22-23	23-24
Média de eventos ordinários	101	53	48	76	80	45	115	98

Fonte: Autoria própria

Tabela 5: Intervalo mínimo de separação médio calculado para cada duração

Duração (min)	10	30	1 h	2 h	3 h	4 h	8 h	14h	24 h
	min	min							
Intervalo mínimo de separação médio (h)	14.5	15.6	17.5	19.9	23.3	26.0	36.5	50.1	64.1

Fonte: Autoria própria

Tabela 6: Intervalo mínimo de separação médio calculado para cada ano hidrológico

Ano hidrológico	12-	15-	16-	17-	20-	21-	22-	23-
	13	16	17	18	21	22	23	24
Intervalo mínimo de separação médio (h)	13.5	42.2	37.8	29.4	24.1	59.5	17.6	14.0

Fonte: Autoria própria

A maior parte dos conjuntos ano/duração apresentou um número de eventos ordinários superiores a 50. Marra *et al.* (2018, p. 37) destaca que tal limiar seria importante para obter estimativas robustas de quantis de tempo de retorno de 100

anos para séries históricas curtas. Contudo, como mencionado anteriormente, o número de máximos identificados caiu consideravelmente para as longas durações, o que poderia levar a maiores erros de previsões de quantis para tais durações.

Independentemente, o número de máximos anuais se mostrou particularmente elevado para alguns anos analisados – especificamente, 22-23. Para as curtas durações, considerando que o intervalo médio de separação foi inferior a 24 h, há uma possibilidade alta de que foram identificados mais de um máximo em alguns dias em tais ocasiões.

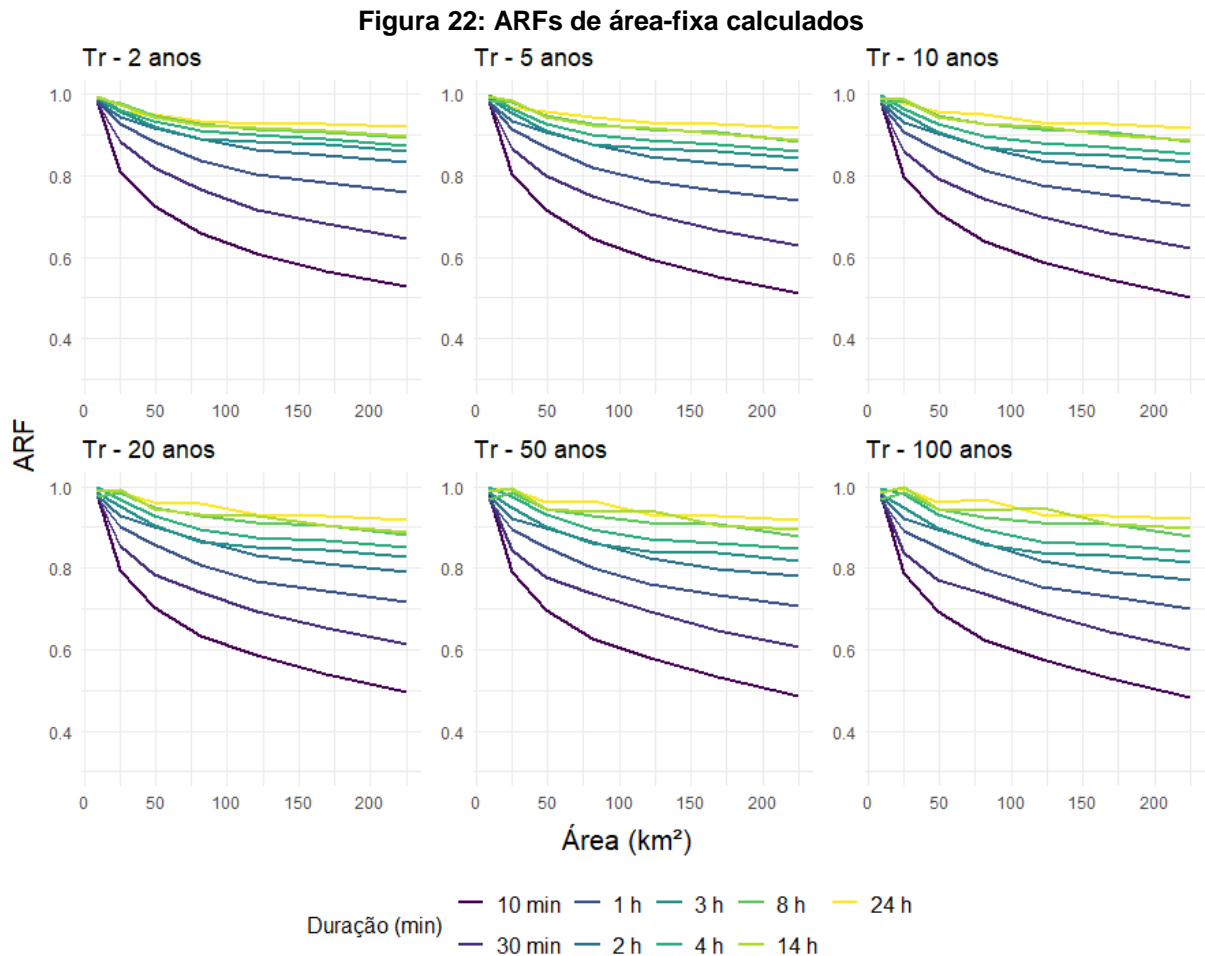
O uso de MEVDs para análise de dados de precipitação ficou mais associado a análise de chuva diária, com poucas variações do método dedicado a dados subdiários até o momento. Em relação à separação de eventos, originalmente foi utilizado a metodologia proposta por Lutz *et al.* (2024) para tal propósito. Nela, o intervalo de separação mínimo é considerado como o primeiro *lag* cuja autocorrelação seja menor que um valor pré-fixado, definido como 0,1 em seu trabalho. Contudo, ao utilizar tal método, o número de eventos ordinários identificados por ano ultrapassava mais de centenas (até milhares) de eventos por ano, com o valor de 0,1 sendo demasiadamente grande para a identificação da independência entre máximos anuais. Por causa disso, foi tomada a decisão de utilizar a separação originalmente sugerida por Marra *et al.* (2018).

Para possíveis adaptações para o uso de tal método de separação, há algumas sugestões a serem feitas. Uma alternativa para evitar o número exacerbado de eventos em um dado ano seria estabelecer um quantil maior de autocorrelação para identificação do intervalo mínimo (como 90% de não-excedência ao invés do terceiro quartil – 75%), mas haveria o risco de diminuir ainda mais o número de eventos ordinários para os outros anos e durações, especialmente 24 h,

Outra possibilidade seria aumentar a altura pluviométrica de “corte” sugerida por Lutz *et al.* (2024), possivelmente variando-a a cada duração, p. ex.: 0.5 mm para 1 h ou 1 mm para 2 h. Contudo, como os testes desenvolvidos se limitaram ao presente estudo de caso, admite-se que uma recomendação nessa linha seria inadequada.

Além da separação por autocorrelação, uma outra possível alternativa para separação de eventos ordinários é a separação por tempestades, proposta por Marra, Borga e Morin (2020), em que a separação dos máximos é feita através da identificação de intervalos chuvosos separados por janelas secas, com a duração do evento ordinário sendo definida de evento a evento. Contudo, os autores destacam que a duração de tal intervalo “seco” deve ser feita de acordo com o clima da região, sendo que o trabalho original foi realizado na costa sudeste do Mediterrâneo. Logo, tal método deveria passar por uma adaptação anterior para serem utilizados no presente estudo e contexto climático local.

A Figura (22) mostra os resultados obtidos para todas as durações analisadas por área-fixa e para todos os tempos de retorno avaliados (salvo 25 anos). Os valores de ARF de área-fixa em íntegra podem vistos no Apêndice A.



Fonte: Autoria própria

Para as durações inferiores a 8 horas, observa-se o comportamento esperado: os fatores são inversamente proporcionais ao tempo de retorno estimado. Contudo, nas três durações mais longas, o comportamento demonstrado pelos ARFs diferiu desse padrão, sendo os mesmos invariantes ao tempo de retorno ou até aumentando com ele para algumas combinações de áreas e durações de 14 h e 24 h.

Há o fato de que, diferentemente de outros métodos de cálculo de ARF – como em estruturas analíticas, em que se pode “travar” o fator a uma função e garantir que ela seja monotônica decrescente, menor que 1 e garantir a sua dependência com a frequência relativa – não há qualquer restrição que impeça esse comportamento anômalo.

Na grande maioria dos estudos, infere-se que formações frontais sejam o principal mecanismo de formação dos eventos de maior duração na região analisada, e que

essa prevalência seja substancialmente inferior para menores durações (Mineo *et al.*, 2018, p. 476). No caso específico de Belo Horizonte, há a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) como mecanismo predominante em tais durações. Ela consiste em uma banda convectiva formada na bacia Amazônica e que se estende até o Sudeste brasileiro. Ela é caracterizada por ser um fenômeno de longa duração, sendo que a formação pode apresentar múltiplos dias de duração (Carvalho; Jones; Liebmann, 2004). Além da ZCAS, há um pequeno efeito de orografia decorrente da presença da Serra do Curral, mas sua influência sobre o regime de precipitação do município é mais notável na região imediatamente próxima ao acidente geográfico.

A anomalia verificada é algo pouco reportado na literatura. Os estudos recentes de Kang *et al.* (2019) e Pietersen, Gericke e Smithers (2023) também a apresentaram. Esses autores sugerem que as precipitações máximas por área com maiores de tempo de retorno seriam originadas de fenômenos que cobrem uma grande extensão da bacia e múltiplos centros (ciclones tropicais). Já eventos associados a menores tempos de retorno seriam provenientes de fenômenos mais localizados. Apesar de haver alguns mecanismos geradores de chuva que poderiam corroborar com esta noção em Belo Horizonte (como a já citada ZCAS e o efeito de orografia), a pequena extensão territorial analisada e existência de algumas durações subdiárias com tais anomalias sugere que esse não seria o motivo singular para o comportamento verificado. Outros motivos poderiam ser a técnica empregada para separação dos máximos anuais, a qual pode ter reduzido a amostra de eventos ordinários empregados na inferência do modelo estatístico, ou a extensão das séries temporais analisadas, visto que efeitos de larga escala e longo termo impactam as características dos eventos amostrados.

Além disso, há o fato de que as áreas analisadas pelo estudo possivelmente não revelam a natureza real do comportamento do fator para tais durações, sendo necessário uma avaliação em uma área mais extensa, especialmente ao se tratar de fenômenos de longa duração e grande abrangência espacial. A cobertura espacial média de um sistema frontal é de cerca de 1.000 a 10.000 km² (Willems, 2001 *apud* Biondi; Greco; De Luca, 2021, p. 5), ou com as ZCAS chegando a cobrir o estado por inteiro. Por causa da uniformidade de tais eventos e considerando que a maior área analisada foi de 225 km², admite-se plausível que a extensão analisada não seja

capaz de capturar em sua completude o comportamento das precipitações dessa natureza.

Apesar do comportamento anômalo do fator para as longas durações, o uso da MEVDs permitiu conduzir a análise de frequência de maneira satisfatória para o caso analisado, visto ainda que ela ainda é uma das poucas alternativas viáveis para a base de dados utilizada. Contudo, por causa dos vieses reportados para os casos de inferência em que o tempo de retorno é muito maior que a extensão da série histórica (Zorzetto; Botter; Marani, 2016; Marra *et al.*, 2018), é válido ressaltar que se deve analisar os resultados para os quantis de 50 e 100 anos com cautela.

Considerando que este é possivelmente o segundo trabalho sobre ARFs utilizando tal técnica de análise estatística, e possivelmente o primeiro a utilizar em regiões tropicais, é necessário ainda observar possíveis desenvolvimentos a respeito da técnica para revisitar os seus resultados no futuro, especialmente, no que se diz em respeito a separação de eventos ordinários.

5.2 Fatores de centro de evento

5.2.1 Eventos identificados

Os eventos identificados e usados para análise se dispõem no Quadro (3). 50% dos eventos foram descartados por se localizarem em pontos onde não seria possível conduzir a análise espacial.

Quadro 3: Eventos identificados e usados para análise

Dia	Usado para análise?
12/02/2016	Sim
04/12/2016	Não
12/01/2017	Sim
08/03/2017	Sim
19/03/2017	Não
03/12/2017	Não
09/12/2017	Sim
30/12/2017	Sim
15/11/2018	Não
24/02/2018	Não
16/03/2018	Não
02/01/2020	Não
03/01/2020	Não
14/01/2020	Sim
19/01/2020	Sim
23/01/2020	Não
28/01/2020	Sim
21/03/2020	Não
18/11/2020	Sim
15/01/2021	Não
07/02/2021	Sim
18/10/2021	Não
11/12/2022	Não
07/12/2022	Sim
30/12/2022	Não
22/01/2023	Sim
12/03/2023	Sim
31/12/2023	Sim
17/01/2024	Não
23/01/2024	Sim
10/10/2024	Não
26/10/2024	Sim

Fonte: Autoria própria

Notavelmente, 6 dos 32 eventos identificados foram em janeiro de 2020. Apesar de apenas três deles terem progredido para análise, tal fato indica o quão extremo foram os fenômenos de precipitação que ocorreram durante aquele mês. Ademais, o algoritmo construído para detecção de tempestades severas os identificou adequadamente. Dos fenômenos analisados por Caputo e Siqueira (2020, p. 7) entre 2011 e 2020 e utilizando a mesma rede, ele identificou todos os eventos com intensidade maiores que tempo de retorno de 10 anos (salvo os de 2014 e 2019, cujos

anos não foram analisados por falta de dados). A concordância com os eventos encontrados no artigo indica o bom desempenho do algoritmo para identificação das tempestades severas.

O Quadro (4) apresenta o início e fim do evento e a categoria de duração a qual ele foi considerado para o cálculo do fator final.

Quadro 4: Dados dos eventos analisados

Início (UTC)	Fim (UTC)	Estação Central	Duração considerada (h)
12/02/2016 19:10	12/02/2016 20:50	E32	2
12/01/2017 20:50	12/01/2017 22:40	E23	2
08/03/2017 19:50	08/03/2017 20:50	E31	1
09/12/2017 01:20	09/12/2017 01:50	E21	0.5
30/12/2017 17:00	30/12/2017 17:30	E30	0.5
14/01/2020 18:30	14/01/2020 19:00	E14	0.5
19/01/2020 17:50	19/01/2020 19:00	E23	1
28/01/2020 23:00	29/01/2020 02:20	E42	3
18/01/2020 21:30	18/01/2020 23:40	E19	2
07/02/2021 11:30	07/02/2021 20:30	E41	8
07/12/2022 20:30	07/12/2022 22:50	E24	2
22/01/2023 21:00	22/01/2023 21:40	E14	1
12/03/2023 02:00	12/03/2023 03:40	E19	2
31/12/2023 20:00	31/12/2023 21:10	E22	1
23/01/2024 22:50	24/01/2024 00:20	E30	1
26/10/2024 22:40	26/10/2024 23:50	E30	1

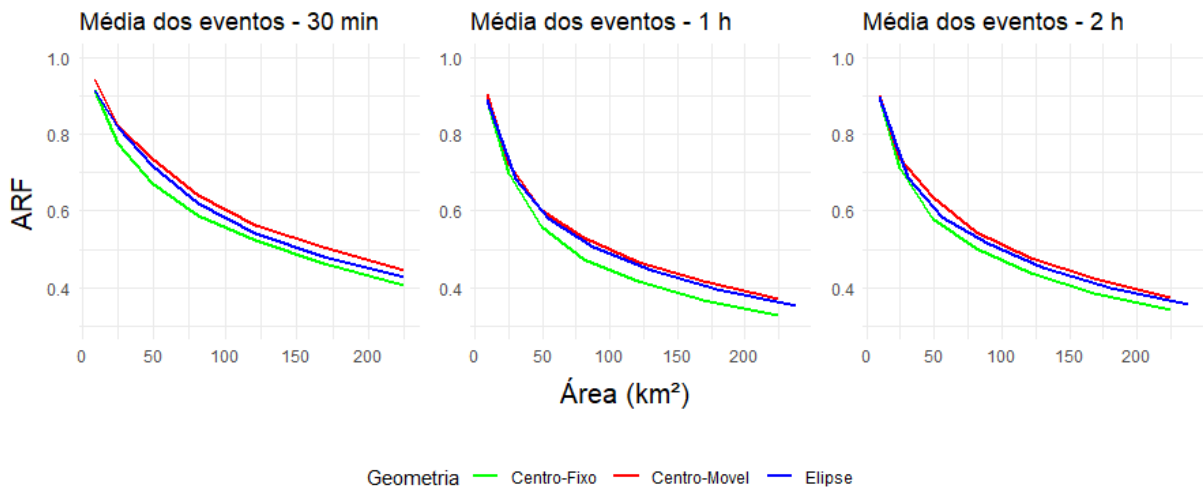
Fonte: Autoria própria

Observa-se que a maior parte dos eventos identificados foram de curta duração (30 min a 2h). Por essa razão, infere-se que eles seriam oriundos majoritariamente de células convectivas. Uma análise das condições sinóticas seria requerida para uma afirmação inequívoca, contudo admite-se crível essa indução, em especial, ao se considerar os resultados discutidos no subitem anterior.

5.2.2 Comparação entre fatores obtidos para diferentes geometrias de referência

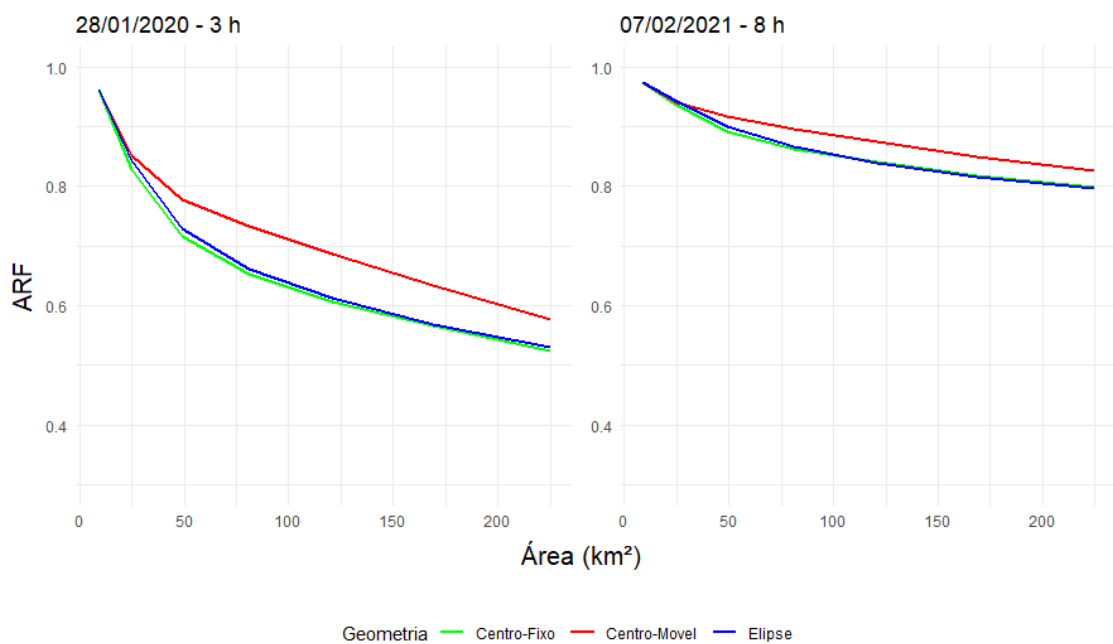
As Figura (23) e (24) mostram a comparação entre os ARFs obtidos para as áreas de referência diferentes considerando os valores médio para as durações de 30 min, 1 h e 2 h, além dos obtidos para os eventos de 28/01/2020 e 07/02/2021. Os resultados tabelados do centro de evento podem ser vistos no Apêndice B.

Figura 23: ARFs de centro de evento para 30 min, 1 h e 2 h.



Fonte: Autoria própria

Figura 24: ARFs dos eventos singulares de 3 h e 8 h



Fonte: Autoria própria

O centro-fixo, no geral, demonstrou estimativas de ARFs inferiores aos obtidos pela elipse e o centro-móvel. Esse resultado era esperado, visto que as duas geometrias de referência alternativas buscavam maximizar a altura precipitada total circunscritas por elas. De fato, os estudos de Kim *et al.* (2019) e Biondi, Greco e De Luca (2021) obtiveram resultados similares e, inclusive, propuseram o centro-móvel com o objetivo de obter estimativas mais conservadoras, no caso do último estudo citado.

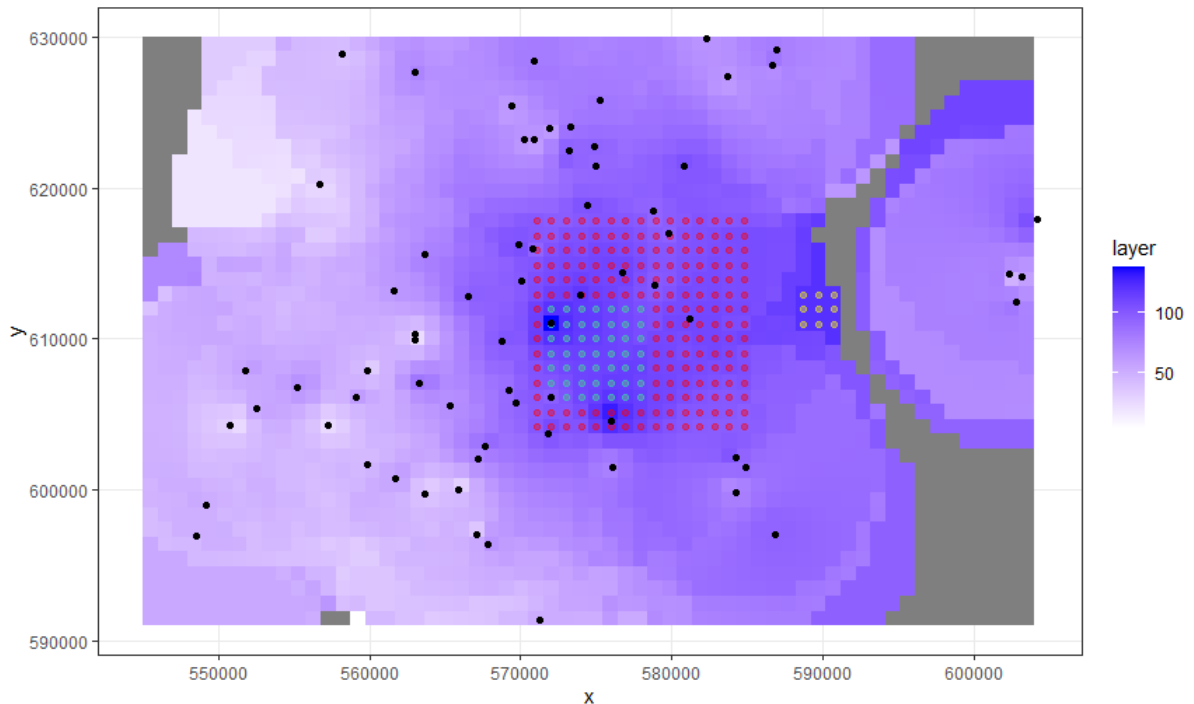
É válido aludir à magnitude das diferenças observadas no presente estudo e em publicações recentes. Para as diferenças observadas nos artigos de referência, Kim *et al.* (2019, p. 424) reportaram até 20% de diferença em média entre as áreas circulares e elípticas; Biondi, Greco e De Luca (2021, p. 7) de até 29% para o centro-móvel e o quadrado fixo para 1 h/950 km². Para este estudo, foram observados uma diferença máxima de 10,13% entre elipse e centro-fixa (1 h, 169 km²). e 11,56% (1 h, 225 km²) entre o centro-móvel e centro-fixa. Possivelmente, a explicação seria pelo fato de que as extensões das áreas analisadas neste estudo não revelariam as maiores diferenças observadas. Outra possibilidade seria a amostragem dos eventos, como discutido adiante.

A diferença entre as duas geometrias analisadas, todavia, é notavelmente inferior aos descritos nessas publicações, sendo que a diferença máxima de apenas 4.63% (área igual a 169 km² e duração de 30 min). Para os eventos singulares (3 h e 8 h), contudo, não foram observadas grandes diferenças entre o centro-fixa e elipses, mas por se tratar de eventos únicos, não há como atribuir essas diferenças às geometrias analisadas.

Por fim, é necessário mencionar alguns aspectos relacionados a implementação dos dois métodos sugeridos, especialmente o centro-móvel. Apesar de sua implementação computacional ser relativamente simples e o tempo de computação similar ao centro-fixa, o seu emprego requer uma delimitação estrita do domínio espacial da análise, a fim de evitar a interpretação de artefatos de interpolação (como *bull's eye*) como valores reais de campo de chuva.

O domínio original tinha estações de locais como Brumadinho ou Sabará, mas devido a distância entre as estações destes locais e o resto da rede, observou-se tais artefatos, os quais o centro-móvel usou para análise dos eventos, como pode ser mostrado na Figura (25):

Figura 25: Área de referência do centro-móvel (9 km²) sendo atraída por efeito de borda da interpolação

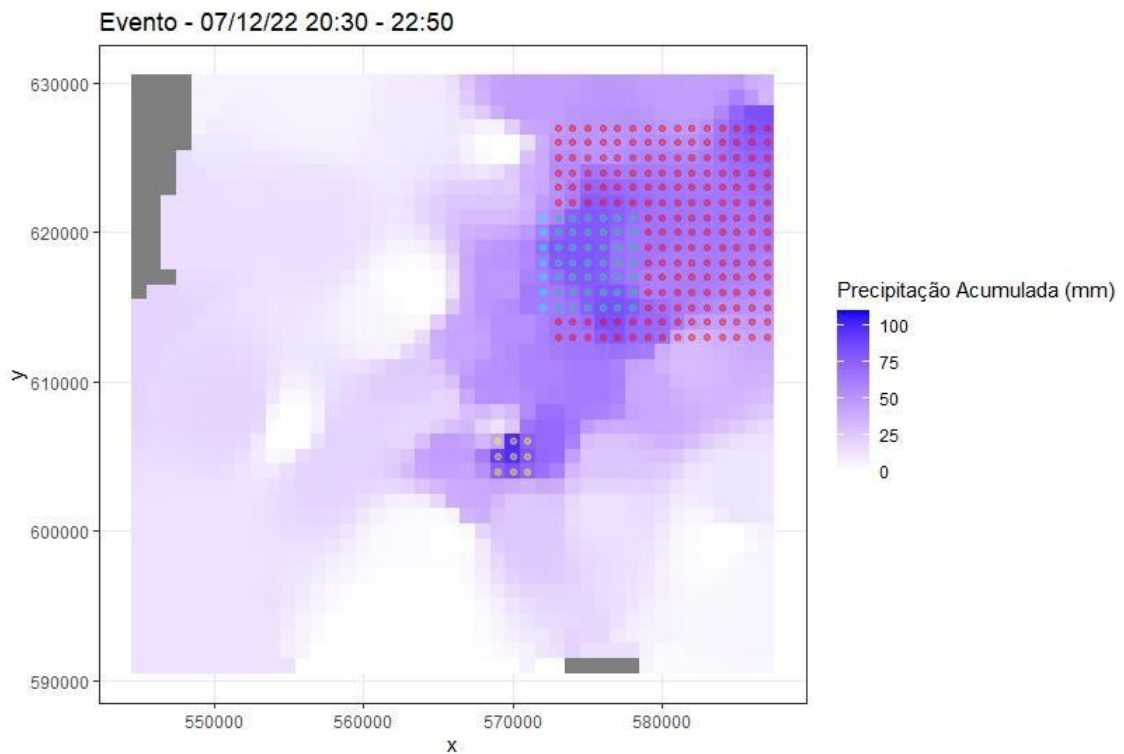


Fonte: Autoria própria

Biondi, De Greco e Luca (2021, p. 6) mencionam que as áreas nas regiões costeiras de seu estudo também apresentavam tais artefatos e, para o cálculo do ARF nesses locais consideraram a estimativa pontual de uma estação como sendo válida para todos os quadrados na região definida por n quadrados na vizinhança. Além disso, os autores mencionam que os ARFs de centro-fixos poderiam apresentar erros no caso de estações localizadas à borda da rede devido aos erros de estimativas para precipitação média por área ocasionados por efeitos de borda, mas não chegam a citar nenhum empecilho em relação ao uso do centro móvel.

Independentemente, o que poderia ser o maior problema para essa geometria é o próprio conceito do centro-móvel. Considerando que o preceito central é assumir que o máximo por área e o máximo pontual podem ocorrer em locais distintos, há o risco de que o método poderia combinar a análise de dois eventos espacialmente distintos, porém temporalmente concomitantes. A Figura (26) mostra um exemplo do centro-móvel se deslocando do centro da tormenta original.

Figura 26: Deslocamento das áreas de 49 km² (verde) e 225 km² (vermelho) do centro original (área amarela de 9 km²)



Fonte: Autoria própria

Por ser de um domínio relativamente pequeno, ainda pode se tratar da mesma formação meteorológica, mas considerando a região analisada no estudo conduzido por Biondi, Di Greco e Luca (2021), de 15.000 km² de extensão, o risco de analisar dois eventos diferentes poderia ser maior.

A definição de um “centro” de tempestade pode ser uma tarefa que, possivelmente, não seja possível de realizar para certos tipos de eventos. Ao impor a condição de sua existência e que o cálculo da precipitação por área deve ser baseado no local onde ele ocorreu, há o risco de que o método não capturaria corretamente a distribuição espacial de certos eventos que não apresentam uma estrutura tão bem definida, como formações frontais que apresentam alta uniformidade espacial; células convectivas que movem rapidamente sobre a bacia; tempestades tropicais com múltiplos centros etc. O centro-móvel pode ser útil para lidar com os tipos de eventos citados, mas seria necessário estabelecer outros parâmetros (como uma distância máxima entre áreas de análise) para manter uma análise espacial coerente. Outra possibilidade para tentar definir áreas de referências menos condicionadas a tal artefato poderia ser o método de agregação dos píxeis de maior intensidade, como

proposto por Wright, Smith e Baeck (2014). Mesmo que ele necessite de ainda definir o ponto com maior intensidade, ele ainda buscaria outros pontos com alta altura precipitada próximos ao local, o que poderia resultar numa melhor representação de tais campos uniformes e com múltiplos centros.

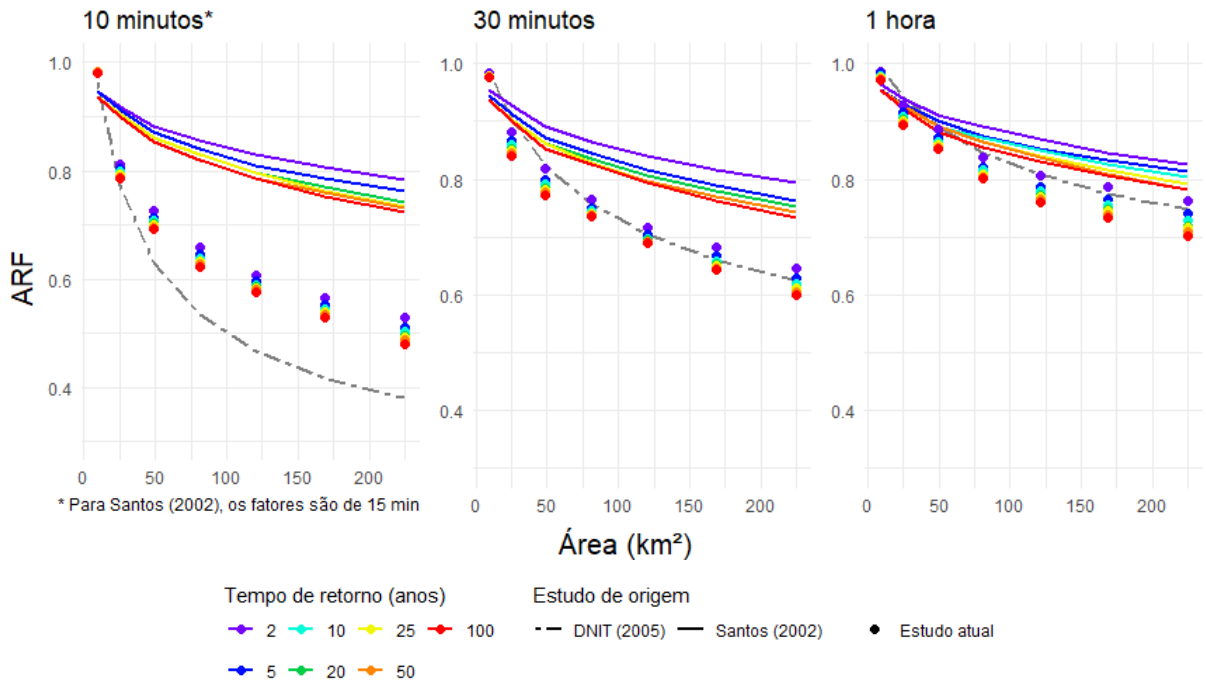
Em relação à elipse, o maior empecilho apresentado em seu emprego foi o tempo de processamento. Para cada evento analisado foram necessários cerca de 2 a 3 minutos para o cálculo. Para um estudo de escala similar ao presente, isto não representa um problema e reprocessar/reproduzir os resultados é trivial. Todavia, para estudos em maiores escalas, analisando um número consideravelmente maior de eventos e calculando relações para áreas maiores, tal fato já poderia ser mais problemático. Para o estudo de Olivera *et al.* (2008, p. 441) foram analisadas 18.531 tempestades; Thorndahl, Nielsen e Rasmussen (2019, p. 6), 534 tempestades; Kim *et al.* (2019, p. 418), 1.519 centros de tempestade; Wright, Smith e Baeck (2014, p. 771), 200 tempestades (50 para cada duração analisada). Para alternativas para otimização do código, Kim *et al.* (2019, p. 418) citam a utilização da técnica de otimização por Enxame de Partículas para o cálculo dos parâmetros das elipses, mas podem existir outras alternativas de otimização que poderiam ser mais fáceis de implementar.

5.3 Comparação entre resultados

5.3.1 Comparações da área-fixa com estudo anterior e fatores usados pelo DNIT

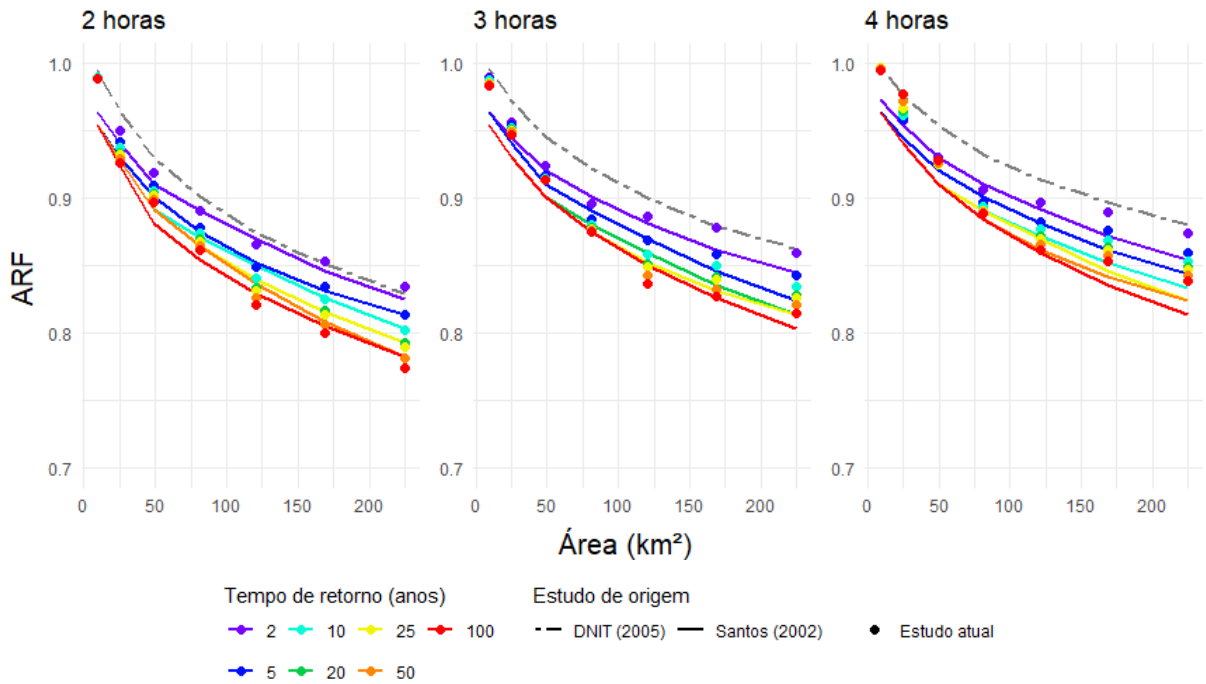
As Figuras (27) a (29) mostram uma comparação dos resultados obtidos no presente estudo com os fatores de mesmo de tempo de retorno de Santos (2002) e os fatores da Equação (13) do DNIT (2005) para as mesmas durações. Foi feita a comparação contra os valores de área-fixa pelo fato de que há a possibilidade de fazer a equivalência direta para todas as durações analisadas e os outros fatores também serem derivados de metodologias empregando análise de máximos anuais. Os valores estabelecidos pelos dois trabalhos podem ser vistos no Anexo I.

Figura 27: Comparação dos fatores de área-fixa e outros estudos para 10 min, 30 min e 1 h.



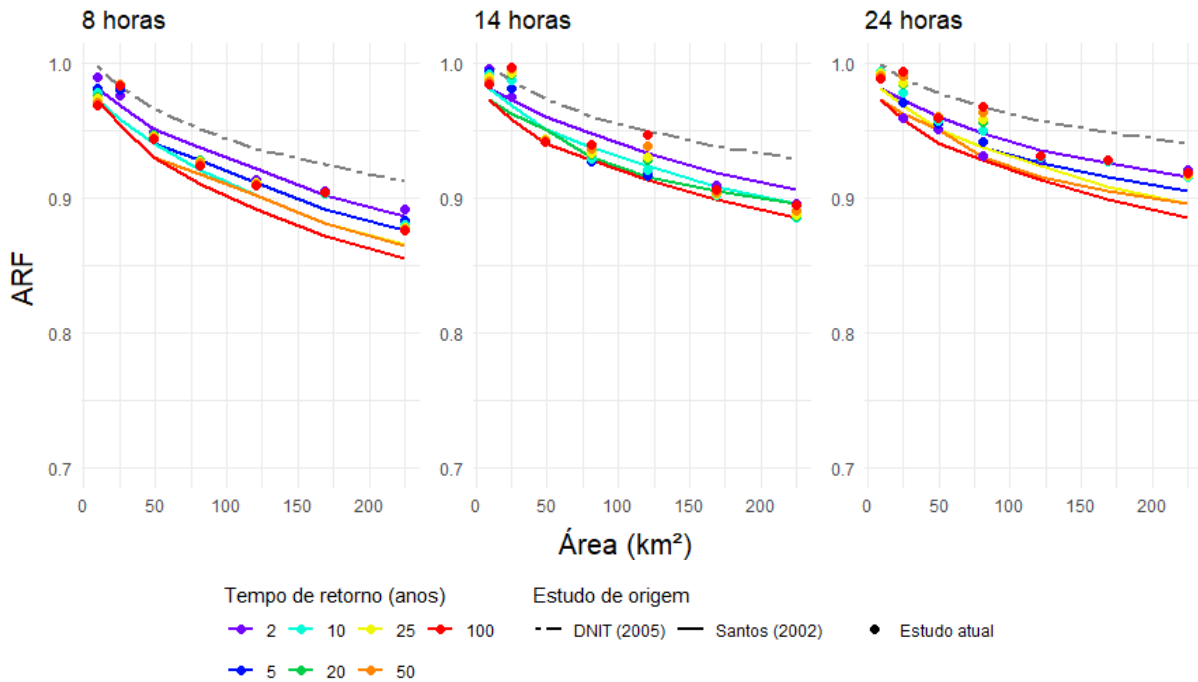
Fonte: Autoria própria

Figura 28: Comparação dos fatores de área-fixa e outros estudos para 2 h, 3 h e 4 h



Fonte: Autoria própria

Figura 29: Comparação dos fatores de área-fixa e outros estudos para 8 h, 14 h e 24 h.

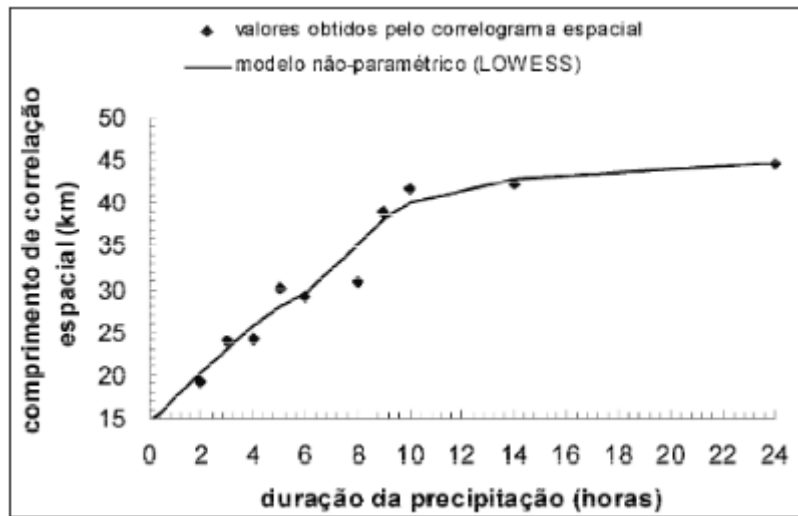


Fonte: Autoria própria

Para as durações intermediárias (2 h a 4 h), observa-se uma boa concordância entre os três fatores avaliados. Como descrito anteriormente, Santos (2002, p. 64) também já havia reportado a concordância entre os resultados (em específico, para tempo de retorno de 2 anos) e os delimitados no TP-29. Contudo, há ainda algumas diferenças notáveis entre os ARFs analisados - em específico, para as durações subhorárias e horária, além das longas durações (superior a 8 h).

Primeiramente, para as durações de 30 min e 1 h, observa-se que os fatores descritos por Santos (2002) se demonstraram significativamente maiores que os encontrados por este estudo e os delimitados pelo DNIT (2005). Considerando que outras durações apresentavam boa correspondência com os do TP-29, possivelmente seria um viés acarretado por uma extrapolação de cálculo. No artigo publicado posteriormente, Santos e Naghettini (2003, p. 197) destacam que foi necessário realizar uma extrapolação gráfica para obter o comprimento de correlação espacial para tais durações, visto que seriam necessárias mais estações na região e que essas fossem mais próximas entre si para obter as relações nessas faixas de duração. A extrapolação pode ser vista na Figura (30).

Figura 30: Gráfico entre os comprimentos de correlação espacial obtidos e a duração



Fonte: Santos; Naghettinni, (2003)

Observa-se que não há pontos anteriores a duração de 2 horas, sendo necessário utilizar a reta do modelo não-paramétrico calculado para inferir os valores da variável para aqueles pontos.

Além disso, há o fato de que a rede utilizada para o estudo ser significativamente mais esparsa - aproximadamente uma estação pluviográfica a cada 650 km² - que a apresentada pelo atual (uma estação a cada 12 km²). Apesar das metodologias analíticas permitirem a construção do fator com um número muito menor de estações (visto que elas utilizam apenas medidas pontuais para computação), o uso de tal rede poderia ainda ter introduzido um viés para as estimativas do fator, visto que a caracterização fenômenos de curta duração e baixa abrangência espacial com a rede utilizada não seria possível. Por causa destes dois fatos, os valores de ARFs para tais durações poderiam ter apresentado um viés significativo em comparação a fatores utilizando uma rede com maior densidade de instrumentos.

Em segundo, para a duração de 10 min, nota-se uma grande discordância entre todos os três fatores analisados. Além das explicações já citadas para as diferenças entre Santos (2002) e o presente estudo, os fatores da expressão do DNIT (2005) também seriam extrapolações das relações estabelecidas pelo TP-29, visto que o estudo original só conduziu a análise para as durações de 30 min, 1 h, 3 h, 6 h e 24 h. Somando ao fato de que ainda se trata de fatores transpostos de uma região

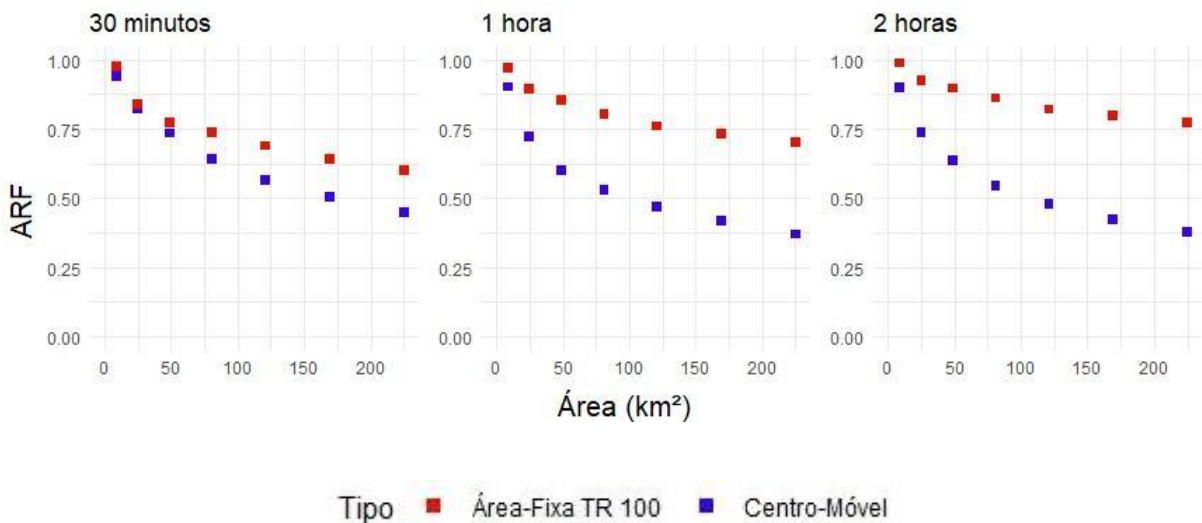
hidrometeorológica expressivamente distinta, as grandes diferenças para os valores estipulados pelo DNIT (2005) nesse intervalo não são uma surpresa.

Por fim, para as longas durações, observa-se que o DNIT (2005) ainda demonstrou fatores mais conservadores, em geral, que as apresentadas pelos estudos locais. Apesar das anomalias notadas em relação a/ao invariância/aumento com tempo de retorno, os dois fatores locais são inferiores aos apresentados pelo DNIT (2005). Isso reforça a conjectura de que essas diferenças decorrem de gênese e evoluções distintas dos eventos analisados.

5.3.2 Inter comparação entre métodos analisados

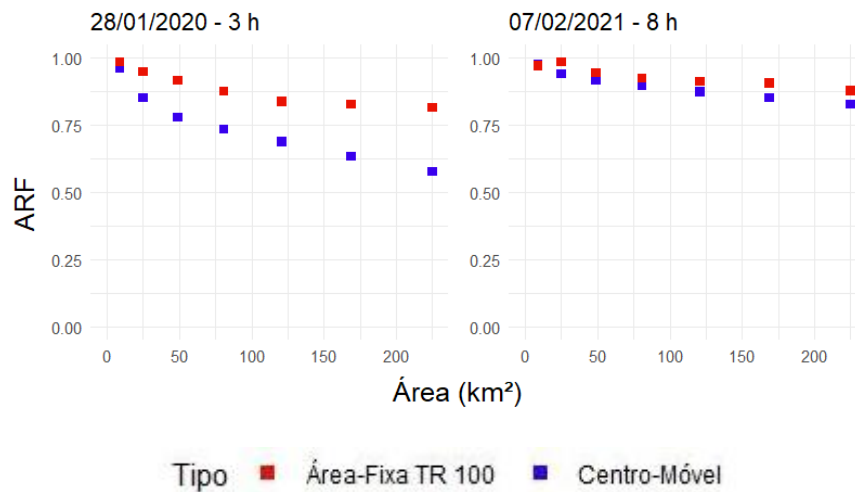
A Figura (31) e (32) mostram uma comparação entre os fatores de centro de evento obtidos pelo centro-móvel e os fatores de área-fixa para tempo de retorno de 100 anos.

Figura 31: Comparação entre os fatores de área-fixa e centro de evento de tempestade para 30 min, 1 h e 2 h



Fonte: Autoria própria

Figura 32: Comparação entre os fatores de área-fixa e centro de evento de tempestade para os dois eventos singulares de 28/01/2020 e 07/02/2021



Fonte: Autoria própria

Ainda considerando o caso mais conservador para o centro de evento e o menos conservador para área-fixa, há uma diferença significativa entre os fatores computados pelos dois métodos empíricos, com os fatores de área-fixa sendo quase duas vezes superiores as suas contrapartidas por centro de evento para 1 h e 2 h, apesar de haver uma diferença menor para os fatores de 30 min, 3 h e 8 h. Tal discordância entre fatores está coerente com o reportado por toda a literatura a respeito do uso dos dois métodos (Kang *et al.*, 2019; Sivapalan; Blöschl, 1998, p. 151; Svensson; Jones, 2010, p. 7)

Contudo, ainda é necessário fazer a avaliação do fator para uma gama maior de eventos a fim de quantificar a real diferença entre os fatores de área-fixa e centro de evento correspondentes. Visto que só foram amostrados 14 eventos para durações menores que 2 h, ainda há grandes incertezas sobre o comportamento médio de eventos extremos da região. Estudos anteriores de centro de evento analisaram de 10 (Wright; Smith; Baeck, 2014) a 1000 (Olivera *et al.*, 2008) vezes mais eventos que o presente estudo, sendo que foi analisado apenas um evento singular para as durações de 3 h e 8 h. Mesmo com tais limitações notadas sobre os resultados do centro de evento, os fatores produzidos ainda foram úteis por indicarem a necessidade de reavaliação de resultados anteriores com metodologias geograficamente centradas.

Como discutido extensivamente nas seções anteriores, os ARFs de centro de evento estão ligados ao tipo de tempestade e podem ser relacionados diretamente a elas. Dado as durações das tempestades analisadas, poder-se-ia dizer que os fatores desenvolvidos seriam indicativos do comportamento de fenômenos convectivos na região, sendo que futuramente há a possibilidade de construir fatores para outros tipos de formações para a região ou país, semelhante ao estudo de Biondi, Greco e De Luca (2021) ou Wright, Smith e Baeck (2014).

Contudo, essa separação por tipo de tempestade ainda é algo restrito a estudos acadêmicos, sendo que a modelagem da distribuição espacial da intensidade em chuvas de projetos normalmente não associa o tipo de origem da tormenta às suas estimativas (salvo algumas exceções como PMPs utilizando o modelo de célula convectiva). Além disso, esta relação da natureza do evento está indiretamente inclusa no ARF por meio das suas durações, como indicado na discussão sobre os fenômenos predominantes para longa duração. Apesar disso, sua discussão ainda é importante para o melhor entendimento do comportamento do ARF e poder explicar comportamentos como os valores conservadores de ARFs de área-fixa.

Para os fatores de área-fixa, devido ao comportamento anômalo dos resultados para durações superiores a 8 h, o possível viés introduzido pela MEVD para os quantis de 50 e 100 anos e os resultados de centro de evento mostrando uma possível distorção dos fatores computados, o uso dos ARF produzidos por esse método devem ser feitos com cautela. Dado esse contexto, tais fatores poderiam ser utilizados como resultados substitutos aos produzidos pelo estudo original de Santos (2002), considerando que os ARFs do estudo anterior foram construídos com uma base de dados com uma série histórica de tamanho similar, mas utilizando uma rede mais esparsa e que poderia ter distorcido as estimativas de ARF para as durações analisadas, especialmente as subhorárias.

Uma possível consideração a ser feita para estudos futuros seria observar as diferenças dos dois fatores em relação as durações analisadas. Dos resultados obtidos, observa-se que a diferença entre dois métodos diminui consideravelmente para os eventos de 3 h e 8 h. Nessa via, poder-se-ia entrar na discussão de adotar um método ao invés de outro dependendo da duração analisada (p. ex.: usar o centro

de evento para as durações de 1 h – 4 h e os de área-fixa para 8 h e superiores), mas, por questões de consistência entre resultados e a grande diferença metodológica entre os dois métodos, recomenda-se o uso dos ARFs produzidos por um dos métodos apenas.

Algo a ser notado é a questão de aplicabilidade dos fatores. Visto o contexto de drenagem urbana, projetos que envolvem pequenas áreas urbanas não fariam uso dos ARF devido ao curto tempo concentração de tais bacias e a área sendo muito pequena. Para questões de reservação, só os fatores de 14 h, 24 h e durações maiores seriam de maior interesse. Com isso, os fatores intermediários e para áreas menores acabariam sendo extrapolações de cálculos, só apresentando alguns usos para certos nichos. Contudo, ainda é necessário realizar este cálculo para todas as durações e áreas a fim de observar o seu comportamento e averiguar se os resultados produzidos estão de acordo com a literatura a seu respeito. Ainda assim, os fatores computados poderiam vir a ser utilizados. A exemplo, eles poderiam vir a uso para algumas obras de macrodrenagem, localizadas em bacias com tempos de concentração de 30 min a 1 h - como bueiros, como estabelecido pela Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem da PBH (2022).

Mesmo com todas estas observações feitas para o cálculo dos fatores de área-fixa, o centro de evento se mostrou significativamente mais restritivo em uso. Diferentemente do outro método empírico, o qual pôde realizar uma análise “contida” a Belo Horizonte, o centro de evento necessitou de uma rede de monitoramento muito maior (de 225 km² da área de referência máxima para 1.720 km² com os postos do CEMADEN) para a descrição integral dos eventos que ocorreram no local de estudo ou próximos a ele, sendo que não foi possível produzir resultados significativos. Em possíveis estudos futuros, poder-se-ia tomar outras alternativas para identificação de tormentas, como um “catálogo” de tempestades – similar a Wright, Smith e Baeck (2014) – ou usando tempos de retorno menores para demarcação de eventos severos, como Rodríguez *et al.* (2013, p. 4).

Deve-se trazer aqui que a cidade apresenta um radar meteorológico em suas proximidades, o qual está localizado em Mateus Leme e está sob o controle da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Foi considerado o uso do seu

produto, mas seus dados de chuva não estavam disponíveis no momento para uso no tempo em que o estudo foi conduzido. Outro produto de sensoriamento remoto cotado para análise foi o produto de satélite do GOES-16, mas como sua série histórica só se deu início em 2019, ela seria insuficiente para conduzir o estudo sobre ele.

Por fim, para a computação dos dois métodos, foi necessária uma rede extremamente densa de monitoramento para a avaliação do comportamento espacial da chuva. A rede da PBH ainda seria uma das poucas no Brasil em que é possível conduzir estudos similares, mas, mesmo com tais instrumentos em mãos, o estudo ainda foi parcialmente limitado, seja pela sua cobertura espacial ou o número de anos analisados. Há ainda alguns locais no país que apresentam as condições necessárias para o desenvolvimento de estudos similares e que não foram analisados até o presente momento (a cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, que possui um radar meteorológico (Verdan; Oscar Júnior, 2023)) mas eles representam a minoria dos núcleos urbanos no país.

O aprofundamento de estudos de ARF e outras abordagens de variação espacial da intensidade de chuvas de projeto dentro do Brasil necessita da expansão da rede de monitoramento pluviométrica nacional em núcleos urbanos. Como planejar essa expansão, contudo, extrapola os objetivos desse trabalho.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo se propôs a reanalisar as relações de ARF para o município de Belo Horizonte em luz de duas técnicas empíricas comumente utilizadas em estudos e aplicações na engenharia: a análise por área-fixa, consistindo na razão entre as estimativas de máximos por área e pontuais em um dado local; e o centro de evento de tempestade, em que a análise do decaimento da precipitação por área é feita para cada tempestade. Utilizou-se a rede hidrométrica da PBH para os cálculos dos fatores, composta por 36 postos pluviográficos e 8 anos hidrológicos. As chuvas pontuais foram espacializadas por meio da técnica IDW, a partir da estimativa “ótima” do expoente em cada intervalo de tempo avaliado.

Na análise por área-fixa, optou-se pelo uso de MEVDs para as distribuições dos máximos anuais, visto a curta série histórica presente e a impossibilidade de se trabalhar com métodos usuais de análise estatística - máximos por bloco e inferência de distribuições de valores extremos. Utilizou-se um método de separação de máximos anuais de dados horários proposto por Marra *et al.* (2018), em que a independência dos eventos é garantida através do cálculo do tempo mínimo cuja autocorrelação entre dois pontos seria mínima e equivalente a valores de ruído da série temporal.

Para os ARFs calculados por área-fixa, observou-se que os fatores para as precipitações de até 4 horas apresentaram o comportamento esperado do ARF neste método: inversamente proporcional à área e tempo de retorno e diretamente proporcional à duração. A partir de 8 horas, contudo, observou-se que o fator se tornou praticamente invariante (ou até aumentava para as áreas de 25 e 49 km²) em relação ao tempo de retorno. Está incerto se tal fato se deve ao método de separação de eventos utilizados (que acarretou um número menor de máximos anuais por ano), efeitos decorrentes das naturezas dos eventos prevalentes para tais durações ou se tal dependência com tempo de retorno se revelaria apenas com a análise para maiores áreas. Apesar das MEVDs terem sido essenciais para análise estatística com a série histórica disposta e o estudo ter as implementado com sucesso, um maior refinamento das técnicas utilizadas ainda seria necessário para permitir a construção de resultados ainda mais robustos.

Para o cálculo via centro de evento de tempestade foi empregado o uso da IDF elaborada por Pinheiro e Naghettini (1998) para a identificação de eventos severos com tempo de retorno maior que dez anos. Além do uso de geometrias regulares (quadrados) sobrepostas ao centro da tempestade para análise espacial do evento, também foram consideradas duas outras alternativas de geometrias de referências: formas elípticas sobrepostas ao centro da tormenta, utilizada originalmente por Olivera *et al.* (2008); e o centro-móvel, proposto por Biondi, Greco e De Luca (2021), tratando-se de uma área quadrada que pode varrer a cena para maximizar a altura precipitada contida nela.

Ao todo, foram analisados 16 eventos, a maioria com durações inferiores a duas horas. Os resultados de ARF gerados pelas duas outras alternativas de geometria foram maiores que os produzidos por centro-fixo, mas não mostraram diferenças da mesma magnitude como as mostradas nas publicações que as descreveram, possivelmente pelo fato de que a análise espacial foi realizada para áreas de até 225 km², diferentemente de tais estudos que chegaram a analisar até 5000 km². Entre os dois métodos, os seus resultados foram similares, mas se nota que o centro-móvel pode ser mais suscetível a erros de interpolação e, em domínios de estudo maiores, poderia combinar a análise espacial de dois eventos diferentes simultâneos. Apesar do estudo não ter descrito integralmente as diferenças entre as áreas de referência, a identificação de tal falha do centro-móvel ainda poderia ser útil para futuros estudos utilizando o método. Por ora, as elipses se mostraram as formas mais consistentes em capturar a variação espacial de eventos.

Os resultados produzidos foram comparados com fatores delimitados para uso no Brasil (Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem Urbana, do DNIT (2005)) e os anteriores da região (Santos, 2002) e entre si. Para as durações analisadas, os fatores de área-fixa calculados para as durações subhorárias se mostraram consideravelmente menores que os previamente calculados por Santos (2002), possivelmente pelo fato de que a autora teve de realizar uma extrapolação para obter os ARF para tais durações, além de ter utilizado uma rede consideravelmente mais esparsa que poderia ter contribuído ao viés de sobrestimação encontrado. Por isso e considerando que o presente estudo dispôs de uma rede com série histórica de tamanho semelhante ao estudo original de Santos (2002), mas com

uma rede com melhor monitoramento, as relações de ARF produzidas neste estudo poderiam vir a substituir as relações anteriores, enquanto não houver novos estudos na região com uma base maior de dados.

Contudo, destaca-se que a análise conduzida foi feita com base em uma série histórica de curta extensão temporal, logo ainda há incertezas consideráveis sobre os resultados gerados, mesmo com a aplicação de MEVDs. Estimativas robustas por área-fixa só serão possíveis com uma série histórica maior. Além disso, para regiões externas à área de estudo, salienta-se a necessidade de construir relações regionais sempre que possível. O uso de fatores transpostos, sem consideração das características hidrológicas e climáticas das regiões do estudo original e de interesse pode acarretar em grandes erros de projeto, como demonstrado por Girnius (2016).

Ao analisar os resultados produzidos por centro de evento de tempestade, observou-se que os seus fatores são significativamente menores que os resultados correspondentes de área-fixa. Tal fato poderia ser indicativo de que os ARFs de área-fixa não representam estruturas reais de chuva, sendo apenas relações estatísticas entre máximos por área e pontuais que acabam consideravelmente maiores. Todavia, devido ao pequeno número de eventos amostrados para análise, os fatores produzidos por centro de evento do estudo ainda não seriam robustos o suficiente para serem usados em prática.

Por causa destes dois fatos, recomenda-se revisitar este trabalho em luz de uma série histórica maior e com uma rede com maior cobertura espacial - possivelmente utilizando os próprios dados do CEMADEN. Isso não só permitiria averiguar a acurácia das estimativas de ARF de área-fixa por MEVDs, mas também introduziria mais eventos para o cômputo de ARFs por centro de evento e permitiria uma análise comparativa mais robusta entre os dois métodos, possivelmente levando a ARFs de centro de evento que poderiam vir a ser utilizados.

Esse estudo reforça a percepção de outros pesquisadores de que é necessário desenvolver estudos nacionais que permitam a caracterização espaçotemporal de eventos extremos, em especial, em núcleos urbanos com vistas ao desenvolvimento de projetos de engenharia hidráulica. As diferenças encontradas entre os fatores estabelecidos para uso e os locais do estudo anterior demonstram a importância de,

não só da necessidade do desenvolvimento de relações locais, mas também do impacto que a densidade de monitoramento pode apresentar no cômputo de tais relações. Além disso, a condução de estudos similares deve considerar os possíveis benefícios e vieses que técnicas diferentes de avaliação do comportamento espacial da chuva podem exercer no resultado final, como foi demonstrado ao longo deste estudo.

Estudos de ARF e ademais abordagens para distribuição espacial de chuvas de projeto são temas poucos explorados no país, e dado a vulnerabilidade da nação a eventos de precipitação extrema, eles seriam uma peça importantíssima para auxiliar em projetos de drenagem urbana, contenção e outras técnicas de mitigação de cheias. Os requisitos necessários de rede hidrométrica para conduzir tais análises ainda são altos, mas com o advento de produtos de sensoriamento remoto ao redor do país e a expansão destas redes de monitoramento, seria imperativo que mais estudos da área fossem conduzidos nos próximos anos

7 RECOMENDAÇÕES

Os pontos da lista abaixo descrevem algumas recomendações, decorrentes dos resultados alcançados e da experiência acumulada, para o desenvolvimento de estudos similares ao descrito:

- Obter relações para áreas maiores, observar o comportamento da curva do fator e obter mais eventos a serem estudados;
- Realizar uma análise considerando outras áreas de referência em diferentes locais da RMBH, observando se há alguma diferença significativa do fator para a diferentes locais na região;
- Para análise do fator por centro de evento de tempestade, utilizar produtos de sensoriamento remoto (preferencialmente radar), com o intuito de expandir o domínio de estudo analisado e melhorar descrição da variação espacial das tormentas analisadas;
- Também para estudos por centro de evento, investigar a influência que diferentes mecanismos geradores de chuva e outras possíveis variáveis externas (altitude, gradiente do terreno, tipo de ocupação do solo etc.) têm

sobre o fator. Contudo, seria necessário ferramentas além da rede presente para análise sinóptica dos eventos e caracterizar a natureza de sua formação corretamente;

- Avaliar possíveis modificações ao centro-móvel para impedir o comportamento de deslocamento do evento original;
- Implementar e avaliar o método de análise de precipitação por área sugerido por Wright, Smith e Baeck (2014), comparando com o seu desempenho contra as elipses e observando o seu comportamento para múltiplas tempestades;
- Possibilidade de explorar outras metodologias de cálculo de ARF não abordadas. Em específico, metodologias analíticas, como a estrutura de invariância temporal proposta por Mélése, Blanchet e Creutin. (2019) ou até mesmo desenvolver uma base teórica própria;
- Possível avaliação comparativa contra diferentes abordagens de análise estatística para os métodos de área-fixa - máximos anuais utilizando diferentes distribuições de valores extremos, picos sob limiar, outras adaptações da MEVD etc. - e utilizando uma rede hidrométrica com série histórica maior;
- Caso seja possível realizar um estudo sobre simulações estocásticas de campos de chuva na região, comparar o seu uso contra ARFs locais para modelagem de vazão em modelos chuva-vazão e eventos de cheia observados, similar ao trabalho de Girnius (2016).

REFERÊNCIAS

ASQUITH, W. H.; FAMIGLIETTI, J. S. Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. **Journal of Hydrology**, v. 230, n. 1–2, p. 55–69, abr. 2000.

BACCHI, Baldassare; RANZI, Roberto. On the derivation of the areal reduction factor of storms. **Atmospheric Research**, v. 42, n. 1–4, p. 123–135, out. 1996.

BARBALHO, Fernando Duarte; FORMIGA, Klebber Teodomiro Martins. Novo método para determinação do fator de redução de área aplicado em chuvas de projeto. **Ciência & Engenharia**, v. 22, n. 2, p. 83–93, 2013.

BELL, Frederick Charles. **THE AREAL REDUCTION FACTOR RAINFALL FREQUENCY ESTIMATION**. Wallingford, Inglaterra: Institute of Hydrology, dez. 1976.

BENNETT, Bree *et al.* Estimating Extreme Spatial Rainfall Intensities. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 3, p. 04015074, mar. 2016.

BENOIT, Lionel; ALLARD, Denis; MARIETHOZ, Gregoire. Stochastic Rainfall Modeling at Sub-kilometer Scale. **Water Resources Research**, v. 54, n. 6, p. 4108–4130, jun. 2018.

BIONDI, Daniela; GRECO, Aldo; DE LUCA, Davide Luciano. Fixed-area vs storm-centered areal reduction factors: a Mediterranean case study. **Journal of Hydrology**, v. 595, p. 125654, abr. 2021.

BREINL, Korbinian; MÜLLER-THOMY, Hannes; BLÖSCHL, Günter. Space–Time Characteristics of Areal Reduction Factors and Rainfall Processes. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 4, p. 671–689, abr. 2020.

CAPUTO, Úrsula Kelli; SIQUEIRA, Rejane. PRECIPITAÇÕES DE JANEIRO DE 2020 NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE – MG. *In*: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS. **Anais...** Porto Alegre, Rio Grande do Sul: out. 2020.

CARVALHO, Leila M. V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, jan. 2004.

CHEN, Feng-Wen; LIU, Chen-Wuing. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. **Paddy and Water Environment**, v. 10, n. 3, p. 209–222, set. 2012.

COLES, Stuart; PERICCHI, Luis Raúl; SISSON, Scott. A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. **Journal of Hydrology**, v. 273, n. 1–4, p. 35–50, mar. 2003.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Drenagem Urbana: Manual de Projeto**. 3. ed. São Paulo, Brasil, 1986.

COOK, Nicholas J.; HARRIS, R. Ian. Exact and general FT1 penultimate distributions of extreme wind speeds drawn from tail-equivalent Weibull parents. **Structural Safety**, v. 26, n. 4, p. 391–420, out. 2004.

COSTA, Veber *et al.* Assessing the unexpectedness of a very large observed rainfall event in the metropolitan region of Belo Horizonte, Brazil. **Natural Hazards**, v. 120, n. 4, p. 3979–3994, mar. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

DIRETORIA DE GEOCIÊNCIAS. **Acesso e Uso de Dados Geospaciais: Manuais Técnicos em Geociências**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

ESCRITÓRIO DE CLIMA DOS ESTADOS UNIDOS. **Rainfall Intensity-Frequency Regime: Part 1 - The Ohio Valley**, jun. 1957. Disponível em: <<https://www.weather.gov/media/owp/oh/hdsc/docs/TP29P1.pdf>>. Acesso em: 7 ago. 2024

ESCRITÓRIO DE CLIMA DOS ESTADOS UNIDOS. **Rainfall Intensity-Frequency Regime: Part 4 - Northeastern United States**, maio 1959. Disponível em: <<https://www.weather.gov/media/owp/oh/hdsc/docs/TP29P4.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2025

GIRNIUS, Lígia De Souza. **Análise comparativa do efeito da distribuição espaço-tempo em eventos pluviométricos intensos na formação de vazões em bacias urbanas**. Mestrado em Engenharia Hidráulica—São Paulo: Universidade de São Paulo, 25 ago. 2016.

HANSEN, E. M.; SCHREINER, L. C.; MILLER, J. F. **Application of Probable Maximum Precipitates Estimates - United States East of the 105th Meridian**: NOAA Hydrometeorological Report. Washington D.C, Estados Unidos: Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos da América, ago. 1982. Disponível em: <https://www.weather.gov/media/owp/hdsc_documents/PMP/HMR52.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

HAYES, Donaldc.; YOUNG, Richard L. **Comparision of Peak Discharge and Runoff Characteristic Estimates from the Rational Method to Field Observations for Small Basins in Central Virginia**: Scientific Investigations Report. [S.l.]: Departamento do Interior dos Estados Unidos, 2006. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5254/>>. Acesso em: 12 dez. 2025.

HOSKING, J. R. M. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, v. 52, n. 1, p. 105–124, 1 set. 1990.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R.; WOOD, E. F. Estimation of the Generalized Extreme- Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments. **Technometrics**, v. 27, n. 3, p. 251–261, ago. 1985.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022: População e domicílios - Primeiros resultados**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2023.

JORDAN, P. W. *et al.* Areal Reduction Factors for Estimation of Design Rainfall Intensities for New South Wales and the Australian Capital Territory. 2011.

KANG, Boosik *et al.* Comparative Study on Spatiotemporal Characteristics of Fixed-Area and Storm-Centered ARFs. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 10, p. 04019044, out. 2019.

KAO, Shih-Chieh *et al.* Variability of precipitation areal reduction factors in the conterminous United States. **Journal of Hydrology X**, v. 9, p. 100064, dez. 2020.

KIM, Jongho *et al.* The role of rainfall spatial variability in estimating areal reduction factors. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 416–426, jan. 2019.

LE, Phuong Dong *et al.* Dependence properties of spatial rainfall extremes and areal reduction factors. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 711–719, out. 2018.

LEBEL, Th.; LABORDE, J. P. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v. 2, n. 4, p. 245–261, dez. 1988.

LUTZ, Julia *et al.* Areal reduction factors from gridded data products. **Journal of Hydrology**, v. 635, p. 131177, maio 2024.

MARANI, Marco; IGNACCOLO, Massimiliano. A metastatistical approach to rainfall extremes. **Advances in Water Resources**, v. 79, p. 121–126, maio 2015.

MARRA, Francesco *et al.* Metastatistical Extreme Value analysis of hourly rainfall from short records: Estimation of high quantiles and impact of measurement errors. **Advances in Water Resources**, v. 117, p. 27–39, jul. 2018.

MARRA, Francesco; BORGA, Marco; MORIN, Efrat. A Unified Framework for Extreme Subdaily Precipitation Frequency Analyses Based on Ordinary Events. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 18, p. e2020GL090209, 28 set. 2020.

MARTINS, J. R. S.; GIRNIUS, L. S.; PINTO, M. G. M. **POINT TO AREA RAINFALL RELATIONSHIPS USING RADAR DATA**. 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF

FLOOD MANAGEMENT. **Anais...** . São Paulo, Brasil, set. 2014. Disponível em: <<https://eventos.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014809.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024

MEDEIROS, Oranda Borges. **Estudo da distribuição na área de chuvas intensas em bacias de médio porte**. Campinas, São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, set. 2002.

MÉLÈSE, Victor; BLANCHET, Juliette; CREUTIN, Jean-Dominique. A Regional Scale-Invariant Extreme Value Model of Rainfall Intensity-Duration-Area-Frequency Relationships. **Water Resources Research**, v. 55, n. 7, p. 5539–5558, jul. 2019.

MILOJEVIC, Tatjana; BLANCHET, Juliette; LEHNING, Michael. Determining return levels of extreme daily precipitation, reservoir inflow, and dry spells. **Frontiers in Water**, v. 5, p. 1141786, 24 jul. 2023.

MINEO, C. *et al.* The areal reduction factor: A new analytical expression for the Lazio Region in central Italy. **Journal of Hydrology**, v. 560, p. 471–479, maio 2018.

MINIUSSI, Arianna; MARANI, Marco; VILLARINI, Gabriele. Metastatistical Extreme Value Distribution applied to floods across the continental United States. **Advances in Water Resources**, v. 136, p. 103498, fev. 2020.

MUSHTAQ, Sumra *et al.* Reliable estimation of high floods: A method to select the most suitable ordinary distribution in the Metastatistical extreme value framework. **Advances in Water Resources**, v. 161, p. 104127, mar. 2022.

MYERS, Vance A.; ZEHR, Raymond M. **NOAA Technical Report NWS 24: A Methodology for Point-to-Area Rainfall Frequency Ratios**. National Weather Service, fev. 1980. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/7014/noaa_7014_DS1.pdf?>. Acesso em: 19 nov. 2025

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA. **Guide to hydrological practices**. 6° ed. Genebra, Suíça: Organização Mundial de Meteorologia, 2008.

OLIVERA, Francisco *et al.* Estimation of Average Rainfall Areal Reduction Factors in Texas Using NEXRAD Data. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 6, p. 438–448, jun. 2008.

OMOLAYO, A. S. On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation. **Journal of Hydrology**, v. 145, n. 1–2, p. 191–205, maio 1993.

OVEREEM, Aart *et al.* Extreme value modeling of areal rainfall from weather radar. **Water Resources Research**, v. 46, n. 9, 1 set. 2010.

PANTHOU, G. *et al.* Characterising the space–time structure of rainfall in the Sahel with a view to estimating IDAF curves. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 12, p. 5093–5107, 11 dez. 2014.

PAPALEXIOU, Simon Michael; KOUTSOYIANNIS, Demetris. Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. **Water Resources Research**, v. 49, n. 1, p. 187–201, jan. 2013.

PAVLOVIC, Sandra *et al.* Intercomparison of selected fixed-area areal reduction factor methods. **Journal of Hydrology**, v. 537, p. 419–430, jun. 2016.

PELEG, Nadav *et al.* Partitioning the impacts of spatial and climatological rainfall variability in urban drainage modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 3, p. 1559–1572, 14 mar. 2017.

PIETERSEN, Jacobus P. J.; GERICKE, Ockert J.; SMITHERS, Jeffrey C. Derivation of long duration geographically-centred areal reduction factors for catchment design rainfall estimation in South Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 50, p. 101542, dez. 2023.

PINHEIRO, Márcia Maria Guimarães; NAGHETTINI, Mauro. Análise Regional de Frequência e Distribuição Temporal das Tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 73–88, 1998.

PLESSIS, J. A. du; LOOTS, Wynand. Re-evaluation of area reduction factors and their impact on floods in South Africa. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 11, p. 1–16, 1 jun. 2019.

POWELL, David N. et al. Dimensionless Rainfall Patterns for South Carolina. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 1, p. 130–133, jan. 2007.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS DE DRENAGEM - CAPÍTULO 5: MACRODRENAGEM, TRATAMENTO DE FUNDO DE VALE E MITIGAÇÃO DE INUNDAÇÕES**. , abr. 2022. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/Cap%C3%ADtulo4_Microdrenagem%20e%20Controles%20Regionais_0.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2026

RODRÍGUEZ, Raul *et al.* Rainfall spatial organization and areal reduction factors in the metropolitan area of Barcelona (Spain). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 114, n. 1–2, p. 1–8, out. 2013.

RODRIGUEZ-ITURBE, Ignacio; MEJÍA, José M. On the transformation of point rainfall to areal rainfall. **Water Resources Research**, v. 10, n. 4, p. 729–735, ago. 1974.

ROSIN, Talia; MARRA, Francesco; MORIN, Efrat. Exploring patterns in precipitation intensity–duration–area–frequency relationships using weather radar data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 28, n. 15, p. 3549–3566, 6 ago. 2024.

SANTOS, Elaine Cristina Xavier. **ESTUDO DE VARIABILIDADE ESPACIAL DO CAMPO DE CHUVA E TRANSFORMAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PONTUAL EM PRECIPITAÇÃO MÉDIA ESPACIAL NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**. Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, jun. 2002.

SANTOS, Elaine; NAGHETTINI, Mauro. Agregação do Coeficiente de Abatimento Espacial à Relação Intensidade-Duração-Freqüência das Precipitações Sobre a

Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 189–199, 2003.

SCHELLANDER, Harald; LIEB, Alexander; HELL, Tobias. Error Structure of Metastatistical and Generalized Extreme Value Distributions for Modeling Extreme Rainfall in Austria. **Earth and Space Science**, v. 6, n. 9, p. 1616–1632, set. 2019.

SIDEK, Lariyah Mohd *et al.* **Derivation Of Areal Reduction Factor For Storm Design Application In Malaysia Using Grid Based Approaches**. . 37TH INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRO-ENVIRONMENT ENGINEERING AND RESEARCH WORLD CONGRESS. **Anais...** . Kuala Lumpur, Malásia, 14 ago. 2017.

SILVEIRA, André. Abatimento espacial da chuva em Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 5–13, 2001.

SIVAPALAN, Murugesu; BLÖSCHL, Günter. Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1–4, p. 150–167, jan. 1998.

SVENSSON, C.; JONES, D. A. Review of methods for deriving areal reduction factors. **Journal of Flood Risk Management**, v. 3, n. 3, p. 232–245, set. 2010.

THORND AHL, Søren; NIELSEN, Jesper; RASMUSSEN, Michael. Estimation of Storm-Centred Areal Reduction Factors from Radar Rainfall for Design in Urban Hydrology. **Water**, v. 11, n. 6, p. 1120, 29 maio 2019.

VERDAN, Ian; OSCAR JÚNIOR, Antonio Carlos Da Silva. Análise Episódica do Downburst do dia quatorze de fevereiro de 2018, no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 441–462, 6 mar. 2023.

VIDRIO-SAHAGÚN, Cuauhtémoc Tonatihu; HE, Jianxun; PIETRONIRO, Alain. Nonstationary hydrological frequency analysis using the Metastatistical extreme value distribution. **Advances in Water Resources**, v. 176, p. 104460, jun. 2023.

WILSON, P. S.; TOUMI, R. A fundamental probability distribution for heavy rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 14, p. 2005GL022465, 28 jul. 2005.

WRIGHT, Daniel B.; SMITH, James A.; BAECK, Mary Lynn. Critical Examination of Area Reduction Factors. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, p. 769–776, abr. 2014.

ZHAO, Wenpeng *et al.* Spatiotemporal Variability of Current and Future Sub-Daily Rainfall in Japan Using State-Of-The-Art High-Quality Data Sets. **Water Resources Research**, v. 59, n. 4, p. e2022WR034305, abr. 2023.

ZORZETTO, E.; BOTTER, G.; MARANI, M. On the emergence of rainfall extremes from ordinary events. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 15, p. 8076–8082, 16 ago. 2016.

APÊNDICE A – Fatores de área-fixa

Tabela A. 1: Valores de ARF por área-fixa para 10 minutos

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.984	0.983	0.983	0.982	0.982	0.982	0.981
25	0.811	0.803	0.798	0.794	0.793	0.789	0.786
49	0.725	0.714	0.708	0.702	0.701	0.696	0.692
81	0.658	0.645	0.639	0.633	0.632	0.627	0.623
121	0.607	0.596	0.590	0.585	0.584	0.580	0.576
169	0.565	0.552	0.545	0.540	0.539	0.534	0.530
225	0.528	0.512	0.503	0.496	0.493	0.487	0.481

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 2: Valores de ARF por área-fixa para 30 minutos

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.983	0.980	0.979	0.978	0.978	0.977	0.977
25	0.881	0.867	0.859	0.853	0.851	0.846	0.841
49	0.818	0.800	0.791	0.784	0.782	0.777	0.772
81	0.764	0.750	0.745	0.741	0.740	0.738	0.737
121	0.717	0.704	0.698	0.694	0.693	0.691	0.689
169	0.683	0.667	0.659	0.653	0.652	0.647	0.643
225	0.647	0.629	0.620	0.613	0.611	0.605	0.599

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 3: Valores de ARF por área-fixa para 1 hora

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.987	0.927	0.886	0.838	0.807	0.786	0.763
25	0.983	0.915	0.872	0.822	0.788	0.765	0.740
49	0.980	0.908	0.865	0.815	0.780	0.755	0.728
81	0.977	0.903	0.861	0.810	0.773	0.747	0.719
121	0.976	0.901	0.859	0.808	0.771	0.745	0.716
169	0.973	0.897	0.856	0.805	0.766	0.739	0.708
225	0.971	0.893	0.853	0.802	0.761	0.734	0.701

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 4: Valores de ARF por área-fixa para 2 horas

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.990	0.990	0.990	0.989	0.989	0.989	0.989
25	0.950	0.942	0.938	0.934	0.933	0.929	0.926
49	0.919	0.910	0.906	0.903	0.902	0.899	0.897
81	0.891	0.879	0.874	0.870	0.868	0.865	0.862
121	0.866	0.849	0.841	0.834	0.832	0.826	0.821
169	0.854	0.835	0.825	0.817	0.814	0.807	0.800
225	0.835	0.814	0.802	0.793	0.790	0.782	0.774

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 5: Valores de ARF por área-fixa para 3 horas

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.990	0.989	0.988	0.986	0.986	0.985	0.984
25	0.957	0.954	0.952	0.951	0.950	0.949	0.947
49	0.924	0.917	0.915	0.914	0.914	0.914	0.914
81	0.896	0.885	0.881	0.878	0.877	0.876	0.875
121	0.887	0.869	0.859	0.851	0.849	0.843	0.837
169	0.878	0.859	0.850	0.842	0.840	0.833	0.827
225	0.860	0.843	0.835	0.828	0.826	0.821	0.815

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 6: Valores de ARF por área-fixa para 4 horas

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.996	0.958	0.931	0.907	0.897	0.890	0.874
25	0.997	0.959	0.926	0.897	0.883	0.876	0.860
49	0.997	0.962	0.925	0.894	0.877	0.869	0.854
81	0.997	0.965	0.925	0.891	0.872	0.864	0.849
121	0.997	0.967	0.925	0.891	0.870	0.862	0.847
169	0.996	0.972	0.926	0.890	0.866	0.858	0.843
225	0.995	0.977	0.928	0.889	0.862	0.853	0.839

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 7: Valores de ARF por área-fixa para 8 horas

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.990	0.982	0.978	0.975	0.974	0.971	0.969
25	0.976	0.981	0.984	0.985	0.985	0.985	0.984
49	0.949	0.947	0.947	0.947	0.946	0.945	0.944
81	0.928	0.928	0.928	0.928	0.927	0.926	0.924
121	0.914	0.912	0.912	0.912	0.912	0.911	0.910
169	0.906	0.903	0.903	0.904	0.904	0.904	0.905
225	0.892	0.884	0.881	0.879	0.878	0.877	0.876

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 8: Valores de ARF por área-fixa para 14 horas

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.996	0.994	0.992	0.990	0.990	0.987	0.985
25	0.975	0.982	0.988	0.992	0.993	0.996	0.997
49	0.944	0.943	0.943	0.944	0.944	0.943	0.942
81	0.928	0.927	0.930	0.933	0.934	0.937	0.940
121	0.919	0.917	0.921	0.928	0.931	0.939	0.947
169	0.910	0.903	0.902	0.903	0.903	0.905	0.907
225	0.896	0.887	0.886	0.887	0.888	0.891	0.895

Fonte: Autoria própria

Tabela A. 9: Valores de ARF por área-fixa para 24 horas

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
9	0.994	0.994	0.994	0.993	0.993	0.991	0.989
25	0.960	0.971	0.978	0.985	0.986	0.991	0.994
49	0.951	0.956	0.958	0.960	0.960	0.961	0.960
81	0.932	0.942	0.950	0.957	0.959	0.964	0.968
121	0.928	0.929	0.931	0.932	0.932	0.932	0.932
169	0.928	0.927	0.927	0.928	0.928	0.928	0.928
225	0.921	0.916	0.916	0.917	0.917	0.918	0.919

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – Fatores do centro de evento de tempestade

Tabela B. 1: Média do ARF para os eventos de 30 minutos

Área (km ²)	Geometria de referência		
	Centro-fixo	Elipse	Centro-móvel
9	0.913	0.914	0.941
25	0.774	0.820	0.821
49	0.671	0.717	0.735
81	0.589	0.619	0.642
121	0.523	0.542	0.564
169	0.462	0.481	0.504
225	0.405	0.427	0.447

Fonte: Autoria própria

Tabela B. 2: Média do ARF para os eventos de 1 hora

Área (km ²)	Geometria de referência		
	Centro-fixo	Elipse	Centro-móvel
9	0.888	0.889	0.903
25	0.699	0.733	0.723
49	0.559	0.605	0.601
81	0.473	0.521	0.530
121	0.415	0.460	0.468
169	0.366	0.408	0.417
225	0.328	0.363	0.370

Fonte: Autoria própria

Tabela B. 3: Média dos ARF para os eventos de 2 horas

Área (km ²)	Geometria de referência		
	Centro-fixo	Elipse	Centro-móvel
9	0.896	0.896	0.900
25	0.712	0.743	0.738
49	0.581	0.612	0.637
81	0.503	0.531	0.546
121	0.437	0.465	0.478
169	0.384	0.410	0.424
225	0.342	0.365	0.376

Fonte: Autoria própria

Tabela B. 4: ARF para o evento de 28/01/2020, de 3 horas de duração

Área (km ²)	Geometria de referência		
	Centro-fixa	Elipse	Centro-móvel
9	0.962	0.962	0.962
25	0.828	0.842	0.850
49	0.717	0.728	0.778
81	0.653	0.660	0.732
121	0.607	0.612	0.686
169	0.567	0.569	0.633
225	0.524	0.529	0.576

Fonte: Autoria própria

Tabela B. 5: ARF para o evento de 07/02/2021, de 8 horas de duração

Área (km ²)	Geometria de referência		
	Centro-fixa	Elipse	Centro-móvel
9	0.974	0.974	0.974
25	0.935	0.942	0.940
49	0.892	0.900	0.916
81	0.863	0.866	0.895
121	0.840	0.839	0.873
169	0.818	0.816	0.850
225	0.798	0.797	0.826

Fonte: Autoria própria

ANEXO A – Relações de ARFs estabelecidas pelo DNIT (2005) e Santos (2002)

Tabela A. 1: ARFs obtidos através da expressão disposta no Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem

Área (km ²)	Duração (min)								
	10	30	60	120	180	240	480	840	1440
9	0.963	0.986	0.992	0.995	0.996	0.997	0.998	0.998	0.999
25	0.774	0.903	0.943	0.965	0.972	0.976	0.983	0.987	0.989
49	0.631	0.823	0.891	0.931	0.946	0.954	0.967	0.974	0.978
81	0.534	0.757	0.846	0.901	0.922	0.933	0.951	0.961	0.968
121	0.467	0.704	0.808	0.874	0.900	0.914	0.937	0.950	0.958
169	0.418	0.661	0.775	0.851	0.880	0.897	0.925	0.939	0.949
225	0.380	0.625	0.747	0.830	0.863	0.881	0.913	0.930	0.941

Fonte: DNIT, 2005

Tabela A. 2: ARFs de Santos (2002) para 15 minutos e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
10	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
50	0.88	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85
100	0.84	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80	0.80
200	0.79	0.77	0.75	0.75	0.74	0.74	0.73
600	0.69	0.65	0.63	0.63	0.62	0.61	0.61

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 3: ARFs de Santos (2002) para 30 minutos e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.95	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
50	0.89	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85
100	0.85	0.83	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81
200	0.80	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.74
600	0.70	0.66	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 4: ARFs de Santos (2002) para 1 hora e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
50	0.91	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88
100	0.88	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.84
200	0.83	0.81	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79
600	0.74	0.72	0.70	0.69	0.69	0.68	0.68

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 5: ARFs de Santos (2002) para 2 horas e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
50	0.91	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88
100	0.88	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.84
200	0.83	0.82	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79
600	0.75	0.72	0.70	0.69	0.69	0.68	0.68

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 6: ARFs de Santos (2002) para 3 horas e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
50	0.92	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
100	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86
200	0.85	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81
600	0.77	0.74	0.73	0.72	0.72	0.71	0.70

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 7: ARFs de Santos (2002) para 4 horas e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
50	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
100	0.90	0.89	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87
200	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.83	0.82
600	0.78	0.76	0.75	0.74	0.74	0.73	0.73

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 8: Fatores de Santos (2002) para 8 horas e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
50	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93
100	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90
200	0.89	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86
600	0.84	0.82	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 9: ARFs de Santos (2002) para 14 horas e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97
50	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94
100	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92
200	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89
600	0.86	0.84	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82

Fonte: Santos, 2002

Tabela A. 10: ARFs de Santos (2002) para 24 horas e até 600 km²

Área (km ²)	Tempo de retorno (anos)						
	2	5	10	20	25	50	100
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97
50	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94
100	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92
200	0.92	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89
600	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83

Fonte: Santos, 2002